



UNIVERSIDAD NACIONAL
AVENIDA DE
MEXICO

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

PROGRAMA DE DOCTORADO EN INGENIERÍA

FACULTAD DE INGENIERÍA

COMPARACIÓN Y ESTUDIO DE ALGUNAS
ESTRUCTURAS SENSORAS CON BASE
EN FIBRAS ÓPTICAS

T E S I S

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

DOCTOR EN INGENIERÍA

ELÉCTRICA - TELECOMUNICACIONES

P R E S E N T A :

KATYA EUGENIA ROMO MEDRANO MORA

TUTOR:

DR. SERGEI KHOTIAINTSEV DUSKRIATCHENKO

2007





Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



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.

JURADO ASIGNADO:

Presidente: DR. GARCÍA VALENZUELA AUGUSTO

Secretario: DR. GUTIÉRREZ CASTREJÓN RAMÓN

1^{er.} Vocal: DR. KHOTIAINTSEV SERGEI

2^{do.} Vocal: DR. GARCÍA UGALDE FRANCISCO

3^{er.} Vocal: DR. MARYNYUK OLEKSANDR

1^{er.} Suplente: DR. ALVAREZ BADA JOSE RAMÓN

2^{do.} Suplente: DR. LANDEROS AYALA SALVADOR

Lugar o lugares donde se realizó la tesis:

MÉXICO, D.F.

TUTOR DE TESIS:

DR. SERGEI KHOTIAINTSEV

FIRMA

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN.....	1
Objetivo General.....	4
Objetivos Particulares.....	4
Metas.....	4
Metodología.....	5
RESUMEN.....	6
CAPÍTULO 1. Sensores refractométricos.....	7
1.1 Los fundamentos de operación de los sensores con base en fibras ópticas.....	7
1.1.1 Parámetros de la radiación óptica.....	9
1.2 Sensores refractométricos en fibras ópticas.....	11
1.3 Investigaciones realizadas hasta la fecha y estado actual de desarrollo de los sensores refractométricos puntuales en fibras ópticas.....	15
1.4 Conclusiones.....	19
CAPÍTULO 2. Desarrollo del modelo matemático de un sensor refractométrico puntual.....	21
2.1 Características de operación de un sensor refractométrico puntual.....	21
2.2 Criterios de calidad de un sensor refractométrico puntual.....	22
2.3 Consideraciones para el modelado de las fuentes de luz y haces luminosos, en un sensor refractométrico puntual.....	23
2.4 Consideraciones para el modelado de superficies de elemento transductor de un sensor refractométrico puntual.....	25
2.5 Consideraciones de los efectos de la polarización de la luz en un sensor refractométrico puntual.....	26
2.6 Descripción del modelo matemático de un sensor refractométrico puntual.....	29
2.6.1 Consideraciones generales.....	29
2.6.2 Descripción de la superficie de segundo orden como elemento de sensibilidad.....	32
2.6.3 Modelado del rayo inicial incidente en la superficie de segundo orden.....	37
2.6.3.1 Coordenadas de salida del rayo inicial R_i	37
2.6.3.2 Coordenadas de dirección del rayo inicial R_i	38
2.6.3.3 Coordenadas de intersección del rayo inicial R_i con la superficie de segundo orden.....	38
2.6.3.4 Coordenadas de un vector normal a la superficie.....	39
2.6.3.5 Ángulo de incidencia del rayo inicial R_i	40
2.6.3.6 Cálculo del rayo reflejado R_r	40
2.6.3.7 Cálculo de la potencia del rayo reflejado R_r	41
2.6.3.8 Cálculo del alcance del rayo reflejado R_r en la fibra óptica receptora.....	42
2.7 Conclusiones.....	43

CAPÍTULO 3. Descripción del algoritmo y del programa de cálculo de las características de un sensor refractométrico.....	44
3.1 Descripción del algoritmo a nivel de bloques.....	44
3.2 Implementación del Método de Monte Carlo.....	48
3.3 Secuencia de cálculos.....	49
3.4 Descripción del programa de cálculo.....	50
3.5 Validación del funcionamiento correcto del algoritmo y del programa de cálculo.....	52
3.6 Conclusiones.....	60
CAPÍTULO 4. Análisis de resultados del modelado numérico de las características de un sensor refractométrico.....	61
4.1 Metodología para la comparación de los sensores de con diferentes formas geométricas del elemento de detección.....	61
4.1.1 Metodología de comparación de las características para diferentes variantes de los sensores semiesféricos.....	61
4.1.2 Metodología para la comparación de las distintas formas geométricas.....	64
4.2. Análisis de las características de los sensores de forma elipsoidal.....	68
4.2.1 Sensores elipsoidales con variaciones en el tamaño del eje z para $ z >1$	68
4.2.2 Sensores elipsoidales con variaciones en el tamaño del eje z para $ z <1$	69
4.2.3 Sensores elipsoidales con variaciones en el tamaño del eje x para $ z <1$	70
4.2.4 Sensores elipsoidales con variaciones en el tamaño del eje x para $ z >1$	71
4.2.5 Sensores elipsoidales con variaciones en el tamaño en el eje x para $ z =1$	71
4.2.6 Comparación de las características de sensores refractométricos con diferentes formas elipsoidales del elemento de detección.....	73
4.2.6.1 Análisis de la linealidad, intervalo de entrada e intervalo de salida de los sensores elipsoidales.....	78
4.3 Análisis de las características de los sensores de forma paraboloidal.....	80
4.3.1 Características de los sensores paraboloidales base.....	80
4.3.2 Comparación de la transmisión relativa $T^*(n)$ de los paraboloides base.....	81
4.3.3 Variaciones del paraboloides base (21).....	82
4.3.4 Variaciones del paraboloides base (22).....	84
4.3.5 Variaciones del paraboloides base (23).....	85
4.3.6 Comparación de las características de sensores refractométricos con elementos de detección paraboloidales con distintos parámetros.....	86
4.3.6.1 Comparación de la transmisión relativa $T^*(n)$ para las variaciones del paraboloides (21).....	88
4.3.6.2 Comparación de la transmisión relativa $T^*(n)$ para las variaciones del paraboloides (22).....	93
4.3.6.3 Comparación de la transmisión relativa $T^*(n)$ para las variaciones del paraboloides (23).....	97
4.3.6.4 Análisis de la linealidad, intervalo de entrada, intervalo de salida de los sensores con elemento de detección paraboloidal.....	104
4.4 Comparación de la característica de transmisión de los elipsoides y paraboloides ante cambios en parámetros de las fibras ópticas del sensor.....	106
4.4.1 Cambios en el índice de refracción del material del elemento de detección del sensor.....	110

4.4.2 Cambios en la apertura numérica de las fibras ópticas.....	111
4.4.3 Cambios en el diámetro del núcleo de las fibras ópticas.....	112
4.4.4 Cambios en la posición de las fibras ópticas con respecto al eje z del elemento de detección.....	114
4.5 Conclusiones.....	116

CAPITULO 5. Los resultados del modelado numérico de las características de un sensor refractométrico con una capa dieléctrica externa.....	119
5.1 Técnicas de modelado de un sensor refractométrico con una capa dieléctrica externa.....	120
5.2 Evaluación del efecto de una capa dieléctrica externa en los sensores con superficies de segundo orden.....	122
5.2.1 Análisis de características de un sensor de forma semiesférica con una capa dieléctrica de contaminación.	122
5.2.1.1 Posición del sensor con la punta en vertical hacia abajo, elemento semiesférico.....	122
5.2.1.2 Posición del sensor con la punta en vertical hacia arriba, elemento semiesférico.....	128
5.2.1.3 Posición del sensor con la punta en horizontal lateral, elemento semiesférico.....	131
5.2.1.4 Cambios en la transmisión de un sensor semiesférico con una capa dieléctrica.....	133
5.2.2 Análisis de características de un sensor con forma elipsoidal con una capa dieléctrica de contaminación.....	135
5.2.2.1 Elipsoide eje mayor en x	135
5.2.2.1.1 Posición del sensor con la punta en vertical hacia abajo, elemento elipsoidal con eje mayor en x	135
5.2.2.1.2 Posición del sensor con la punta en vertical hacia arriba, elemento elipsoidal con eje mayor en x	141
5.2.2.1.3 Posición del sensor con la punta horizontal lateral, elemento elipsoidal, con eje mayor en x	144
5.2.2.1.4 Cambios en la transmisión de un sensor elipsoidal con el eje mayor en x , con una capa dieléctrica.....	149
5.2.2.2 Elipsoide eje mayor en z	151
5.2.2.2.1 Posición del sensor con la punta en vertical hacia abajo, elemento elipsoidal con eje mayor en z	151
5.2.2.2.2 Posición del sensor con la punta en vertical hacia arriba, elemento elipsoidal con eje mayor en z	155
5.2.2.2.3 Posición del sensor con la punta en horizontal lateral, elemento elipsoidal con eje mayor en z	158
5.2.2.2.4 Cambios en la transmisión de un sensor elipsoidal con el eje mayor en z , con una capa dieléctrica.....	162
5.2.3 Análisis de características de un sensor de forma paraboloidal.....	164
5.2.3.1 Posición del sensor con la punta en vertical hacia abajo, elemento paraboloidal.....	164

5.2.3.2 Posición del sensor con la punta en vertical hacia arriba, elemento paraboloidal.....	171
5.2.3.3 Posición del sensor con la punta en horizontal lateral, elemento paraboloidal.....	174
5.2.3.4 Cambios en la transmisión de un sensor paraboloidal con una capa dieléctrica.	181
5.3 Conclusiones.....	185
CONCLUSIONES GENERALES.....	188
TRABAJO FUTURO.....	191
ANEXO 1. Artículo: Optical-fibre sensor system for monitoring the performance of the gas-propellant centrifuge separator of a spacecraft.....	192
ANEXO 2. Artículo: Refractometric fiber-optical detectors of liquids: effect of residual liquid film.....	205
ANEXO 3. Artículo: An optical-fibre refractometric liquid-level sensor for liquid nitrogen.....	213
REFERENCIAS.....	226
Referencias Capítulo 1.....	226
Referencias Capítulo 2.....	228
Referencias Capítulo 3.....	229
Referencias Capítulo 4.....	229
Referencias Capítulo 5.....	230

INTRODUCCIÓN

Las telecomunicaciones hoy en día, se han convertido en un elemento clave para el desarrollo económico, político, social, educativo y cultural de un país. Uno de los puntos más críticos en materia de telecomunicaciones, es el medio de transmisión, el cual es un recurso esencial, ya sea el espectro electromagnético por el número finito de canales de frecuencias, o bien el cableado existente en una ciudad como la nuestra, para una red de telefonía, por el alto costo de la inversión que representa.

Dentro de los medios de transmisión, las fibras ópticas han logrado tener un tremendo impacto tanto en la ciencia como en la tecnología, debido a sus características especiales como el gran ancho de banda, inmunidad al ruido, bajo peso etc.

En general, existen numerosos elementos de línea de fibra óptica, así como elementos sensores, incluyendo de tipo refractométrico. Varios de estos elementos presentan un gran interés para su aplicación en diversos sistemas incluyendo los de telecomunicaciones.

En muchas ocasiones en cables de telecomunicaciones, o en sistemas de distribución de energía, existe el problema de ingreso de agua o de alguna sustancia en el interior de los cables, cuando por ejemplo se encuentra en un ducto subterráneo y se presenta una ruptura en el cable. Por lo cual es importante detectar la presencia de sustancias ajenas que podrían dañar los cables y la confiabilidad del sistema. Una solución atractiva es utilizar fibras ópticas como elemento sensor para detectar el índice de refracción del medio externo: el aire ó el agua.

En particular, el Departamento de Ingeniería en Telecomunicaciones de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México, trabaja exitosamente sobre los sensores refractométricos con base en fibras ópticas para diversas aplicaciones. Los resultados obtenidos hasta la fecha permiten esperar, que con ciertas modificaciones y mejoras, se puedan desarrollar algunas nuevas estructuras con base en fibras ópticas, con características adecuadas para su utilización como detectores de alguna sustancia en contacto con los cables de fibra óptica en sistemas de telecomunicaciones.

Las características más importantes de los elementos en cuestión son: a) una alta sensibilidad al índice de refracción del medio externo, y b) pérdidas muy pequeñas, es decir, mantener un alto coeficiente de transmisión.

Es necesario señalar que las estructuras simples no conducen a los mejores resultados; de lo cual se desprende la importancia de la optimización de las superficies y estructuras internas.

Tanto la tecnología del proceso de fabricación, como el tipo de fibra tienen una clara influencia en las limitaciones de la implementación, así que resulta conveniente determinar qué tipos de estructuras son realizables y presentan posibilidades de aplicación.

El problema antes enunciado no es trivial, en virtud de que implica el análisis teórico matemático de estructuras que típicamente no tienen un eje de simetría y por eso un análisis bidimensional y paraxial no concuerda con los requerimientos correspondientes.

En el tratamiento de la transmisión de radiación electromagnética a través de un sistema que tiene un eje de simetría, es común hacer uso de la aproximación paraxial bidimensional; sin embargo de esta manera en el presente caso no se pueden obtener los resultados adecuados.

En el mercado existen numerosos paquetes comerciales que hacen simulaciones, y que son utilizados para el diseño de instrumental óptico, que hacen uso fundamental del trazo de rayos, sin embargo estos programas están diseñados utilizando modelos con características muy específicas, que al emplearse en nuevas situaciones, generan errores numéricos. Es por ello que es deseable el desarrollar algoritmos y programas propios que permitan la implementación de nuevos modelos, en donde la función de transmisión esté en función del índice de refracción del medio externo y de las propiedades de la estructura. Todo esto se debe de realizar cuidando la convergencia del algoritmo de trazado de rayos, así como su optimización, para trabajar con el número de rayos suficientes para el análisis, pero que a su vez sea eficiente en términos de tamaño de memoria y tiempo de cómputo.

Por eso, con el fin de obtener nuevos conocimientos sobre las propiedades de nuevos elementos sensores, lo que constituye el objetivo principal de este trabajo, hay que elaborar nuevos métodos para el análisis matemático numérico de estructuras sensoras, además de verificar el modelo matemático, algoritmo y programa, a través de problemas modelo, cuya solución es bien conocida a través de métodos analíticos.

En esta tesis se pretende, primeramente, resolver algunos problemas particulares, cuya solución es indispensable para alcanzar el objetivo principal de la misma.

Como primer paso, hay que desarrollar modelos tridimensionales para el análisis de las características de transmisión de las estructuras sensoras complejas con base en fibras ópticas, en virtud de que en la actualidad no existen ni métodos, ni algoritmos, ni programas que permitan realizar directamente dicho análisis.

El segundo paso consiste en la obtención de nuevos conocimientos acerca de las propiedades de las estructuras sensoras, mediante simulaciones numéricas que hagan uso de los modelos matemáticos desarrollados.

Objetivo General

La obtención de nuevos conocimientos científicos y prácticos sobre las propiedades de algunos tipos de estructuras sensoras refractométricas en fibras ópticas. El transductor de los sensores estudiados puede tener forma semiesférica, elipsoidal o paraboloidal. El modelo tomará en cuenta la polarización de la luz, así como los efectos de tener una capa dieléctrica externa de contaminación sobre la superficie del transductor. En particular, para su aplicación en los detectores de diversas sustancias líquidas, para el diagnóstico de flujo de dos fases (líquido y gas).

Objetivos Particulares

- ❑ Seleccionar métodos numéricos para el análisis teórico de estructuras sensoras, que permitan obtener sus características de respuesta al índice de refracción del medio externo, para diversas formas de sensores, incluyendo estructuras con varias superficies de segundo orden.
- ❑ Desarrollar los algoritmos y programas especializados para implementar los métodos seleccionados en el análisis.
- ❑ Determinar las características de transmisión para algunos tipos particulares de estructuras sensoras: elipsoidal, paraboloidal, etc.
- ❑ Determinar los efectos de una capa dieléctrica externa en la superficie de la estructura sensora del mismo índice de refracción del elemento sensor.

Metas

- ❑ Desarrollar modelos matemáticos que representen estructuras sensoras refractométricas en miniatura, que permitan la obtención de las características de transmisión de una manera rápida y eficiente.
- ❑ Desarrollar los métodos de representación de la superficie de una estructura sensora para el análisis posterior de sus propiedades de respuesta ante variaciones del índice de refracción del medio externo.

- ❑ Desarrollar un algoritmo de trazado de rayos, que permita obtener las características de transmisión en forma rápida, precisa y eficiente, para diversos tipos de superficies.
- ❑ Analizar las propiedades de propagación en algunas estructuras sensoras con superficies de segundo orden: paraboloidal, elipsoidal, etc.
- ❑ Realizar un estudio comparativo de las propiedades de transmisión de las estructuras bajo investigación.
- ❑ Identificar el efecto de las capas residuales, de diferentes formas en las estructuras sensoras utilizadas en detectores de diversas sustancias líquidas y para el diagnóstico de flujo de dos fases (líquido y gas).

Metodología

La metodología incluye el uso de técnicas matemáticas para la solución de las ecuaciones de propagación de los rayos, para el modelado de las superficies, métodos de integración para encontrar la respuesta total del sensor, procesamiento estadístico de los datos y teoría de optimización.

En el desarrollo de la tesis, en primer término, se ubicarán las fuentes de información donde se describe el estado del arte en el área de refractometría y sensores refractométricos en fibras ópticas en particular.

En segundo término, se analizarán los aspectos fundamentales del problema objeto del estudio: las características de los sensores refractométricos, y el margen de características alcanzables en diferentes tipos de esta clase de sensores.

Como tercera fase se identificarán los problemas particulares a desarrollar relacionados a este trabajo de tesis.

Como cuarta fase, en base a la información recopilada y a los problemas identificados en la presente área, se desarrollará la investigación sobre el tema de la tesis.

Se analizarán y discutirán los resultados para la elaboración de las conclusiones y por último se destacarán los resultados obtenidos con este trabajo.

RESUMEN

En este trabajo se investigaron las propiedades de los sensores refractométricos basados en fibras ópticas. El enfoque de este trabajo fue sobre la respuesta del sensor al índice de refracción, en particular la transmisión relativa en función de la forma geométrica y los parámetros del transductor del sensor.

Se desarrolló el modelo matemático del sensor basado en óptica geométrica, este modelo fue implementado en un simulador, el cual incluye una interfaz gráfica para cambiar los distintos parámetros de las fibras ópticas, del sensor, y que además muestra el trazado de rayos en dos planos. Se realizaron las simulaciones con diversas variantes de transductores semiesféricos, elipsoidales y paraboloidales.

Se mostró que con las formas de los elementos de detección elipsoidales y paraboloidales existe una mayor facilidad, para la modificación de la respuesta (mayor linealidad, e intervalos de entrada y salida) del sensor al índice de refracción del medio externo, que en el caso de la forma semiesférica conocida anteriormente.

También, se mostró que es posible elegir las formas particulares de transductores para obtener una respuesta significativa en el caso de los medios externos que no podían haber sido alcanzados por los sensores basados en superficies semiesféricas (por tener un índice de refracción relativamente grande).

Además, se mostraron los efectos de la presencia de una capa de contaminación dieléctrica externa sobre la superficie del sensor, encontrando las geometrías y posiciones que tienen una menor sensibilidad ante la presencia de una capa de contaminación.

Los nuevos conocimientos sobre las propiedades de los sensores refractométricos basados en fibras ópticas obtenidos en este trabajo, explican y muestran como aprovechar la forma geométrica de la superficie de trabajo del sensor, las constantes de los materiales, y los demás parámetros del sensor para la adecuada selección de un sensor que propicie la obtención de una respuesta deseada del sensor al índice de refracción del medio externo, para satisfacer las necesidades particulares de los usuarios potenciales de estos sensores.

Capítulo 1. Sensores refractométricos

El avance en la tecnología de las fibras ópticas, propiciado por la industria de las telecomunicaciones (campo en el que se usan como medio de transmisión), así como la disminución en los costos de la electrónica óptica, ha permitido que se desarrolle la tecnología de sensores de fibras ópticas [1], dando como resultado el diseño y desarrollo de sensores de fibra óptica para una diversidad de aplicaciones científicas e industriales.

1.1 Los fundamentos de operación de los sensores con base en fibras ópticas.

Un sensor tiene la función de transformar los datos que caracterizan el mundo real (cantidades físicas primarias) en una forma adecuada, para que la información pueda ser utilizada, procesada y registrada por los sistemas de medición. Los sensores, por lo general, convierten cantidades de diferente naturaleza física en una señal eléctrica. En su forma genérica, un sensor cuenta con un transductor (elemento sensor) y una serie de convertidores, los cuales transforman la cantidad física de interés en una señal eléctrica de salida.

En los sensores de fibra óptica se utiliza la sensibilidad de las características de la radiación óptica, la cual se propaga por la fibra, ante diferentes factores físicos del medio ambiente, tales como: presión, temperatura, campo magnético, campo eléctrico, etc. para su medición.

Las características de la radiación óptica que sirven como fundamentos de operación de los sensores de fibras ópticas son:

1. Cambios en la intensidad de la luz.
2. Cambios de fase.
3. Cambios en los parámetros de difracción.
4. Cambios en la distribución modal.
5. Cambios en la frecuencia.

Los sensores más simples son aquellos que utilizan variaciones en la intensidad de la luz, son utilizados, por ejemplo para medir el desplazamiento de un objeto mediante el cambio en la intensidad de la luz que llega a un reflector, o en el caso más básico, para detectar la presencia o ausencia de un objeto cuando un fotodetector recibe la presencia constante de un flujo de luz emitida por una fuente, ya sea para contar elementos en una línea de producción, medir la velocidad de rotación a través de un disco perforado, etc.

Los sensores de fase son utilizados principalmente para registrar las variaciones de temperatura. Su funcionamiento radica en el calentamiento del sensor, que sufre un alargamiento, aumentando

de esta forma la trayectoria que sigue la luz, y en consecuencia cambia la fase de la luz que llega a un detector. Existe una fibra de referencia que provee la diferencia de fase para el comparador. Este proceso es sumamente complejo, debido a que involucra la medición de la fase de una onda senoidal a la frecuencia de la luz, por lo que la fuente luminosa debe tener una sola frecuencia y una fase constante [2]. También los sensores de fase son utilizados para medir presión, que de la misma forma, con el cambio de longitud de la fibra ante una variación de presión, ocurre un cambio de fase.

Las rejillas de difracción también se utilizan como sensores de desplazamiento. Dos rejillas se alinean para formar una rejilla equivalente y conforme una de las rejillas se desplaza, hay un cambio en el ángulo de difracción, que se recibe en el detector como un cambio en la intensidad. Otro tipo de sensores utilizan la variación del índice de refracción de un medio, como en el caso de un sensor detector de líquido que puede ser implementado a través de dos fibras ópticas conectadas a un prisma con un índice de refracción muy cercano al del líquido. Mientras el prisma esté sumergido en el líquido no habrá algún cambio en el índice de refracción al pasar de un medio a otro (y por lo tanto no habrá una desviación o reflexión de la luz), pero cuando el nivel del líquido disminuya la diferencia entre el índice de refracción del prisma y del aire ocasionará que ocurra una reflexión a la segunda fibra [3].

Las ventajas que presentan los sensores de fibra óptica con respecto a otro tipo de sensores, son:

- Menor tamaño
- Menor peso
- Bajo consumo de potencia
- Bajo costo
- Inmunidad a la interferencia electromagnética
- Operación exitosa bajo condiciones ambientales extremas
- Compatibilidad con las líneas de comunicación de fibras ópticas
- Facilidad de construir arreglos de los sensores y las redes de sensores.

Los sensores de fibra óptica utilizan algunos parámetros de la radiación óptica para detectar y medir las cantidades físicas. En las etapas posteriores del sensor, la señal óptica se transforma en eléctrica para su posterior procesamiento, almacenamiento ó presentación visual o gráfica en un

sistema de medición. Por eso podemos considerar que en todos los sensores la transformación de una cantidad física da como resultado una señal eléctrica de salida [4].

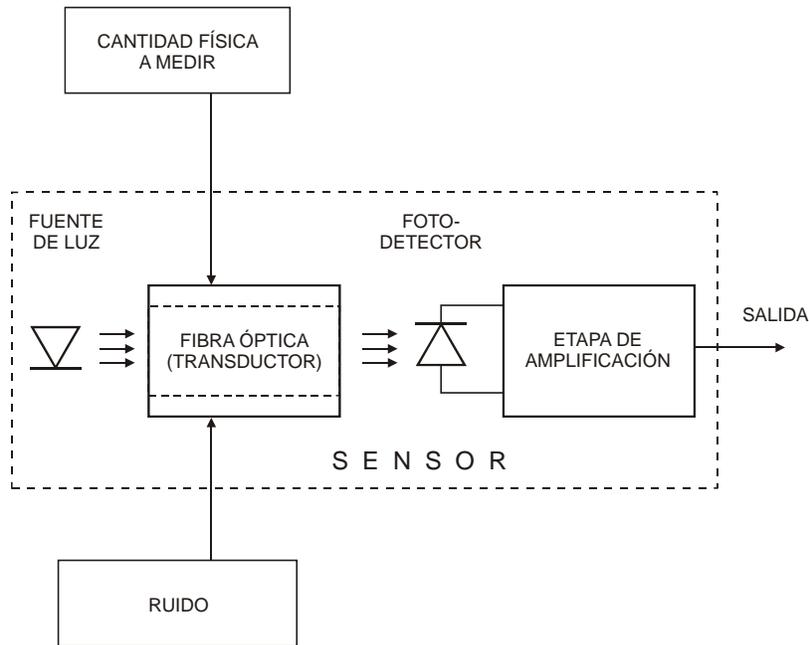


Figura 1.1 – Esquema general de un transductor de fibra óptica.

El funcionamiento de los sensores de fibra óptica se basa en la capacidad de los medios ópticos, para cambiar las características de la radiación que se propaga en ellos. Este cambio de las características se detecta después como una señal óptica la cual se transforma en eléctrica por el fotorreceptor y el subsiguiente sistema de procesamiento (figura 1.1).

1.1.1 Parámetros de la radiación óptica

Una onda armónica se puede expresar de manera general como

$$\mathbf{E}(\mathbf{r},t)=\mathbf{E}_0(\mathbf{r},t)e^{j[\omega t - g(\mathbf{r}) + \phi_0]}, \quad (1)$$

Ésta ecuación describe la componente eléctrica de un campo electromagnético arbitrario en un punto de observación \mathbf{r} del espacio en el momento de tiempo t , donde ω es la frecuencia angular temporal de la onda electromagnética, $g(\mathbf{r})$ es el retardo espacial de la fase, y ϕ_0 es la fase inicial. El argumento completo del exponente $[\omega t - g(\mathbf{r}) + \phi_0]$ es conocido como la fase instantánea de la onda¹.

¹ Se han denotado los vectores en negritas.

La polarización de la onda en el punto de observación \mathbf{r} , está determinada por la relación entre las proyecciones $E_{0x}(\mathbf{r},t)$ y $E_{0y}(\mathbf{r},t)$ del vector $\mathbf{E}(\mathbf{r},t)$.

Para el caso particular de una onda plana propagándose sobre el eje z (en el sistema de coordenadas), la variación de la intensidad del campo eléctrico en el tiempo y en el espacio está dada por la ecuación

$$E(x,y,z,t)=E_0e^{j[\omega t-\beta z+\phi_0]}, \quad (2)$$

$2\pi/\lambda = \beta$ es la constante de propagación, la cual es una función de la frecuencia y en ocasiones (para medios anisotrópicos) también es una función de las coordenadas espaciales, λ es la longitud de onda en el medio de propagación.

En las ecuaciones (1) y (2) se puede ver que el vector de intensidad del campo eléctrico $\mathbf{E}(\mathbf{r},t)$ depende de la amplitud E_0 , la fase instantánea y la polarización de la onda, así como de la dirección de propagación y la dispersión cromática del medio.

Algunas acciones físicas modifican algunos de los parámetros de la onda que se utilizan en los sensores de fibra óptica para medir las cantidades físicas primarias correspondientes. Dependiendo de cuál de los parámetros de la onda de luz se modifica por el cambio en la cantidad física primaria, los sensores de fibra óptica se dividen en sensores de amplitud (si E_0 es una función), fase (si β es una función), frecuencia (si ω es una función), y polarización (si $E_{0x}(\mathbf{r},t)$ y $E_{0y}(\mathbf{r},t)$ son funciones).

Todos los fotodetectores responden únicamente a la intensidad de la onda electromagnética, en un sensor óptico los cambios de fase, frecuencia ó polarización que ocurren en el transductor se deben convertir, en una etapa posterior del sensor, en un cambio de amplitud, para así poder detectarlos.

Para los sensores de fibra óptica, los primeros fenómenos físicos que encontraron aplicación fueron los mencionados anteriormente, que acompañan a la propagación de la radiación óptica en un medio sujeto a acciones externas físicas. Con estos fenómenos ya se habían creado los métodos de control de intensidad, fase y polarización de la radiación óptica, los cuales son ampliamente utilizados. Estos métodos se emplean en la práctica en la modulación de un rayo de luz, la desviación del rayo de luz, la modulación del factor de calidad de un láser, etc.

Los métodos de modulación de la luz utilizados en los dispositivos tradicionales se aplican también en los sensores de fibra óptica. Además, se han desarrollado nuevos métodos que utilizan las singularidades de las fibras ópticas para la conversión de acciones externas en un cambio de

un parámetro de la radiación que tiene su propagación en la fibra óptica. En estos nuevos métodos se han aplicado fenómenos físicos bien conocidos tales como la fotoelasticidad, la magnetostricción y la electrostricción, los efectos de Pockels, Kerr y Faraday, entre otros.

1. 2 Sensores refractométricos en fibras ópticas

La refractometría es un área de instrumentación óptica que se dedica a la medición del índice de refracción de diversos medios y materiales.

Al conocer el índice de refracción se puede acceder a un gran número de cantidades físicas tales como: La densidad, composición química, concentración, nivel de líquido, etc., como se puede apreciar en la figura 1.2.

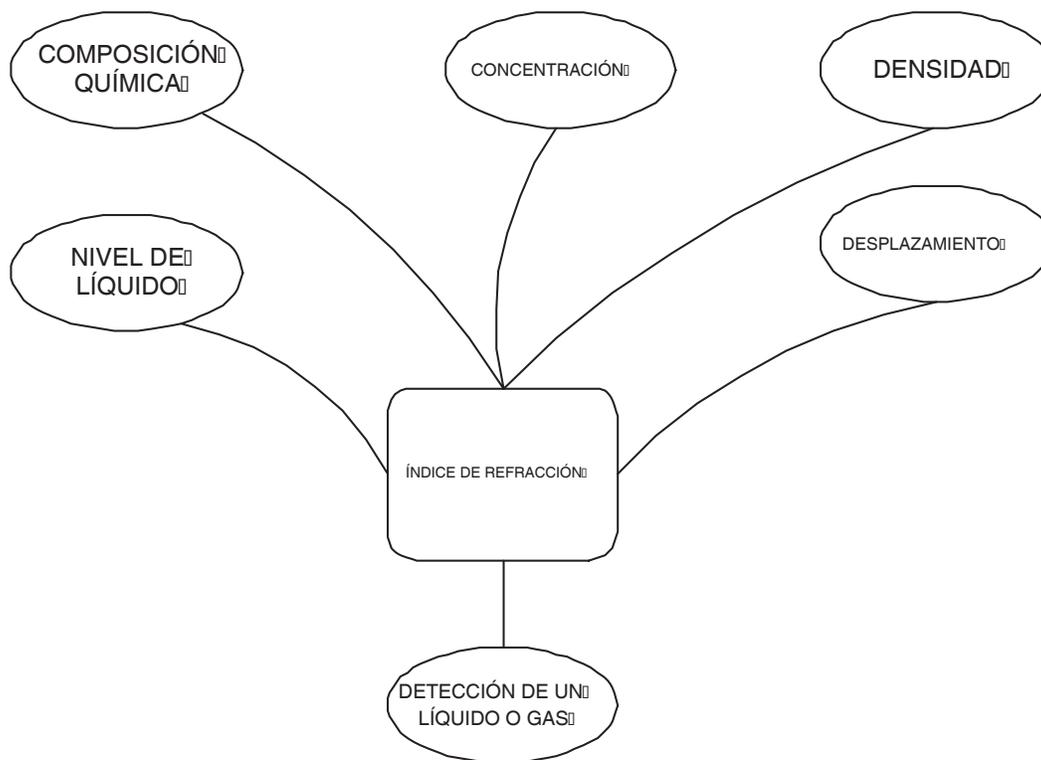


Figura 1.2 Los diferentes factores que pueden medirse utilizando el índice de refracción.

Por eso los métodos relacionados a la medición del índice de refracción poseen un lugar muy importante en el campo de la instrumentación.

La mayoría de los refractómetros comerciales para uso general utilizan la medición del ángulo crítico para lograr una mayor precisión. La exactitud típica corresponde a cuatro o cinco dígitos de precisión en el índice de refracción, pero con algunos instrumentos (refractómetros de tipo Pulfrich) se han logrado mediciones con hasta seis dígitos de precisión [5]. En esta clase de refractómetros, la luz es incidente a un prisma desde el lado de la muestra por lo que la luz viaja largas distancias a través de ella, lo cuál puede ser una limitación para ciertas aplicaciones. Los desarrollos posteriores [6] utilizan la luz reflejada en una configuración de reflexión interna para medir el ángulo crítico, a través de la medición del derivativo de la potencia reflejada con respecto al ángulo de incidencia, lo que abrió el camino para la creación de nuevos diseños e incluso se pudieron utilizar en un mayor número de sustancias (incluyendo las sustancias absorbentes). Aunque este tipo de diseños no pueden ser fácilmente utilizados como sensores para el monitoreo de los procesos físicos o químicos a través de la muestra, sí como técnicas para su utilización en laboratorios en donde son muy útiles para medir el índice de refracción del volumen de la muestra.

Para mejorar este tipo de refractómetros se ha desarrollado el método de la reflectometría dinámica [6], que es una técnica de modulación del ángulo, que puede medir el índice de refracción complejo, lo que permite una mayor exactitud en las mediciones.

Actualmente podemos encontrar en lo más reciente de la literatura [7] diseños basados en reflectometría dinámica con escaneo de ángulo que, además de proveer un alto nivel de resolución en líquidos incluso absorbentes o turbios, tienen un tamaño compacto y transportable ($15 \times 15 \text{cm}^2$), que permite su utilización fuera de los laboratorios.

Una línea de investigación y desarrollo relacionada a los sensores refractométricos es la de los sensores basados en la resonancia de superficies de plasmón, que también utilizan el efecto del campo evanescente y tienen diversas aplicaciones, principalmente en la caracterización de las sustancias bioquímicas. La resonancia de la superficie de plasmón es excitada en la interfase entre una capa de metal delgada y un medio dieléctrico, por medio del acoplamiento a través de un sustrato con alto índice de refracción. Estos sensores pueden ser utilizados también para la medición de los cambios del índice de refracción, según su configuración [8].

A pesar de que existen diversos tipos de refractómetros, los diseños que utilizan las fibras ópticas como un elemento esencial del refractómetro, han tenido un gran desarrollo para diversas

aplicaciones por las ventajas que ofrecen las fibras ópticas (en primer lugar por la posibilidad de fabricar los sensores miniatura y por la factibilidad de construir arreglos grandes de sensores).

La mayoría de los sensores refractométricos basados en fibras ópticas utilizan el campo evanescente para tener acceso al índice de refracción del medio externo. Bajo la acción del índice de refracción del medio externo, varían uno o más parámetros de la luz que se propagan en la fibra óptica. De esta manera, los sensores refractométricos determinan el índice de refracción del medio externo lo que nos permite tener acceso a una variedad de otras características físicas y químicas de este medio.

El presente trabajo está enfocado a los sensores refractométricos en fibras ópticas, en virtud de que estos ofrecen los diseños miniatura, por el tipo de aplicaciones en donde se van a utilizar: para la detección de ingreso de agua en los cables de telecomunicaciones ó de potencia, para la medición del nivel de un líquido utilizando arreglos lineales de transductores, para el monitoreo de flujos en los sistemas de propulsión a bordo de aviones o naves espaciales etc. En estas aplicaciones el tamaño y peso reducido de los equipos es de suma importancia.

En general hay sensores refractométricos con un elemento de sensibilidad distribuido (como por ejemplo una fibra óptica sin revestimiento), figura 1.3, y sensores puntuales (por ejemplo una fibra óptica con un prisma en su terminación), figura 1.4.

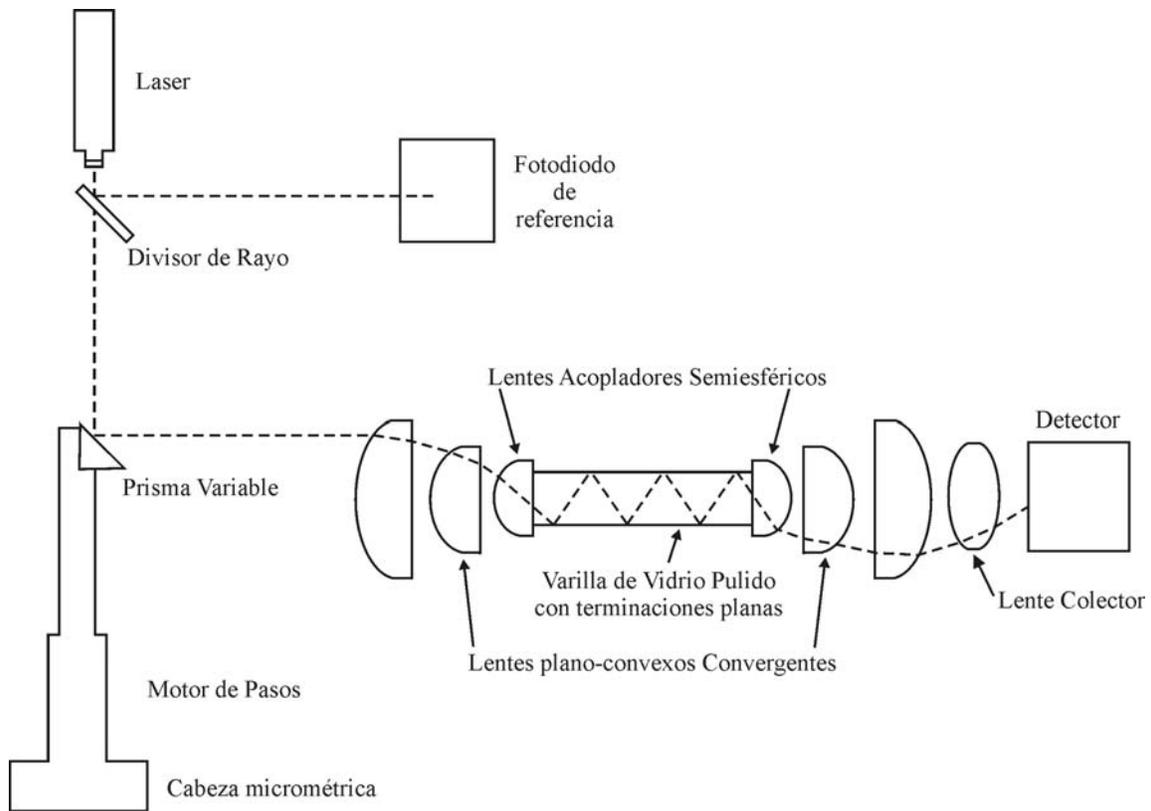


Figura 1.3 Diagrama de un refractómetro con un elemento de sensibilidad distribuido [17].

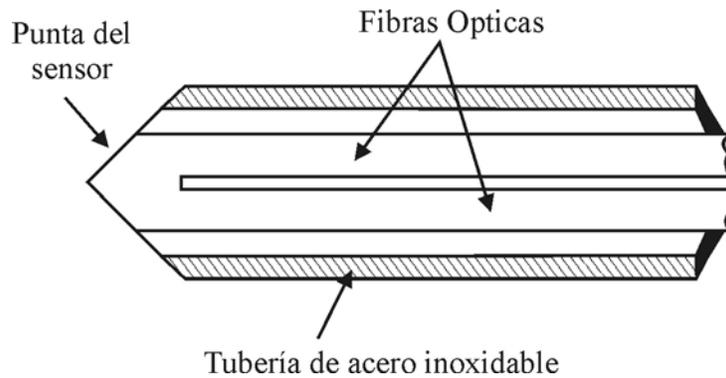


Figura 1.4 Sensor refractométrico con punta de prisma a base de dos fibras.

Los sensores refractométricos distribuidos han sido ampliamente investigados, por lo que la generación de nuevos conocimientos al respecto proporcionaría una menor aportación a la ciencia.

En virtud de lo anterior, en el presente trabajo la investigación se limita a los sensores puntuales ya que existen varias propuestas para mejorar sus características, así como el surgimiento de nuevas aplicaciones importantes e interesantes que demandan este tipo de sensores. Lamentablemente no se han realizado estudios sobre las características críticas para emplearlos en determinadas aplicaciones, ni se han realizado comparaciones de las propiedades de los elementos de sensibilidad.

1.3 Investigaciones realizadas hasta la fecha y estado actual de desarrollo de los sensores refractométricos puntuales en fibras ópticas.

El primer sensor de esta clase descrito en la literatura [9] es un sensor que podemos clasificar como sensor con elemento de sensibilidad de tipo prismático como el que se muestra en la figura 1.4.

Este sensor consta de dos fibras multimodales paralelas, cuyos extremos están unidos mediante la fundición del material y están cortados en forma de prisma. En este caso existe en el aire una reflexión total interna en las dos facetas del prisma, haciendo que la luz entre por la segunda fibra. En un líquido, la refracción total interna desaparece y la señal en la fibra receptora disminuye, por lo que sirve para detectar el medio en el que se encuentra la cabeza del sensor (prisma). Este es un diseño miniatura que aprovecha las dimensiones mínimas transversales de las fibras ópticas. La aplicación fue la detección de las burbujas de gas en el flujo de un líquido.

Aunque este primer sensor funciona bien como discriminador entre aire y líquido, tiene la desventaja de tener una baja precisión en la medición del índice de refracción, debido a que cuenta con un espectro de ángulos de incidencia de los rayos que se propagan en la fibra óptica sobre las caras del prisma, en lugar de tener un ángulo único de incidencia. Esto se diferencia de los refractómetros comerciales o experimentales existentes en los laboratorios, los cuales operan a través de la colimación de los rayos luminosos.

Por todos estos factores, los trabajos posteriores tuvieron como objetivo mejorar las características de los sensores refractométricos en fibras ópticas conservando las ventajas como el diseño miniatura, pero mejorando sus características refractométricas. Entonces se propusieron diseños como se muestra en la figura 1.5 con una fibra doblada en forma de U, y diseños como

los que aparecen en la figura 1.6 con superficies no planas: en forma de domos, elipsoides, paraboloides y finalmente semiesferas [10]-[15].

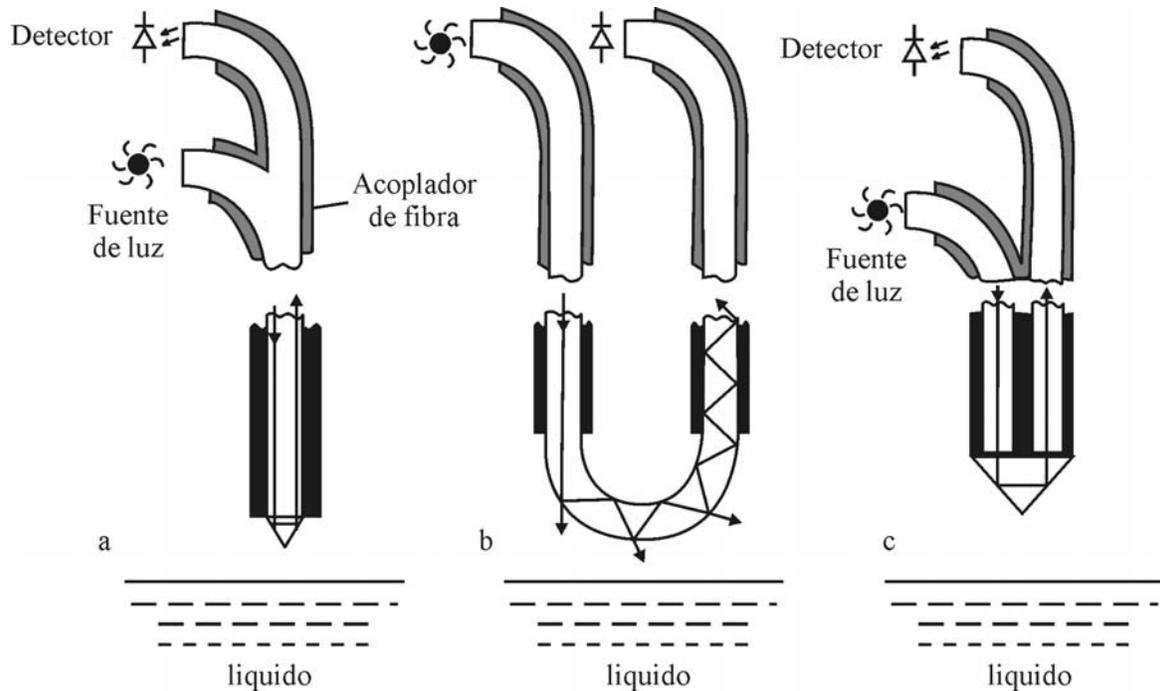


Figura 1.5 Detectores de nivel con: a) una fibra y terminación en triángulo, b) una fibra sin recubrimiento y doblada en forma de U, c) dos fibras acopladas a un prisma [9].

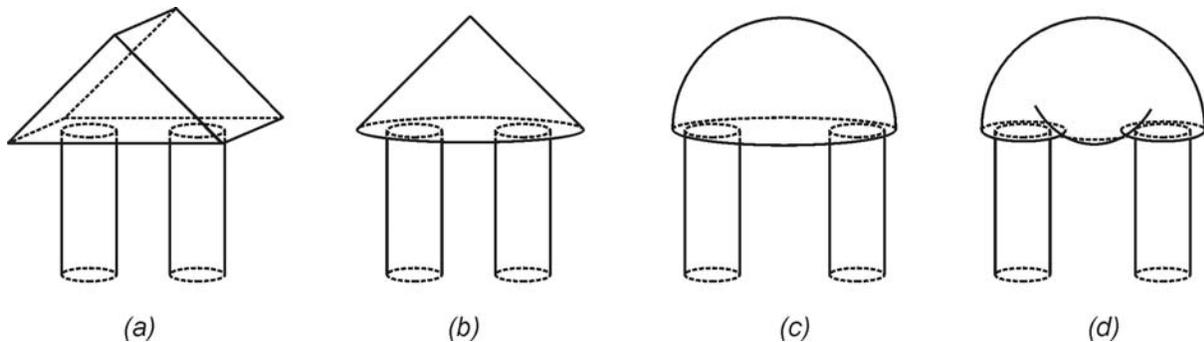


Figura 1.6 Algunos ejemplos de sensores refractométricos con superficies no planas: a) prisma, b) cono, c) semiesfera, d) superficie compleja [11].

En el caso de los sensores con cierta curvatura de su superficie de trabajo, aparece la posibilidad de reducir el intervalo de ángulos de incidencia y al mismo tiempo hacer un enfoque de la luz que sale de la fibra transmisora a la cara de la fibra receptora.

En los trabajos anteriores se demostró que se puede mejorar la precisión de los sensores al modificar en un cierto intervalo la forma de la característica de transmisión o respuesta del sensor (para obtener una característica escalonada o aproximadamente lineal), así como acomodar la característica en el intervalo de n deseado [13].

No obstante, en los trabajos citados, no fue encontrado el límite de las características que se pueden obtener con una determinada forma del sensor, y no se encontró un estudio confiable y profundo de las características de las formas elipsoidal y paraboloidal; tampoco se llevó a cabo un estudio comparativo entre diferentes formas de superficies de segundo orden: esférica, elipsoidal y paraboloidal. De igual forma, no se ha realizado un estudio de los efectos de la polarización de la luz sobre las características de los sensores mencionados. Sin embargo los sensores reportados en los trabajos citados encontraron aplicaciones útiles en medidores de nivel [15] entre otras.

Una de las principales aplicaciones de los sensores en cuestión es el diagnóstico de flujos de dos fases: gas y líquido, como el que aparece en la figura 1.7. En este caso, los procesos hidrodinámicos tienen un efecto grande sobre la respuesta óptica del sensor. La interacción de las burbujas de gas con el sensor depende del tamaño de las burbujas y la respuesta óptica es muy compleja [16]. En general en la evaluación de un sensor hay que tomar en cuenta sus propiedades hidrodinámicas, cómo interactúa con las burbujas, cómo varía su respuesta óptica en función del tamaño velocidad y forma de las burbujas, así como la variación de la respuesta por la presencia de una capa residual en la superficie del sensor.

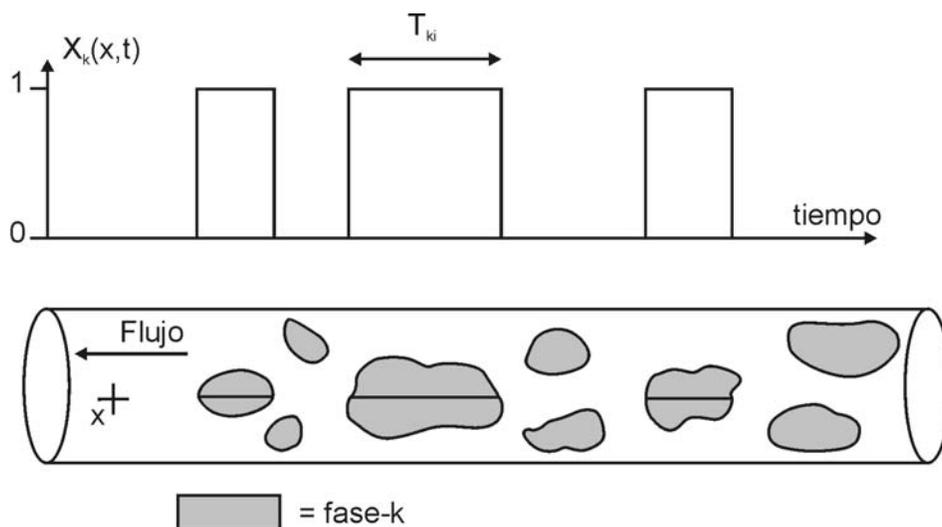


Figura 1.7 Monitoreo del flujo de dos fases: discriminación entre burbujas de aire y un líquido [16].

La estructura de un sensor genérico, objeto de estudio en la presente tesis, consiste en dos fibras (una emisora y otra receptora) acopladas a una estructura reflectora (superficie refractométrica), la cual puede tener diversas formas y características; la fibra emisora está conectada a una fuente de luz (que puede ser un *LED* o un láser) mientras que la receptora esta conectada a un fotorreceptor.

De acuerdo a la forma de los elementos de sensibilidad, podemos distinguir cuatro grupos principales:

1. Elementos con secciones rectas cilíndricas o cónicas, o fibras ópticas sin cubierta.
2. Secciones de las fibras ópticas dobladas en forma de U.
3. Fibras ópticas cuyo extremo sirve como refractómetro y que puede ser una superficie plana, un prisma reflector, retroreflector, cono, o una superficie redondeada.
4. Elementos de acoplamiento óptico de dos fibras elaborado en forma de un prisma, cono, paraboloides etc.

El principio de operación del sensor se encuentra basado en la dependencia de la reflexión total interna en la superficie refractométrica y en el índice de refracción del medio externo.

Las investigaciones más recientes, reportan aplicaciones de los sensores refractométricos en numerosas áreas científicas y tecnológicas como en sistemas de control en procesos industriales, en aviación, desarrollos para sistemas espaciales, química y medicina.

Sin embargo cada aplicación tiene sus requerimientos y especificaciones especiales, por lo que se debe conocer la utilización que se la va a dar a un sensor, para poder elegir el tipo de sensor más conveniente, y después realizar un diseño con las cualidades y características que se requieran. Por ejemplo, para mediciones con alta precisión para pruebas en laboratorio, se obtienen mejores resultados al utilizar sensores con reflectometría dinámica, mientras que para la detección de un líquido en el interior de un cable o un ducto muy estrecho, se requiere de un sensor miniatura que no exige una precisión tan grande.

En la presente tesis se busca desarrollar este tipo de sensores para su utilización en detectores de diversas sustancias líquidas, en los cables de sistemas de telecomunicación o de distribución de energía etc., por lo que se trabajará con sensores miniatura.

Existen principalmente dos clases de problemas para el desarrollo de los sensores refractométricos en fibras ópticas:

El primer problema está relacionado con las características particulares de los sensores, el segundo tipo de problema está relacionado a las aplicaciones específicas.

En la primera categoría, se debe tratar que el sensor tenga una cierta sensibilidad o respuesta al índice de refracción. Se deben tener pérdidas intrínsecas menores a una cierta cantidad, el sensor debe operar en un cierto intervalo de valores del índice de refracción del medio externo. En ocasiones hay que buscar características con una alta linealidad o bien una respuesta escalonada de dos niveles, pero siempre buscando que el escalón se encuentre en cierta región del índice de refracción.

De los datos existentes en la bibliografía se puede conocer el nivel actual con respecto a cada una de estas características de forma independiente. En la práctica es imposible hacer una comparación confiable de los diferentes sensores reportados en los artículos existentes, debido a que en la mayoría no se especifican los parámetros con detalle, o faltan datos que impiden una comparación.

Por otra parte las aplicaciones particulares tienen exigencias especiales que cumplir, por lo que hay una variedad muy grande de especificaciones técnicas tanto sobre las características como sobre los detalles de implementación; por ejemplo, el equipo de laboratorio puede tener sensores grandes mientras que para un cable se necesitan miniaturas, en el equipo médico necesita ser desechable, en la industria petrolera el equipo debe tener una vida útil de 10 o 20 años. En virtud de una gran variedad de requerimientos no existe una solución óptima global y única para un sensor, esto es válido para sensores de cualquier tipo y no solamente para los sensores refractométricos en fibras ópticas.

1.4 Conclusiones

El gran desarrollo y crecimiento del campo de las telecomunicaciones, ha generado avances en la tecnología de las fibras ópticas, así como una baja en los costos de la electrónica óptica, por estas razones la investigación en el área de sensores basados en fibras ópticas se ha incrementado.

El objeto de estudio de este trabajo, está centrado en los sensores refractométricos basados en fibras ópticas. Se puede llegar a la conclusión de que los sensores refractométricos basados en fibras ópticas ofrecen perspectivas interesantes, pero que este campo aún requiere de una investigación más detallada y profunda de las propiedades de los sensores.

Se han realizado estudios y trabajos para sensores refractométricos basados en fibras ópticas con un elemento transductor semiesférico, se han estudiado sus propiedades, la respuesta ante el cambio de sus parámetros, así como diversas aplicaciones en las que han demostrado su gran utilidad.

Sin embargo se requiere una investigación de las propiedades de los sensores, para otras superficies de segundo orden como elemento transductor, se necesita una comparación entre las propiedades de cada tipo de superficie de segundo orden, que tome en cuenta los efectos de la polarización de la luz, para conocer las diferentes características de los sensores, y así poder elegir el más apropiado para una aplicación específica.

En términos de las aplicaciones prácticas, es muy importante también investigar los efectos de capas residuales de varias sustancias que pueden formarse sobre la superficie del sensor, que podrían ocasionar cambios, errores o la pérdida de la respuesta de un sensor.

Capítulo 2. Desarrollo del modelo matemático de un sensor refractométrico puntual

Como se mencionó en el capítulo anterior, el objeto de estudio de esta tesis es el sensor refractométrico puntual; en el presente capítulo se describirán sus características de operación, los criterios de calidad, las consideraciones para el modelado de las fuentes de luz, el modelado de la superficie del elemento transductor así como los efectos de polarización de la luz.

2.1 Características de operación de un sensor refractométrico puntual

Se puede hacer una división entre las características principales y secundarias [1-4]. Podemos incluir dentro de las características principales para la medición del desempeño de un sensor refractométrico:

1. Transmisión óptica del transductor:

$$T(n) = \frac{I_2(n)}{I_1}, \quad (1)$$

donde I_1 es la intensidad de la luz de entrada emitida por la fibra transmisora al elemento transductor, e $I_2(n)$ es la intensidad a la salida del transductor que es aceptada por la segunda fibra, la cual es una función del índice de refracción del medio externo.

2. Transmisión relativa:

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

donde T_{aire} e I_{2aire} son la transmisión del transductor y la intensidad de la luz de salida cuando el medio circundante es el aire.

3. Pérdidas intrínsecas:

$$A(db) = 10 \log_{10} \frac{1}{T_{aire}} = 10 \log_{10} \frac{I_1}{I_{2aire}}, \quad (3)$$

Las pérdidas intrínsecas son debidas exclusivamente a la estructura del transductor.

4. Longitud del intervalo de entrada:

$$\Delta n = n_{m\acute{a}x} - n_{m\acute{i}n}, \quad (4)$$

5. Longitud del intervalo de salida:

$$\Delta T^* = |T^*(n_{m\acute{a}x}) - T^*(n_{m\acute{i}n})|, \quad (5)$$

Dentro de las características secundarias tenemos:

1. Intervalo de entrada

Es el intervalo en el que puede variar el índice de refracción para ser medido; es el intervalo comprendido entre el valor máximo y mínimo que puede ser medido con el transductor: n_{\min} a n_{\max} .

2. Intervalo de salida

Es el intervalo de transmisión relativa comprendido de n_{\min} a n_{\max} : $T^*(n_{\max})$ a $T^*(n_{\min})$.

3. No linealidad:

La característica no lineal de la transmisión relativa es expresada como un porcentaje de la diferencia entre el comportamiento ideal lineal y la longitud del intervalo de salida:

$$N(n) = \frac{T^*(n) - (Kn + a)}{\Delta T^*} \times 100\% , \quad (6)$$

donde $(Kn + a)$ es la expresión de la recta ideal característica que conecta el punto máximo y mínimo, por lo que K es la pendiente de la recta ideal $K = \frac{\Delta T^*}{\Delta n}$ y donde a es la ordenada al origen.

4. Máxima no linealidad:

Es el valor máximo que puede tomar la función de no linealidad $N(n)$ en el intervalo de entrada del transductor.

5. Sensitividad del transductor:

Es el gradiente de la función de transmisión relativa

$$S(n) = \frac{dT^*(n)}{dn} \approx \frac{T^*(n_1) - T^*(n_2)}{n_1 - n_2} , \quad (7)$$

donde n_1 y n_2 son los índices de refractividad en la vecindad de n . Para el caso de una recta ideal como característica de transmisión $S(n) = K$.

6. Máxima desviación de la sensibilidad:

Es la diferencia máxima entre K y $S(n)$ en el intervalo operacional del transductor:

$$\Delta S_{\max} = |K - S(n)|_{\max} , \quad (8)$$

2.2 Criterios de calidad de un sensor refractométrico puntual

Los criterios de calidad de un sensor refractométrico dependen de la aplicación en la que van a ser utilizados. Las aplicaciones podemos dividirlos en dos categorías principales [3-5]:

- a) Medición del índice de refracción.
- b) Discriminación entre dos líquidos o entre un líquido y el aire.

Cada categoría requiere de una función de transmisión con características diferentes, la primera necesita de una función de transmisión lineal para medir las variaciones del índice de refracción, mientras que la segunda requiere una función de tipo escalón para discriminar entre dos líquidos o bien un líquido y el aire.

2.3 Consideraciones para el modelado de las fuentes de luz y haces luminosos, en un sensor refractométrico puntual

Para el caso general en los sensores refractométricos se pueden utilizar varios tipos de fuentes de luz y se puede considerar una conexión o contacto directo con el elemento transductor. Estas fuentes se pueden acoplar directamente al transductor o a través de las fibras ópticas. Con todas estas variantes se puede pensar en algunas de las posibles características de los haces luminosos que se pueden utilizar con un elemento transductor. Por ejemplo, a un elemento transductor semiesférico se le pueden acoplar directamente un diodo emisor de luz *LED* o un láser semiconductor como se muestra en las figuras 2.1 y 2.2, o también conectar un elemento foto detector. Los dispositivos emisores de luz pueden tener su área emisora de forma rectangular, circular, etc. y pueden tener una distribución uniforme o no uniforme de la intensidad de la radiación óptica emitida en su superficie activa. También el patrón de radiación puede ser cualquiera, desde Lambertiano hasta diagramas más anchos, más angostos, simétricos o asimétricos como en el caso de láseres semiconductores.

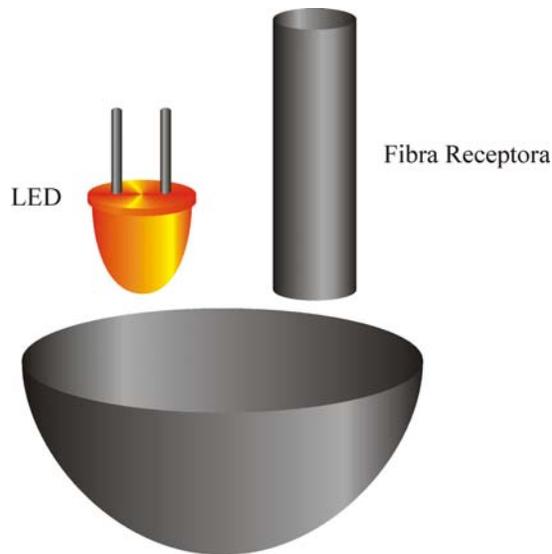


Figura 2.1 Superficie acoplada a un LED y a una fibra óptica.

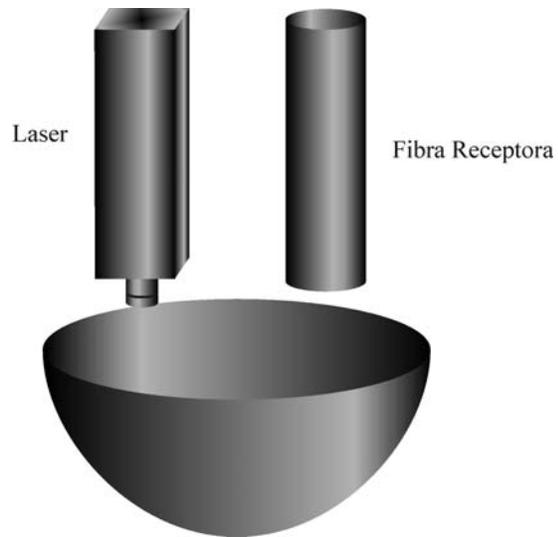


Figura 2.2 Superficie acoplada a un láser y a una fibra óptica receptora.

También las características de polarización de la luz dependen de los diferentes tipos de fuentes: los *LEDs* normalmente emiten una luz no polarizada y los láseres semiconductores son fuentes de luz polarizada linealmente. En el caso de utilizar las fibras ópticas para conectar una fuente de luz y el elemento transductor, las características del haz dependen de la excitación de la fibra óptica y del acoplamiento en la entrada.

Cuando la longitud de la fibra es grande, (cientos de metros) se establece el equilibrio modal y la distribución de la intensidad de la luz a la salida ya no depende tanto de las condiciones de excitación. Por ejemplo, una fibra de perfil escalonado, tiene una distribución de intensidad uniforme en su sección transversal mientras que una fibra gradual tiene una distribución paraboloidal.

La diferencia entre una fuente semiconductor como *LED* o láser y la fibra óptica, es que en el caso de las fibras ópticas, los parámetros de la fibra determinan el patrón de radiación (ángulos de salida de los rayos de la fibra y la distribución de la intensidad entre ellos).

Cada uno de estos casos particulares requiere un modelo particular de haz luminoso en términos de [2,6]:

- Forma del área emisora.
- Dimensiones o tamaño de área emisora.
- Distribución de la intensidad sobre esta área.
- Distribución angular de los rayos que salen de cada punto de esta área.

No obstante, se pueden encontrar algunos casos típicos, por ejemplo un *LED* con un área emisora circular, una distribución de la intensidad de la radiación uniforme sobre esta área y un patrón de radiación lambertiano:

$$B = B_0 \cos \theta, \quad (9)$$

donde B es la intensidad y B_0 es la intensidad en la dirección normal a la superficie, θ es el ángulo entre la normal y la dirección de radiación.

Un patrón lambertiano modificado:

$$B = B_0 \cos^x \theta, \quad (10)$$

En el caso de un láser semiconductor se puede asumir que el área emisora tiene una forma rectangular, la distribución de la intensidad es uniforme y el patrón de radiación tiene su ancho angular diferente en dos planos ortogonales x y y .

Para las fibras ópticas se pueden pensar en dos tipos principales de distribuciones:

1. Fibra escalonada con una distribución de la intensidad uniforme sobre el núcleo de la fibra y una cierta distribución de la intensidad de radiación dentro de la superficie cónica que corresponde a la apertura angular de la fibra.
2. Fibra de índice gradual en donde la distribución de la intensidad en la sección transversal de la fibra tiene una forma parabólica.

2.4 Consideraciones para el modelado de superficies de elemento transductor de un sensor refractométrico puntual

En general para la elaboración del modelo matemático de la superficie reflectora utilizando el trazado de rayos y la óptica geométrica existen tres caminos para su simulación.

El primero es a través de una ecuación algebraica (técnica analítica), que describe la superficie como el conjunto de puntos que satisfacen la ecuación.

El segundo método es utilizando un número finito de segmentos simples definidos en un aspecto paramétrico, en este caso hay que tener cuidado sobre lo que sucede en las fronteras entre los diferentes segmentos.

El tercer método es una combinación de los dos anteriores en donde se utiliza una ecuación para definir la superficie, pero también se utilizan segmentos definidos por polinomios de menor grado en forma paramétrica, por lo que una superficie compleja puede ser representada a través de secciones representadas por polinomios de menor grado.

Cada técnica tiene sus ventajas y desventajas, como se presenta en la tabla 2.1.

Método	Ventajas	Desventajas
Ecuación algebraica de la superficie	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Se puede simular fácilmente una superficie lisa ✓ Facilidad de programación 	<ul style="list-style-type: none"> ✗ Dificultad para simular superficies muy complejas (por ejemplo una superficie con dobleces)
Ecuaciones paramétricas de los segmentos de la superficie	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Se pueden simular superficies muy complejas (por ejemplo superficies con dobleces) 	<ul style="list-style-type: none"> ✗ Difícil de programar ✗ Se tiene que tener mucho cuidado con las fronteras de las diferentes secciones
Método Combinado	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Se puede simular cualquier tipo de superficie (sencilla o compleja) ✓ Reduce el tiempo de cálculo 	<ul style="list-style-type: none"> ✗ El modelo matemático requiere de un mayor tiempo de diseño

Tabla 2.1 Ventajas y desventajas de las técnicas para la construcción del modelo matemático.

2.5 Consideraciones de los efectos de la polarización de la luz en un sensor refractométrico puntual

La polarización de la luz es una propiedad de las ondas electromagnéticas (*EM*), una onda *EM* tiene asociados un campo magnético y uno eléctrico, ortogonales, los cuales oscilan en una dirección perpendicular a la dirección de propagación. El campo eléctrico de una onda *EM* senoidal en particular, puede ser descompuesto en dos componentes ortogonales, cada uno con una amplitud y una fase. La amplitud es el valor máximo de la componente del campo, mientras que la intensidad de la luz es proporcional al cuadrado de la amplitud. La fase, referenciada a una posición fija o tiempo, indica qué parte del ciclo del campo eléctrico se encuentra oscilando.

Dos componentes ortogonales no interfieren en amplitud, sino que se suman de acuerdo al álgebra vectorial. Cuando los dos componentes ortogonales se encuentran en fase, se dice que la onda *EM* está linealmente polarizada. Cuando las dos componentes tienen la misma amplitud, y una fase relativa de 90° , se dice que la onda *EM* se encuentra circularmente polarizada (si las amplitudes y las fases de dos campos ortogonales tienen cualquier valor arbitrario se dice que se encuentra elípticamente polarizada) [7].

Cuando la luz está compuesta por una combinación de ondas linealmente polarizadas, circularmente polarizadas y elípticamente polarizadas, a la luz resultante se le considera como no polarizada o parcialmente polarizada. Se considera no polarizada cuando no existe una dirección fija del campo eléctrico y no existen relaciones de fase fijas entre las componentes ortogonales.

Se puede producir luz polarizada pasando un haz de luz a través de un polarizador. Un polarizador ideal transmite solo la luz cuyo campo eléctrico es paralelo al eje de transmisión del polarizador y rechaza la luz con campo ortogonal.

La polarización también puede ser generada por la respuesta anisotrópica de los materiales o por sistemas de geometría anisotrópica. Los mecanismos para producir polarización incluyen la absorción preferencial en un material dicróico, la transmisión y la reflexión con una incidencia oblicua, doble refracción en un material birrefringente o por rejillas de difracción.

Las leyes de Fresnel de la reflexión en una interfase plana entre dos medios [7,8], muestran como se aprecia en la figura 2.3, que si la luz incidente se encuentra linealmente polarizada con su campo eléctrico en el plano de incidencia, entonces no habrá luz reflejada en el ángulo de Brewster θ_B dado por:

$$\theta_B = \arctan\left(\frac{n_2}{n_1}\right), \quad (11)$$

Donde n_1 es el índice de refracción del medio en el que viaja el rayo y n_2 es el índice de refracción del medio en el que el rayo incide como se muestra en la figura 2.3.

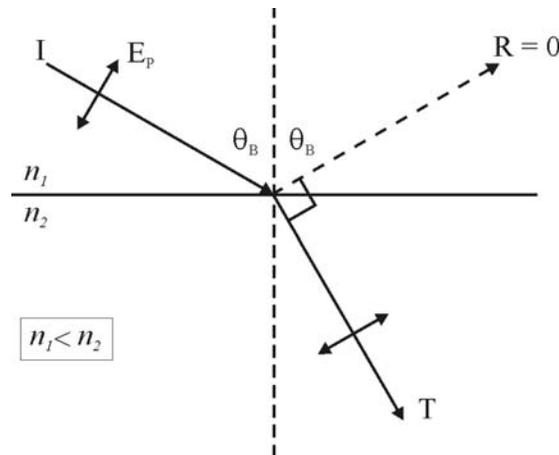


Figura 2.3. Luz incidente al primer medio con el ángulo de Brewster, con una polarización de su vector eléctrico, paralelo al plano de incidencia. El rayo es totalmente transmitido al segundo medio, con reflexión cero.

La potencia óptica reflejada es cero para θ_b y se incrementa aproximadamente en un factor cuadrático para ángulos menores y cercanos a θ_b .

El tipo de luz que utilizan los sensores debe ser tomado en cuenta según la fuente de luz que se utilice en cada caso. Por ejemplo si consideramos la utilización de luz no coherente, divergente y no polarizada, se puede hacer uso de las fórmulas de Fresnel para caracterizar la iluminación y tomar en cuenta la polarización de la luz al reflejarse en un medio dieléctrico.

El coeficiente de reflexión interna en la superficie refractométrica [7,8] de un sensor para luz lineal incidente polarizada perpendicularmente al plano de incidencia es:

$$R_{\perp} = \frac{\sin^2(\theta_i - \theta_t)}{\sin^2(\theta_i + \theta_t)}, \quad (12)$$

donde θ_i es el ángulo del rayo incidente y θ_t es el ángulo del rayo transmitido.

Para luz polarizada en forma paralela al plano de incidencia el coeficiente es [7,8]:

$$R_{=} = \frac{\tan^2(\theta_i - \theta_t)}{\tan^2(\theta_i + \theta_t)}, \quad (13)$$

En el caso de la luz no polarizada $R = \frac{1}{2}(R_{=} + R_{\perp})$ donde cada polarización tiene la misma energía si poseen la misma amplitud. Estas relaciones son válidas para cada uno de los rayos, por lo que se puede obtener la reflectividad interna del sensor como la sumatoria de las contribuciones de cada uno de los rayos de la fibra emisora, mientras que en la fibra de salida deberemos tomar en cuenta el ángulo de polarización de cada rayo después de cada reflexión en la superficie refractométrica, el cual puede ser obtenido utilizando la ley de Brewster:

$$\tan \theta_p = \frac{n_t}{n_i}, \text{ en donde } \theta_p \text{ es el ángulo de polarización y donde } n_i \text{ y } n_t \text{ son los índices de}$$

refracción del medio incidente y del medio transmisor.

Después de cada reflexión es necesario verificar la magnitud de la reflectancia para cada tipo de polarización, para estimar si uno de los estados de polarización contiene mayor energía. En la fibra receptora se tomarán en cuenta los rayos cuyas contribuciones energéticas sean de una magnitud considerable, y la potencia de salida estará en términos de los coeficientes de reflexión:

$P_r = P_i R$, donde P_r y P_i son las potencias del rayo reflejado y del rayo incidente respectivamente [7].

2.6 Descripción del modelo matemático de un sensor refractométrico puntual

2.6.1 Consideraciones generales

En el presente trabajo se analizarán sensores refractométricos puntuales, que utilizarán fibras ópticas multimodales. Es importante hacer esta aclaración debido a que se van a utilizar dentro del modelado matemático técnicas de trazado de rayos y de óptica geométrica, debido a que las estructuras ópticas que serán utilizadas tienen una dimensión mucho mayor que la longitud de onda. En el caso de utilizar fibras monomodales sería necesario un análisis desde el punto de vista de la óptica ondulatoria, que tendrían como punto de partida las ecuaciones de Maxwell, lo que implicaría un modelado matemático distinto.

Como modelo inicial podemos partir de que el sensor estará formado por dos fibras ópticas multimodales de índice escalonado (una de entrada y una de salida), acopladas a una superficie de un material dieléctrico y una fuente de luz monocromática, no polarizada y no coherente. A partir de este modelo inicial se establecerá un modelo matemático, y una vez validado (después de hacer pruebas de comparación con resultados experimentales obtenidos en trabajos reportados en la bibliografía), se extenderá el modelo matemático inicial con la intención de analizar los efectos de los cambios en las características geométricas del sensor, los efectos de la polarización, y los efectos de tener una capa de contaminación en diferentes tipos de superficies.

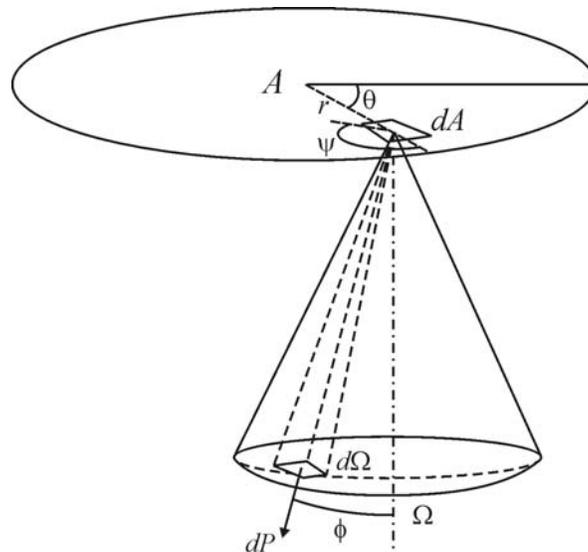


Figura 2.4 Elemento de potencia emitido por un elemento de área del núcleo de la fibra óptica transmisora.

La potencia (flujo) emitida por un elemento en la superficie del núcleo de la fibra transmisora dP_t se puede describir en forma general como: $dP_t = J(r, \theta, \phi, \psi) dA d\Omega$ donde $J(r, \theta, \phi, \psi)$ es la distribución de potencia, $dA = r dr d\theta$ donde r y θ son las coordenadas polares del elemento de área con respecto al centro del núcleo de la fibra óptica, y $d\Omega = \sin\phi d\phi d\psi$ es el elemento del ángulo sólido (Ω) que corresponde a la apertura angular de la fibra óptica, ϕ y ψ son las coordenadas esféricas del elemento de ángulo sólido, con respecto al eje del elemento y del eje de la fibra óptica, tal y como se muestra en la figura 2.4.

La potencia en la fibra óptica receptora, puede ser obtenida como la suma de las potencias de todos los rayos que se propagan de la fibra transmisora, menos la atenuación del sistema.

La atenuación del sistema debe tomar en cuenta las pérdidas de potencia de los rayos que no entran en la apertura de la fibra receptora, y también la atenuación causada por las reflexiones parciales en la superficie reflectora.

De esta forma podemos expresar la potencia en la fibra óptica receptora $P_r(n)$ como [2]:

$$P_r(n) = \iiint_A \iiint_{\Omega} J(r, \theta, \phi, \psi) R(n, \alpha(r, \theta, \phi, \psi, S)) M(r, \theta, \phi, \psi, S, U) dA d\Omega, \quad (14)$$

donde $J(r, \theta, \phi, \psi)$ es la distribución de potencia, $R(n, \alpha(r, \theta, \phi, \psi, S))$ es la función de atenuación causada por la reflexión en la superficie del elemento, n es el índice de refracción del medio externo en el que se encuentra la superficie, α es el ángulo de incidencia de un rayo en la superficie reflectora, S es la función que caracteriza la forma de la superficie reflectora, $M(r, \theta, \phi, \psi, S, U)$ es la función de los rayos que entran en la apertura angular de la fibra receptora, y U es la función que describe las coordenadas y la apertura angular de la fibra receptora.

Para el desarrollo del modelo matemático podemos considerar la sección transversal de los núcleos de las fibras, que pueden ser representados como ecuaciones de una circunferencia colocadas en un plano z determinado, a partir de donde comenzará la superficie a la que están acopladas las fibras, como se muestra en la figura 2.5. La luz que viaja en las fibras puede representarse como rayos individuales matemáticamente representados como ecuaciones de recta parametrizadas. En este punto es importante considerar la apertura angular de las fibras tanto para la salida de los rayos de la fibra emisora, como para la aceptación de los rayos reflejados en la fibra receptora.

La superficie se representará con la ecuación matemática de la forma de superficie tridimensional correspondiente (paraboloide elíptico, semiesfera, elipsoide etc.).

Posteriormente se debe considerar la intersección de los rayos con la superficie refractométrica, mediante la solución simultánea de la ecuación que representa al rayo con la ecuación de la superficie. Una vez obtenido este punto, se debe obtener el rayo reflejado, para lo que será necesario obtener un vector que represente la normal al gradiente interno en el punto de incidencia dentro de la superficie, para de esta forma obtener el ángulo de incidencia; al obtener el rayo reflejado, se debe de calcular su potencia e ir siguiendo su trayectoria para monitorear si alcanza la fibra de salida (directamente o después de un cierto número de reflexiones en la superficie).

Una vez realizado este procedimiento con uno de los rayos que salieron de la fibra emisora, se debe sumar la contribución de potencia de cada uno de los rayos que alcanzaron la fibra de salida.

Con estos resultados se puede evaluar la calidad del sensor con los parámetros que se mencionaron en la sección 2.1 del presente capítulo.

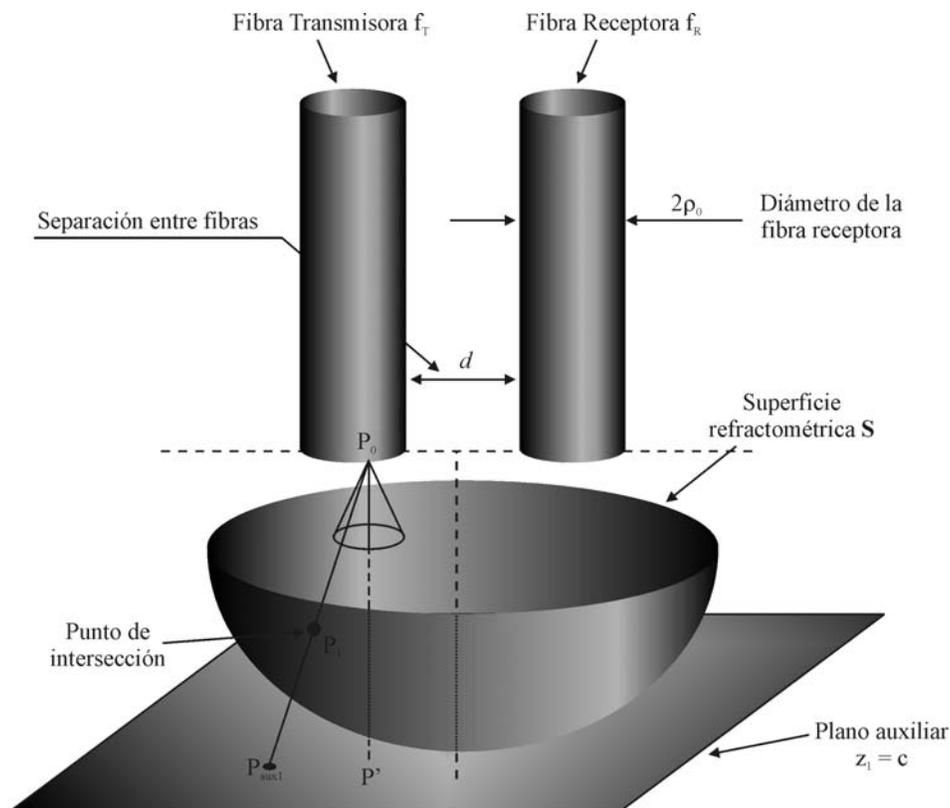


Figura 2.5 Vista tridimensional de un sensor refractométrico con una superficie elipsoidal.

2.6.2 Descripción de la superficie de segundo orden como elemento de sensibilidad

Una superficie de segundo orden (o superficie cuadrática) es aquella cuya representación implícita está dada por $f(x, y, z) = 0$ donde $f(x, y, z)$ es un polinomio cuadrático.

La forma algebraica de una superficie cuadrática está dada por la ecuación [9]:

$$Ax^2 + By^2 + Cz^2 + 2Dxy + 2Eyz + 2Fxz + 2Gx + 2Hy + 2Iz + J = 0, \quad (15)$$

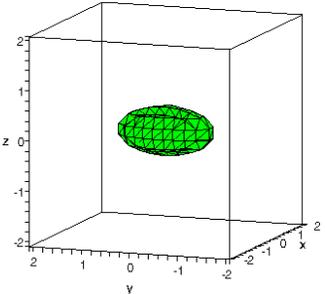
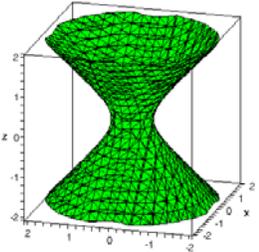
Por ejemplo si $A=B=C=-J=1$ y $D=E=F=G=H=I=0$, entonces la ecuación produce una esfera unitaria con centro en el origen.

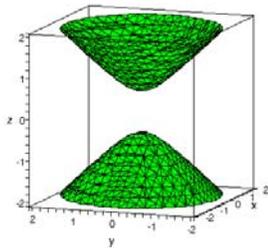
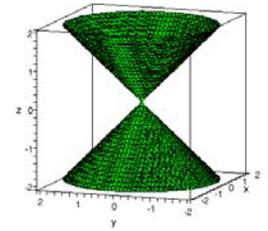
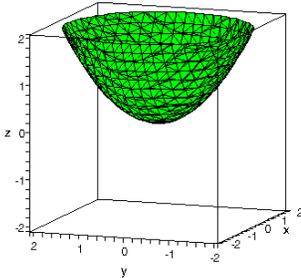
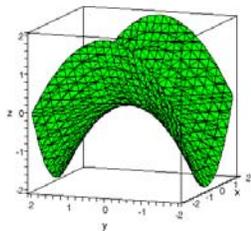
Cuando se resuelve una ecuación implícita para una de las variables de la función, se obtiene su ecuación explícita como por ejemplo:

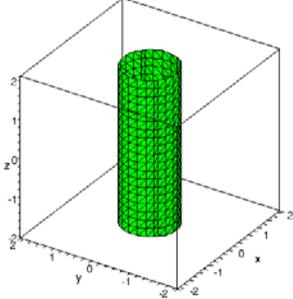
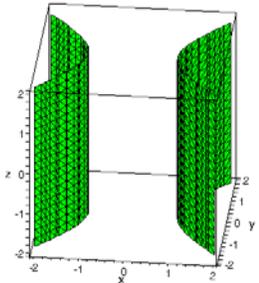
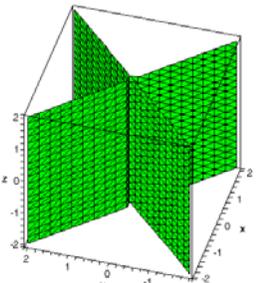
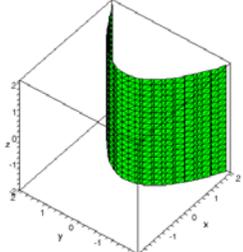
$$z = f(x, y), \quad (16)$$

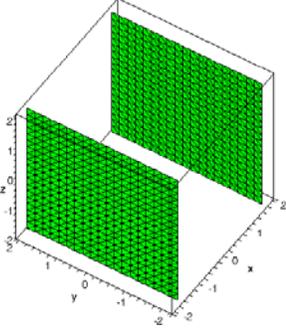
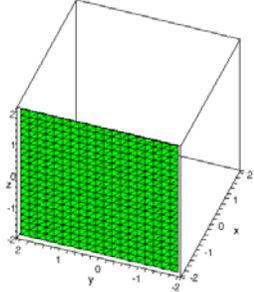
En general podemos resumir el tipo de ecuaciones que se pueden generar de la ecuación 15, en sus formas canónicas en la tabla 2.2.

Tabla 2.2 Fórmulas generales para superficies de segundo orden, y sus gráficas.

Ecuación en su forma canónica	Tipo de superficie
$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} + \frac{z^2}{c^2} - 1 = 0$	Elipsoide 
$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} + \frac{z^2}{c^2} + 1 = 0$	Elipsoide imaginario
$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} - \frac{z^2}{c^2} - 1 = 0$	Hiperboloide de una hoja 
$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} - \frac{z^2}{c^2} + 1 = 0$	Hiperboloide de dos hojas

	
$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} - \frac{z^2}{c^2} = 0$	<p>Cono de segundo orden</p> 
$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} + \frac{z^2}{c^2} = 0$	<p>Cono imaginario de segundo orden</p>
$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} - 2cz = 0$	<p>Paraboloide elíptico</p> 
$\frac{x^2}{a^2} - \frac{y^2}{b^2} - 2cz = 0$	<p>Paraboloide hiperbólico</p> 
$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} - 1 = 0$	<p>Cilindro elíptico</p>

	
$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} + 1 = 0$	Cilindro elíptico imaginario
$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 0$	Par de planos imaginarios intersectados
$\frac{x^2}{a^2} - \frac{y^2}{b^2} - 1 = 0$	Cilindro hiperbólico
	
$\frac{x^2}{a^2} - \frac{y^2}{b^2} = 0$	Par de planos intersectados
	
$y^2 - 2px = 0$	Cilindro parabólico
	
$x^2 - a^2 = 0$	Par de planos paralelos

	
$x^2 + a^2 = 0$	Par de planos imaginarios paralelos
$x^2 = 0$	Par de planos coincidentes
	

Como se puede apreciar en la tabla 2.3, las superficies de segundo orden que por su forma presentan las características más adecuadas para su fabricación y su utilización como elemento transductor son el paraboloides elíptico, el elipsoide y la esfera como caso particular de este último.

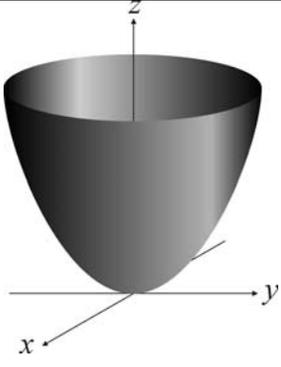
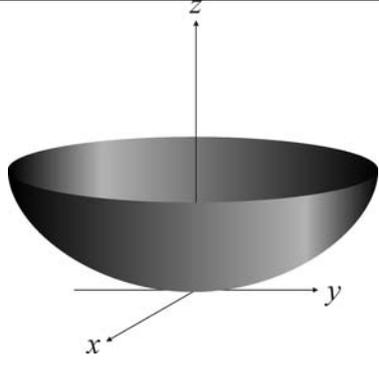
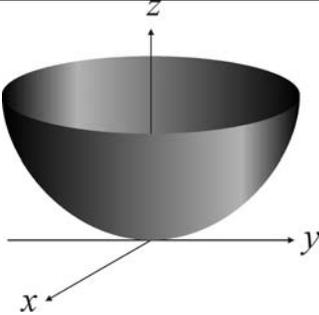
<i>Paraboloide Elíptico</i>	<i>Elipsoide</i>	<i>Semiesfera</i>
$z = \frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2}$	$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} + \frac{z^2}{c^2} = 1$	$x^2 + y^2 + z^2 = r^2$
		
Superficie paraboloidal	Superficie elíptica Restringiendo los valores de z	Superficie semiesférica Restringiendo los valores de z

Tabla 2.3 Fórmulas generales para las superficies del paraboloides elíptico, elipsoide y semiesfera.

También podemos expresar la ecuación 15 implícita en forma matricial [9,10]:

$$PQP^T = 0, \quad (17)$$

$$\text{donde } P = [x \quad y \quad z \quad 1], \quad (18)$$

$$\text{y } Q = \begin{bmatrix} A & D & F & G \\ D & B & E & H \\ F & E & C & I \\ G & H & I & J \end{bmatrix}, \quad (19)$$

Otra forma de representar una superficie, es descomponiéndola en segmentos o “parches” (que son análogos a los segmentos en las curvas). Un “parche” es una colección de curvas limitadas de puntos, cuyas coordenadas están dadas por polinomios continuos de dos parámetros de la forma: $x = x(u, w)$, $y = y(u, w)$, $z = z(u, w)$, donde las variables paramétricas u y w están restringidas al intervalo $u, w \in [0,1]$, lo que genera parches rectangulares. Si mantenemos fijo el valor de una de las variables paramétricas, obtenemos una curva en términos de la variable libre. Si hacemos este proceso para cada una de las variables se formará una red de familia de curvas. Asociado a cada parche tenemos un conjunto de condiciones de frontera o límites.

Un ejemplo de ecuaciones paramétricas de una esfera de radio r cuyo centro se encuentra en (x_0, y_0, z_0) son [10]:

$$x = x_0 + r \cos u \cos w, \quad u \in \left[\frac{-\pi}{2}, \frac{\pi}{2} \right], \quad w \in [0, 2\pi], \quad (20)$$

$$y = y_0 + r \cos u \sin w, \quad (21)$$

$$z = z_0 + r \sin u, \quad (22)$$

donde u y w son análogos a la latitud y longitud respectivamente, con ambos ángulos en radianes. Las curvas con u constante son paralelas a la latitud, por lo que se genera un círculo en un plano paralelo a x , y mientras, w varía. Las curvas con w constante son meridionales a la longitud y forma semicírculos conforme u varía.

Un elipsoide con centro en (x_0, y_0, z_0) tiene las siguientes ecuaciones paramétricas:

$$x = x_0 + a \cos u \cos w, \quad u \in \left[\frac{-\pi}{2}, \frac{\pi}{2} \right], \quad w \in [0, 2\pi], \quad (23)$$

$$y = y_0 + b \cos u \sin w, \quad (24)$$

$$z = z_0 + c \sin u, \quad (25)$$

2.6.3 Modelado del rayo inicial incidente en la superficie de segundo orden.

2.6.3.1. Coordenadas de salida del rayo inicial R_i

Se puede trabajar un modelo inicialmente, asumiendo que el núcleo de la fibra óptica es de forma circular y que la fibra se encuentra acoplada, unida al lado plano de un elemento de sensibilidad, formado con una superficie de segundo orden, como se muestra en la figura 2.6.

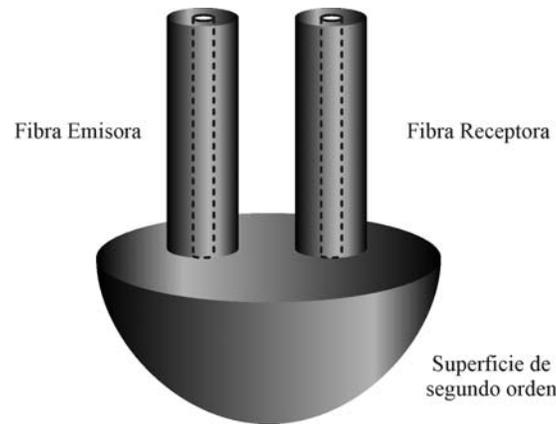


Figura 2.6 Vista tridimensional de superficie de segundo orden con fibras acopladas.

Se genera una coordenada aleatoria sobre la superficie del núcleo de la fibra, que será el punto de partida del rayo $(x_i \ y_i \ z_i)$ [11].

$$x_i = r_i \cos \theta_i - a, \quad (26)$$

$$y_i = r_i \sin \theta_i, \quad (27)$$

$$z_i = c, \quad (28)$$

En donde a es la distancia entre el eje del núcleo de la fibra y el eje de simetría del eje de la superficie de segundo orden, c es plano donde se encuentran las caras de los extremos de las fibras ópticas y la superficie de segundo orden, r_i y θ_i son las coordenadas polares del vector radial en el punto de salida del rayo, y están dados por:

$r_i = \rho \sqrt{A_1}$, para $0 \leq r_i \leq \rho$ y $0 < A_1 < 1$, donde ρ es el radio del núcleo de la fibra óptica, y A_1 es un número aleatorio;

$\theta_i = 2\pi A_2$, para $0 \leq \theta_i \leq 2\pi$ $0 < A_2 < 1$, donde A_2 es otro número aleatorio.

2.6.3.2. Coordenadas de dirección del rayo inicial R_i

En cuanto a la dirección del rayo inicial que sale del punto de partida $(x_i \ y_i \ z_i)$, debe ser calculada tomando en cuenta la distribución angular de la potencia óptica (para una fibra cuya fuente es del tipo lambertiana) según las siguientes ecuaciones [11]:

$$\phi_i \sin \phi_i = \frac{NA_i}{n_s} \arcsin\left(\frac{NA_i}{n_s}\right) A_3, \quad 0 \leq \phi_i \leq \phi_{Smáx} \text{ y } 0 < A_3 < 1 \quad (29)$$

$$\psi_i = 2\pi A_4, \quad 0 \leq \psi_i \leq 2\pi \text{ y } 0 < A_4 < 1 \quad (30)$$

en donde NA_i es la apertura numérica en el punto de salida de un rayo, n_s es el índice de refracción del material del elemento sensor (elemento de sensibilidad), $\phi_{Smáx} = \arcsin\left(\frac{NA}{n_s}\right)$ es el ángulo máximo de salida del elemento sensor, y A_3, A_4 son dos números aleatorios.

Las coordenadas de la dirección del rayo inicial $(X_{di} \ Y_{di} \ Z_{di})$ son [11]:

$$X_{di} = \sin \phi_i \cos \psi_i, \quad (31)$$

$$Y_{di} = \sin \phi_i \sin \psi_i, \quad (32)$$

$$Z_{di} = \cos \phi_i, \quad (33)$$

donde ϕ_i se puede obtener de (29), utilizando para su resolución un método numérico (método iterativo de la secante).

2.6.3.3. Coordenadas de intersección del rayo inicial R_i con la superficie de segundo orden

Las ecuaciones paramétricas de una recta que pasa por el punto (x_0, y_0, z_0) y es paralela al vector $a\vec{i} + b\vec{j} + c\vec{k}$ son: $x = x_0 + at$, $y = y_0 + bt$, $z = z_0 + ct$ en donde la parametrización obtenida para la recta, expresa las coordenadas x, y y z como funciones lineales del parámetro t . Las ecuaciones paramétricas para una recta, permiten encontrar en dónde la recta interseca una superficie dada.

Para el presente problema, el punto de salida del rayo inicial está dado por $(x_i \ y_i \ z_i)$, y su vector de dirección por $(X_{di} \ Y_{di} \ Z_{di})$, por lo que las ecuaciones paramétricas de la recta, en función del parámetro t son:

$$x = x_i + X_i t, \quad (34)$$

$$y = y_i + Y_i t, \quad (35)$$

$$z = z_i + Z_i t, \quad (36)$$

Ahora se deben sustituir las ecuaciones paramétricas de la recta en la ecuación cuadrática que describe al sensor (dependiendo de su forma), y se resuelve para t .

Por ejemplo para el caso de un paraboloide elíptico de la forma:

$$Ax^2 + By^2 + Cz + J = 0, \quad (37)$$

Sustituyendo (34), (35) y (36) en (37) :

$$A(x_i + X_i t)^2 + B(y_i + Y_i t)^2 + C(z_i + Z_i t) + J = 0, \quad (38)$$

Simplificando (38) :

$$a_p t^2 + b_p t + c_p = 0, \quad (39)$$

donde:

$$a_p = (AX_i^2 + BY_i^2), \quad (40)$$

$$b_p = (2Ax_i X_i + 2By_i Y_i + Z_i), \quad (41)$$

$$c_p = (Ax_i^2 + By_i^2 + Cz_i + J), \quad (42)$$

Las raíces de la ecuación (39) son:

$$t_1 = \frac{-b_p + \sqrt{b_p^2 - 4a_p c_p}}{2a_p}, \quad (43)$$

$$t_2 = \frac{-b_p - \sqrt{b_p^2 - 4a_p c_p}}{2a_p}, \quad (44)$$

Si $b_p^2 - 4a_p c_p$ es menor a cero, no hay ninguna intersección con el paraboloide, si es mayor a cero hay dos puntos de intersección (en este caso es necesario analizar el modelo y elegir una respuesta, dependiendo de la geometría de nuestro modelo), y si es igual a cero solo hay un punto de intersección.

Sustituyendo el valor de t en las ecuaciones (34), (35) y (36), obtenemos el punto de incidencia $P_1(x_1, y_1, z_1)$.

2.6.3.4. Coordenadas de un vector normal a la superficie

Una vez obtenido el punto de incidencia en la superficie de segundo grado, es necesario encontrar el rayo reflejado. Para la obtención del rayo reflejado se requiere obtener el ángulo o dirección con que se refleja en la superficie de segundo orden, para lo cual primero se debe obtener un vector normal a la superficie en el punto de incidencia, el cual se obtiene mediante el gradiente de la superficie evaluado en el punto de incidencia.

El gradiente para una función $f(x, y, z)$ esta definido como:

$$\nabla f = \frac{\partial f}{\partial x} i + \frac{\partial f}{\partial y} j + \frac{\partial f}{\partial z} k, \quad (45)$$

si las derivadas parciales de $f(x, y, z)$ están definidas para el punto $P_0(x_0, y_0, z_0)$.

Para el caso de la superficie representada en la ecuación (38), tenemos que el vector normal \vec{N} es el gradiente en el punto de incidencia $P_1(x_1, y_1, z_1)$ del rayo con la superficie:

$$\nabla f |_{P_1} = 2Ax_1 i + 2By_1 j + Ck, \quad (46)$$

2.6.3.5. Ángulo de incidencia del rayo inicial R_i

Si la dirección del rayo incidente está dada por el vector de dirección $R_{di} = (X_{di} \ Y_{di} \ Z_{di})$ y el vector normal a la superficie de incidencia ya fue calculado, en ángulo α de incidencia del rayo sobre la superficie, es el ángulo entre los dos vectores, que puede ser obtenido como el producto escalar de los mismos:

$$\vec{R}_{di} \cdot \vec{N} = \|\vec{R}_{di}\| \|\vec{N}\| \cos \alpha, \quad (47)$$

$$\alpha = \arccos \left(\frac{\vec{R}_{di} \cdot \vec{N}}{\|\vec{R}_{di}\| \|\vec{N}\|} \right), \quad (48)$$

Para el caso de la superficie paraboloidal representada por (38):

$$\alpha = \left(\frac{2Ax_1 X_{di} + 2By_1 Y_{di} + CZ_{di}}{\sqrt{X_{di}^2 + Y_{di}^2 + Z_{di}^2}} \right) \left(\sqrt{4A^2 x_1^2 + 4B^2 y_1^2 + C^2} \right), \quad (49)$$

2.6.3.6. Cálculo del rayo reflejado R_r

Según las leyes de reflexión y refracción, el rayo reflejado se encuentra en el mismo plano que el rayo incidente y su normal y que el ángulo de reflexión es el mismo ángulo que el de incidencia. Por lo que podemos obtener el vector del rayo reflejado R_r como:

$$\vec{R}_r = \vec{R}_i \sin \alpha \cdot \hat{V}_{aux} + \vec{R}_i \cos \alpha \cdot \hat{N}, \quad (50)$$

donde

$$\hat{V}_{aux} = \hat{N} \times (\vec{N} \times \vec{R}_i), \quad (51)$$

y \vec{R}_i es el módulo del vector del rayo inicial R_i .

2.6.3.7. Cálculo de la potencia del rayo reflejado R_r

Se puede expresar la potencia del rayo reflejado R_r en términos del coeficiente de reflexión y de la potencia del rayo incidente inicial R_i :

$$P_{R_r} = RP_{R_i}, \quad (52)$$

en donde R es el coeficiente de reflexión.

El coeficiente de reflexión lo podemos calcular según las fórmulas de Fresnel [12, 13] para rayos con polarización paralela y normal con respecto al plano de polarización de la luz:

$$r_{\parallel} = \frac{\tan(\theta_1 - \theta_2)}{\tan(\theta_1 + \theta_2)} = \frac{n^2 \cos \alpha - \sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha}}{n^2 \cos \alpha + \sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha}}, \quad (53)$$

$$r_{\perp} = \frac{-\sin(\theta_1 - \theta_2)}{\sin(\theta_1 + \theta_2)} = \frac{\cos \alpha - \sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha}}{\cos \alpha + \sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha}}, \quad (54)$$

donde θ_1 es el ángulo de incidencia y θ_2 el ángulo de refracción, α es el ángulo de incidencia, y $n = \frac{n_2}{n_1}$ donde n_1 y n_2 son en este caso los índices de refracción del material del sensor y del medio circundante. Estas fórmulas son válidas cuando el ángulo α es menor al ángulo crítico de incidencia [7, 8, 11]:

$$\alpha_{crítico} = \arcsin\left(\frac{n_2}{n_1}\right), \quad \text{para } n_2 < n_1. \quad (55)$$

El coeficiente de reflexión para luz no polarizada es [7, 8, 12, 13]:

$$R = \frac{1}{2}(r_{\parallel} + r_{\perp}), \quad (56)$$

Para luz polarizada con un ángulo γ con respecto al plano de polarización y al plano de incidencia el coeficiente de reflexión es [7, 8, 12, 13]:

$$R = r_{\parallel} \cos^2 \gamma + r_{\perp} \sin^2 \gamma, \quad (57)$$

2.6.3.8. Cálculo del alcance del rayo reflejado R_r en la fibra óptica receptora

Un rayo reflejado podrá entrar en la fibra óptica receptora, si atraviesa en los límites del diámetro del núcleo de la fibra óptica y si llega con una inclinación dentro del cono de aceptación de la fibra receptora (ángulo menor que la apertura numérica para ese punto).

Por lo que primero se verifica que el punto de incidencia del rayo, se encuentre dentro de la circunferencia que forma el núcleo de la fibra óptica:

$(x-h)^2 + (y-k)^2 = \rho^2$, donde (h,k) son las coordenadas del centro del núcleo de la fibra óptica con un radio ρ en el plano z que se localiza el extremo de la fibra óptica receptora.

Si el punto de incidencia se encuentra dentro del núcleo de la fibra, entonces se procede a probar la condición del ángulo de incidencia α_i del rayo donde [11]:

$$\alpha_i < \arcsin\left(\frac{AN}{n_e}\right), \quad (58)$$

donde AN es la apertura numérica en el punto de incidencia y n_e es el índice de refracción de la superficie de segundo orden.

2.7 Conclusiones

El modelo matemático descrito en el presente capítulo se basa en los principios de la óptica geométrica. Este modelo toma como base los modelos desarrollado y probados en trabajos anteriores [11], la principal diferencia es que únicamente toma en cuenta superficies de segundo orden, y que además incluye los efectos de la polarización.

En el modelado de la fuente de radiación óptica, se toma en cuenta la forma de su área activa, la distribución de la intensidad sobre esta área y el patrón de radiación de la fuente.

Para el modelado de la superficie del elemento sensor, se utiliza el método algebraico de descripción de la superficie utilizando una ecuación de segundo orden.

El modelo puede ser utilizado para cualquier ecuación de segundo orden, el modelo también toma en cuenta la polarización que adquiere cada rayo después de la primera reflexión dentro del sensor.

Capítulo 3. Descripción del algoritmo y del programa de cálculo de las características de un sensor refractométrico

El objetivo del presente capítulo es explicar la estructura del algoritmo que permite encontrar la transmisión óptica del sensor y que está basado en el modelo matemático descrito en el capítulo anterior, así como explicar el funcionamiento del programa de cálculo que implementa el algoritmo mencionado y que se utilizó para realizar las simulaciones de las diferentes variantes de sensores.

A diferencia de los algoritmos y programas existentes, estas herramientas permiten la simulación numérica de los sensores refractométricos con un elemento de sensibilidad no solamente semiesférico, si no con cualquiera forma de su superficie que puede ser descrita por una ecuación de segundo orden. Los programas comerciales, tienen precios elevados, requieren de capacitación para su manejo, y no fueron diseñados para este tipo de aplicación específica, por lo que elaborar un programa dedicado al análisis de este tipo de sensores es conveniente por el ahorro en costos y tiempo.

3.1 Descripción del algoritmo a nivel de bloques

El algoritmo de cálculo se muestra en el diagrama de bloques de la figura 3.1, cuyos bloques se describen a continuación.

Algoritmo para la Simulación de Sensores Refractométricos en Fibras Ópticas

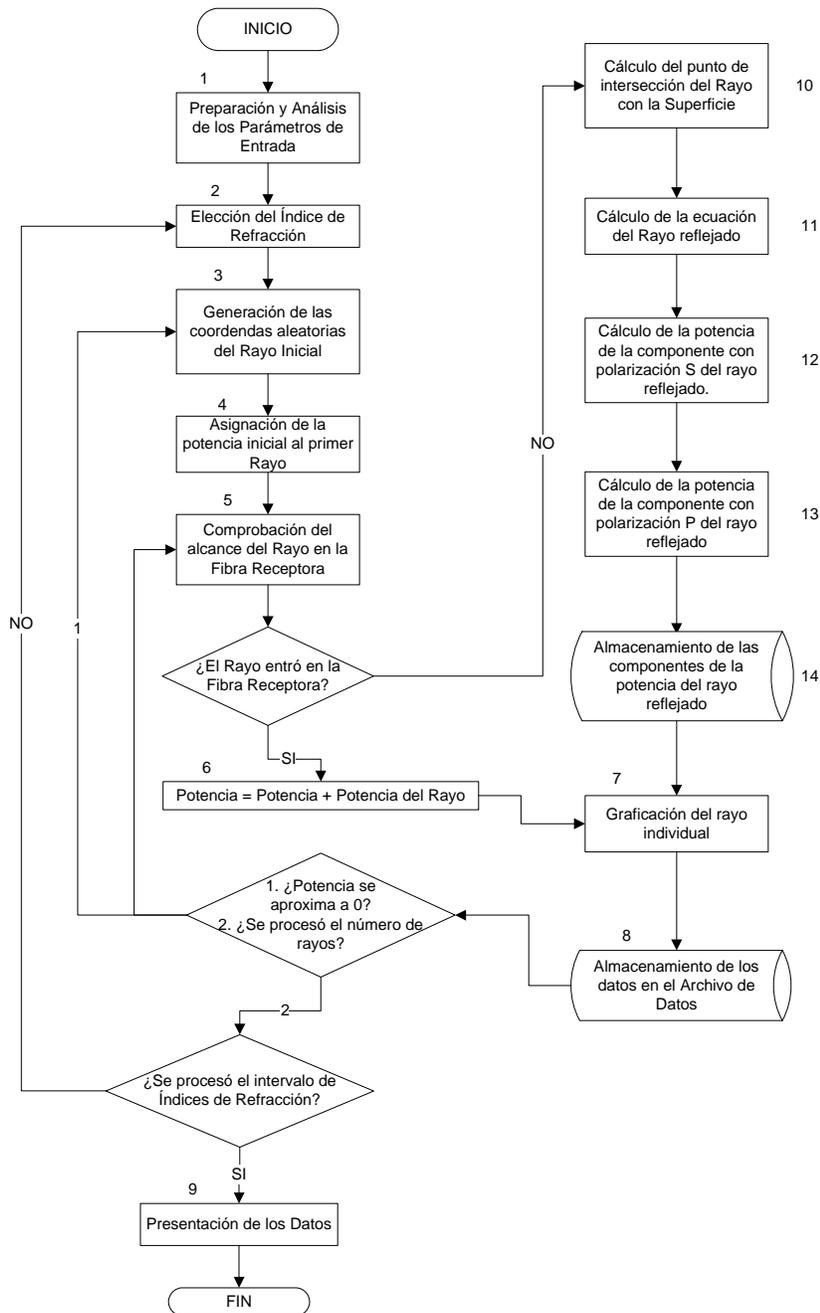


Figura 3.1 Diagrama de bloques del algoritmo de cálculo de la transmisión óptica de un sensor refractométrico.

Bloque 1. Preparación y análisis de los parámetros de entrada.

En este punto es necesario especificar las características de las fibras ópticas tanto trasmisora y receptora:

- Perfil escalonado o gradual;
- Apertura numérica de cada una de las fibras (ángulo máximo de aceptación);
- Diámetro de los núcleos de las fibras (fibras ópticas circulares);
- Distancia entre las fibras ópticas;
- Distancia entre las fibras y la superficie reflectora;

Descripción de la superficie reflectora:

- Ecuación o forma de la superficie reflectora;
- Índice de refracción de la superficie reflectora.

También, en este punto se deben introducir:

- el número de rayos que se desea simular;
- el número de reflexiones máximas que puede tener un rayo dentro de la superficie (este es un criterio que puede ser cambiado por el usuario, para descartar los rayos que excedan cierto número de reflexiones, mejorando la velocidad de cálculo, o bien por consideraciones de potencia tras un cierto número de reflexiones).

Bloque 2. Elección del índice de refracción.

Se debe especificar un intervalo de índices de refracción del medio externo (el que se va a medir), para obtener la respuesta del sensor ante los cambios en el medio externo. Es necesario especificar $n_{\text{mínimo}}$ y $n_{\text{máximo}}$ así como el tamaño del incremento para recorrer el intervalo dado.

Bloque 3. Generación de las coordenadas aleatorias del rayo inicial.

Utilizando el método de Monte Carlo, se generan las coordenadas del punto de salida del rayo y el vector de dirección del rayo.

Bloque 4. Asignación de la potencia inicial al primer rayo.

Se la asigna una magnitud de potencia al rayo inicial.

Bloque 5. Comprobación del alcance del rayo en la fibra receptora.

Se analiza la trayectoria del rayo, para comprobar si el rayo entró directamente en la fibra receptora.

Bloque 6. Potencia = potencia del rayo.

En este punto se calcula la potencia del rayo que ha ingresado en la fibra receptora, y se adiciona a la potencia total de la fibra receptora. Para cada rayo se calcula el coeficiente de reflexión de acuerdo con las fórmulas de Fresnel.

Bloque 7. Graficación del rayo individual.

Se hace el trazado del rayo y se grafica su trayectoria en el área de representación gráfica del programa, ya que el tener una representación gráfica nos da una idea de cómo trabaja el sensor, las trayectorias que siguen los rayos, la luz que sale del sensor o no entra a la fibra receptora, etc.

Bloque 8. Almacenamiento de los datos en el archivo de datos.

Es necesario generar un archivo con los datos de posición y potencia individuales de cada rayo para su análisis y procesamiento posterior.

Bloque 10. Cálculo de intersección del rayo con la superficie.

En el caso de que el rayo no haya entrado en la fibra receptora, es necesario calcular el punto de intersección con la superficie.

Bloque 11. Cálculo de la ecuación del rayo reflejado.

Una vez obtenido el punto donde el rayo incide en la superficie, se debe calcular la ecuación del rayo que se refleja para poder ir siguiendo su trayectoria.

Bloque 12. Cálculo de la potencia de la componente con polarización s del rayo reflejado.

Se calcula la potencia del rayo reflejado en la componente s , tomando en cuenta los coeficientes de reflexión, para poder seguir su evolución, se elimina cuando tiene una potencia muy pequeña ($P_{\text{terminal del rayo}} \leq 10^{-6} P_{\text{inicial del rayo}}$).

Bloque 13. Cálculo de la potencia de la componente con polarización p del rayo reflejado.

Se calcula la potencia del rayo reflejado en la componente p , tomando en cuenta los coeficientes de reflexión, para poder seguir su evolución, se elimina cuando tiene una potencia muy pequeña ($P_{\text{terminal del rayo}} \leq 10^{-6} P_{\text{inicial del rayo}}$).

Bloque 14. Almacenamiento de las componentes de la potencia del rayo reflejado.

Es necesario generar un archivo con los datos de potencia individuales de cada rayo para su análisis y procesamiento posterior.

Bloque 9. Presentación de los datos.

Al terminar el algoritmo se genera el archivo de texto con la transmisión absoluta T^* y se hace el trazado de rayos en la sección gráfica.

El proceso se repite como se puede ver en el bloque de decisión, hasta que la potencia del rayo es muy pequeña, y el rayo es descartado para seguirlo analizando, para el número de rayos que indicó el usuario en los parámetros iniciales, y para todo el barrido del intervalo del índice de refracción que también se especificó como parámetro inicial.

Al final se obtiene un gráfico de las trayectorias de los rayos dentro del sensor, y un archivo de datos con la potencia de cada rayo, así como con la potencia total de la luz en la fibra receptora, para un cierto intervalo de índices de refracción, con el que se pueden realizar distintos análisis de las características de transmisión y la calidad de una variante particular del sensor.

3.2 Implementación del Método de Monte Carlo

Se requieren generar cuatro valores aleatorios A_1, A_2, A_3, A_4 para determinar las coordenadas del rayo inicial, así como su dirección, en un intervalo entre $[0,1]$ lo cual se puede realizar a través de una función definida (*randomize*¹) en el lenguaje de programación que se está utilizando (*Visual Basic* en este caso). Se genera una coordenada aleatoria sobre la superficie del núcleo de la fibra, que será el punto de partida del rayo $(x_i \ y_i \ z_i)$:

¹ La función *randomize* de *Visual Basic* utilizada, genera números aleatorios no correlacionados, usando el reloj de la computadora como semilla para la generación de números aleatorios.

$$x_i = r_i \cos \theta_i - a, \quad (1)$$

$$y_i = r_i \sin \theta_i, \quad (2)$$

$$z_i = c, \quad (3)$$

en donde a es la distancia entre el eje del núcleo de la fibra óptica (valores establecidos por el usuario) y el eje de simetría del eje de la superficie de segundo orden, c es plano donde se encuentran las caras de los extremos de las fibras ópticas y la superficie de segundo orden, r_i y θ_i son las coordenadas polares del vector radial en el punto de salida del rayo, y están dados por:

$r_i = \rho \sqrt{A_1}$, para $0 \leq r_i \leq \rho$ y $0 < A_1 < 1$ donde ρ es el radio del núcleo de la fibra óptica, y A_1 es un número aleatorio;

$\theta_i = 2\pi A_2$, para $0 \leq \theta_i \leq 2\pi$ $0 < A_2 < 1$ donde A_2 es otro número aleatorio.

Las coordenadas de la dirección del rayo inicial $(X_{di} \ Y_{di} \ Z_{di})$ son:

$$X_{di} = \sin \phi_i \cos \psi_i, \quad (4)$$

$$Y_{di} = \sin \phi_i \sin \psi_i, \quad (5)$$

$$Z_{di} = \cos \phi_i, \quad (6)$$

donde ϕ_i se puede obtener de la ecuación (7), utilizando para su resolución el método numérico iterativo de secantes ;

$$\phi_i \sin \phi_i = \frac{NA_i}{n_s} \arcsin \left(\frac{NA_i}{n_s} \right) A_3, \quad \text{para } 0 \leq \phi_i < \phi_{Sm\acute{a}x} \text{ y } 0 < A_3 < 1, \quad (7)$$

$$\psi_i = 2\pi A_4, \quad \text{para } 0 \leq \psi_i \leq 2\pi \text{ y } 0 < A_4 < 1. \quad (8)$$

3.3 Secuencia de cálculos

En el algoritmo de la sección 3.1 la secuencia de los cálculos es la siguiente:

1. Obtener las coordenadas de salida del rayo inicial R_i de forma aleatoria.
2. Obtener la dirección del rayo inicial R_i de forma aleatoria.
3. Calcular si el rayo ingresó en la fibra óptica receptora.
4. Calcular la potencia del rayo que ingresó en la fibra óptica receptora.

5. Si el rayo no ingresó a la fibra receptora, calcular el punto de intersección con la superficie de segundo orden.
6. Calcular el ángulo incidencia del rayo.
7. Obtener el vector del rayo reflejado.
8. Calcular la potencia del rayo reflejado.

Esta secuencia se debe repetir para el número de rayos indicado en los parámetros de entrada, así como repetirse para el intervalo de índices de refracción establecido también en los parámetros de entrada.

3.4 Descripción del programa de cálculo

El programa de cálculo utiliza el lenguaje de programación Visual Basic ya que este lenguaje de programación permite la generación de una interfaz gráfica de una manera relativamente sencilla, la cual es deseable para tener mayor facilidad de manejo en cuanto a la variación de los parámetros. También consta de un área en la que se puede ver una representación gráfica del sensor, y del trazado de rayos, además de generar un archivo con la relación de potencia en las fibras ópticas, para el cálculo de las características de transmisión del sensor.

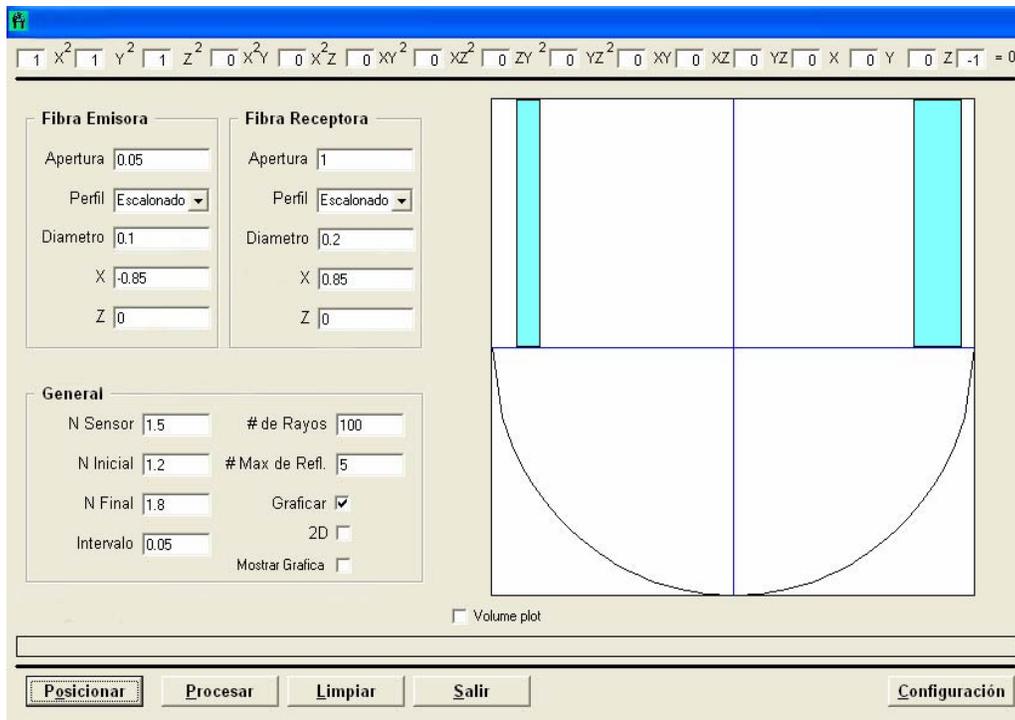


Figura 3.2 Interfase del programa de cálculo de la transmisión óptica de un sensor refractométrico de fibra óptica.

Como se puede apreciar en la figura 3.2, la interfaz del programa consta de diversos campos (parámetros de entrada) que deben ser llenados por el usuario:

- ecuación que describe la estructura sensora de segundo orden;
- apertura numérica de cada una de las fibras;
- diámetro del núcleo de las fibras;
- tipo de perfil (escalonado o gradual) de cada una de las fibras;
- posición de las fibras sobre la superficie del sensor en los planos x , y , z .

En cuanto a la segunda parte (general), se debe indicar el índice de refracción del sensor (el cual se considera idéntico al del núcleo de la fibra), el número de rayos que salen de la fibra, el número máximo de reflexiones de un rayo, y el intervalo de índices de refracción del medio externo, así como el paso para recorrer el intervalo.

Los campos de Graficar y 2D nos permiten visualizar el trazado de rayos en la parte derecha de la pantalla, ya sea en la proyección en el plano xz o yz .

Por último para el funcionamiento del programa, se utilizan los botones de posicionar (primero), el cual traza el sensor y las fibras en base a los parámetros definidos, y el de procesar que inicia el trazado de rayos y el botón de configuración para indicar en qué archivo se guardarán los datos de salida.

A continuación en la figura 3.3 podemos ver algunos ejemplos de los resultados de cálculo de las trayectorias de los rayos obtenidos mediante este programa:

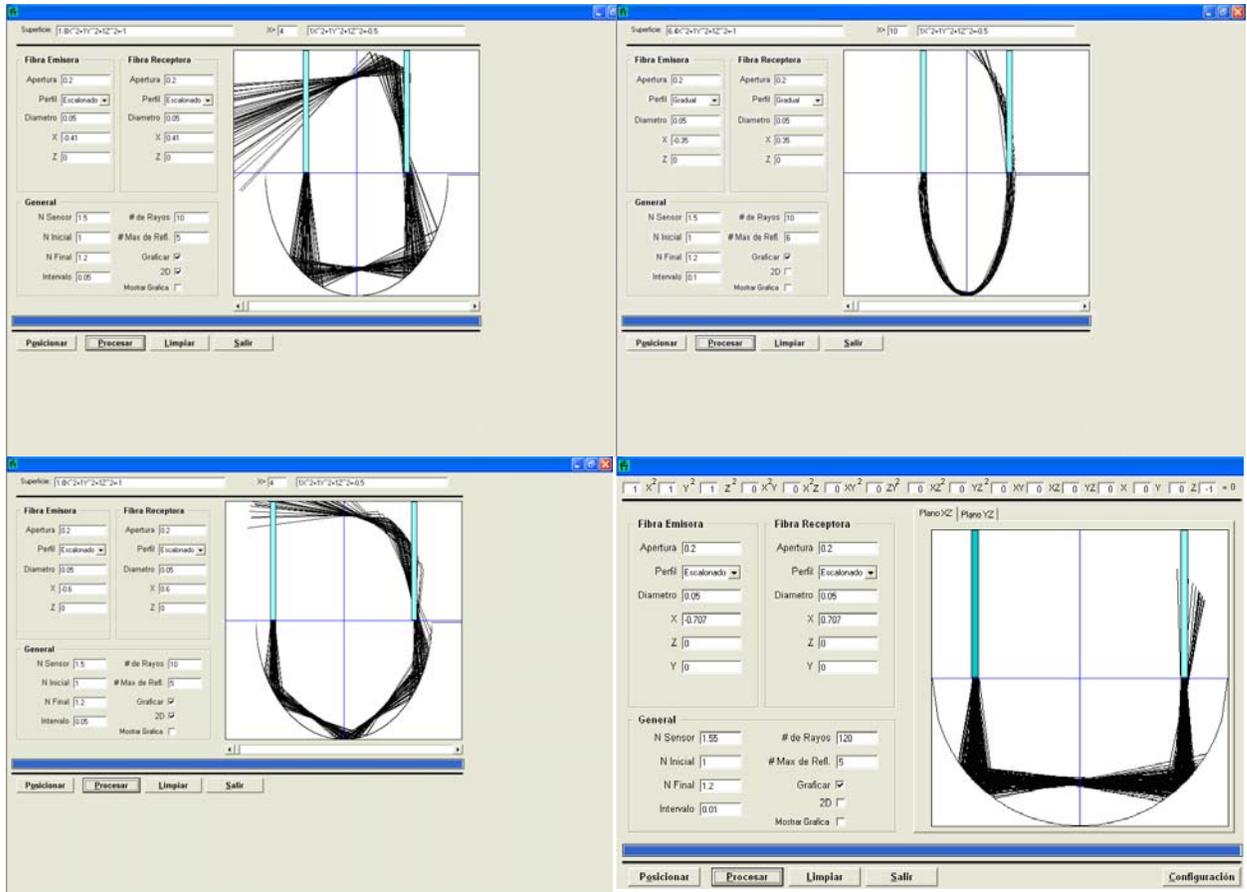


Figura 3.3. Ejemplos del cálculo de las trayectorias de los rayos obtenidos mediante el programa de trazado de rayos (se especificarán las variaciones entre cada una de las versiones posteriormente).

3.5 Validación del funcionamiento correcto del algoritmo y del programa de cálculo

Para la verificación del funcionamiento correcto de este programa, se realizaron pruebas utilizando las variantes del sensor probadas en trabajos existentes, estos son algunas variantes del sensor de forma semiesférica [1]-[4].

A continuación, para estas variantes, se compararán los resultados generados con el programa elaborado, con los resultados existentes (tanto simulados como experimentales) reportados en las referencias [1]-[4].

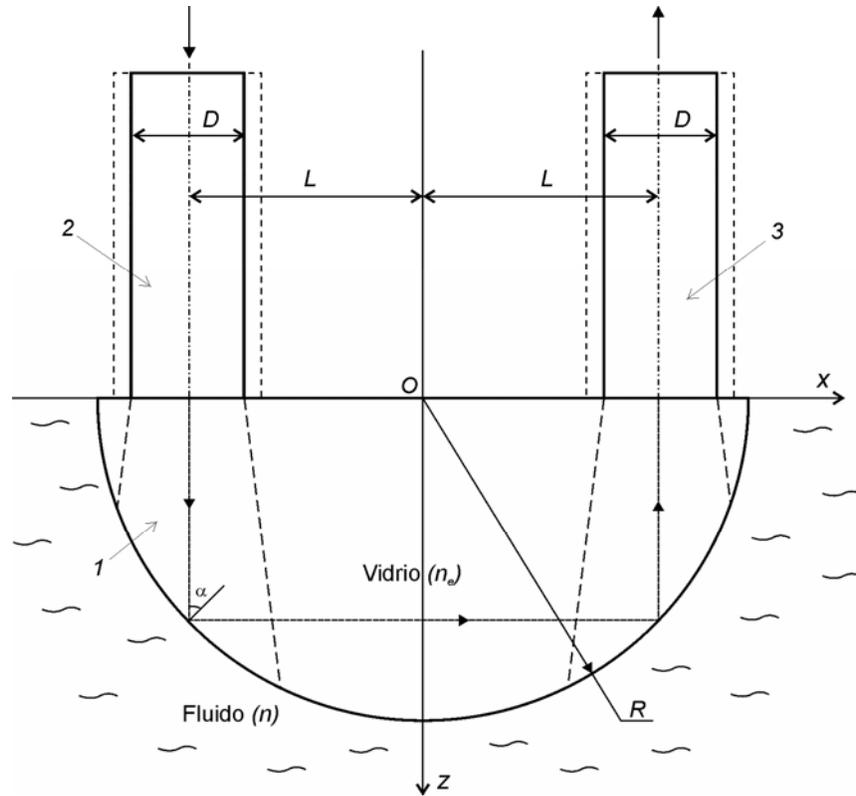


Figura 3.4. Una variante de un sensor refractométrico de forma semiesférica [2] utilizado para las pruebas. (1) elemento semiesférico transparente dieléctrico; (2) la fibra óptica de entrada; (3) la fibra óptica de salida. El rayo axial de la fibra óptica de entrada se muestra para el caso de dos reflexiones seriales en la superficie del elemento semiesférico. Los parámetros del sensor están descritos en el texto.

La primera serie de cinco gráficas fueron obtenidas con el programa elaborado (que se llamará de aquí en adelante SRFO), en base a los parámetros establecidos en la referencia [2]. En la referencia [2] se consideró el sensor semiesférico dieléctrico mostrado en la figura 3.4, en donde el radio de la semiesfera es R , con dos fibras ópticas (1) y (2) y un diámetro del núcleo D . El índice de refracción del elemento semiesférico elaborado con un material dieléctrico transparente con un índice de refracción igual al del núcleo de las fibras ópticas $n_e=1.45$. Las fibras ópticas son multimodales de índice escalonado, tienen parámetros idénticos: un núcleo con un diámetro D y apertura numérica AN en el aire. Las fibras se encuentran a ángulos rectos con respecto a la cara plana de la superficie del elemento, y están colocadas de forma simétrica con respecto al eje z , a una distancia L desde el eje. Se utilizaron los siguientes parámetros geométricos adimensionales:

$$\Phi=D/R \text{ y } \Lambda=L/R$$

En [2], el análisis fue realizado para el caso de luz monocromática no polarizada.

A continuación (figura 3.5) se muestra la gráfica generada utilizando SRFO, correspondiente a la figura 3, de la referencia [2], que muestra la transmisión del transductor T versus la

posición adimensional de la fibra Λ en el intervalo $\Lambda=0.6$ hasta $\Lambda=1$ bajo $\Phi=0.05$ y una $AN=0.2$ para el caso del elemento semiesférico en el aire. Esta figura fue comparada en la referencia [2] con datos experimentales, demostrando un comportamiento muy similar a la curva generada por el programa SRFO.

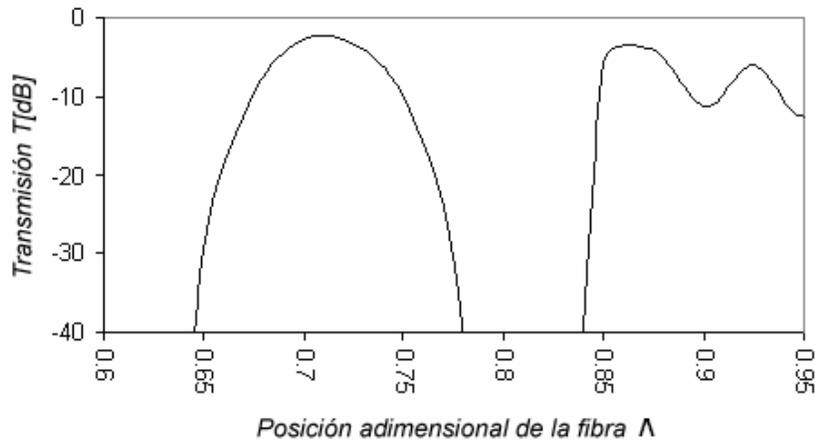


Figura 3.5 Gráfica obtenida al utilizar SRFO, que coincide con la figura 3 de la referencia [2]: T versus la posición adimensional de la fibra Λ en el intervalo $\Lambda=0.6$ hasta $\Lambda=1$ bajo $\Phi=0.05$ y una $AN=0.2$ para el caso del elemento semiesférico en el aire.

La siguiente gráfica (figura 3.6) obtenida con los datos generados por el programa SRFO, es igual a los resultados obtenidos en la figura 4 de la referencia [2], correspondientes a la transmisión del transductor, ante la variación de la posición Λ de las fibras, para diferentes valores de AN . Esta gráfica muestra el efecto de la apertura numérica de las fibras, cuyo incremento resulta en un incremento del ancho de la zona de transmisión.

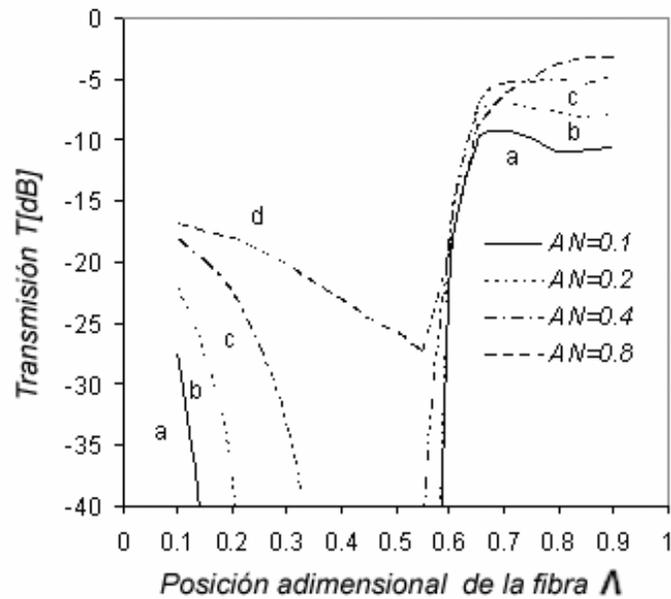


Figura 3.6 Gráfica generada con el SRFO, correspondiente a la figura 4 de la referencia [2]: Transmisión del transductor versus la posición adimensional de las fibras Λ (en el intervalo $\Lambda=0.5 \Phi$ hasta $\Lambda=1-0.5 \Phi$) para un elemento de superficie semiesférica bajo $\Phi=0.2$ y una apertura numérica $AN=0.1$ (curva a), 0.2 (curva b), 0.4 (curva c), 0.8 (curva d).

La siguiente gráfica (figura 3.7) generada con los datos del SRFO, corresponde a la figura 5 de la referencia[2], en la que se muestra la transmisión del sensor, para diferentes variaciones del índice de refracción del medio externo, para diferentes diámetros Φ , para una apertura $AN=0.2$ y una posición relativa $\Lambda=0.707$.

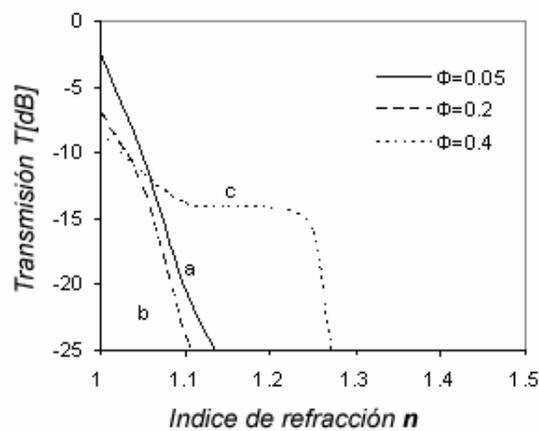


Figura 3.7 Gráfica generada con los datos del SRFO, correspondiente a la figura 5 de la referencia [2]: Transmisión del transductor versus el índice de refracción del medio externo n , para un intervalo de entrada $n=1.0$ hasta $n=1.5$ con $\Lambda=0.707$, $AN=0.2$ y $\Phi=0.05$ (curva a), 0.2 (curva b), 0.4 (curva c).

La figura 3.8 muestra la gráfica generada con los resultados del SRFO, correspondientes a la figura 6 de la referencia [2], que muestra la transmisión versus el índice de refracción n , para la misma posición Λ , y un mismo diámetro D , variando la apertura numérica AN de las fibras.

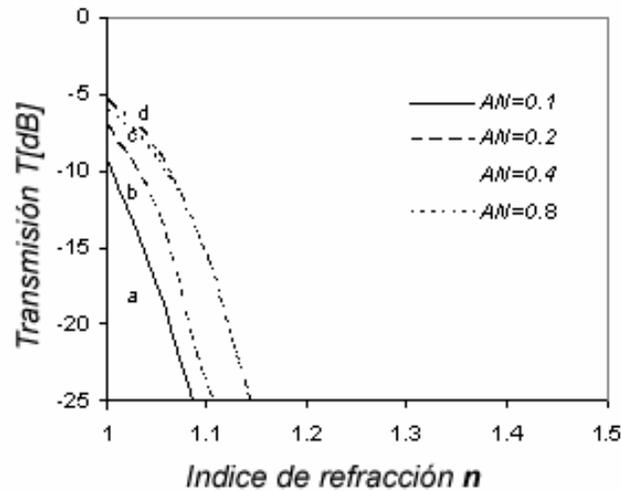


Figura 3.8 Transmisión versus índice de refracción del medio externo n para un intervalo de entrada $n=1$ hasta $n=1.5$ con $\Lambda=0.707$, $\Phi=0.2$, y $AN=0.1$ (curva a), 0.2 (curva b), 0.4 (curva c), 0.8 (curva d).

La figura 3.9 muestra la transmisión relativa T^* del transductor en un intervalo de índices de refracción del medio externo, para diferentes posiciones relativas de las fibras Λ . En esta gráfica se pueden apreciar las diferentes zonas de transmisión según la posición relativa de las fibras.

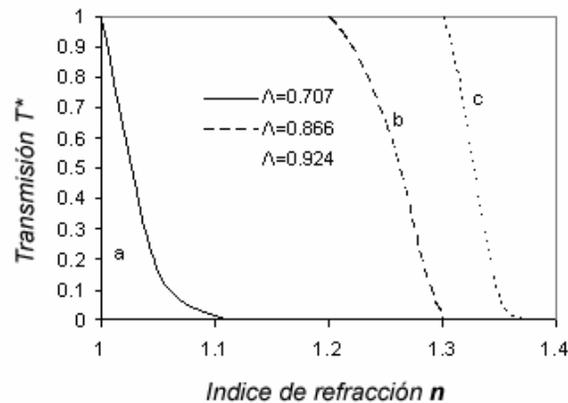


Figura 3.9 Gráfica generada con los datos del SRFO, correspondiente a la figura 6 de la referencia [2]: Transmisión relativa del transductor T^* versus el índice de refracción del medio externo n en un intervalo de $n=1$ hasta $n=1.4$ para una posición de las fibras de $\Lambda=0.707$ (curva a), $\Lambda=0.866$ (curva b), $\Lambda=0.924$ (curva c), y un diámetro relativo $\Phi=0.05$.

Las pruebas experimentales para estas gráficas se explican detalladamente en la sección 7, de la referencia [2].

Las siguiente serie de 5 gráficas, fueron elaboradas con el programa SRFO, a partir de los datos proporcionados en la referencia [3], para la validación del programa. En las que la característica de transmisión tiene una forma de escalón para ciertos intervalos de n .

La diferencia del elemento transductor empleado en esta referencia, consiste en el índice de refracción del elemento sensor n_e , que en la referencia [2] era de 1.45, mientras que en la referencia [3] es de 1.55. Los parámetros descritos en la figura 3.4, son los mismos para este transductor.

La figura 3.10 que se presenta a continuación, corresponde a la figura 3 de la referencia [3], en la que se aprecia la transmisión relativa del transductor T^* ante variaciones en el índice de refracción de medio externo, para distintas posiciones relativas Λ de las fibras.

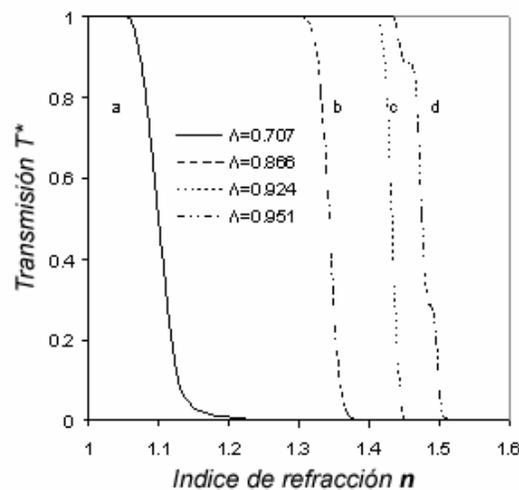


Figura 3.10 Gráfica generada con los datos del SRFO correspondiente a la figura 3 de la referencia [3]: Transmisión relativa del transductor T^* versus el índice de refracción del medio externo n , para $n=1$ hasta $n=1.6$, $\Phi=0.05$, $AN=0.2$ y posiciones relativas de las fibras $\Lambda=0.707$ (curva a), $\Lambda=0.866$ (curva b), $\Lambda=0.924$ (curva c), $\Lambda=0.951$ (curva d).

La figura 3.11 muestra la gráfica obtenida con los datos del SRFO, correspondientes a la figura 4 de la referencia [3] que muestra la transmisión relativa T^* versus el índice de refracción, para diferentes índices de refracción del material del elemento n_e .

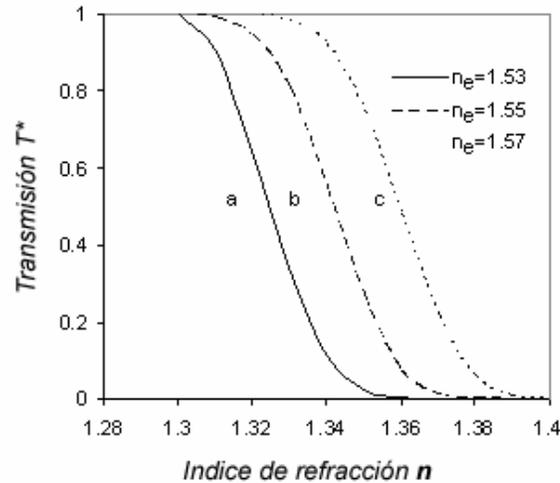


Figura 3.11 Gráfica generada con los datos del SRFO correspondiente a la figura 4 de la referencia [3]: Transmisión relativa T^* del transductor versus el índice de refracción del medio externo n , para $\Lambda=0.866$, $\Phi=0.05$, $AN=0.2$ y $n_e=1.53$ (curva a), $n_e=1.55$ (curva b), $n_e=1.57$ (curva c).

La figura 3.12 muestra el funcionamiento del sensor para variaciones en el diámetro relativo de las fibras, que aumentan la sensibilidad promedio del transductor, correspondiente a la figura 5 de la referencia [3].

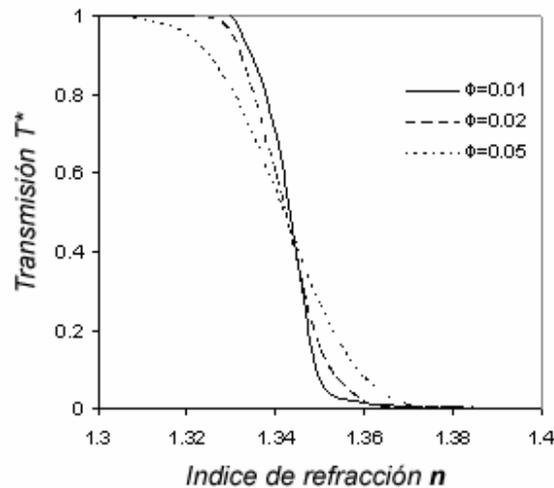


Figura 3.12 Gráfica generada con los datos del SRFO correspondiente a la figura 5 de la referencia [3]: Transmisión relativa T^* del transductor versus el índice de refracción del medio externo n , para $n_e=1.55$, $\Lambda=0.866$, $AN=0.2$, $\Phi=0.01$ (curva a), 0.02 (curva b), 0.05 (curva c).

La figura 3.13 comprueba la característica de transmisión para variaciones en la apertura numérica.

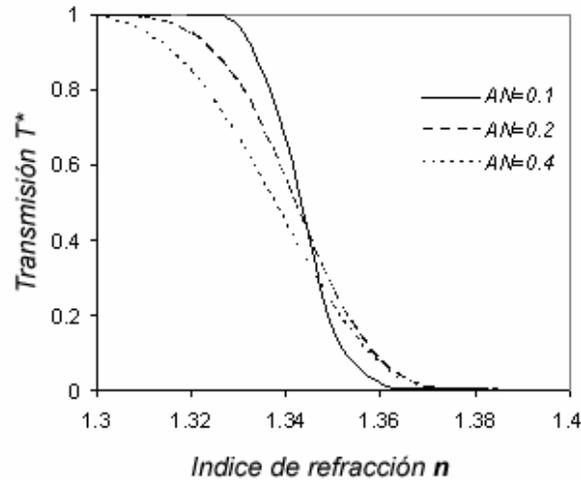


Figura 3.13 Transmisión relativa T^* del transductor versus el índice de refracción del medio externo n , para $n_e=1.55$, $\Lambda=0.866$, $\Phi=0.05$, $AN=0.1$ (curva a), 0.2 (curva b), 0.4 (curva c).

Finalmente la figura 3.14 correspondiente a la figura 7 de la referencia [3], comprueba la característica de transmisión relativa del sensor para diferentes posiciones relativas Λ de las fibras con distinto índice de refracción del material del elemento sensor n_e .

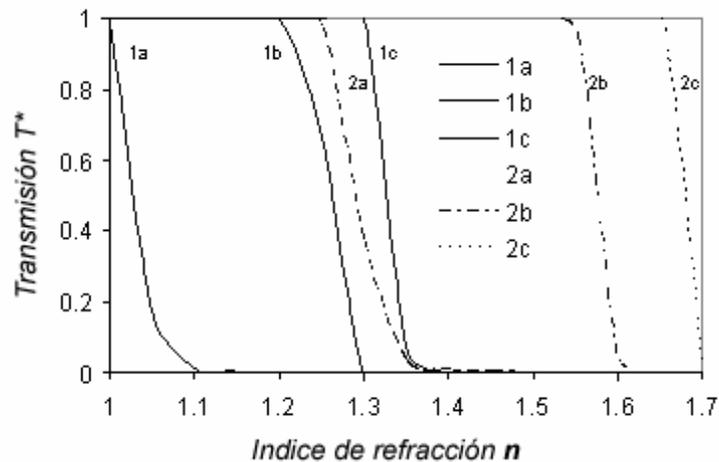


Figura 3.14 Transmisión relativa T^* del transductor versus el índice de refracción del medio externo n , para $\Phi=0.05$, $AN=0.2$, $\Lambda=0.707$ (a), 0.866 (b), y 0.924 (c) y para $n_e=1.45$ (líneas sólidas), $n_e=1.82$ (líneas punteadas). El cálculo se realizó con el programa SRFO para el sensor de la figura 7 del trabajo [3].

La comparación de estos resultados con los datos existentes muestra que hay una excelente correspondencia entre los resultados de nuestra simulación numérica y los resultados obtenidos por otros autores citados previamente.

3.6 Conclusiones

El algoritmo de análisis numérico que se describe en este capítulo implementa el modelo matemático expuesto en el capítulo anterior del presente trabajo. Este algoritmo realiza el trazado de rayos para una forma de superficie del sensor descrita por una ecuación de segundo orden y considera los parámetros geométricos del sensor, las constantes ópticas de los materiales, y la distribución angular de la potencia de la radiación óptica en la entrada al sensor.

El programa de cálculo que implementa el algoritmo utiliza el lenguaje de programación *Visual Basic*, y tiene una interfaz gráfica cómoda para la presentación de la geometría del sensor y las trayectorias de los haces.

Las pruebas de simulación numérica realizadas con algunas variantes de un sensor refractométrico semiesférico muestran una buena coincidencia de nuestros resultados con los datos existentes sobre las características de los sensores descritos en la literatura científica, lo que permite llegar a una conclusión que el algoritmo y el programa de cálculo SRFO funcionan correctamente, y pueden ser utilizados para los fines del presente trabajo.

Aunque solo hay resultados para sensores semiesféricos en trabajos anteriores, el programa y algoritmo funcionarán correctamente para sensores con otras formas geométricas, dado que el algoritmo no cambia, y lo único que es necesario modificar para cada caso por como fue diseñado el programa SRFO, son los coeficientes de la ecuación general, que bien puede ser una semiesfera, u otra superficie de segundo orden.

Capítulo 4. Análisis de resultados del modelado numérico de las características de un sensor refractométrico

El objetivo de este capítulo es analizar las posibilidades de mejora de algunas de las características de un sensor refractométrico tales como linealidad de la respuesta para cambios del índice de refracción del medio externo, ante las modificaciones de sus diferentes parámetros, para encontrar las formas de superficie que ofrecen mejores características que las formas actualmente conocidas. A partir de estas modificaciones se busca encontrar la posibilidad de modificar las características del sensor para obtener una respuesta deseable (con transmisión para un intervalo de índices de refracción determinado, con un comportamiento lineal o de escalón unitario) según la aplicación en donde sea utilizado el sensor.

4.1 Metodología para la comparación de los sensores con diferentes formas geométricas del elemento de detección.

4.1.1 Metodología de comparación de las características para diferentes variantes de los sensores semiesféricos.

El punto de partida de este análisis, es la comparación de distintas variantes de sensores elipsoidales y paraboloidales contra la respuesta de un sensor semiesférico básico. El sensor semiesférico fue, analizado con detalle en [1]- [3] (figura 4.2.)

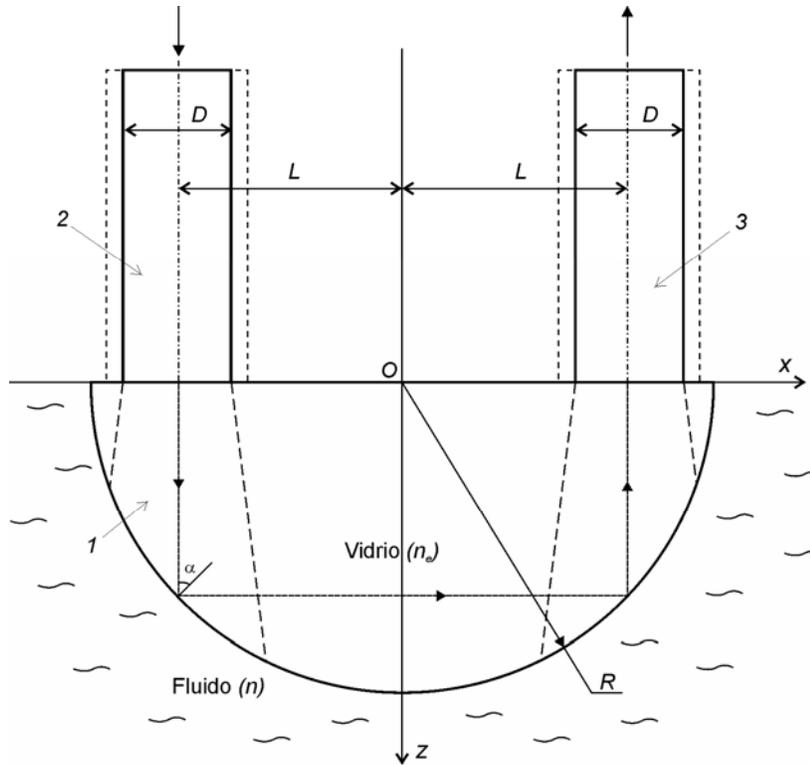


Figura 4.2. Sensor refractométrico de forma semiesférica utilizado para las pruebas: (1) elemento semiesférico transparente dieléctrico; (2) la fibra óptica de entrada; (3) la fibra óptica de salida. El rayo axial de la fibra óptica de entrada se muestra para el caso de dos reflexiones seriales en la superficie del elemento semiesférico.

En [1], se presentan distintas combinaciones de parámetros para un sensor con elemento de detección semiesférico, que muestran distintas características en su respuesta. La cantidad de combinaciones posibles, tomando en cuenta los 8 parámetros que se pueden variar para este sensor (diámetro de cada fibra, posición de cada fibra, apertura numérica de cada fibra, índice de refracción del material del elemento de detección, radio de la semiesfera), se podrían obtener 40,320 combinaciones de parámetros y 40,320 sensores.

Para este problema no se puede hablar de encontrar una sola combinación óptima para obtener el “mejor” sensor, debido a que hay distintos criterios de calidad para evaluar el desempeño de un sensor refractométrico. Por ejemplo se pueden encontrar los parámetros para tener un sensor con la mayor linealidad, pero es posible que este sensor no opere en el intervalo de índice de refracción deseado, lo cual sugiere la ausencia de un mínimo global. Aún si se eligiera solo uno de estos criterios, la búsqueda de la mejor combinación requeriría de un sistema de optimización, que está fuera de los alcances de esta tesis.

Con la intención de encontrar una variante base del sensor con elemento de detección semiesférico, para hacer la comparación de sus características con las de nuevos sensores que

tengan un elemento de detección con otra geometría, se ha seleccionado una fracción del espectro de posibilidades (de las 40,320 configuraciones posibles). Como parte de la metodología de optimización del sensor según un criterio particular de calidad, se propone dejar fijos el índice de refracción del sensor y la apertura numérica de las fibras ópticas, debido a que para la construcción física de este tipo de diseños, cambiar el índice de refracción de la superficie implicaría tener varias semiesferas y un conjunto de fibras ópticas cuyo índice de refracción correspondiera al de cada sensor.

En cambio se puede obtener con mayor facilidad un conjunto de fibras de distintos diámetros, las cuales pueden ser colocadas a diferentes distancias del eje z del sensor y con ello generar respuestas con características de linealidad o intervalos de índices de refracción diferentes.

Para tener criterios de selección de los parámetros del sensor semiesférico, se presentan los siguientes criterios de desempeño.

1. Linealidad de la respuesta: uno de los criterios más apreciados para el análisis del desempeño de un sensor refractométrico es la linealidad de la curva de transmisión relativa $T^*(n)$. En este trabajo se propone el siguiente criterio, denominado integral del valor absoluto del error relativo promedio (*IAERP*), que representa el porcentaje de desviación promedio de un punto dentro de la curva de transmisión relativa $T^*(n)$ con respecto a una línea recta de referencia.

$$IAERP = \frac{1}{i} \sum_{i=1}^n \frac{|e(i)| * 100}{y_r(i)}, \quad (0)$$

donde i es el número de puntos del intervalo de medición, $e(i)$ es el error resultante de la resta entre un punto de la curva de transmisión relativa $T^*(n)$ y la recta de referencia y_r .

2. Intervalo de entrada (definido previamente en la sección 4.2).

3. Intervalo de salida (definido previamente en la sección 4.2).

4. Pendiente de la línea de referencia: es la inclinación de la recta que pasa por los puntos obtenidos de los intervalos de entrada y de salida.

Los resultados del análisis de los parámetros mencionados anteriormente, se muestran en la Tabla 4.1. Se puede observar que la combinación que tiene la mayor linealidad (menor *IAERP*, 3.53), es la que tiene una distancia entre las fibras de $L=0.866$, con las fibras de un diámetro $D=0.02$. El mayor intervalo de entrada (0.070) se obtiene con las fibras de un diámetro $D=0.05$, colocadas a una distancia de $L=0.707$, para esta combinación también se obtiene la menor magnitud de

pendiente (-14.552) de la línea de referencia. El intervalo de salida mayor (0.9) se obtiene con fibras de diámetro $D=0.02$, colocadas a una distancia de $L=0.924$.

Parámetros		Criterios			
Distancia entre las fibras	Diámetro de las fibras	IAERP	Intervalo de entrada	Intervalo de salida	Pendiente de la curva de referencia
0.707	d=0.01	81.18	0.035	0.898	-32.983
	d=0.02	31.40	0.043	0.897	-26.493
	d=0.05	5.51	0.070	0.896	-14.552
0.866	d=0.01	8.68	0.017	0.896	-61.198
	d=0.02	3.53	0.022	0.893	-43.836
	d=0.05	9.27	0.030	0.893	-32.322
0.924	d=0.01	10.15	0.014	0.897	-73.382
	d=0.02	12.60	0.030	0.900	-51.537
	d=0.05	9.14	0.031	0.898	-43.994
0.951	d=0.01	No hay transmisión			
	d=0.02	14.05	0.001	0.566	-514.88
	d=0.05	12.12	0.013	0.804	-69.038

Tabla 4.1. Parámetros de un sensor semiesférico, y los valores de los criterios de optimización para el desempeño del sensor.

La combinación de parámetros elegida como variante base de la semiesfera, para ser comparada con las variantes elipsoidales y paraboloidales que se analizan a continuación es la que se encuentra remarcada en gris en la tabla 4.1. Se eligió esta combinación de parámetros por tener el mayor intervalo de entrada (0.070), la menor magnitud de pendiente (-14.552), una buena linealidad (5.51, que corresponde a la segunda mejor) y un intervalo de salida superior al promedio (0.896 vs. 0.858 en promedio).

4.1.2 Metodología para la comparación de las distintas formas geométricas.

En el presente trabajo se ha seleccionado una sola de las variantes de sensor con elemento de detección semiesférico, analizado en la referencia [1], para utilizar como base de acuerdo a los criterios que se establecieron para este trabajo en la sección 4.1.1, pero la misma metodología se puede aplicar para hacer una comparación con cualquiera de las combinaciones reportadas en [1].

Las características del sensor semiesférico (figura 2) seleccionado son:

- Diámetro de las fibras ópticas $D=0.05$;
- Posición de las fibras con respecto al eje z de la semiesfera $L=0.707$;
- Índice de refracción del elemento $n_e=1.55$;
- Fibras ópticas multimodo de índice escalonado;
- Apertura numérica de las fibras $AN=0.2$;
- Luz monocromática no polarizada;

Esta semiesfera esta representada por la ecuación:

$$x^2 + y^2 + z^2 = 1, \text{ para } z \leq 0 \quad (1)$$

La característica de transmisión relativa $T^*(n)$ para distintos índices de refracción n del medio externo para el sensor semiesférico de la ecuación (1), es la que se muestra en la figura 4.3. Esta gráfica muestra un intervalo de entrada $\Delta n = 0.05$ y una no linealidad máxima $\Delta N_{\max} = 6.37\%$, lo cual hace de este sensor una buena opción para aplicaciones en las que se requiera una respuesta lineal en un intervalo de índices de refracción n ente 1.075 y 1.125.

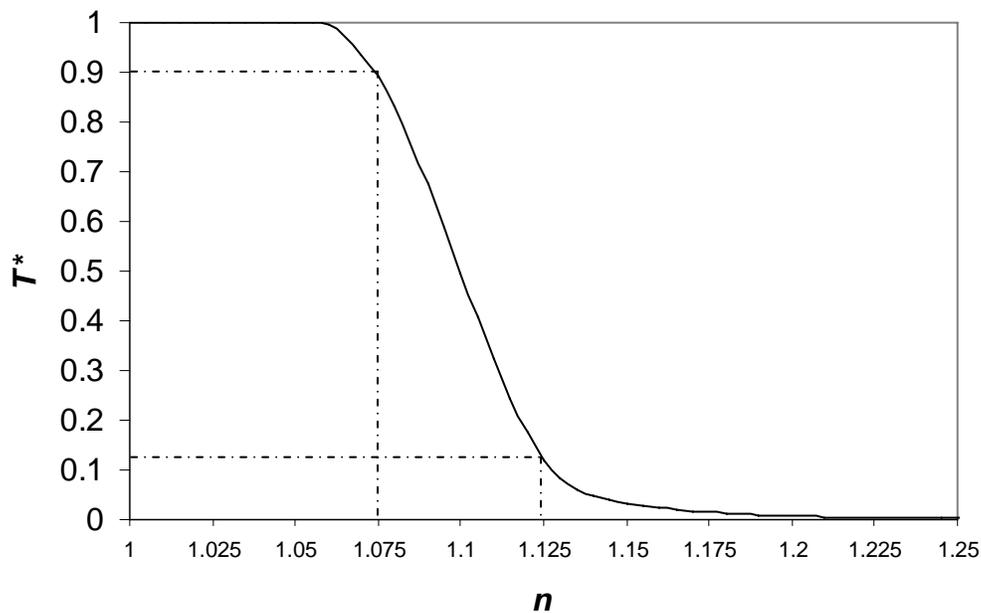


Figura 4.3 Transmisión relativa $T^*(n)$ del sensor semiesférico para diferentes índices de refracción n del medio externo, utilizada como base para la comparación.

La semiesfera es un caso particular del elipsoide, por lo que la metodología para comparar estas dos formas del elemento de detección, fue a partir de variaciones cercanas a las del elemento de detección semiesférico seleccionado.

Las variaciones de las geometrías analizadas del transductor se muestran en la Tabla 4.2.

Valores constantes en el eje x y en el eje y , variables en el eje z	Valores constantes en el eje z y en el eje y , variables en el eje x .
<p>a) Perfil de los elipsoides en el plano xz, mismo valor en el eje x que la semiesfera, valores mayores que la semiesfera en el eje z, con el mismo perfil que la semiesfera vistos en el plano xy.</p>	<p>c) Perfil de los elipsoides en el plano xz, mismo valor en el eje z que la semiesfera, valores mayores que la semiesfera en el eje x, con el mismo perfil que la semiesfera vistos en el plano yz.</p>
<p>b) Perfil de los elipsoides en el plano xz, mismo valor en el eje x que la semiesfera, valores menores que la semiesfera en el eje z, con el mismo perfil que la semiesfera vistos en el plano xy.</p>	<p>d) Perfil de los elipsoides en el plano xz, valor más grande que la semiesfera en el eje z, valores mayores y menores que la semiesfera en el eje x.</p>
	<p>e) Perfil de los elipsoides en el plano xz, valor menor que la semiesfera en el eje z, valores mayores y menores que la semiesfera en el eje x.</p>

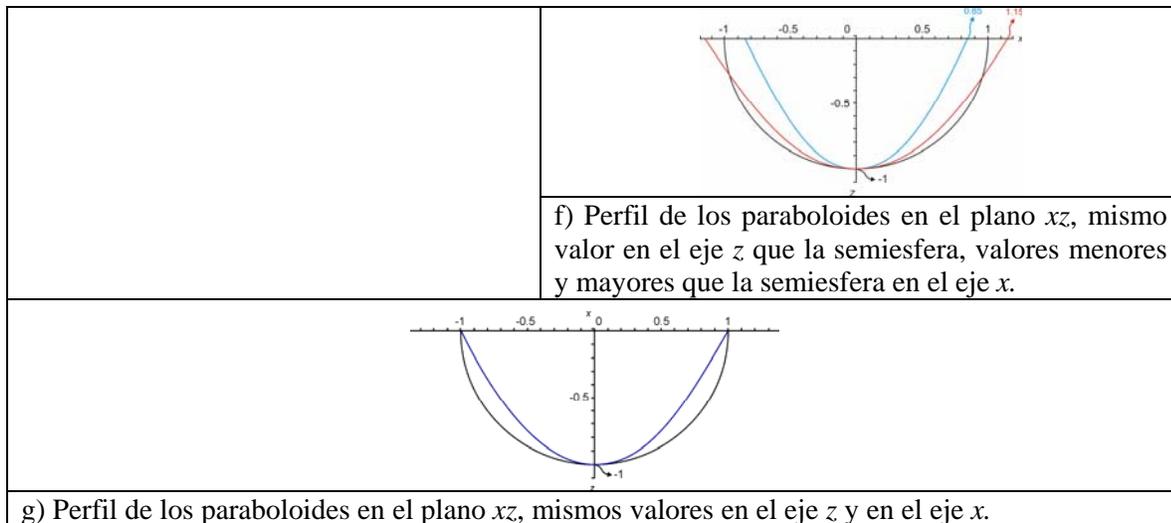


Tabla 4.2. Variaciones de parámetros para el análisis de transductores con formas elipsoidales y paraboloidales

Primero se generaron elipsoides que vistos en el plano xy tuvieran el mismo perfil que las semiesferas (casos a y b de la Tabla 4.2). En el plano xz , se mantuvo fija la distancia en x , y se modificó el tamaño en z para obtener tamaños del elemento, mayores y menores que los de la semiesfera (Casos a y b de la Tabla 4.2).

Después se generaron elipsoides en donde el plano yz es igual al perfil de la semiesfera (caso c de la Tabla 4.2), el tamaño en el plano z se mantuvo fija, y se generó una serie de variaciones con distancias en el plano x mayores y menores que en la semiesfera.

Por último se hicieron cambios en los tamaños en los ejes x y z (casos d y e de la Tabla 4.2), en donde los elipsoides no coinciden ni en la distancia en el eje x , ni en la distancia en el eje z con la semiesfera.

La selección de los paraboloides para analizar en este capítulo, partió de tres variantes que se tomaron como base. Se inició con un paraboloide que coincidiera con la esfera en los extremos en x , y en el extremo en z (caso g de la Tabla 4.2). El segundo paraboloide tiene coincidencia en el extremo del eje z pero la distancia en x es menor que la de la semiesfera (caso f1 de la tabla 4.2), y el tercer paraboloide tiene coincidencia en z , (caso f2 de la tabla 4.2) pero la distancia en x es mayor que la que existe en la semiesfera. A partir de estos tres paraboloides se generaron las ecuaciones con variaciones en el tamaño del elemento en el eje z (figura 4.14).

De todos los elipsoides y paraboloides analizados, se elegirán algunos en específico para analizar su respuesta ante variaciones de los parámetros no relacionados con la geometría del elemento de detección del sensor, como la posición de las fibras, su diámetro, la apertura numérica etc.

4.2. Análisis de las características de los sensores de forma elipsoidal

Los parámetros no relacionados directamente con la geometría del elemento de detección que se mantuvieron constantes para todos los elipsoides analizados a continuación son:

- Diámetro de las dos fibras ópticas $D=0.05$,
- Posición de las fibras ópticas con respecto al eje z del elemento de detección, $L=0.707$,
- Índice de refracción del elemento $n_e=1.55$,
- Fibras ópticas multimodo de índice escalonado,
- Apertura numérica de las fibras $AN=0.2$,
- Luz monocromática no polarizada.

4.2.1 Sensores elipsoidales con variaciones en el tamaño del eje z para $|z|>1$

La primera serie de variaciones de elipsoide tiene los mismos extremos en el eje x que la semiesfera, mientras en el plano xz , los valores en z son mayores que el límite de la semiesfera como se puede observar en la figura 4.4.

Las ecuaciones para este tipo de elipsoides que se pueden observar en la figura 4.4, son:

$$x^2 + y^2 + 0.756z^2 = 1, \quad (2)$$

$$x^2 + y^2 + 0.64z^2 = 1, \quad (3)$$

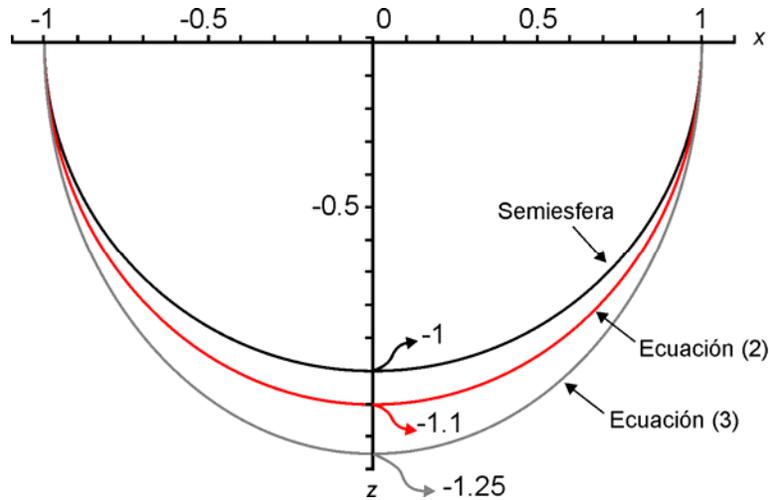


Figura 4.4 Proyección en el plano xz de los sensores elipsoidales (ecuaciones (2) y (3)) y semiesférico (ecuación (1)). Los extremos de los sensores elipsoidales coinciden en el eje x , mientras que muestran un desplazamiento de su superficie, hacia abajo en z .

4.2.2 Sensores elipsoidales con variaciones en el tamaño del eje z para $|z| < 1$

La segunda serie de variaciones, mantiene también los extremos en el eje x iguales que en la semiesfera, sin embargo en el plano xz los valores en z son menores que el límite de la semiesfera como se muestra en la figura 4.5.

Las ecuaciones para este tipo de elipsoides cuyo perfil aparece en la figura 4.5 son:

$$x^2 + y^2 + 1.234z^2 = 1, \quad (4)$$

$$x^2 + y^2 + 1.5625z^2 = 1, \quad (5)$$

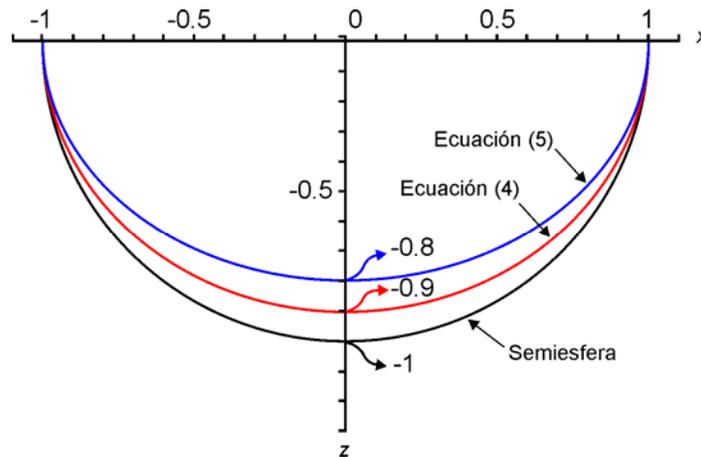


Figura 4.5. Proyección en el plano xz del sensor semiesférico (ecuación (1)) y de los sensores elipsoidales de las ecuaciones (4) y (5). Los elipsoides coinciden en el eje x , pero tienen un desplazamiento de su superficie hacia arriba en z .

Los sensores de las variaciones descritas en las ecuaciones (2) a (5), permanecen iguales al perfil de la semiesfera, vistos desde el plano xy .

4.2.3 Sensores elipsoidales con variaciones en el tamaño del eje x para $|z| < 1$

La tercera serie de variaciones de elipsoides, vistos en el plano xz muestra un límite menor y común en z , pero sus límites en x ya no permanecen constantes, como se puede apreciar en la figura 4.6.

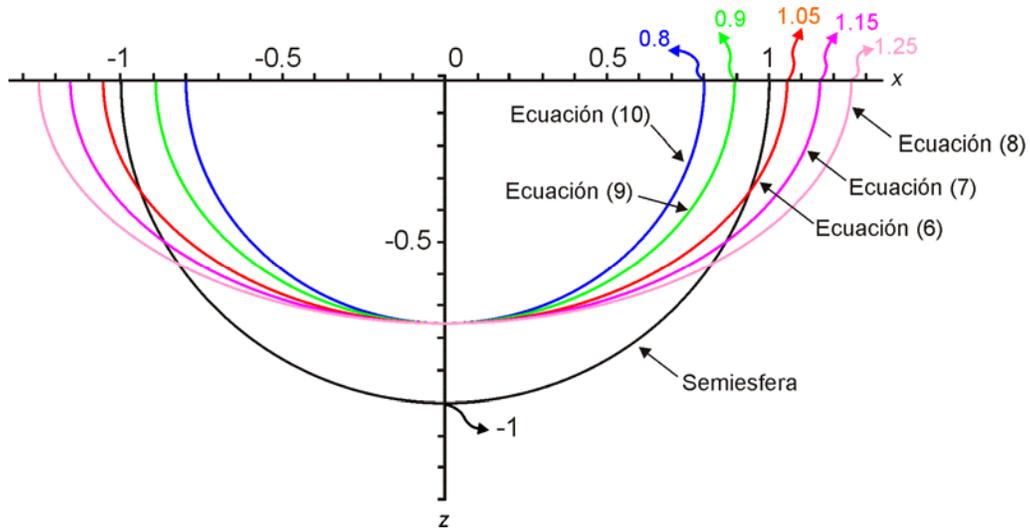


Figura 4.6. Proyección en el plano xz de la semiesfera (ecuación (1)) y de los elipsoides descritos por las ecuaciones (6) a (10). Los elipsoides coinciden en el punto $z=-0.75$ (el cual es menor a la z de la semiesfera), pero varían en el tamaño en el eje x .

Las ecuaciones para estos elipsoides son:

$$1.36x^2 + 1.5y^2 + 2.66z^2 = 1.5, \quad (6)$$

$$1.13x^2 + 1.5y^2 + 2.66z^2 = 1.5, \quad (7)$$

$$0.96x^2 + 1.5y^2 + 2.66z^2 = 1.5, \quad (8)$$

$$1.85x^2 + 1.5y^2 + 2.66z^2 = 1.5, \quad (9)$$

$$2.34x^2 + 1.5y^2 + 2.66z^2 = 1.5, \quad (10)$$

4.2.4 Sensores elipsoidales con variaciones en el tamaño del eje x para $|z|>1$

La cuarta serie de variaciones de elipsoides vistos en el plano xz , muestran un límite mayor y común en z y los límites en x también sufren modificaciones, tomando valores tanto mayores como menores que x comparados con los límites de la semiesfera, como se muestra en la figura 4.7.

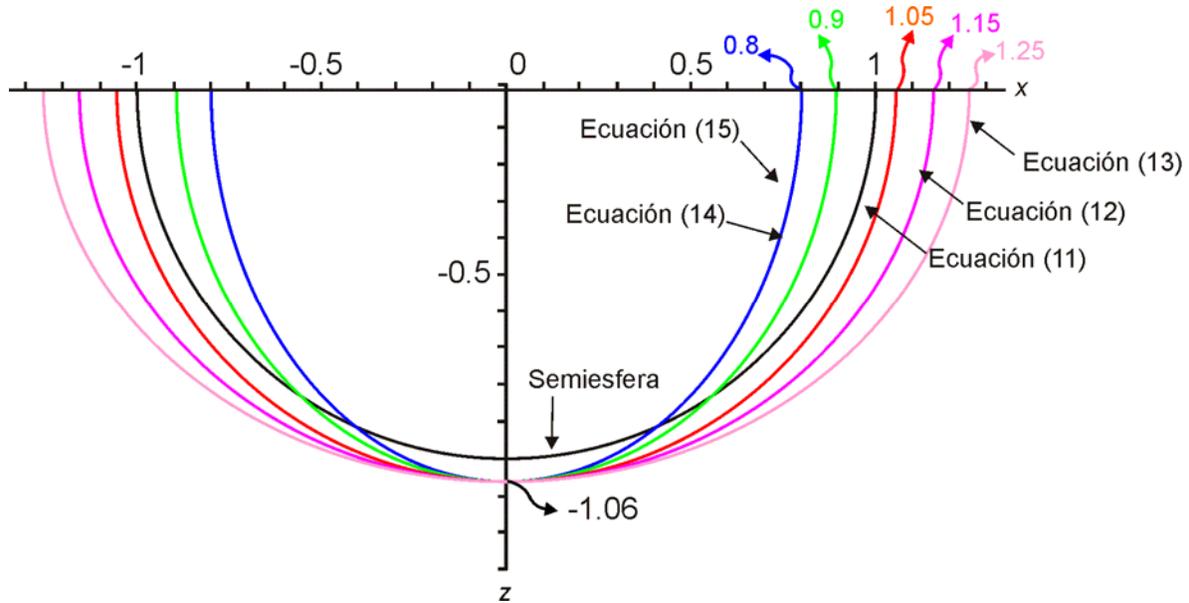


Figura 4.7. Proyección en el plano xz de la semiesfera (ecuación (1)) y de los elipsoides descritos por las ecuaciones (11) a (15). Los elipsoides coinciden en el punto en z (el cual es mayor a la z de la semiesfera), pero difieren en la distancia en el eje x .

Las ecuaciones de estos elipsoides son:

$$2.72x^2 + 3y^2 + 2.66z^2 = 3, \quad (11)$$

$$2.26x^2 + 3y^2 + 2.66z^2 = 3, \quad (12)$$

$$1.92x^2 + 3y^2 + 2.66z^2 = 3, \quad (13)$$

$$3.7x^2 + 3y^2 + 2.66z^2 = 3, \quad (14)$$

$$4.68x^2 + 3y^2 + 2.66z^2 = 3, \quad (15)$$

4.2.5 Sensores elipsoidales con variaciones en el tamaño en el eje x para $|z|=1$

Finalmente la quinta serie de variaciones de elipsoides se realizó dejando el mismo límite de la semiesfera en z , y variando el límite en x , como se puede apreciar en la figura 4.8.

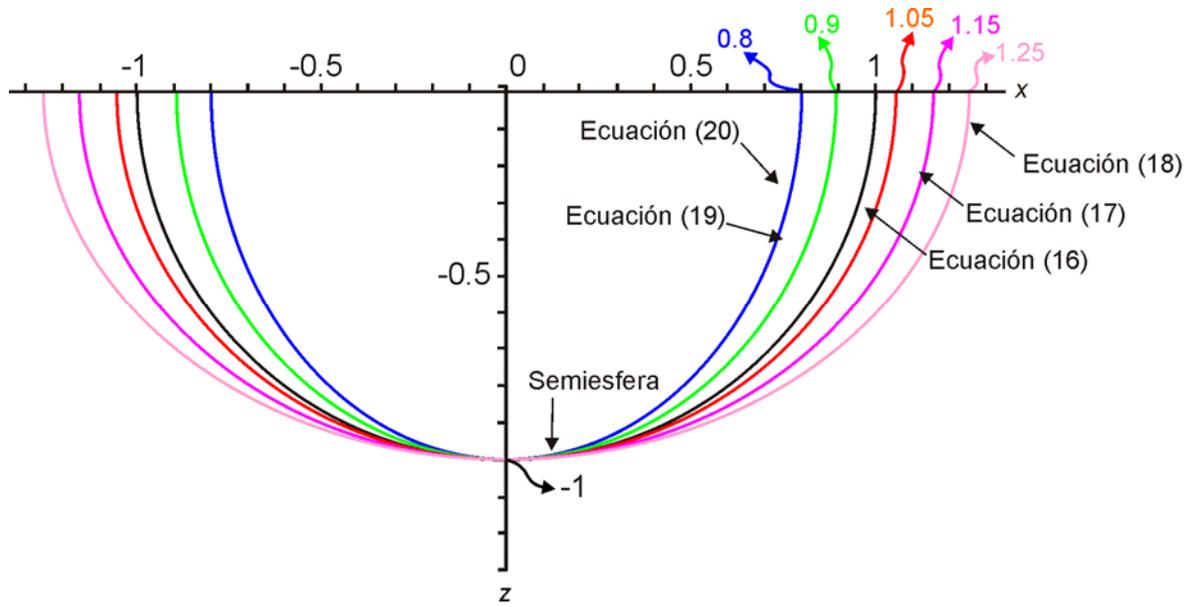


Figura 4.8. Proyección en el plano xz de la semiesfera (ecuación (1)) y los elipsoides descritos por las ecuaciones (16) y (17). Los elipsoides coinciden con la semiesfera en el límite del eje z , pero difieren en el tamaño en el eje x .

Las ecuaciones que representan a estos elipsoides son:

$$0.907x^2 + y^2 + 1z^2 = 1, \quad (16)$$

$$0.756x^2 + y^2 + 1z^2 = 1, \quad (17)$$

$$0.64x^2 + y^2 + 1z^2 = 1, \quad (18)$$

$$1.234x^2 + y^2 + 1z^2 = 1, \quad (19)$$

$$1.5625x^2 + y^2 + 1z^2 = 1, \quad (20)$$

La gráfica de transmisión relativa $T^*(n)$ que corresponde a los sensores elipsoidales se muestra en la figura 4.9. En esta figura aparece la gráfica de la transmisión relativa $T^*(n)$ de la semiesfera (1) y las de todos los sensores elipsoidales que mostraron una transmisión. La curva de transmisión relativa $T^*(n)$ puede ser desplazada hacia la izquierda, o hacia la derecha, para diferentes intervalos de n , lo que permite elegir un sensor para un intervalo de operación específica cambiando los parámetros geométricos de los elipsoides. Tanto el intervalo de entrada, el de salida así como la linealidad, difieren con los de la semiesfera para cada elipsoide que muestra transmisión como se analiza a continuación.

4.2.6 Comparación de las características de sensores refractométricos con diferentes formas elipsoidales del elemento de detección.

La característica de transmisión relativa para los elipsoides (2) y (3) muestra un desplazamiento horizontal hacia la derecha (figura 4.9) comparada con la característica de transmisión relativa de la semiesfera, lo que resulta en dos intervalos de operación: para índices de refracción entre 1.125 y 1.225 para la elipsoide (2) y un intervalo entre 1.15 y 1.275 para el elipsoide (3).

Con las características de transmisión relativa de los elipsoides (2) y (3) podemos concluir que un aumento en el parámetro z moverá la característica transmisión hacia la derecha, y un decremento en este parámetro moverá la transmisión hacia la izquierda. El desplazamiento hacia la izquierda con respecto a la característica de la semiesfera podemos observarlo para el elipsoide (4).

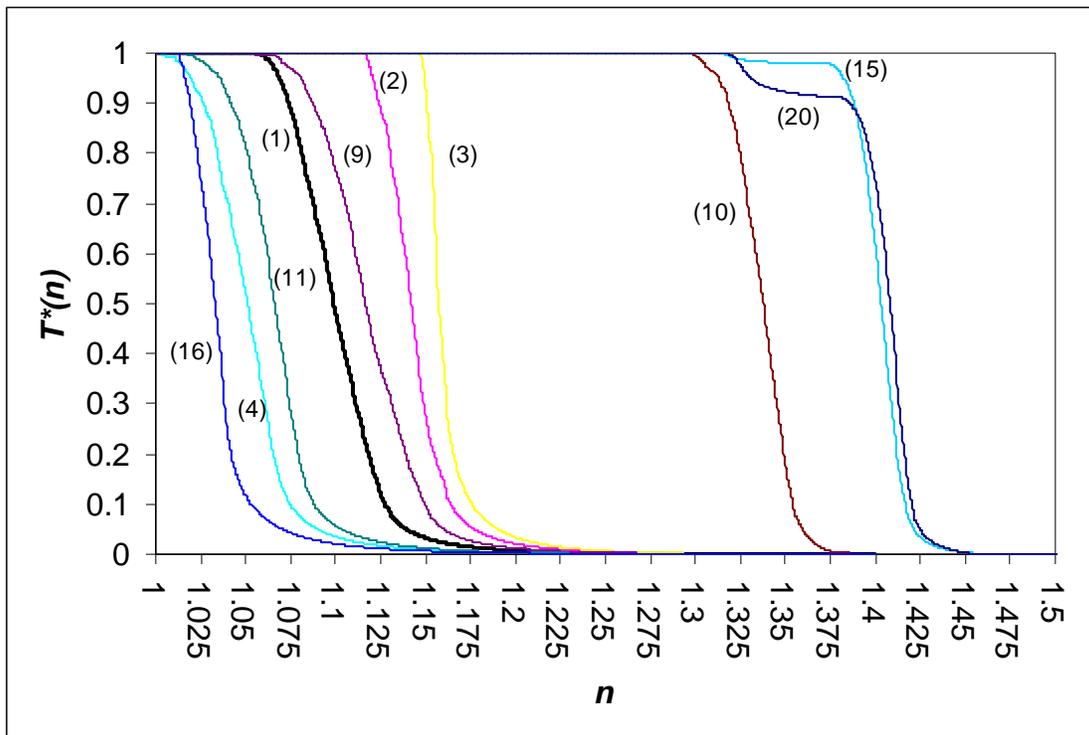


Figura 4.9 Transmisión relativa $T^*(n)$ para un intervalo de índices de refracción n desde 1 hasta 1.5, para los sensores modelados por las ecuaciones (1) a (20).

La característica de transmisión relativa para el elipsoide (5) es de cero, debido a que las fibras ópticas pierden el acoplamiento, como se observa en el trazado de rayos de la figura 4.10 en donde los rayos escapan de la superficie del sensor y no entran en la fibra receptora.

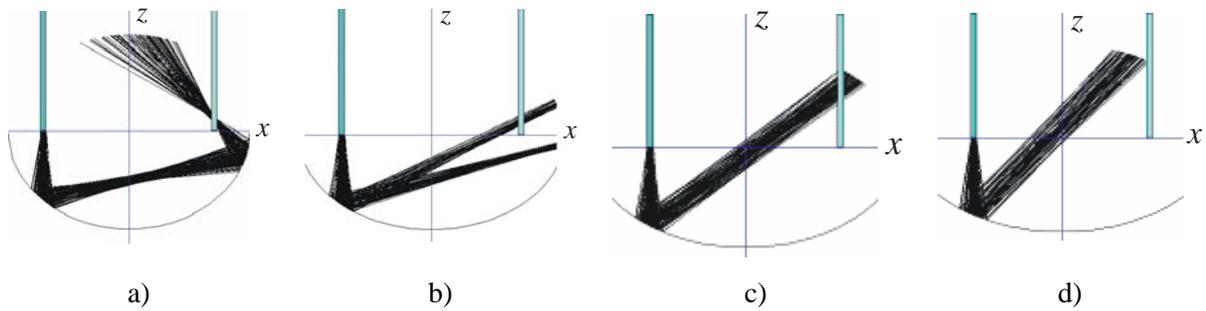


Figura 4.10 Resultados del trazado de rayos en el plano xz para los elipsoides a) ecuación (5), b) ecuación (6), c) ecuación (7), d) ecuación (8).

Los elipsoides representados por las ecuaciones (6) a (8), también tienen una transmisión nula debido a la pérdida de acoplamiento entre las fibras. Lo cual ocurre cuando se presenta una disminución en el parámetro z , y el parámetro x es mayor que el de la semiesfera.

Aunque se tenga una disminución en el parámetro z , si también se tiene una disminución en el parámetro x , como el presentado por los elipsoides de las ecuaciones (9) y (10), se vuelve a tener acoplamiento entre las fibras como se puede observar en la figura 4.11, en la que se observan algunos rayos que entran a la fibra receptora.

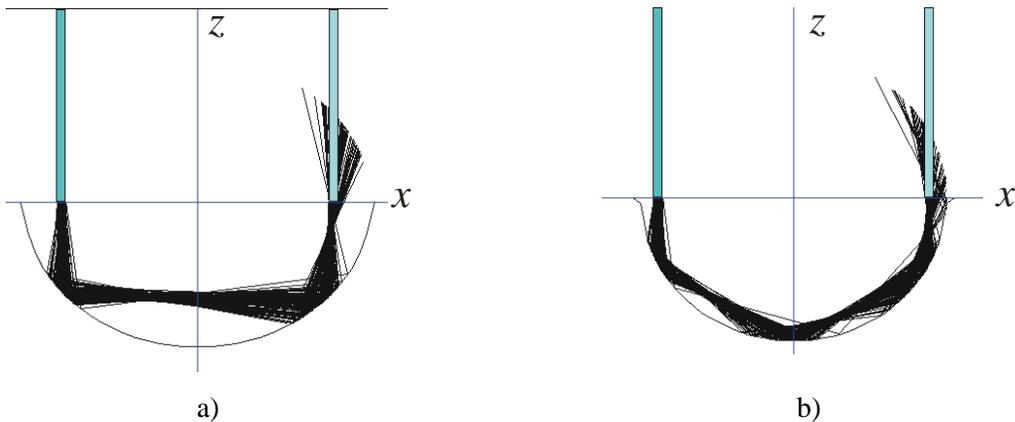


Figura 4.11 Resultados del trazado de rayos en el plano xz para los sensores elipsoidales: a) ecuación (9) y b) ecuación (10).

La curva de transmisión para los elipsoides (9) y (10) también se muestra desplazada hacia la derecha con respecto a la curva de la semiesfera. Aunque la variación en el coeficiente del eje x es solo de un 10% entre las ecuaciones (9) y (10), el desplazamiento con respecto a n pasa de un intervalo entre $n=1.075...1.2$, hasta $n=1.325...1.4$.

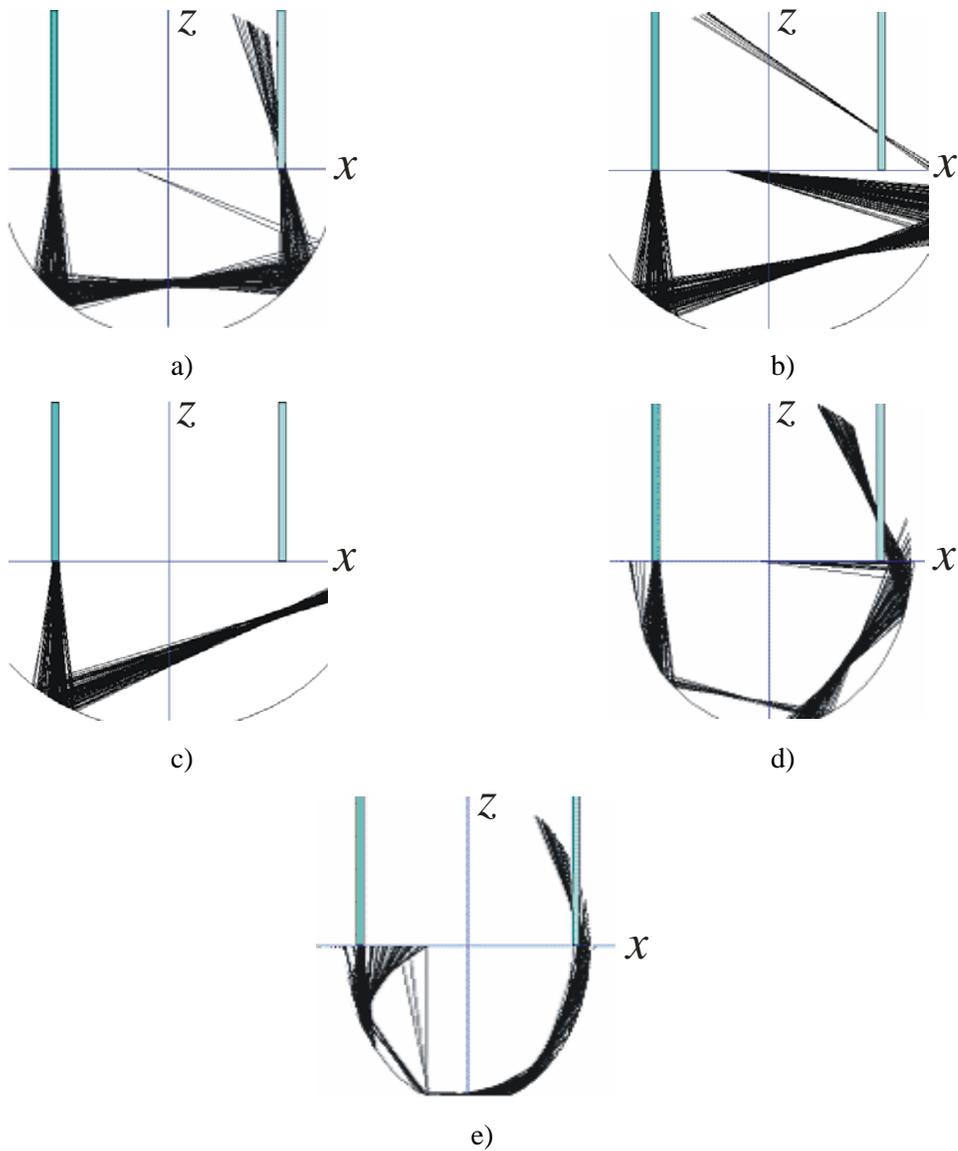


Figura 4.12. Resultados del trazado de rayos en el plano xz para los sensores elipsoidales: a) ecuación (11), b) ecuación (12), c) ecuación (13), d) ecuación (14), e) ecuación (15).

Los elipsoides de las ecuaciones (11) a (15) cuyo parámetro en z es mayor que el de la semiesfera muestran distintos comportamientos dependiendo de su tamaño en la dirección del eje x . El elipsoide de la ecuación (11) que tiene un tamaño en el eje en x mayor que el de la ecuación (15), muestra una característica de transmisión relativa $T^*(n)$ desplazada hacia la izquierda comparada con la característica de transmisión relativa de la semiesfera, mientras que el elemento elipsoidal de la ecuación (15) muestra un gran desplazamiento (hasta $n=1.4$), hacia la derecha. Los elipsoides (12) a (14) no tienen transmisión, debido al desacoplamiento entre las fibras ópticas

como se puede ver en la figura 12 en donde los rayos salen de la superficie del sensor y no entran a la fibra receptora.

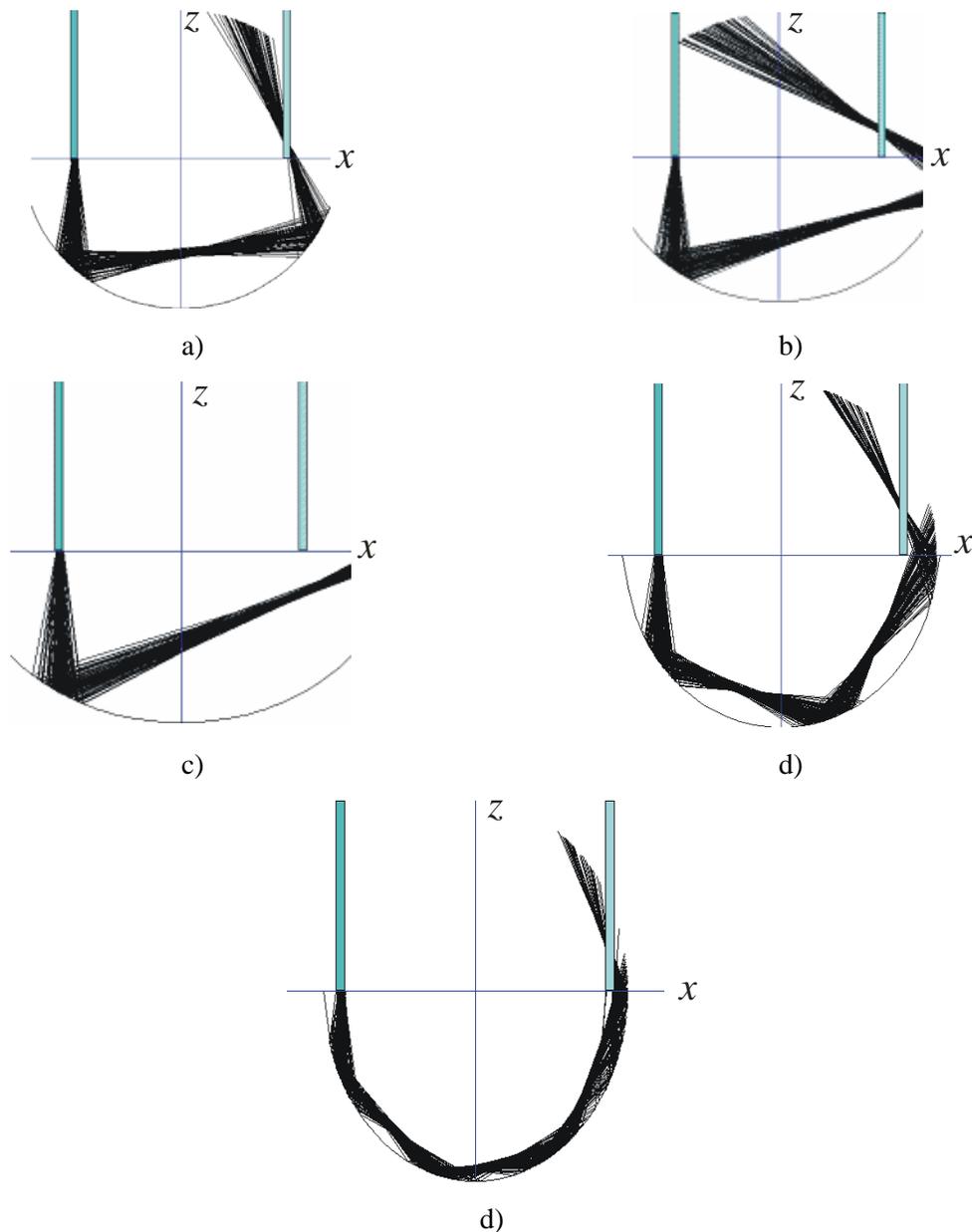


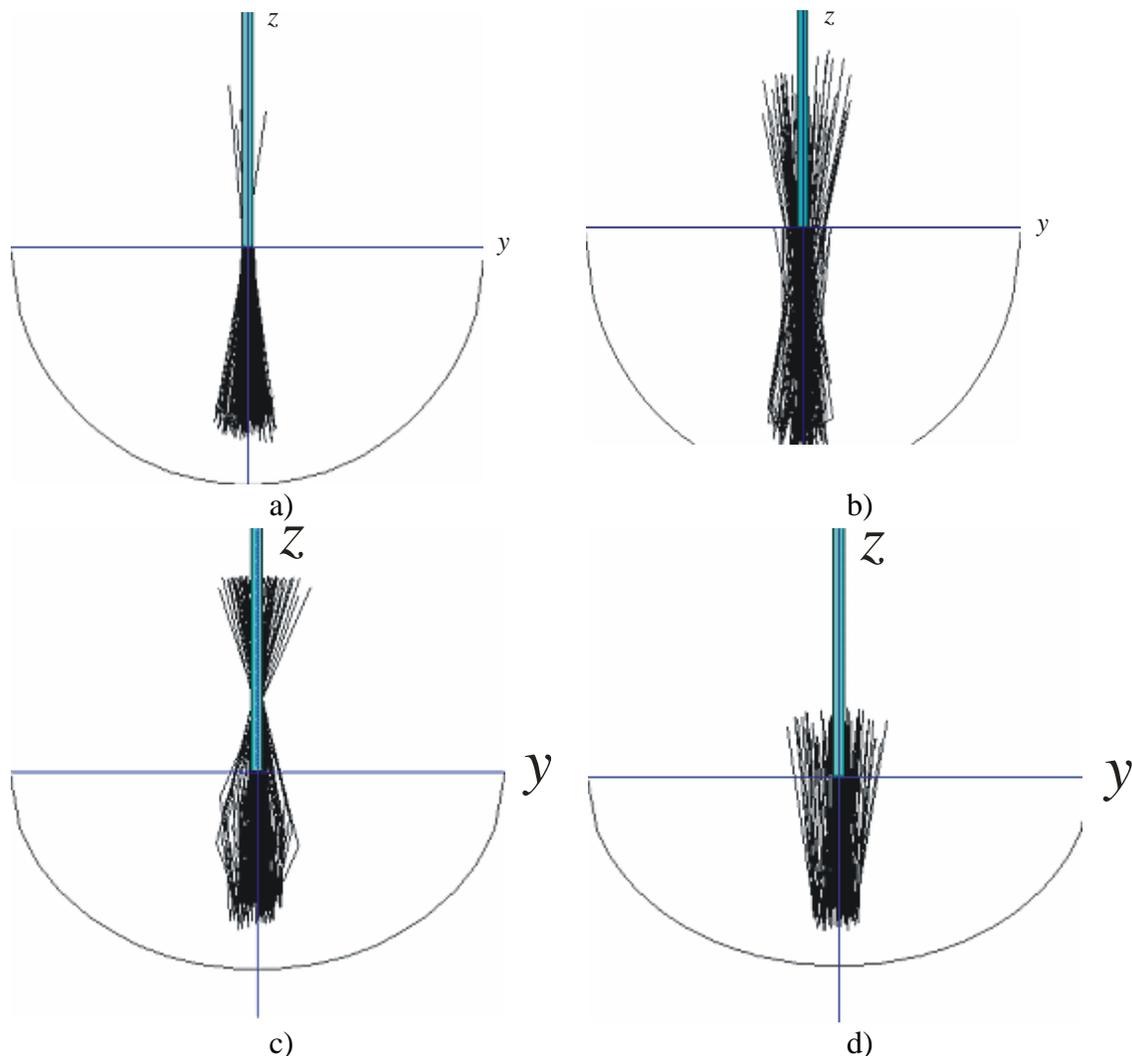
Figura 4.13. Resultados del trazado de rayos en el plano xz para los sensores elipsoidales: a) ecuación (16), b) ecuación (17), c) ecuación (18), d) ecuación (19), e) ecuación (20).

Los sensores de las ecuaciones (16) y (20), tienen el mismo límite en z que la semiesfera, mientras varían los tamaños en el eje x , muestran un comportamiento muy similar a los de los elipsoides (11) y (15), pues para una x menor como la del elipsoide de la ecuación (16) la característica de la transmisión relativa $T^*(n)$ muestra un desplazamiento hacia la izquierda

comparado con el de la semiesfera y para un tamaño en x menor como en el elipsoide de la ecuación (20) muestra un desplazamiento hasta $n=1.325$, hacia la derecha:

Como se puede observar en la figura 4.9, estos dos elipsoides tienen la característica de transmisión relativa con el mayor desplazamiento tanto hacia la izquierda como la derecha respectivamente. Los otros elipsoides de este grupo (17) a (19) no muestran transmisión, debido al desacoplamiento de las fibras ópticas. En la figura 4.13 observamos que los rayos abandonan la superficie del sensor y no entran en la fibra receptora.

El resultado del trazado de rayos también se puede analizar en el plano yz que aparece en la figura 4.14, en donde se muestra el trazado de rayos para sensores que tienen una transmisión relativa distinta de cero para los elipsoides cuyo trazado aparece en los incisos 4.14 a), b), e) y f), mientras que en los incisos 4.14 c) y d) aparece el trazado de dos elipsoides en donde no hay acoplamiento entre las fibras ópticas.



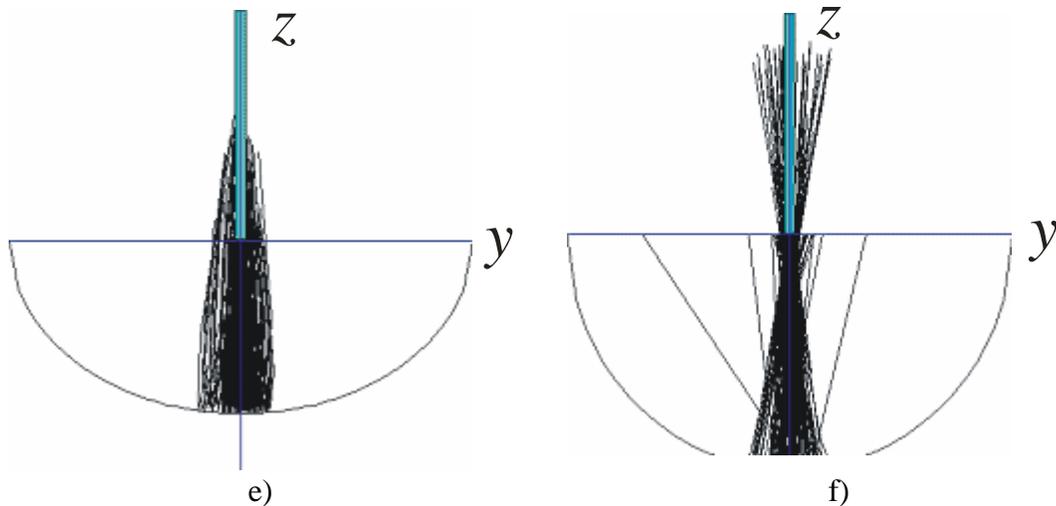


Figura 4.14 Resultados del trazado de rayos para algunos sensores en el plano yz : a) ecuación (1), b) ecuación (2), c) ecuación (5), d) ecuación (6), e) ecuación (10), f) ecuación (15).

4.2.6.1 Análisis de la linealidad, intervalo de entrada e intervalo de salida de los sensores elipsoidales.

En la Tabla 4.3, se presentan las distintas características de cada uno de los sensores elipsoidales mostrados en la figura 9. Los sensores elipsoidales (2), (10), y (15) tienen una respuesta con una menor no linealidad $\Delta N_{máx}$ que la obtenida en trabajos anteriores para distintos sensores semiesféricos [1]-[3]. Estos sensores tienen un menor intervalo de entrada Δn comparados con los sensores semiesféricos analizados en [1]-[3]. Únicamente el sensor elipsoidal de la ecuación (2) tiene, además un menor intervalo de salida $\Delta T^*(n)$.

La selección de alguno de estos sensores depende del intervalo de entrada para una aplicación específica. Si se desea una respuesta lineal para $1.07 < n < 1.13$ la mejor opción es el sensor semiesférico de la ecuación (1). Para un intervalo más a la derecha del anterior entre $1.12 < n < 1.155$ la elección sería el sensor elipsoidal (2).

Para una respuesta lineal entre $1.32 < n < 1.36$ la mejor opción es el sensor elipsoidal de la ecuación (10)

Si se desea una respuesta lineal entre $1.39 < n < 1.42$ la mayor linealidad se obtiene con el sensor elipsoidal (15).

Tabla 4.3. Características de los sensores con elementos de detección elipsoidales.

#	Ecuación	n_{min}	$n_{máx}$	$\Delta n = n_{max} - n_{min}$ Intervalo de entrada	$T^*(n_{min})$	$T^*(n_{máx})$	$\Delta T^* = T^*(n_{max}) - T^*(n_{min}) $ Intervalo de Salida	$\Delta N_{máx}$ Máxima no linealidad
1	$x^2 + y^2 + z^2 = 1$	1.077	1.128	0.051	0.8706	0.1005	0.770	6.13
2	$x^2 + y^2 + 0.756 * z^2 = 1$	1.126	1.154	0.028	0.8783	0.2072	0.671	5.23
3	$x^2 + y^2 + 0.64 * z^2 = 1$	1.151	1.165	0.014	0.8757	0.2071	0.669	6.10
4	$x^2 + y^2 + 1.234 * z^2 = 1$	1.029	1.066	0.037	0.8778	0.2000	0.678	6.22
9	$1.85x^2 + 1.5y^2 + 2.66z^2 = 1.5$	1.090	1.149	0.059	0.8774	0.1029	0.775	6.46
10	$2.34x^2 + 1.5y^2 + 2.66z^2 = 1.5$	1.321	1.354	0.034	0.8731	0.1021	0.771	4.77
11	$2.72x^2 + 3y^2 + 2.66z^2 = 3$	1.045	1.088	0.044	0.8772	0.1004	0.777	7.18
15	$4.68x^2 + 3y^2 + 2.66z^2 = 3$	1.390	1.417	0.027	0.8761	0.1021	0.774	5.13
16	$0.907x^2 + y^2 + 1z^2 = 1$	1.020	1.042	0.022	0.8776	0.2057	0.672	7.57
20	$1.5625x^2 + y^2 + 1z^2 = 1$	1.390	1.420	0.030	0.8785	0.1056	0.773	17.03

4.3 Análisis de las características de los sensores de forma paraboloidal.

Los parámetros no relacionados con la geometría del elemento de detección de los paraboloides son los mismos que para los elipsoides y para el caso del sensor semiesférico seleccionado, excepto que por cuestiones de transmisión la posición de las fibras tuvo que ser cambiada para algunos paraboloides (se especifica en los casos en donde se modificó la posición).

4.3.1 Características de los sensores paraboloidales base

Los paraboloides a analizar fueron generados de tal forma que se parecieran lo más posible a la semiesfera, iniciando con dos ecuaciones:

$$x^2 + y^2 - z - 1 = 0, \quad (21)$$

$$0.714x^2 + 0.714y^2 - z - 1 = 0, \quad (22)$$

El paraboloides de la ecuación (21) coincide con la semiesfera en los extremos en el eje x y en el valor de z máximo, el paraboloides de la ecuación (22) sólo coincide con el máximo en z , pero tiene una mayor coincidencia con el borde del sensor semiesférico como se muestra en la figura 15. Los extremos en x para este sensor son mayores que 1, por lo que se buscó también un paraboloides que tuviera coincidencia con el máximo en z , pero que tuviera los extremos en x menores a 1, este paraboloides es descrito por la ecuación (23) y también se grafica en la figura 4.15 en la que se puede apreciar una mayor coincidencia entre los bordes de este paraboloides comparados con los de la semiesfera.

$$1x^2 + 1y^2 - 0.7z - 0.7 = 0, \quad (23)$$

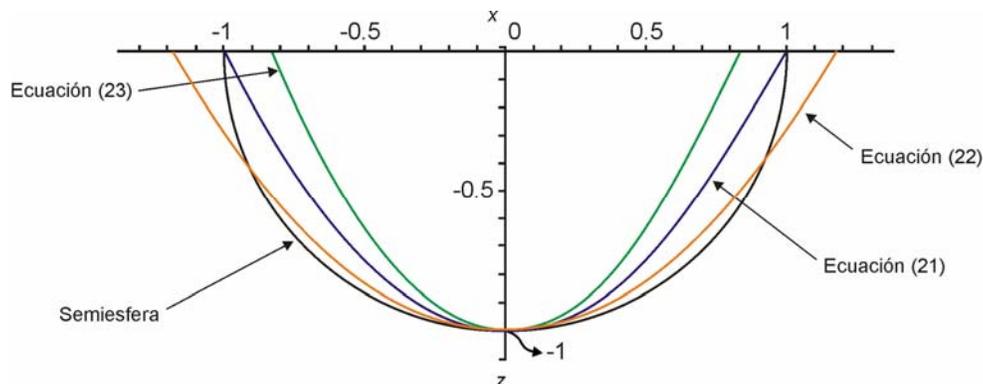


Figura 4.15 Proyección en el plano xz de la semiesfera (ecuación (1)) y los paraboloides descritos por las ecuaciones (21), (22), y (23).

El diámetro de las fibras, así como su apertura numérica e índices de refracción, se mantienen iguales a los establecidos en la sección 4.2.2.

4.3.2 Comparación de la transmisión relativa $T^*(n)$ de los paraboloides base.

Inicialmente se comparó la transmisión relativa $T^*(n)$ de estos tres paraboloides con la de la semiesfera, para un intervalo de índices de refracción n entre 1 y 1.2 que se encuentran en la figura 4.16. En esta gráfica podemos observar que el comportamiento de los elementos de detección paraboloidales de las ecuaciones (21) y (23) es muy similar entre ellos, mientras que el de la ecuación (22) muestra un desplazamiento hacia la derecha a partir de $n=1.05$. Comparada con la transmisión relativa $T^*(n)$ de la semiesfera, las ecuaciones de los paraboloides (21) y (23) muestran un menor intervalo de entrada Δn , mientras que la del paraboloide de la ecuación (22) tiene una magnitud menor en la curva de transmisión que la de la semiesfera, hasta $n=1.11$, y después de este valor su magnitud es mayor que la transmisión de la semiesfera, además de tener un mayor intervalo de entrada Δn .

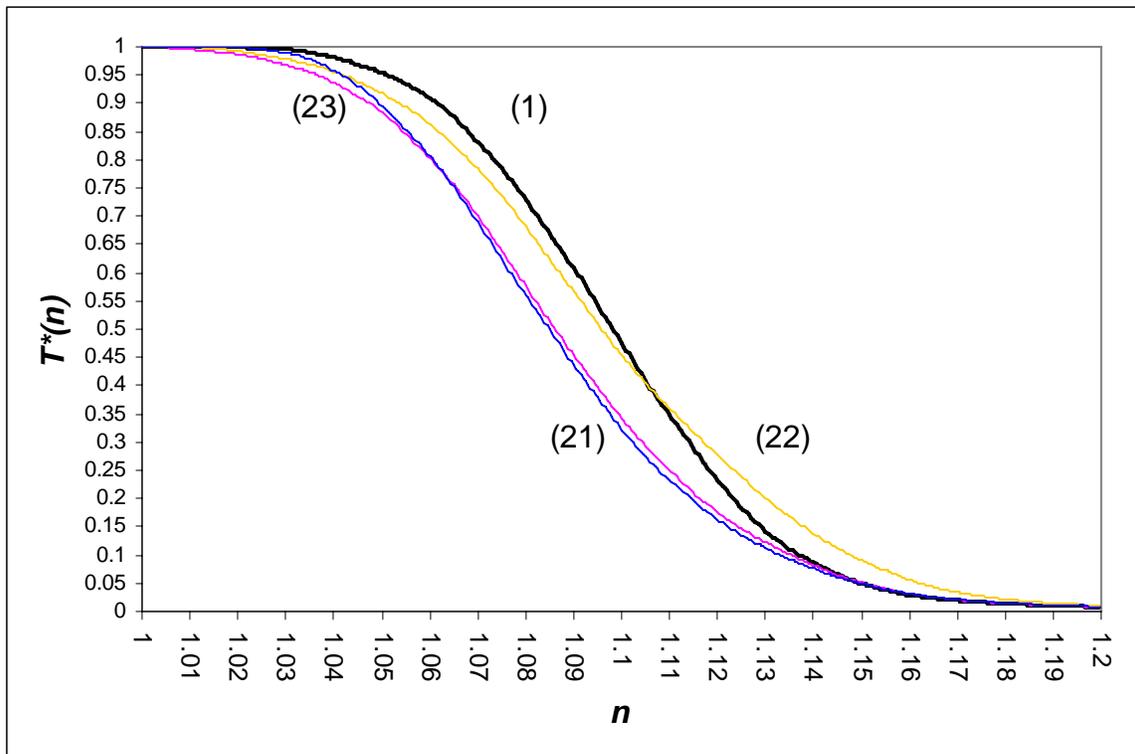


Figura 4.16 Transmisión relativa $T^*(n)$ para un intervalo de índices de refracción n desde 1 hasta 1.2, para los sensores modelados por las ecuaciones (1) y (21) a (23).

El resultado del trazado de rayos de estos tres paraboloides se encuentra en la figura 4.17. Para todos los paraboloides podemos apreciar que un cierto número de rayos no entran a la fibra transmisora debido a que sufren una desviación hacia el centro del sensor. El menor número de rayos que van hacia el centro lo podemos observar en la figura 4.17b) correspondiente al paraboloides de la ecuación (22) que es el que muestra un mayor intervalo de entrada Δn .

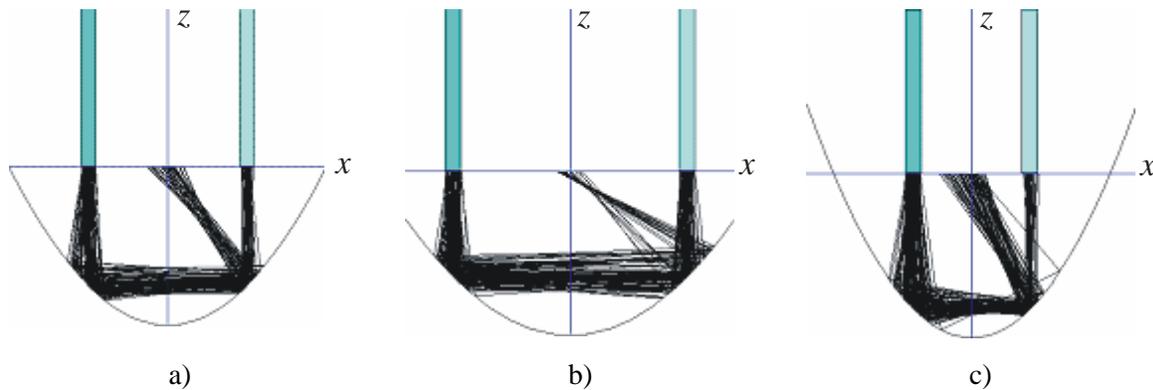


Figura 4.17 Resultados del trazado de rayos en el plano xz para los sensores paraboloidales: a) ecuación (21), b) ecuación (22), c) ecuación (23).

4.3.3 Variaciones del paraboloides base (21)

A partir de estos tres paraboloides se realizaron variaciones en donde se cambió el término independiente de cada una de las ecuaciones, generando paraboloides con distintos valores en z . A partir de este momento al cambio en la distancia máxima en dirección negativa del eje z , se le denominará H , como se muestra en la figura 4.18, en donde aparece la semiesfera de radio adimensional 1 y un paraboloides con una altura adimensional $H=2$.

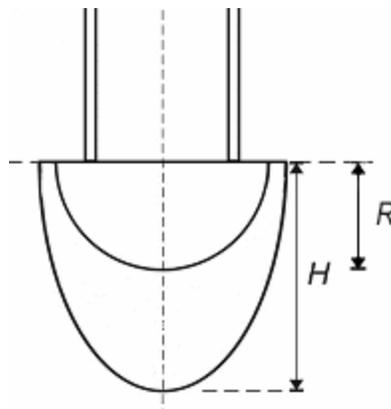


Figura 4.18. Vista lateral del sensor con elemento de detección semiesférico y de un sensor con elemento de detección paraboloides para la definición de H .

A partir de la ecuación (21) se modificaron los términos independientes para obtener distintos valores de H , obteniendo así las ecuaciones:

$$x^2 + y^2 - z - 0.4 = 0, \quad (24)$$

$$x^2 + y^2 - z - 0.6 = 0, \quad (25)$$

$$x^2 + y^2 - z - 0.8 = 0, \quad (26)$$

$$x^2 + y^2 - z - 1.2 = 0, \quad (27)$$

$$x^2 + y^2 - z - 1.4 = 0, \quad (28)$$

$$x^2 + y^2 - z - 1.6 = 0, \quad (29)$$

$$x^2 + y^2 - z - 1.8 = 0, \quad (30)$$

$$x^2 + y^2 - z - 2 = 0, \quad (31)$$

Con estas ecuaciones se obtienen paraboloides con H desde $=.2$ hasta 2 con incrementos de 0.2 . La diferencia entre estos paraboloides la podemos apreciar en la figura 4.19 que muestra una vista del sensor en el plano xz .

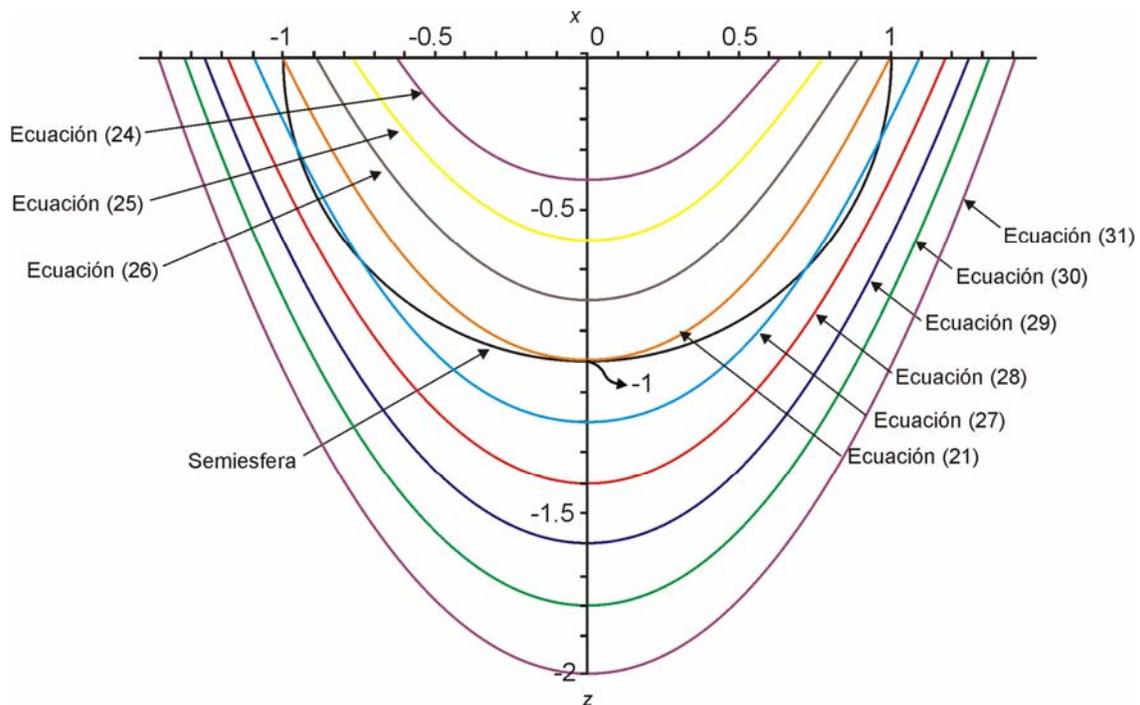


Figura 4.19 Proyección en el plano xz de la semiesfera (ecuación (1)) y los paraboloides descritos por las ecuaciones (21) y (24) a (31), para $H = 0.4$ hasta $H=2$.

4.3.4 Variaciones del paraboloides base (22)

La siguiente variación de paraboloides se realizó a partir de la ecuación (22) a la cual se le cambió el término independiente para obtener variaciones de H desde 0.6 hasta 2. No se inició en $H=0.4$ ya que las fibras quedaban fuera de este paraboloides al mantenerlas en la misma posición.

Las ecuaciones para esta variación son:

$$0.714x^2 + 0.714y^2 - z - 0.6 = 0, \quad (32)$$

$$0.714x^2 + 0.714y^2 - z - 0.8 = 0, \quad (33)$$

$$0.714x^2 + 0.714y^2 - z - 1.2 = 0, \quad (34)$$

$$0.714x^2 + 0.714y^2 - z - 1.4 = 0, \quad (35)$$

$$0.714x^2 + 0.714y^2 - z - 1.6 = 0, \quad (36)$$

$$0.714x^2 + 0.714y^2 - z - 1.8 = 0, \quad (37)$$

$$0.714x^2 + 0.714y^2 - z - 2 = 0, \quad (38)$$

La diferencia en el parámetro H se puede apreciar en la figura 4.20.

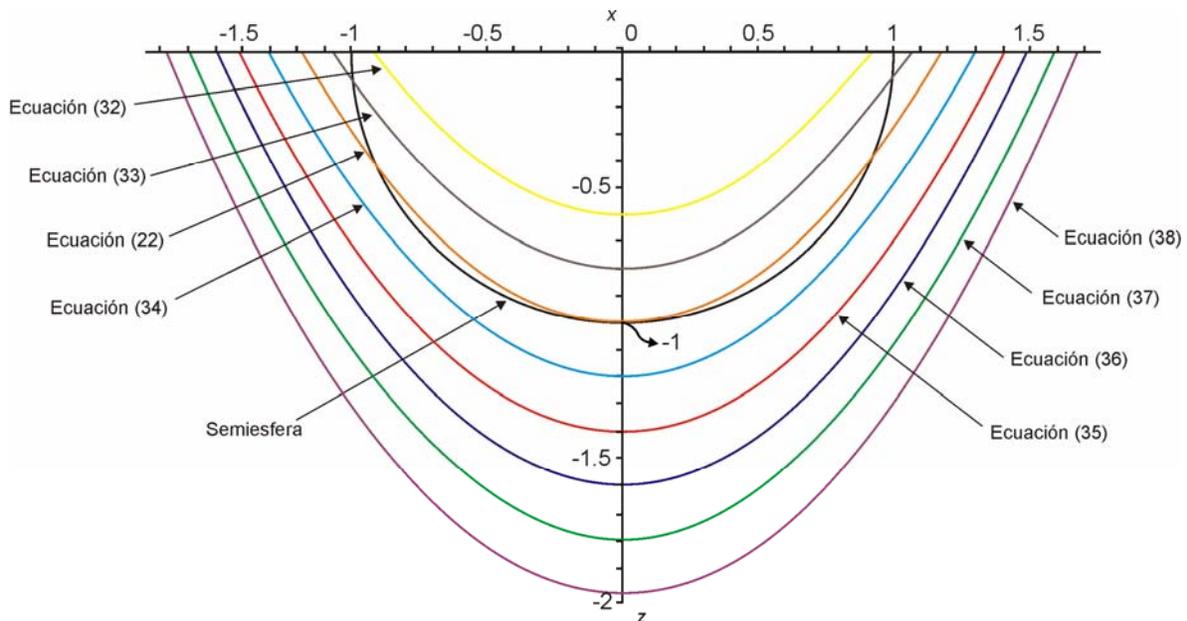


Figura 4.20 Proyección en el plano xz de la semiesfera (ecuación (1)) y los paraboloides descritos por las ecuaciones (22) y (32) a (38), para $H=0.6$ hasta $H=2$.

4.3.5 Variaciones del paraboloide base (23)

Por último de la ecuación (23) se hicieron variaciones en el término independiente de la ecuación para obtener distintos parámetros de H desde 0.2 hasta 2. Las ecuaciones que representan esta variación son:

$$x^2 + y^2 - 0.7z - 0.14 = 0, \quad (39)$$

$$x^2 + y^2 - 0.7z - 0.28 = 0, \quad (40)$$

$$x^2 + y^2 - 0.7z - 0.37 = 0, \quad (41)$$

$$x^2 + y^2 - 0.7z - 0.42 = 0, \quad (42)$$

$$x^2 + y^2 - 0.7z - 0.56 = 0, \quad (43)$$

$$x^2 + y^2 - 0.7z - 0.84 = 0, \quad (44)$$

$$x^2 + y^2 - 0.7z - 0.98 = 0, \quad (45)$$

$$x^2 + y^2 - 0.7z - 1.12 = 0, \quad (46)$$

$$x^2 + y^2 - 0.7z - 1.26 = 0, \quad (47)$$

$$x^2 + y^2 - 0.7z - 1.4 = 0, \quad (48)$$

La proyección de estos sensores en el plano xz se puede observar en la figura 4.21.

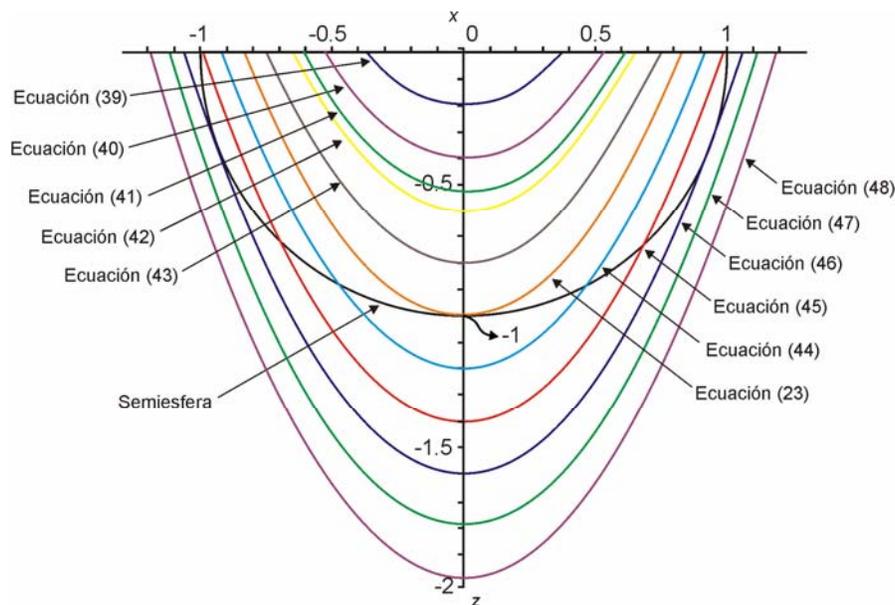


Figura 4.21 Proyección en el plano xz de la semiesfera (ecuación (1)) y los paraboloides descritos por las ecuaciones (23) y (39) a (48), para $H = 0.2$ hasta $H = 2$.

4.3.6 Comparación de las características de sensores refractométricos con elementos de detección paraboloïdales con distintos parámetros.

La transmisión absoluta de los sensores con elementos de detección paraboloïdal, mostró una variación dependiendo de la altura H del paraboloïde como se muestra en la figura 4.22, en donde la curva 4.22a) representa las variaciones de H a partir de la ecuación (21), teniendo un máximo de transmisión absoluta T , cuando $H=0.8$. La gráfica 4.22b) representa las variaciones de H a partir de la ecuación (22), y muestra un máximo en la transmisión absoluta para $H=1$, mientras que la curva 4.22c) representa las variaciones a partir de la ecuación (23) y muestra una transmisión absoluta máxima en $H=0.528$. Podemos observar que la gráfica del inciso 4.22c), tiene un máximo para una H menor, mientras que la del inciso 4.22b) tiene el máximo en la H mayor de las tres variantes, por lo que podemos relacionar estas respuestas con la figura 4.15 en la que el paraboloïde de la ecuación (23) es el que tiene el menor diámetro en x cuando $z=0$, y la ecuación (22) es la que tiene el diámetro mayor en x cuando $z=0$, mientras que la ecuación (21) tiene un diámetro intermedio comparada con las otras dos ecuaciones.

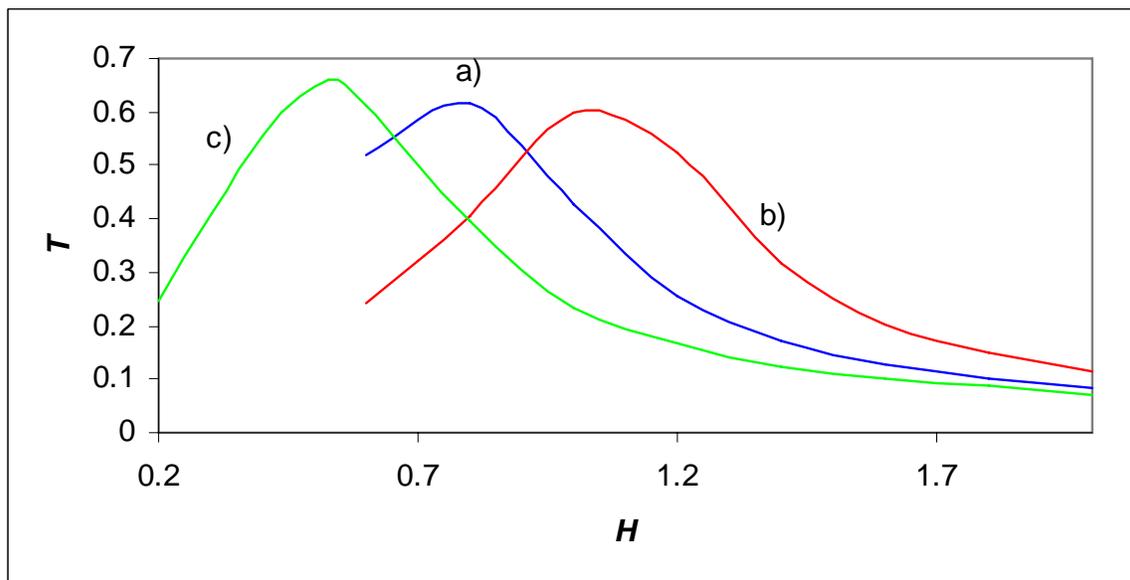
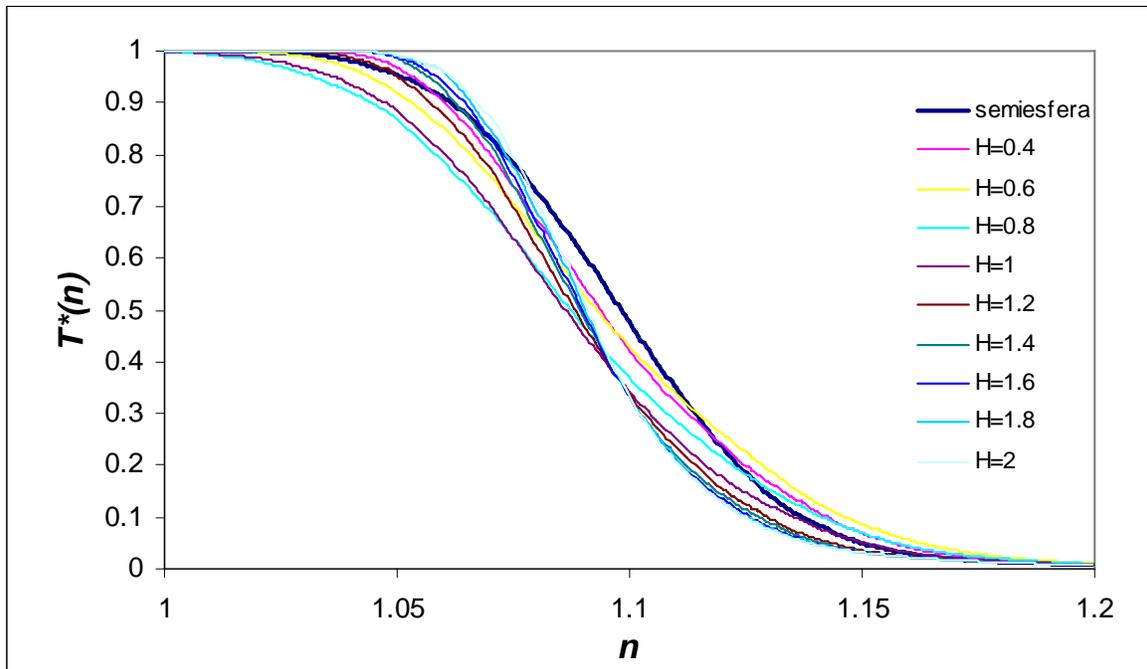


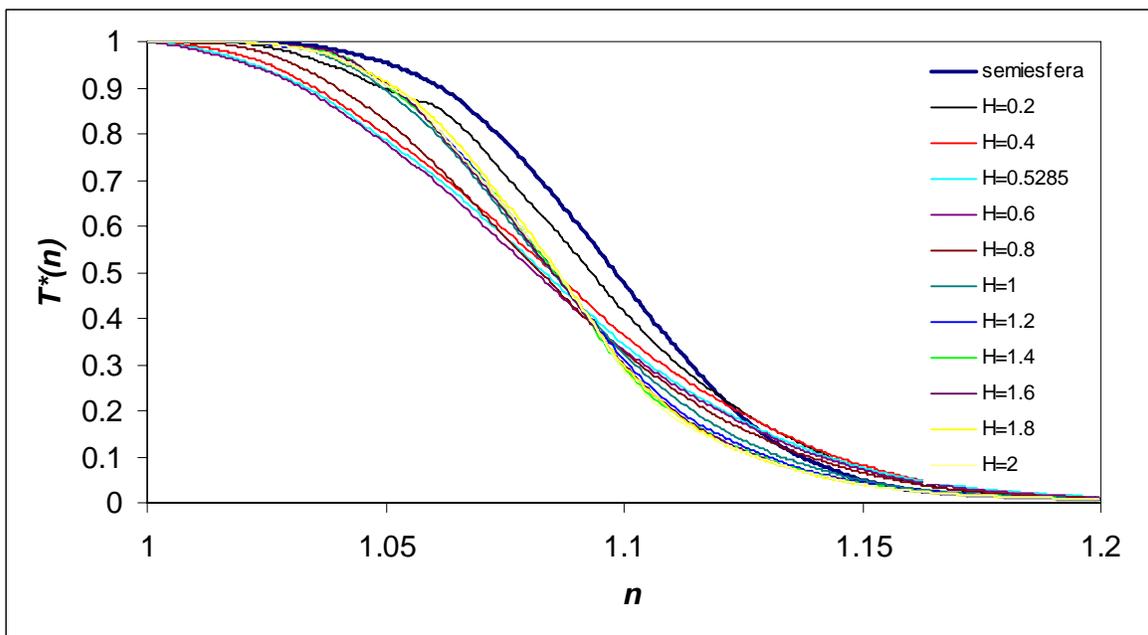
Figura 4.22 Transmisión absoluta T vs. H para cada una de las tres variaciones de paraboloïdes: a) variación de paraboloïde a partir de la ecuación (21), b) variación del paraboloïde a partir de la ecuación (22) c) variación del paraboloïde a partir de la ecuación (23).

Para cada una de estas ecuaciones se obtuvo la respuesta de transmisión relativa para cada uno de los sensores, comparados con la de la semiesfera, la figura 4.23 muestra el comportamiento general de cada una de las tres variantes, y posteriormente se analizan las gráficas por secciones

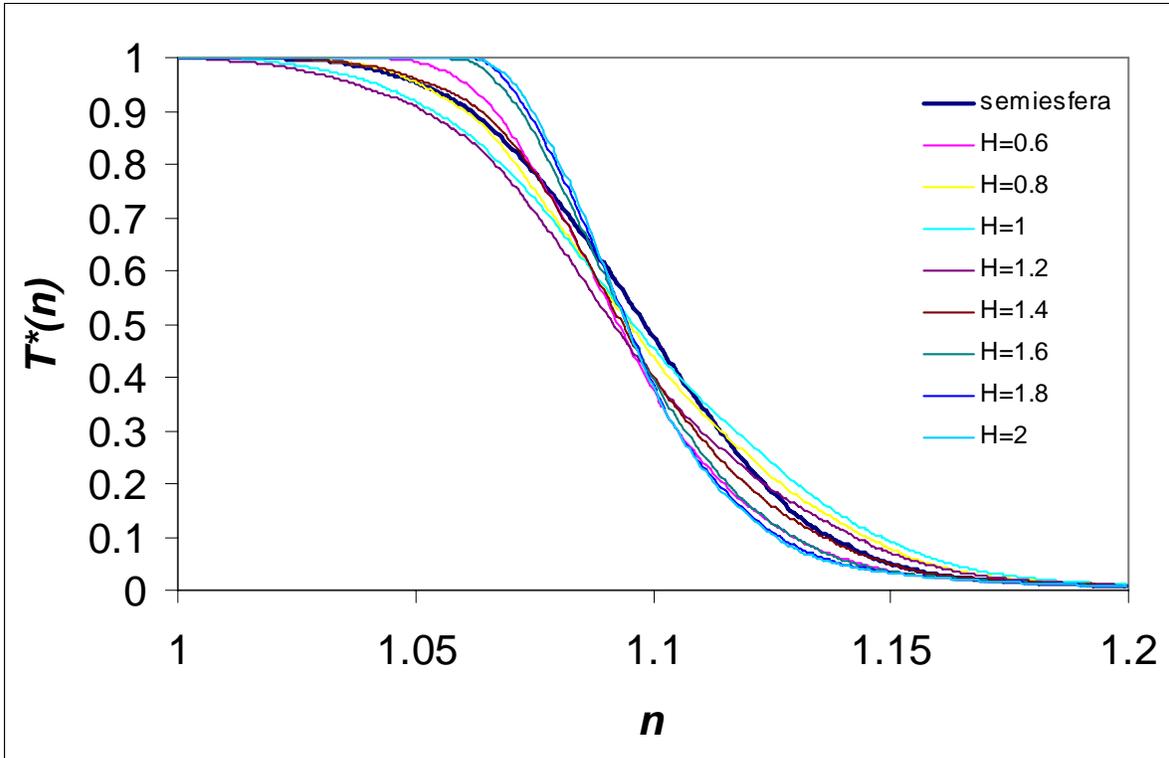
para un intervalo de índices de refracción entre 1 y 1.1, y después para 1.1 y 1.2. También se separa el comportamiento de las gráficas para las diferentes H y así analizar más detalladamente el comportamiento de cada parabolóide.



a)



b)



c)

Figura 4.23 Característica de transmisión relativa $T^*(n)$ para un intervalo de índices de refracción n desde 1 hasta 1.2, para los sensores con elementos de detección, modelados por las ecuaciones (1) – semiesfera, a) variaciones de la ecuación (21), b) variaciones de la ecuación (22), c) variaciones de la ecuación (23).

A diferencia de los elipsoides que se analizaron en la sección 4.3.6., cuya característica de transmisión relativa $T^*(n)$ se encontraba en intervalos de índice de refracción, muy distintos que los del sensor semiesférico; para todos los paraboloides estudiados, se puede observar que la transmisión relativa $T^*(n)$ está limitada para el intervalo $n=1$ hasta $n=1.2$. En la figura 4.23 se muestra que todas las curvas tienen un punto de inflexión y que hay un cambio de concavidad de la función. Las gráficas mostradas en la figura 4.23 se dividirán para distintos intervalos de n y para los distintos valores de H para poder ser analizadas con mayor detalle mediante secciones.

4.3.6.1 Comparación de la transmisión relativa $T^*(n)$ para las variaciones del paraboloides (21)

En la figura 4.22 podemos encontrar la transmisión relativa cuando la característica es cóncava hacia abajo, para la semiesfera y los sensores paraboloidales derivados de la ecuación (21), dado que la transmisión máxima absoluta T se da cuando $H=0.8$ para el sensor (26) como se muestra en la figura 4.24, se separaron las gráficas para $H \leq 0.8$ y $H > 0.8$.

Las tres características de estos paraboloides quedan debajo de la transmisión relativa de la semiesfera, y conforme H aumenta, la respuesta se va desplazando hacia abajo (intervalo más pequeño en donde la respuesta es constante) y hacia la izquierda (mayor tamaño del intervalo de salida).

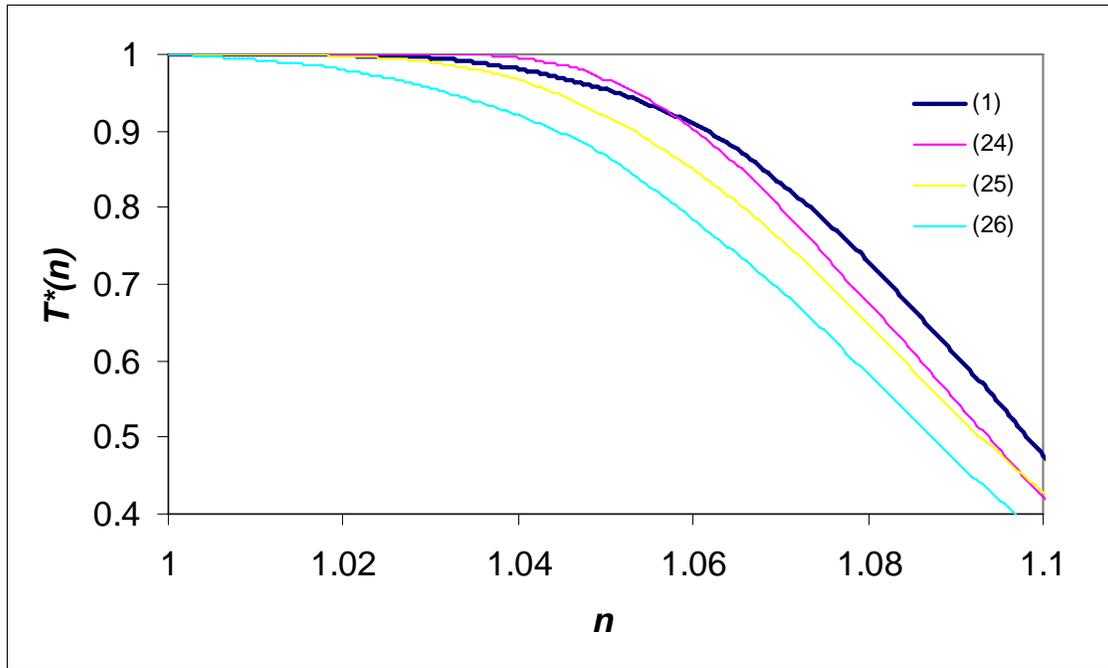


Figura 4.24 Transmisión relativa $T^*(n)$ para un intervalo de índices de refracción $1 \leq n \leq 1.1$ para la semiesfera (1) y los elementos modelados por las ecuaciones (24) a (26).

La figura 4.25 muestra las características para las mismas ecuaciones que la figura 4.24, pero para un intervalo de índices de refracción desde 1.1 hasta 1.2. Para estos paraboloides a partir de $n=1.12$ aproximadamente, las características se invierten y queda por debajo la de la semiesfera mientras que las características correspondientes a los paraboloides (24) a (26) mantienen el mismo orden que para el intervalo anterior.

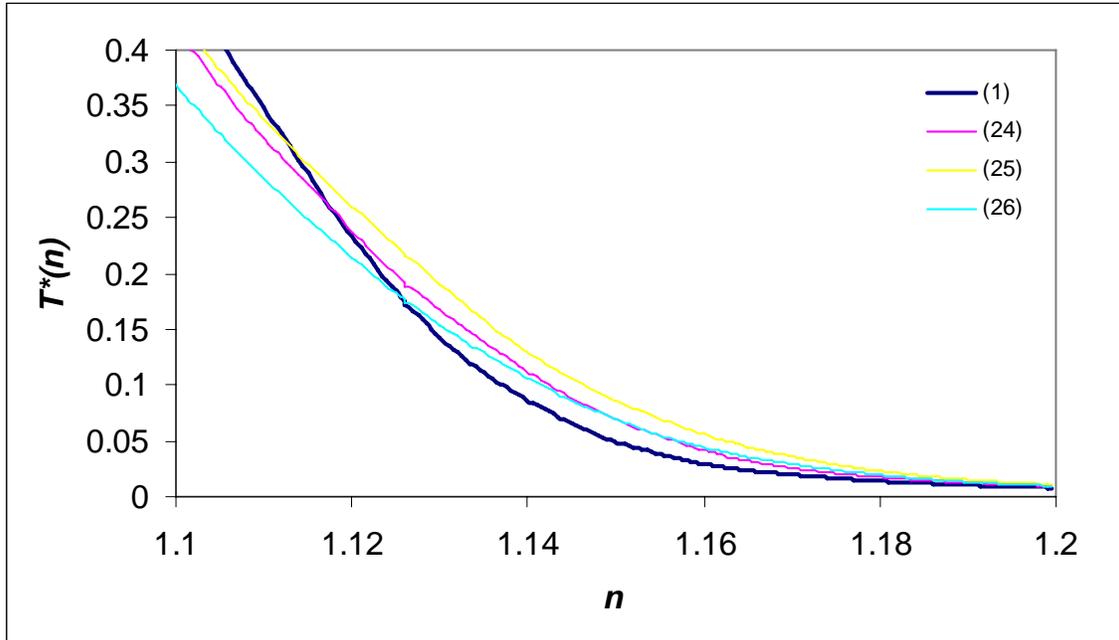


Figura 4.25 Transmisión relativa $T^*(n)$ para un intervalo de índices de refracción $1.1 \leq n \leq 1.2$, para la semiesfera (1) y los elementos modelados por las ecuaciones (24) a (26).

La figura 4.26 muestra la transmisión relativa de la semiesfera y de los paraboloides (21) y del (27) al (31) para índices de refracción desde 1 hasta 1.1. Las características de los paraboloides muestran una mayor reducción en la transmisión relativa de 0.4 para un índice de refracción menor a 1.1, a diferencia de la semiesfera que muestra un desplazamiento hacia la derecha con respecto a los paraboloides. Para este intervalo se obtiene que para las ecuaciones con una H menor, la transmisión también es menor, incrementándose conforme H se incrementa, quedando así de forma ordenada $H=1$ que corresponde a la ecuación (21), $H=1.2$, $H=1.4$, $H=1.6$, $H=1.8$ y $H=2$ correspondientes a las ecuaciones (27) a (31).

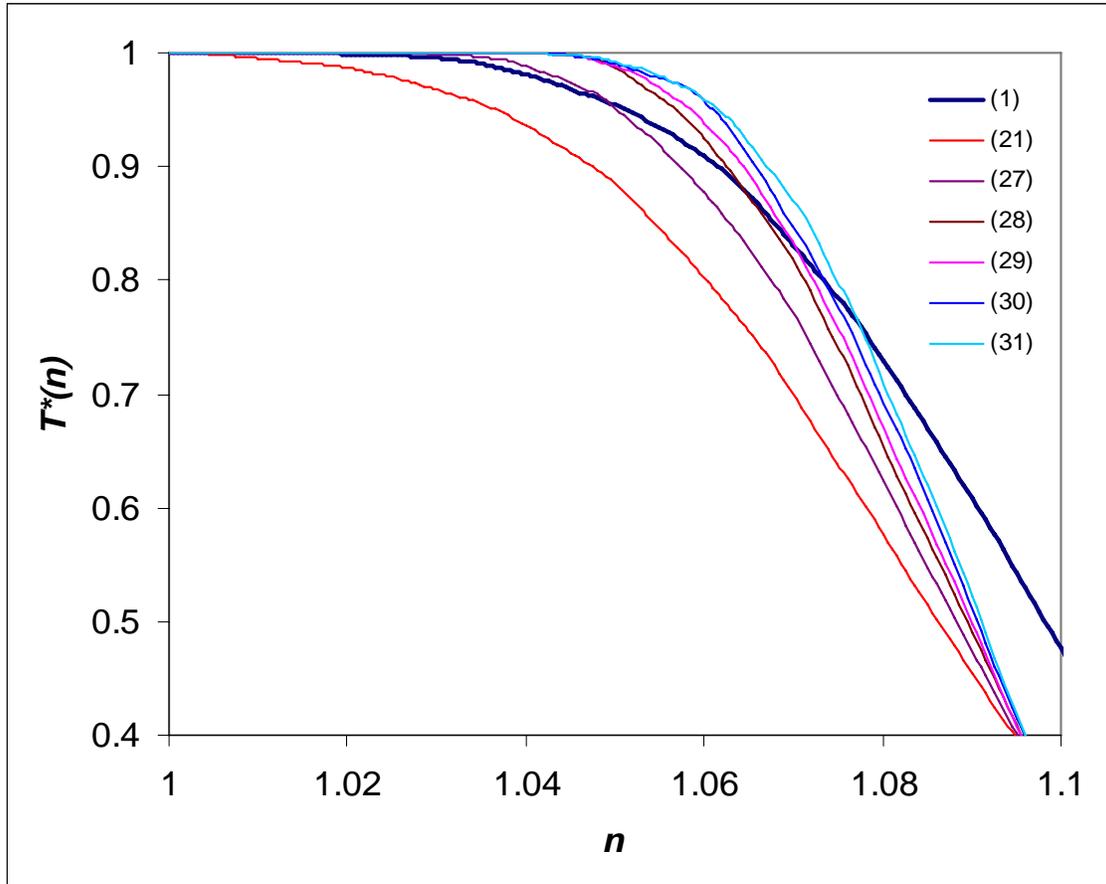


Figura 4.26 Transmisión relativa $T^*(n)$ para un intervalo de índices de refracción $1 \leq n \leq 1.1$, para la semiesfera (1) y los paraboloides modelados por las ecuaciones (21) y (27) a (31).

Para un intervalo de índices de refracción desde $n=1.1$ hasta $n=1.2$ este comportamiento de las características de transmisión relativa para estos paraboloides se invierte, como se muestra en la figura 4.27. En este intervalo las características pertenecientes a las menores alturas H , tienen una magnitud de transmisión mayor, conforme H va aumentando, la transmisión va disminuyendo, quedando ordenadas desde $H=2$ hasta $H=1$. En cuanto al comportamiento de la transmisión con respecto a la semiesfera, quedan todas las gráficas correspondientes a los paraboloides, por debajo de la gráfica de la semiesfera para ambos intervalos.

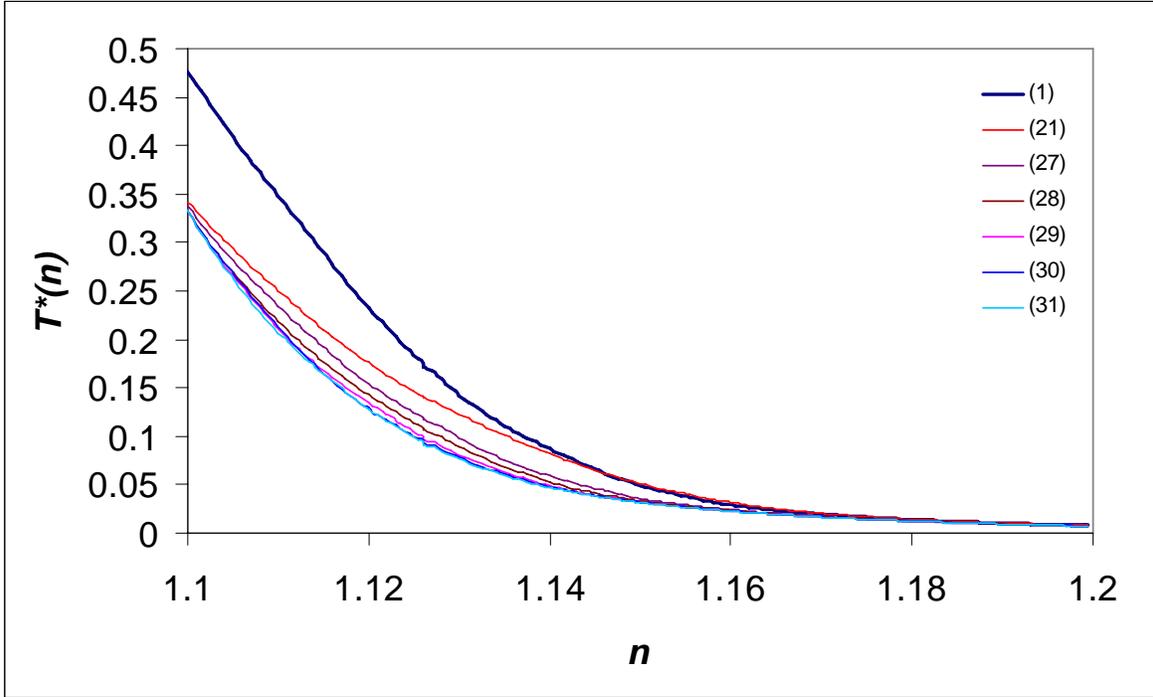
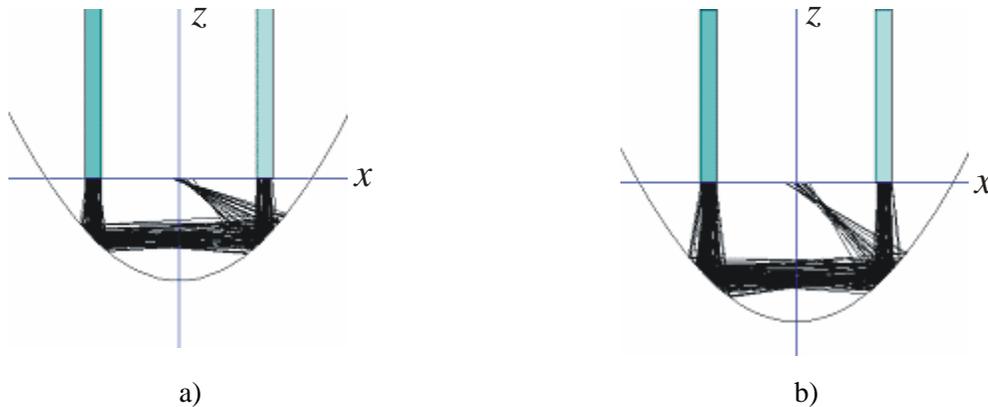


Figura 4.27 Transmisión relativa $T^*(n)$ para un intervalo de índices de refracción $1.1 \leq n \leq 1.2$, para la semiesfera (1) y los paraboloides modelados por las ecuaciones (21) y (27) a (31).

En la figura 4.28 se muestra el resultado del trazado de rayos para algunos de los paraboloides de la primer variación, en la que podemos observar que para $H=0.8$, correspondiente a la ecuación (26), se tiene el menor número de trayectorias que se desvían hacia el centro, lo cual produce un máximo en la transmisión absoluta, como se muestra en la figura 20. En el trazado de rayos podemos observar que para las ecuaciones correspondientes a $H < 0.8$ hay menores pérdidas por los rayos que se desvían hacia el centro, que para las ecuaciones con $H > 0.8$ como en la figura 4.28c) y 4.28d).



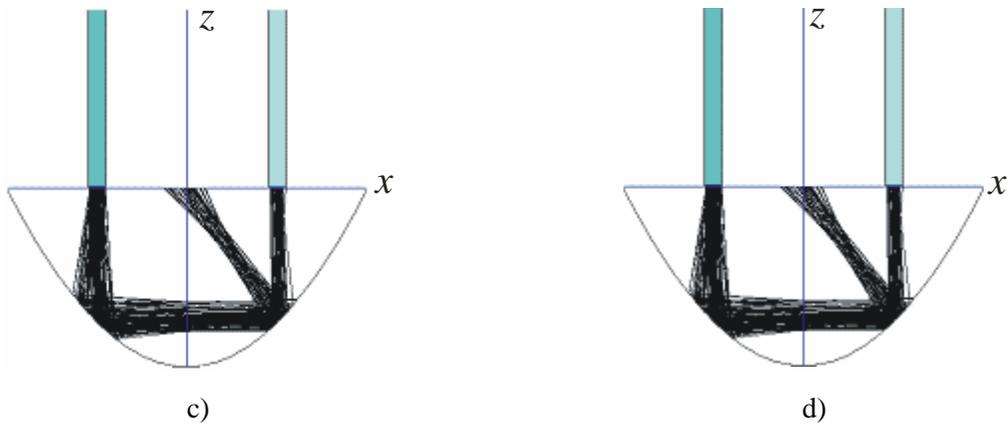


Figura 4.28 Resultados del trazado de rayos en el plano xz para los sensores paraboloidales: a) ecuación (25), b) ecuación (26), c) ecuación (21) d) ecuación (28).

4.3.6.2 Comparación de la transmisión relativa $T^*(n)$ para las variaciones del paraboloides (22)

En la figura 4.29 se muestra la transmisión relativa $T^*(n)$ para un intervalo de índices de refracción entre 1 y 1.1. Para este intervalo se puede apreciar que la transmisión del paraboloides (32) tiene una mayor transmisión relativa que la semiesfera hasta $n=1.077$, los demás quedan por debajo de la transmisión relativa de la semiesfera en este intervalo. Comparando cada una de las características de los paraboloides entre si, podemos observar el mismo comportamiento que para los paraboloides de la sección anterior en el que a menor H la transmisión relativa muestra un desplazamiento hacia arriba dentro de este intervalo, quedando la de $H=0.6$ hasta arriba y la ecuación (22) con $H=1$.

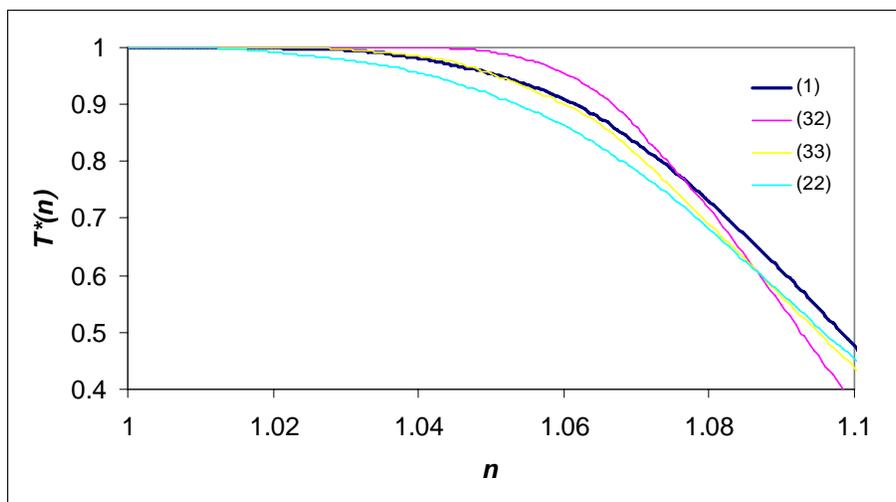


Figura 4.29 Transmisión relativa $T^*(n)$ para un intervalo de índices de refracción $1 \leq n \leq 1.1$, para la semiesfera (1) y los paraboloides modelados por las ecuaciones (32), (33) y (22).

A diferencia de lo ocurrido con los paraboloides de la primera variación (derivados de la ecuación (21)), el comportamiento para el intervalo de índice de refracción n entre 1.1 y 1.2 se invierte, teniendo una menor transmisión conforme la altura H disminuye, quedando las gráficas de las ecuaciones en el orden inverso que para el intervalo anterior. También se tiene una diferencia con respecto a las variaciones de la ecuación (21) de la figura 4.25, en cuanto al comportamiento de las respuestas de los paraboloides con respecto a la semiesfera, pues en la figura 4.25 podemos apreciar que todas las características de los paraboloides quedan por encima de la del sensor semiesférico, mientras que en la figura 4.30 podemos observar que para este intervalo el sensor (32) queda por debajo del sensor semiesférico, lo cual podría utilizarse en aplicaciones en donde se requiera una respuesta del tipo escalón.

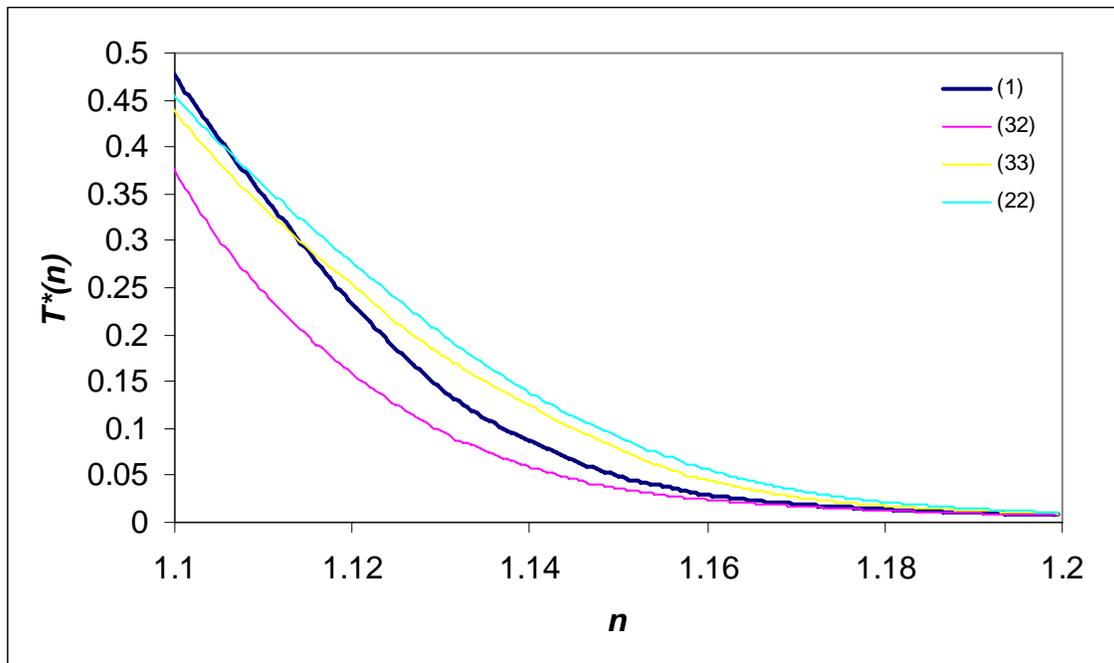


Figura 4.30 Transmisión relativa $T^*(n)$ para un intervalo de índices de refracción $1.1 \leq n \leq 1.2$, para la semiesfera (1) y los paraboloides modelados por las ecuaciones (32), (33) y (22).

En la figura 4.31 se representa la transmisión relativa $T^*(n)$ para sensores paraboloidales con $H \geq 1$ en el intervalo de $n=1.1$ hasta $n=1.2$. Para este intervalo los sensores paraboloidales presentan una transmisión relativa que va desplazándose hacia arriba conforme el valor de H aumenta, teniendo hasta abajo la característica de transmisión relativa del sensor (34) con una $H=1.2$, y en la parte superior la ecuación (38) con una $H=2$. Comparando estas respuestas con la del sensor semiesférico, se tiene que la transmisión relativa del sensor (35) coincide hasta una $n=1.075$ y después la del sensor paraboloidal disminuye más rápidamente. Las características de

transmisión relativa de los sensores (36), (37) y (38) son mayores que la de la semiesfera hasta $n=1.09$, a partir de donde cruzan la respuesta del sensor semiesférico y decrecen más rápidamente. El sensor (34) muestra una característica que queda por debajo de la transmisión relativa semiesfera durante todo este intervalo.

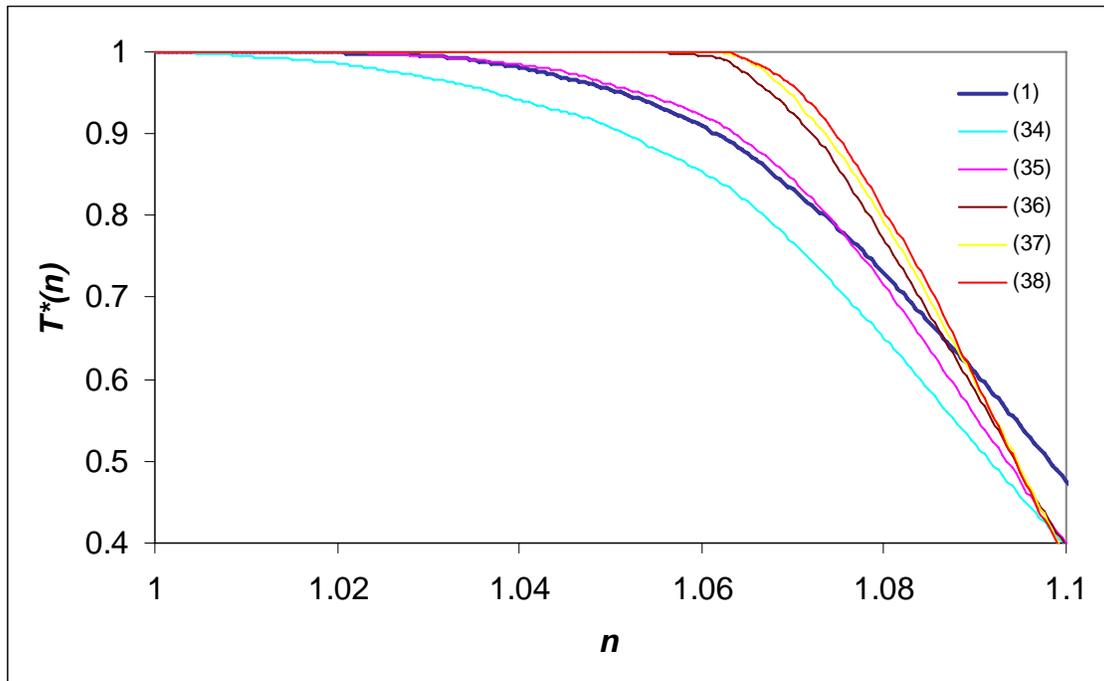


Figura 4.31 Transmisión relativa $T^*(n)$ para un intervalo de índices de refracción $1 \leq n \leq 1.1$, para la semiesfera (1) y los paraboloides modelados por las ecuaciones (22) y (34) a (38).

Para estos mismos sensores, en el intervalo desde $n=1.1$ hasta $n=1.2$ la transmisión relativa $T^*(n)$ se muestra en la figura 4.32. Para este intervalo el comportamiento de la transmisión es inverso con respecto al intervalo anterior, ya que las gráficas muestran una transmisión con menor magnitud al tener una mayor altura H . La transmisión $T^*(n)$ de los sensores (36), (37) y (38) quedan por debajo de la transmisión del sensor semiesférico, mientras que la transmisión relativa del sensor (35) vuelve a coincidir con la característica de transmisión relativa del sensor semiesférico a partir de $n=1.13$, esta coincidencia también se muestra en la gráfica 31 en el intervalo inicial. Por último el sensor (34) cuya transmisión fue la única que quedó por debajo de la del sensor semiesférico en el intervalo anterior, es la única que queda por encima de la de la característica de la semiesfera a partir de $n=1.125$.

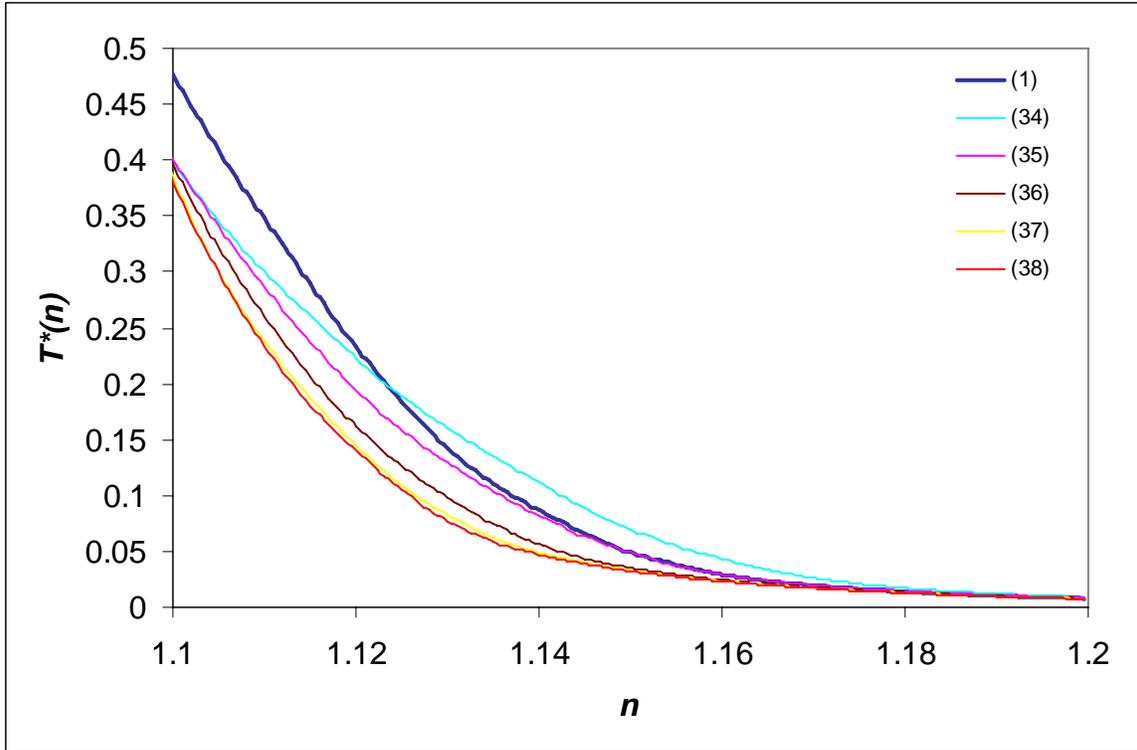
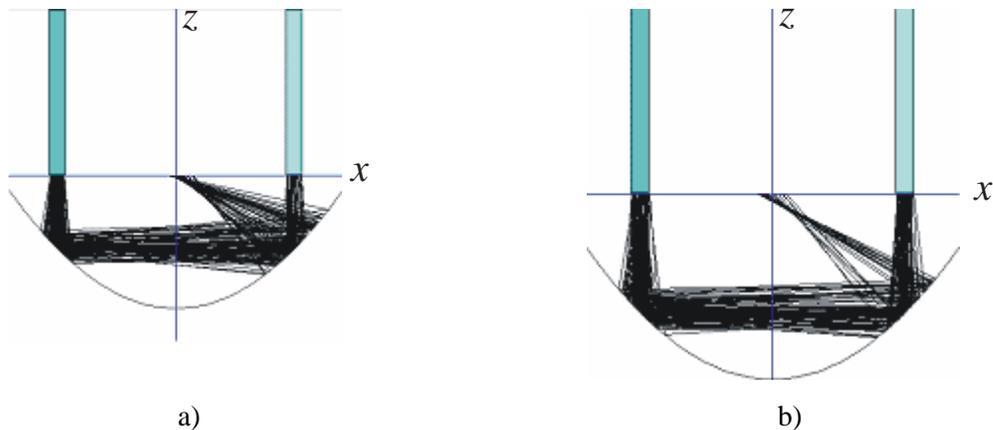


Figura 4.32 Transmisión relativa $T^*(n)$ para un intervalo de índices de refracción $1.1 \leq n \leq 1.2$, para la semiesfera (1) y los paraboloides modelados por las ecuaciones (34) a (38).

El resultado del trazado de rayos para algunos de los sensores de la variación de la ecuación (22) se muestra en la figura 4.33, en la cual se aprecia un cierto número de rayos que se desvían hacia el centro. El sensor (22) es el que muestra el menor número de rayos desviados hacia el centro, por lo que es el que tiene la mayor transmisión absoluta T como se muestra en la figura 4.22. Para el sensor de la figura 4.33d) podemos observar que además del gran número de rayos que se desvían hacia el centro, también aparecen una serie de rayos que abandonan el sensor.



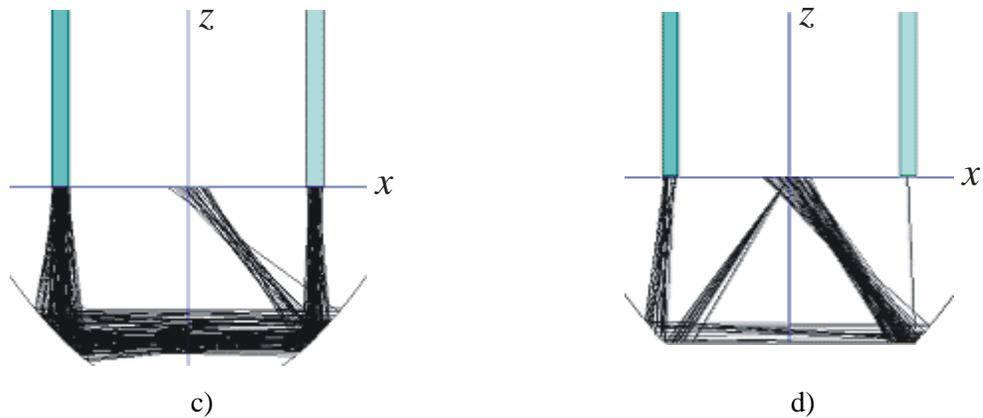


Figura 4.33 Resultados del trazado de rayos en el plano xz para los sensores con elementos paraboloidales: a) ecuación (33), b) ecuación (22), c) ecuación (34), d) ecuación (35).

4.3.6.3 Comparación de la transmisión relativa $T^*(n)$ para las variaciones del paraboloide (23)

En el intervalo comprendido entre $n=1.1$ y $n=1.2$ para los sensores con $H < 0.6$, la respuesta de transmisión relativa muestra el mismo comportamiento que para las variaciones analizadas anteriormente, lo que origina una menor transmisión entre mayor es la H para este intervalo. A diferencia de los casos anteriores todas las características de transmisión relativa quedan por debajo de la del sensor semiesférico y no hay ninguna que se le parezca. También podemos observar que las características de los sensores (40) y (41) son muy similares, debido a que el cambio de la altura H entre ellas es menor que la de las otras variaciones, pues para la ecuación (40) $H=0.4$ y para la ecuación (41) $H=0.5285$. Este incremento menor se realizó porque el máximo de transmisión para este sensor se encuentra en $H=0.5285$ el cual aparece en la figura 4.34.

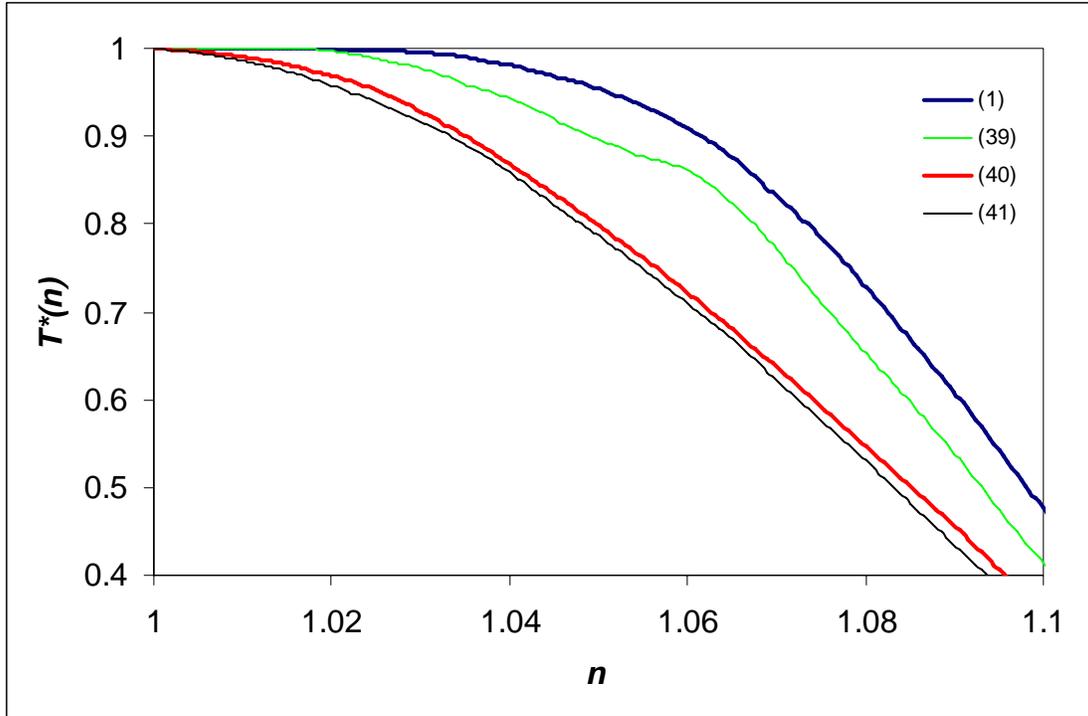


Figura 4.34. Transmisión relativa $T^*(n)$ para un intervalo de índices de refracción $1 \leq n \leq 1.1$, para la semiesfera (1) y los paraboloides modelados por las ecuaciones (39) a (41).

A diferencia de los sensores paraboloidales analizados en las figuras 4.25 y 4.30 el cambio en el orden de las características para los sensores paraboloidales (39) a (41) ocurren después de $n=1.1$ y de manera menos marcada que en los casos anteriores. En la figura 4.35 se puede observar que mantienen el mismo comportamiento que en la figura 34 hasta $n=1.12$ en donde las características de transmisión comienzan a cambiar de posición, hasta $n=1.16$ en donde las características de transmisión relativa quedan invertidas con respecto al intervalo anterior, quedando en la parte inferior el sensor (39) que tiene una $H=0.2$ que es la menor, y en la parte superior el sensor (41) con la $H=0.5285$ siendo la mayor de esta figura. Al igual que en la figura 4.25, la transmisión del sensor semiesférico queda por debajo de las respuestas de todos los paraboloides.

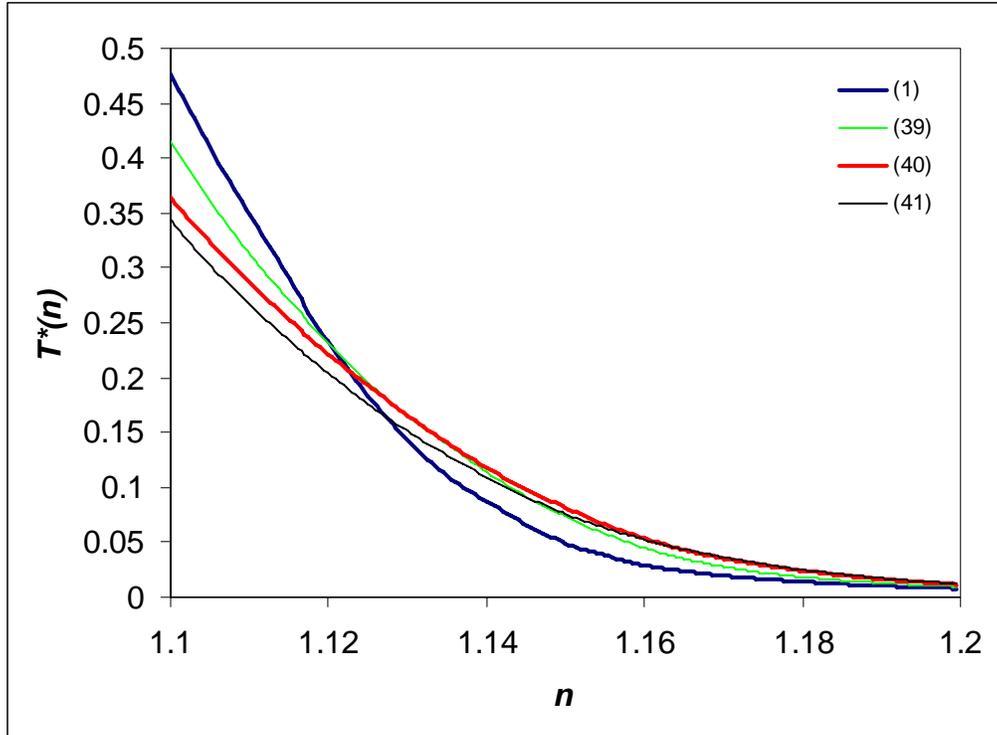


Figura 4.35 Transmisión relativa $T^*(n)$ para un intervalo de índices de refracción $1.1 \leq n \leq 1.2$, para la semiesfera (1) y los paraboloides modelados por las ecuaciones (39) a (41).

Para los sensores originados de la variación de la ecuación (23) con $H \geq 0.6$ las respuestas en el intervalo desde $n=1$ hasta $n=1.1$ muestran un comportamiento muy distinto al de las figuras 4.26 y 4.31. En la figura 4.36 se observa que todas las respuestas de estos paraboloides en este intervalo, tienen una característica de transmisión relativa, por debajo de la del sensor semiesférico. Los paraboloides (42), (43) y (23) muestran el mismo comportamiento que en las figuras 4.26 y 4.31 en donde se tiene una menor transmisión relativa para una H menor. Pero para $H \geq 1.2$ la posición de la transmisión relativa de cada paraboloides ya no queda ordenada con respecto a H . Las gráficas para las ecuaciones (44) a (48) quedan muy cercanas, esto se debe a que la transmisión absoluta para todos estos paraboloides es muy pequeña, de hecho es la que tiene la menor magnitud que para todas las otras variaciones de sensores (figura 4.22b). Para este intervalo el orden de las características de transmisión relativa es el siguiente: (46), (48), (45), (44) y (47), correspondientes a $H=1.6, 2, 1.4, 1.2, 1.8$.

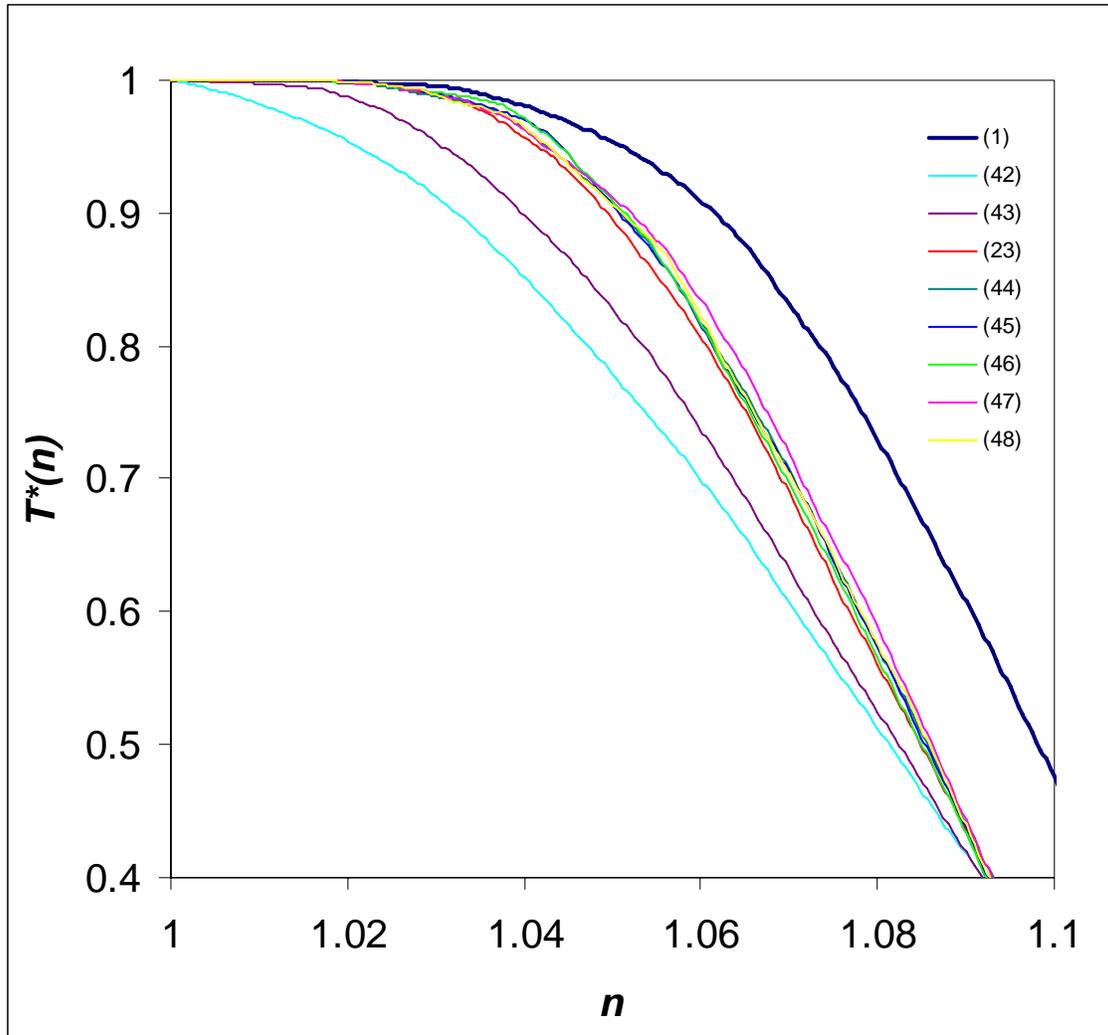


Figura 4.36 Transmisión relativa $T^*(n)$ para un intervalo de índices de refracción $1 \leq n \leq 1.1$, para la semiesfera (1) y los paraboloides modelados por las ecuaciones (23) y (42) a (48).

En la figura 4.37 el intervalo se modificó para $n=1.1$ hasta $n=1.14$ para poder observar con mayor detalle el comportamiento de transmisión relativa de los paraboloides (23) y (42) a (48), dado que se encuentran muy cerca una de la otra. La transmisión relativa del sensor con elemento de detección semiesférico queda por arriba de las transmisión de los sensores con elementos de detección paraboloidales hasta $n=1.13$, para este índice de refracción las respuestas de los sensores (23) (43) y (42) quedan por arriba de la transmisión del sensor semiesférico (1) y al igual que en la figura 4.36 muestran un comportamiento ordenado pero invertido en la que la menor magnitud de transmisión corresponde a la menor H . Para los otros sensores la gráfica en orden ascendente es sensor (48), (45), (47), (46) y (44), correspondientes a $H=2, 1.4, 1.8, 1.6$ y 1.2 . respectivamente.

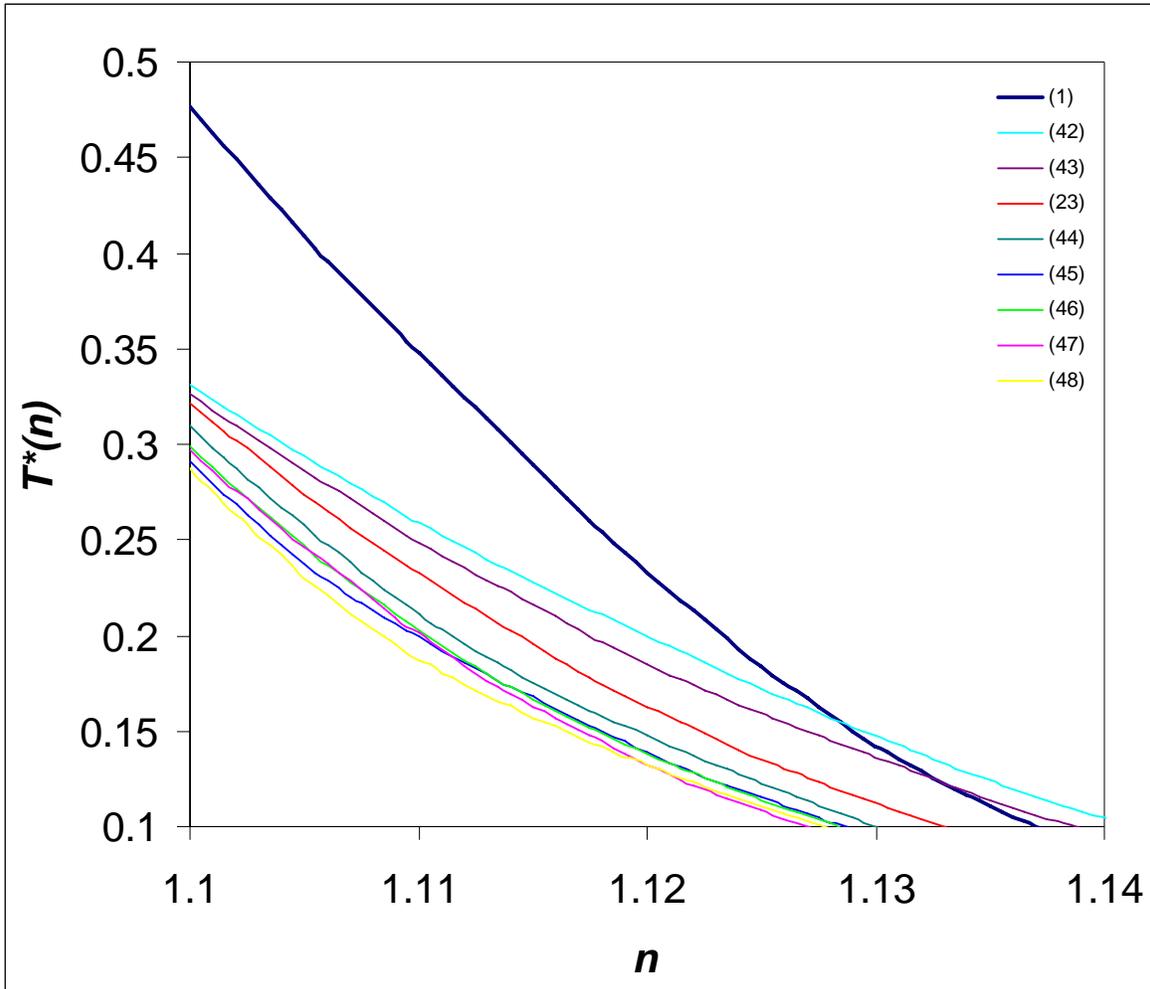


Figura 4.37 Transmisión relativa $T^*(n)$ para un intervalo de índices de refracción $1.1 \leq n \leq 1.14$, para la semiesfera (1) y los paraboloides modelados por las ecuaciones (23) y (42) a (48).

El resultado del trazado de rayos para los sensores generados a partir de la variación de la ecuación (23) se encuentra en la figura 4.38. Existe un conjunto de rayos que se desvían hacia el centro del sensor, disminuyendo la transmisión absoluta. El sensor de la ecuación (41), cuyo trazado de rayos corresponde a la figura 4.38b) muestra el menor número de rayos desviados hacia el centro, por lo que el máximo de la figura 4.22c) queda explicado. Como en los casos anteriores también se puede observar que además de las pérdidas de los rayos con una trayectoria hacia el centro del sensor, para $H > 1$ se tiene además cierto número de rayos que escapan del sensor como se muestra en la figura 4.38e) que muestra el trazado de rayos del sensor (44) cuya H corresponde a 1.2.

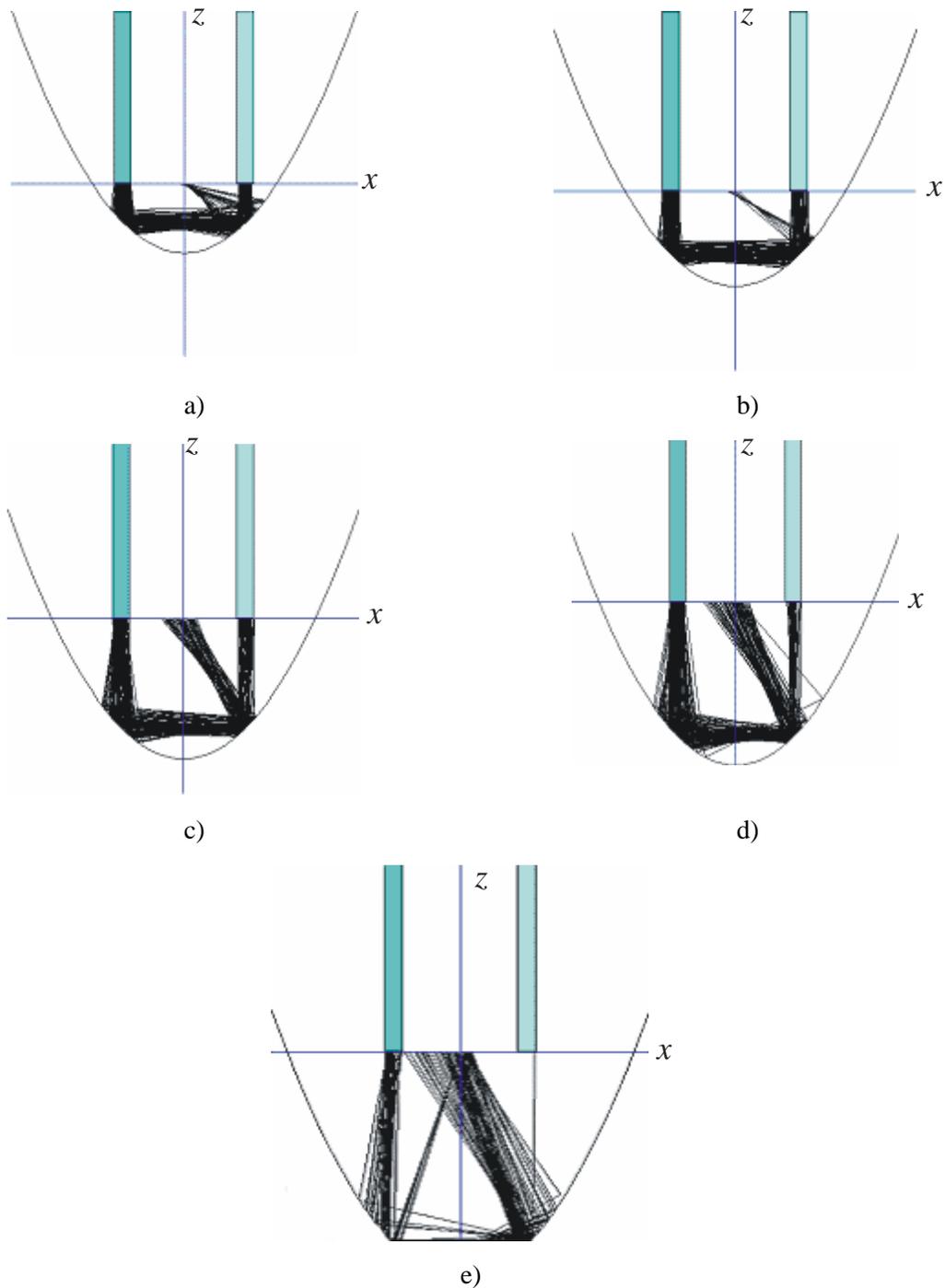


Figura 4.38 Resultados del trazado de rayos en el plano xz para los sensores con elemento de detección paraboloidal: a) ecuación (40), b) ecuación (41), c) ecuación (43), d) ecuación (23), e) ecuación (44).

En la figura 4.39 podemos observar el resultado del trazado de rayos en el plano yz para algunos paraboloides, aunque el acoplamiento es más fácil de observar en el plano xz , el plano yz nos da otra perspectiva de las trayectorias que siguen los rayos en los paraboloides. En la figuras 4.38b),

4.38c) y 4.38d) podemos observar también los rayos que salen del sensor que se desvían hacia el centro, que aparecen en la figura 4.28c), 4.33c), y 4.38b).

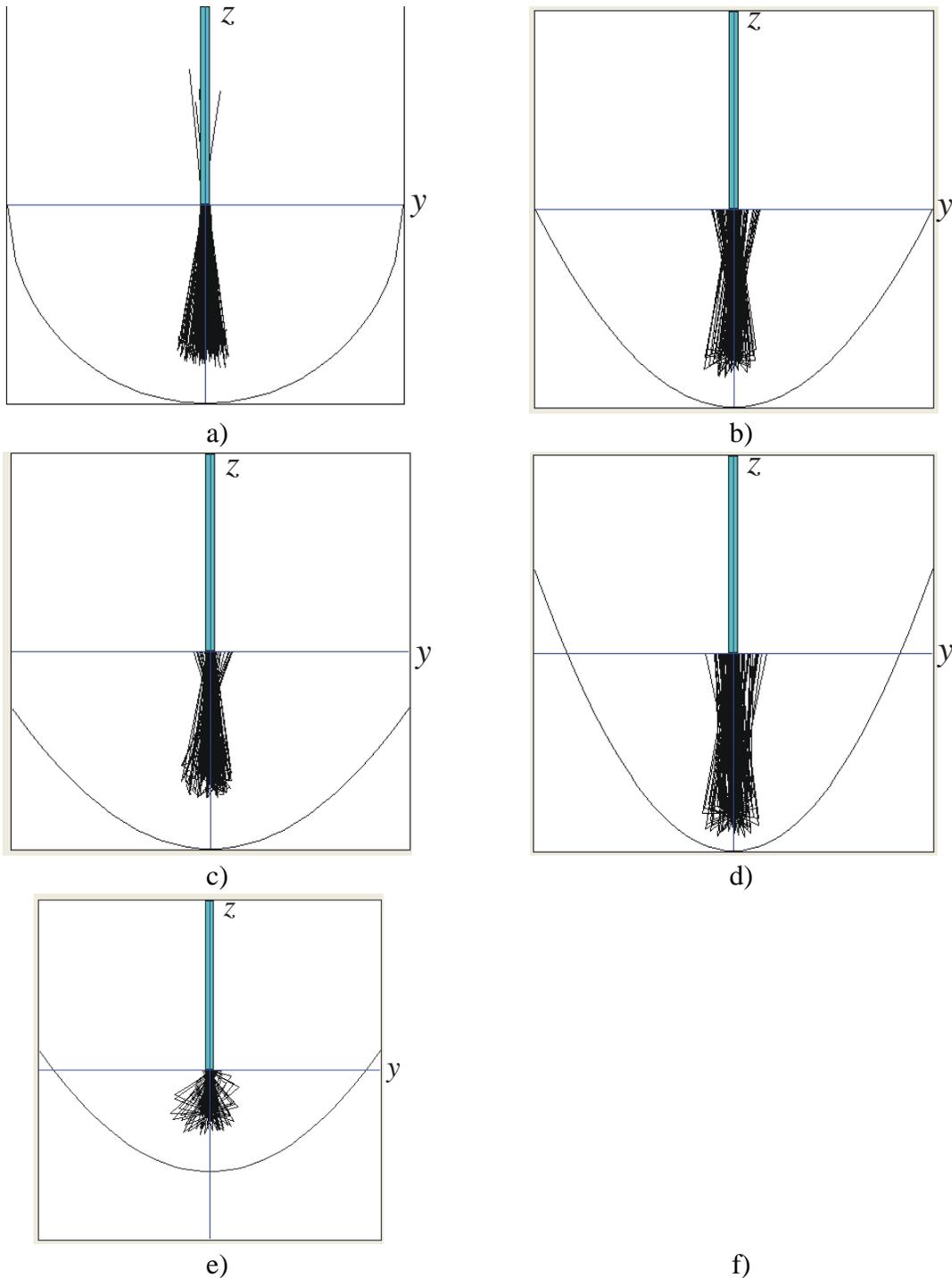


Figura 4.39 Resultados del trazado de rayos en el plano yz para algunos sensores con elemento de detección paraboloïdal: a) ecuación (1), b) ecuación (21), c) ecuación (22), d) ecuación (23), e) ecuación (32), f) ecuación (41).

4.3.6.4 Análisis de la linealidad, intervalo de entrada, intervalo de salida de los sensores con elemento de detección paraboloidal.

En la tabla 4.4 se muestran las características de los sensores paraboloidales analizados en las secciones 4.4 a 4.4.6.3 La tabla muestra al menos siete sensores con una menor no linealidad máxima $\Delta N_{m\acute{a}x}$, estos sensores son: (25), (26), (21), (33), (22), (34), (40), (41), (42) y (43).

Todos estos sensores además tienen un intervalo de entrada mayor Δn , pero un menor intervalo de salida $\Delta T^*(n)$ que el sensor semiesférico.

Estos siete sensores tienen un intervalo para $n_{m\acute{i}n}$ entre: $1.0355 < n_{m\acute{i}n} < 1.0625$, mientras que la $n_{m\acute{a}x}$ para todos los sensores paraboloidales es de 1.12.

Tabla 4.4 Características de los sensores paraboloidales

#	Ecuación	H	n_{min}	n_{max}	Δn	$T^*(n_{max})$	$T^*(n_{min})$	$\Delta T^*(n)$	K	$\Delta N_{max}\%$
1	$x^2+y^2+z^2=1$	1.0	1.0765	1.13	0.0510	0.1005	0.8706	0.7701	15.10	6.13
24	$x^2+y^2-z=0.4$	0.4	1.0620	1.12	0.0580	0.2375	0.8852	0.6477	11.17	6.17
25	$x^2+y^2-z=0.6$	0.6	1.0550	1.12	0.0650	0.2602	0.8870	0.6267	9.64	3.92
26	$x^2+y^2-z=0.8$	0.8	1.0475	1.12	0.0725	0.2143	0.8848	0.6705	9.25	4.56
21	$x^2+y^2-z=1$	1.0	1.0500	1.12	0.0700	0.1758	0.8849	0.7091	10.13	5.18
27	$x^2+y^2-z=1.2$	1.2	1.0590	1.12	0.0610	0.1542	0.8858	0.7316	11.99	7.81
28	$x^2+y^2-z=1.4$	1.4	1.0640	1.12	0.0560	0.1426	0.8852	0.7426	13.26	10.39
29	$x^2+y^2-z=1.6$	1.6	1.0660	1.12	0.0540	0.1346	0.8828	0.7482	13.86	10.81
30	$x^2+y^2-z=1.8$	1.8	1.0670	1.12	0.0530	0.1288	0.8865	0.7577	14.30	10.92
31	$x^2+y^2-z=2$	2.0	1.0670	1.12	0.0530	0.1279	0.9011	0.7733	14.59	13.46
32	$0.714x^2+0.714y^2-z=0.6$	0.6	1.0680	1.12	0.0520	0.1588	0.8866	0.7278	14.00	9.41
33	$0.714x^2+0.714y^2-z=0.8$	0.8	1.0625	1.12	0.0575	0.2537	0.8848	0.6311	10.98	5.72
22	$0.714x^2+0.714y^2-z=1$	1.0	1.0565	1.12	0.0635	0.2770	0.8849	0.6079	9.57	4.73
34	$0.714x^2+0.714y^2-z=1.2$	1.2	1.0545	1.12	0.0655	0.2233	0.8843	0.6610	10.09	6.04
35	$0.714x^2+0.714y^2-z=1.4$	1.4	1.0655	1.12	0.0545	0.1943	0.8850	0.6907	12.67	6.77
36	$0.714x^2+0.714y^2-z=1.6$	1.6	1.0735	1.12	0.0465	0.1624	0.8822	0.7198	15.48	10.66
37	$0.714x^2+0.714y^2-z=1.8$	1.8	1.0745	1.12	0.0455	0.1447	0.8864	0.7417	16.30	12.23
38	$0.714x^2+0.714y^2-z=2$	2.0	1.0755	1.12	0.0445	0.1405	0.8874	0.7469	16.78	12.84
39	$x^2+y^2-0.7z=0.14$	0.2	1.0520	1.12	0.0680	0.2321	0.8883	0.6561	9.65	9.30
40	$x^2+y^2-0.7z=0.28$	0.4	1.0380	1.12	0.0820	0.2219	0.8817	0.6599	8.05	3.01
41	$x^2+y^2-0.7z=0.37$	0.5	1.0360	1.12	0.0840	0.2043	0.8851	0.6809	8.11	3.57
42	$x^2+y^2-0.7z=0.42$	0.6	1.0355	1.12	0.0845	0.1997	0.8812	0.6815	8.07	4.42
43	$x^2+y^2-0.7z=0.56$	0.8	1.0420	1.12	0.0780	0.1847	0.8860	0.7014	8.99	5.58
23	$x^2+y^2-0.7z=0.7$	1.0	1.0515	1.12	0.0685	0.1653	0.8831	0.7178	10.48	7.40
44	$x^2+y^2-0.7z=0.84$	1.2	1.0530	1.12	0.0670	0.1474	0.8854	0.7380	11.02	7.93
45	$x^2+y^2-0.7z=0.98$	1.4	1.0525	1.12	0.0675	0.1391	0.8869	0.7479	11.08	9.39
46	$x^2+y^2-0.7z=1.12$	1.6	1.0565	1.12	0.0635	0.1380	0.8552	0.7173	11.30	9.02
47	$x^2+y^2-0.7z=1.26$	1.8	1.0545	1.12	0.0655	0.1322	0.8830	0.7509	11.46	8.60
48	$x^2+y^2-0.7z=1.4$	2.0	1.0535	1.12	0.0665	0.1321	0.8850	0.7529	11.32	9.73

4.4 Comparación de la característica de transmisión de los elipsoides y paraboloides ante cambios en parámetros de las fibras ópticas del sensor.

Una vez obtenidos los parámetros geométricos tanto de elipsoides como de paraboloides que muestran algunas características de desempeño superiores a las de la semiesfera (ver sección 4.4.6.4), se hicieron variaciones en parámetros de las fibras ópticas, (sin modificar la geometría del elemento de detección del sensor), tales como la posición de las fibras sobre la superficie, el diámetro o la apertura numérica de las fibras, y el índice de refracción del núcleo de las fibras y del elemento de detección del sensor.

Los elementos de detección seleccionados para variar estos parámetros fueron los elipsoides (2), (10), y (15) y los paraboloides (22), (26) y (41). Estos elementos fueron elegidos por representar cada una las diferentes variaciones elaboradas y por tener mayor linealidad que la transmisión relativa de los sensores semiesféricos, aunque para estas variaciones, la no linealidad máxima, no será tomada en cuenta.

Los cambios en las características de transmisión de estos sensores se encuentran resumidos en la tabla 4.5.

Tabla 4.5. Características de los sensores (2), (10), (15), (22), (26) y (41) ante las variaciones de un parámetro no geométrico

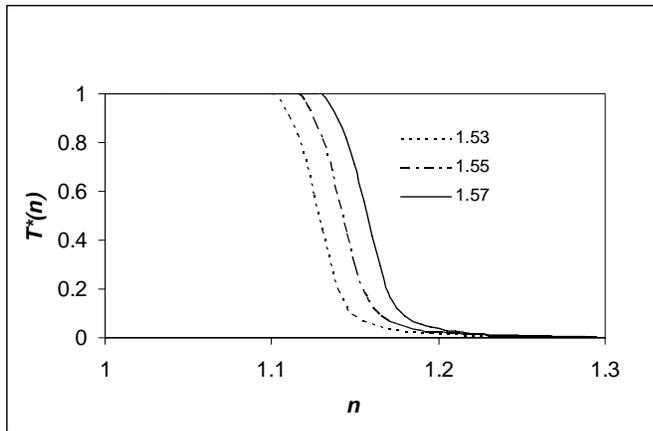
#	Ecuación	Posición Fibras	Diámetro fibras	Apertura Numérica	Índice de Refracción del sensor n_e	n_{min}	n_{max}	Δn	$T^*(n_{min})$	$T^*(n_{max})$	ΔT^*	K
2	$x^2+y^2+0.756z^2=1$	x=0.707	d=0.05	0.2	1.53	1.105	1.200	0.095	0.9795	0.0127	0.9667	10.18
					1.55	1.120	1.215	0.095	0.9680	0.0129	0.9551	10.05
					1.57	1.135	1.235	0.100	0.9562	0.0114	0.9448	9.45
10	$2.34x^2+1.5y^2+2.66z^2=1.5$	x=0.707	d=0.05	0.2	1.53	1.275	1.365	0.090	0.9998	0.0034	0.9965	11.07
					1.55	1.295	1.380	0.085	0.9985	0.0049	0.9936	11.69
					1.57	1.315	1.395	0.080	0.9986	0.0066	0.9920	12.40
15	$4.68x^2+3y^2+2.66z^2=3$	x=0.707	d=0.05	0.2	1.53	1.300	1.425	0.060	0.9965	0.0068	0.9897	16.49
					1.55	1.315	1.445	0.125	0.9998	0.0063	0.9935	7.95
					1.57	1.335	1.465	0.130	0.9958	0.0054	0.9935	7.64
22	$0.714x^2+0.714y^2-z=1$	x=0.707	d=0.05	0.2	1.53	1.015	1.180	0.165	0.9981	0.0127	0.9855	5.97
					1.55	1.025	1.195	0.170	0.9998	0.0126	0.9872	5.81
					1.57	1.040	1.160	0.120	0.9996	0.1363	0.8633	7.19
26	$x^2+y^2-z=0.8$	x=0.5	d=0.05	0.2	1.53	1.005	1.175	0.170	0.9977	0.0105	0.9872	5.81
					1.55	1.015	1.190	0.175	0.9993	0.0108	0.9886	5.65
					1.57	1.030	1.195	0.165	0.9990	0.0146	0.9844	5.97
41	$x^2+y^2-0.7z=0.37$	x=0.3535	d=0.05	0.2	1.53	1.005	1.185	0.180	0.9949	0.0101	0.9848	5.47
					1.55	1.005	1.195	0.190	0.9997	0.0120	0.9876	5.20
					1.57	1.015	1.195	0.180	0.9999	0.0210	0.9789	5.44
2	$x^2+y^2+0.756z^2=1$	x=0.707	d=0.05	0.1	1.55	1.125	1.205	0.080	0.9238	0.0125	0.9113	11.39
				0.2		1.120	1.215	0.095	0.9680	0.0129	0.9551	10.05
				0.4		1.050	1.215	0.165	0.9994	0.0131	0.9863	5.98
10	$2.34x^2+1.5y^2+2.66z^2=1.5$	x=0.707	d=0.05	0.1	1.55	1.315	1.375	0.060	0.9999	0.0050	0.9949	16.58
				0.2		1.295	1.380	0.085	0.9985	0.0049	0.9936	11.69
				0.4		1.280	1.390	0.110	0.9971	0.0037	0.9935	9.03
15	$4.68x^2+3y^2+2.66z^2=3$	x=0.707	d=0.05	0.1	1.55	1.390	1.450	0.060	0.9997	0.0050	0.9947	16.58
				0.2		1.315	1.445	0.125	0.9998	0.0063	0.9935	7.95
				0.4		1.275	1.440	0.130	0.9995	0.0057	0.9935	7.64

22	$0.714x^2+0.714y^2-z=1$	x=0.707	d=0.05	0.1	1.55	1.050	1.180	0.130	0.9969	0.0129	0.9840	7.57
				0.2		1.025	1.195	0.170	0.9998	0.0126	0.9872	5.81
				0.4		1.025	1.195	0.170	0.9984	0.0271	0.9713	5.71
26	$x^2+y^2-z=0.8$	x=0.5	d=0.05	0.1	1.55	1.045	1.185	0.140	0.9970	0.0113	0.9857	7.04
				0.2		1.015	1.190	0.175	0.9993	0.0108	0.9886	5.65
				0.4		1.005	1.185	0.180	0.9978	0.0116	0.9862	5.48
41	$x^2+y^2-0.7z=0.37$	x=0.3535	d=0.05	0.1	1.55	1.030	1.190	0.160	0.9999	0.0102	0.9897	6.19
				0.2		1.005	1.190	0.185	0.9997	0.0144	0.9853	5.33
				0.4		1.005	1.195	0.190	0.9981	0.0325	0.9656	5.08
2	$x^2+y^2+0.756z^2=1$	x=0.707	d=0.025	0.2	1.55	1.140	1.210	0.070	0.9009	0.0180	0.8830	12.61
			d=0.05			1.120	1.205	0.085	0.9680	0.0177	0.9503	11.18
			d=0.1			1.065	1.190	0.125	0.9996	0.0187	0.9809	7.85
10	$2.34x^2+1.5y^2+2.66z^2=1.5$	x=0.707	d=0.025	0.2	1.55	1.320	1.380	0.060	0.9997	0.0053	0.9944	16.57
			d=0.05			1.300	1.380	0.080	0.9956	0.0045	0.9912	12.39
			d=0.1			1.295	1.445	0.150	0.9989	0.0035	0.9955	6.64
15	$4.68x^2+3y^2+2.66z^2=3$	x=0.707	d=0.025	0.2	1.55	1.385	1.440	0.125	0.9355	0.0065	0.9935	7.95
			d=0.05			1.315	1.445	0.060	0.9998	0.0063	0.9935	16.56
			d=0.1			1.270	1.445	0.130	0.9987	0.0053	0.9935	7.64
22	$0.714x^2+0.714y^2-z=1$	x=0.707	d=0.025	0.2	1.55	1.040	1.195	0.155	0.9983	0.0149	0.9834	6.34
			d=0.05			1.025	1.195	0.170	0.9998	0.0126	0.9872	5.81
			d=0.1			1.005	1.195	0.190	0.9999	0.0124	0.9876	5.20
26	$x^2+y^2-z=0.8$	x=0.5	d=0.025	0.2	1.55	1.025	1.180	0.155	0.9997	0.0113	0.9884	6.38
			d=0.05			1.015	1.190	0.175	0.9993	0.0108	0.9886	5.65
			d=0.1			1.005	1.195	0.190	0.9972	0.0113	0.9860	5.19
41	$x^2+y^2-0.7z=0.37$	x=0.3535	d=0.025	0.2	1.55	1.020	1.195	0.175	0.9996	0.0116	0.9880	5.65
			d=0.05			1.005	1.195	0.190	0.9997	0.0120	0.9876	5.20
			d=0.1			1.005	1.195	0.190	0.9950	0.0146	0.9804	5.16
2	$x^2+y^2+0.756z^2=1$	x=0.707	d=0.05	0.2	1.55	1.120	1.190	0.070	0.9670	0.0299	0.9371	13.39
		x=0.866				1.300	1.380	0.080	0.9992	0.0126	0.9865	12.33
		x=0.924				1.400	1.440	0.040	0.9888	0.0419	0.9469	23.67
		x=0.951				1.440	1.450	0.010	0.3994	0.0572	0.3422	34.22
10	$2.34x^2+1.5y^2+2.66z^2=1.5$	x=0.681	d=0.05	0.2	1.55	1.300	1.370	0.070	0.9919	0.0041	0.9878	14.11

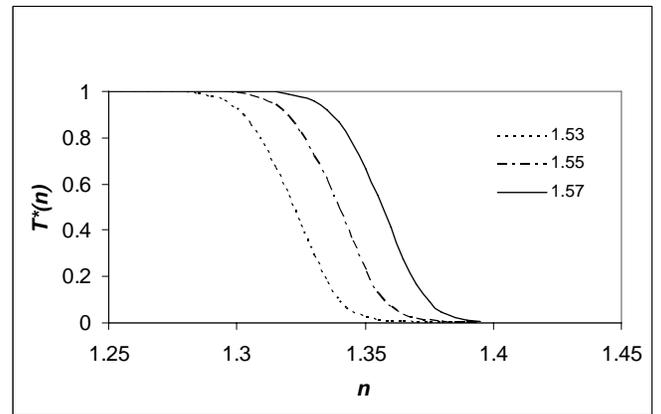
		x=0.694				1.300	1.450	0.150	0.9899	0.0034	0.9866	6.58
		x=0.707				1.300	1.390	0.090	0.9919	0.0016	0.9903	11.00
		x=0.75				1.410	1.450	0.040	0.9840	0.0050	0.9789	24.47
15	$4.68x^2+3y^2+2.66z^2=3$	x=0.681	d=0.05	0.2	1.55	1.265	1.395	0.130	0.9997	0.0041	0.9935	7.64
		x=0.694				1.300	1.425	0.125	0.9497	0.0050	0.9935	7.95
		x=0.707				1.315	1.445	0.130	0.9998	0.0063	0.9935	7.64
		x=0.75				1.395	1.455	0.060	0.9952	0.0081	0.9935	16.56
22	$0.714x^2+0.714y^2-z=1$	x=0.68	d=0.05	0.2	1.55	1.080	1.190	0.110	0.9938	0.0127	0.9811	8.92
		x=0.695				1.040	1.195	0.155	0.9992	0.0120	0.9872	6.37
		x=0.707				1.025	1.195	0.170	0.9998	0.0126	0.9872	5.81
		x=0.72				1.010	1.190	0.180	1.0000	0.0125	0.9874	5.49
26	$x^2+y^2-z=0.8$	x=0.48	d=0.05	0.2	1.55	1.045	1.180	0.135	0.9977	0.0102	0.9875	7.31
		x=0.5				1.015	1.190	0.175	0.9993	0.0108	0.9886	5.65
		x=0.52				1.020	1.195	0.175	0.9999	0.0178	0.9821	5.61
		x=0.53				1.035	1.195	0.160	0.9677	0.0335	0.9343	5.84
41	$x^2+y^2-0.7z=0.37$	x=0.33	d=0.05	0.2	1.55	1.055	1.190	0.135	0.9863	0.0102	0.9761	7.23
		x=0.34				1.025	1.195	0.170	0.9990	0.0102	0.9888	5.82
		x=0.3535				1.005	1.195	0.190	0.9997	0.0120	0.9876	5.20
		x=0.37				1.015	1.195	0.180	0.9966	0.0132	0.9834	5.46

4.4.1 Cambios en el índice de refracción del material del elemento de detección del sensor.

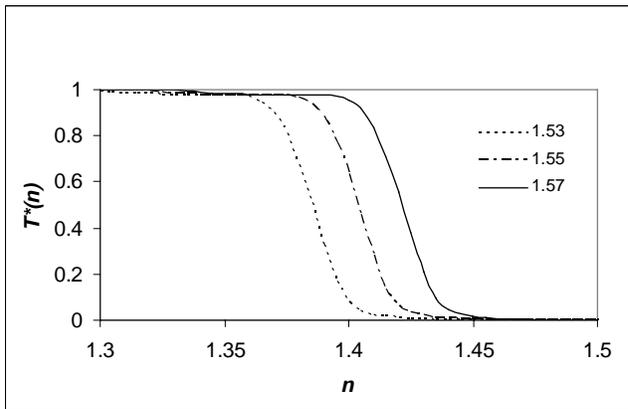
El comportamiento ante cambios en el índice de refracción del material del elemento de detección del sensor es similar al de los sensores semiesféricos [1] como se muestra en la figura 4.40. Las gráficas de transmisión relativa presentan un desplazamiento hacia la izquierda si se disminuye el índice de refracción y hacia la derecha si se incrementa, por lo que con estos sensores también es posible desplazar la respuesta en el eje n para que la transmisión del sensor quede en el intervalo deseado, mediante la elección apropiada del índice de refracción del material del elemento de detección.



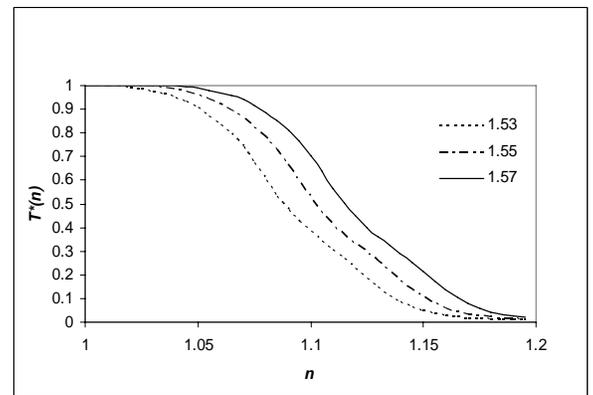
a)



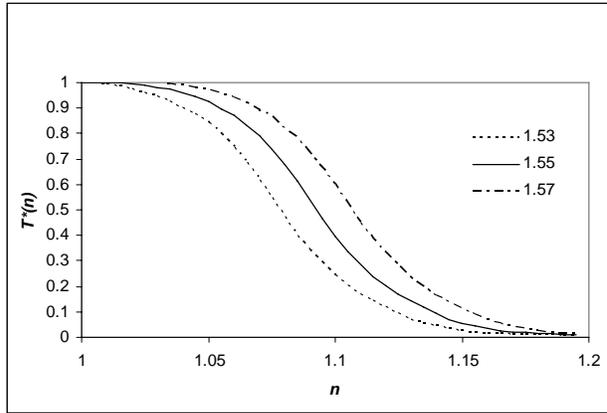
b)



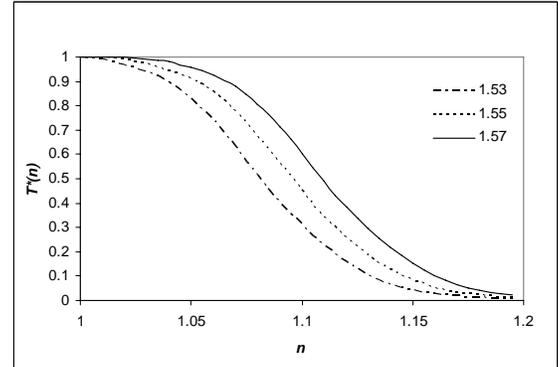
c)



d)



e)



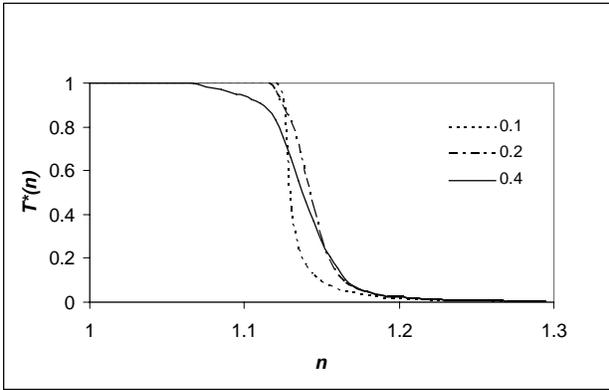
f)

Figura 4.40 Transmisión relativa $T^*(n)$ vs. índice de refracción del medio externo n , para $n_e=1.53$, $n_e=1.55$ y $n_e=1.57$: a) elipsoide (2), b) elipsoide (10), c) elipsoide (15), d) paraboloides (22), e) paraboloides (26), f) paraboloides (41).

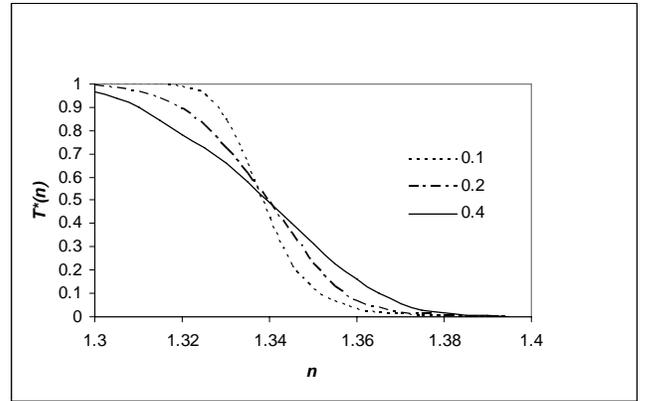
4.4.2 Cambios en la apertura numérica de las fibras ópticas.

El efecto de la apertura numérica no ocasiona ningún desplazamiento en la parte inferior de la gráfica de transmisión relativa para los elipsoides (2) y (10) y para los tres paraboloides, pero ocasiona cambios en el intervalo de entrada (n_{\min}, n_{\max}) . Este comportamiento es el mismo que se obtiene en los sensores semiesféricos. En el elipsoide (15) la modificación en la apertura numérica tampoco ocasiona un desplazamiento en la parte inferior de la curva de transmisión, pero a diferencia de los otros 5 casos, las respuestas no se cruzan para ninguna n , y en la parte superior las curvas sufren un desplazamiento hacia abajo conforme aumenta la apertura numérica. Este comportamiento se puede observar en la figura 4.41.

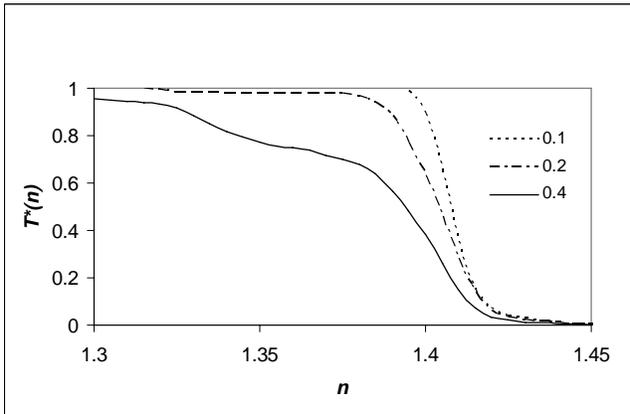
En las curvas de los sensores paraboloidales podemos observar que el cruce entre las gráficas va cambiando de posición, queda en la parte superior para el sensor (22), en la parte central para el sensor (41) y en la parte inferior para el sensor (26).



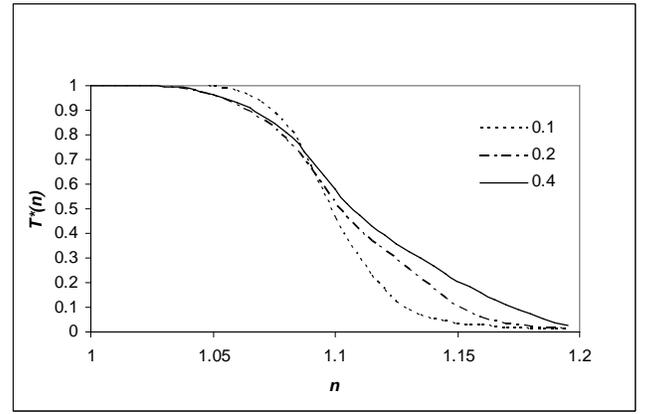
a)



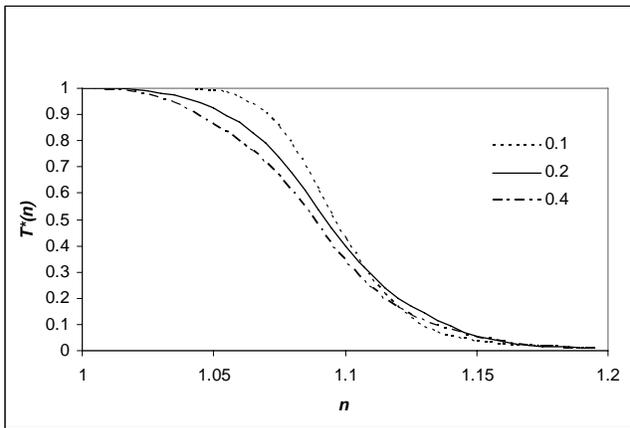
b)



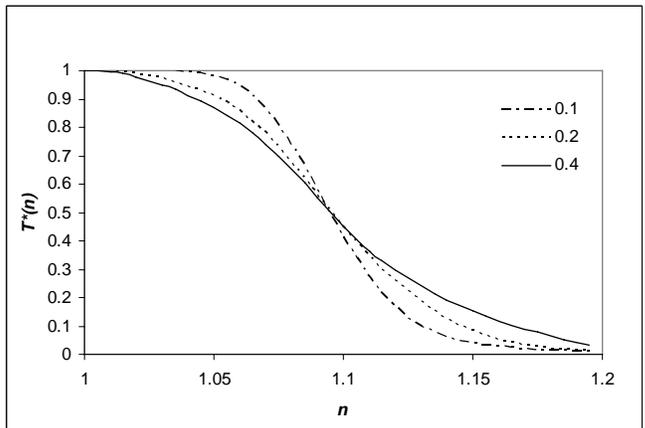
c)



d)



e)



f)

Figura 4.41 Transmisión relativa $T^*(n)$ vs. índice de refracción del medio externo n para $AN=0.1$, $AN=0.2$ y $AN=0.4$: a) elipsoide (2), b) elipsoide (10), c) elipsoide (15), d) paraboloid (22), e) paraboloid (26), f) paraboloid (41).

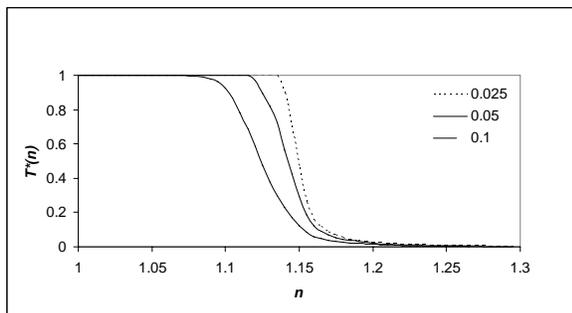
4.4.3 Cambios en el diámetro del núcleo de las fibras ópticas

El cambio en el diámetro del núcleo de las fibras ópticas para los sensores semiesféricos [1], ocasiona un incremento en el intervalo de entrada Δn , y un decremento promedio en la sensibilidad K .

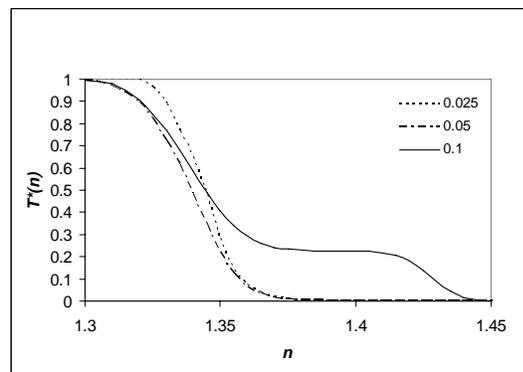
Los efectos del cambio del diámetro de las fibras producen efectos diferentes en cada uno de los sensores analizados (figura 4.42). Para el sensor elipsoidal (2), el incremento en el diámetro de las fibras produce un desplazamiento hacia la izquierda en la parte superior de la curva, mientras que la inferior permanece igual. En los elipsoides (10) y (15) se mantiene el mismo efecto para los diámetros de 0.025 y 0.05, pero para un diámetro de 0.1 la gráfica muestra dos niveles, el primero hasta $n=1.3$ y el segundo en $n=1.35$ para el elipsoide (10), mientras que para el elipsoide (15) el primero se encuentra hasta $n=1.125$ y el segundo para $n=1.38$. El elipsoide (10) muestra también un desplazamiento en la parte inferior de la gráfica llegando hasta $n=1.45$, el elipsoide (15) no muestra ningún cambio en la parte inferior de la curva.

El paraboloides (26) muestra el mismo comportamiento que los sensores semiesféricos al incrementar su intervalo de entrada Δn y disminuir la sensibilidad promedio K .

Los paraboloides (22) y (41) muestran el mismo comportamiento en la parte inferior y superior de las curvas, mientras que la parte intermedia tiene un corrimiento hacia abajo conforme el diámetro de las fibras incrementa, la sensibilidad promedio para cada curva es muy similar.



a)



b)

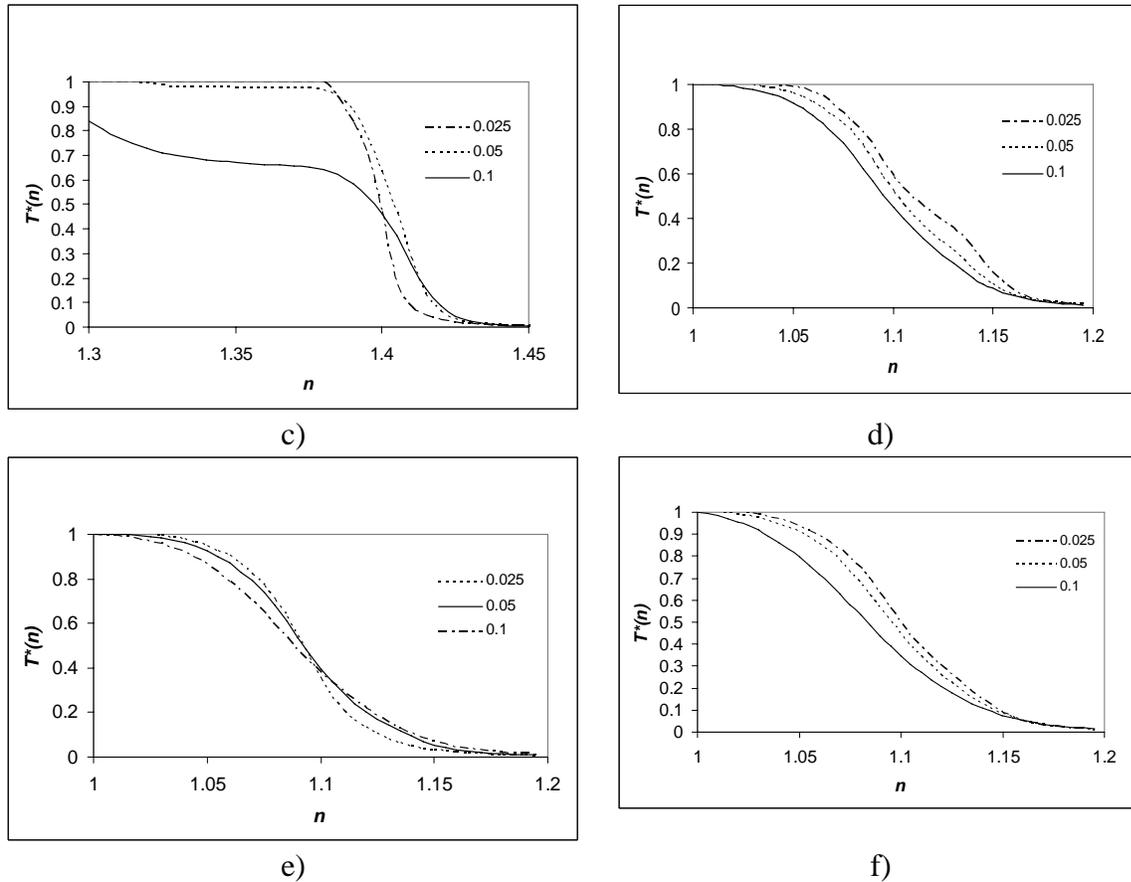


Figura 4.42. Transmisión relativa $T^*(n)$ vs. índice de refracción del medio externo n para $d=0.025$, $d=0.05$ y $d=0.1$: a) elipsoide (2), b) elipsoide (10), c) elipsoide (15), d) paraboloide (22), e) paraboloide (26), f) paraboloide (41).

4.4.4 Cambios en la posición de las fibras ópticas con respecto al eje z del elemento de detección.

Los cambios en la posición de las fibras en los sensores semiesféricos ocasionan grandes desplazamientos de la curva de transmisión [1], lo que ocasiona que el sensor pueda trabajar en distintos intervalos de índices de refracción al desplazar las fibras.

Los elipsoides también presentan este comportamiento que aparece en la figura 4.43.

En los paraboloides este cambio no produce el mismo efecto, debido a que un ligero cambio en la transmisión, ocasiona una disminución en el acoplamiento de las fibras hasta que no hay ninguna transmisión. Al igual que los sensores semiesféricos, los sensores elipsoidales tienen un conjunto de ventanas o posiciones de transmisión, mientras que en los paraboloides encontramos sólo una posición en donde tenemos un máximo acoplamiento, y conforme las fibras se alejan de ella, la transmisión disminuye hasta hacerse nula. Por esta razón podemos observar que ante el cambio

de posición de las fibras en los paraboloides, las respuestas varían en su forma, aunque la parte inferior de todas las gráficas llega hasta un índice de refracción de $n=1.2$.

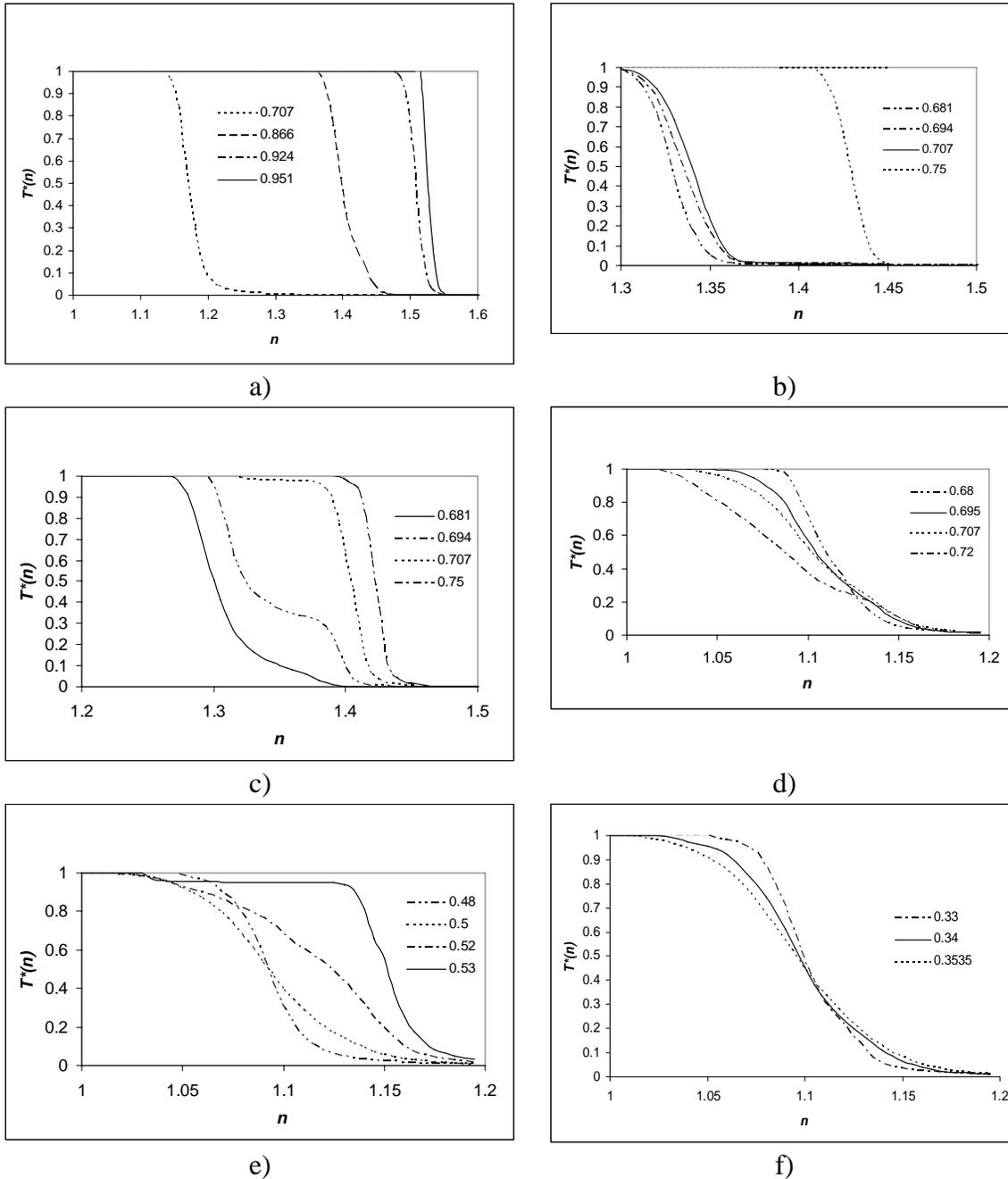


Figura 4.43 Transmisión relativa $T^*(n)$ vs. índice de refracción del medio externo n para distintas posiciones de las fibras: a) elipsoide (2), b) elipsoide (10), c) elipsoide (15), d) paraboloide (22), e) paraboloide (26), f) paraboloide (41).

4.5 Conclusiones

4.1 Los sensores con elementos de detección de distintas formas elipsoidales permiten mover la característica de transmisión relativa $T^*(n)$ sobre el eje n . Permite obtener características con su región lineal, para índices de refracción del medio externo menores a 1.1 y características de transmisión relativa con la región lineal mayores a 1.4, lo cual solo había podido ser obtenido en sensores semiesféricos modificando parámetros como la posición de las fibras, o el índice de refracción del material del elemento de detección.

4.1.1 Si se mantiene constante el tamaño en el eje x , un pequeño aumento en el tamaño en el eje z producirá un desplazamiento sobre el eje de los índices de refracción hacia la derecha de la curva $T^*(n)$, mientras que la disminución en tamaño en el z ocasiona un desplazamiento de $T^*(n)$ hacia la izquierda sobre el eje de los índices de refracción.

4.1.2 Si se mantiene fijo el tamaño en el eje z , un pequeño incremento en el tamaño en el eje x , desplazará la característica de $T^*(n)$ hacia la izquierda sobre el eje de los índices de refracción, mientras que la disminución en el tamaño en el eje x desplazará la característica de $T^*(n)$ hacia la derecha sobre el eje de los índices de refracción.

4.1.3 Si se modifica el tamaño del elipsoide en los ejes x y z simultáneamente se obtendrá un desplazamiento en la característica de transmisión relativa $T^*(n)$, hacia la izquierda o hacia la derecha sobre el eje de los índices de refracción, proporcional a la diferencia entre los dos valores.

4.2 Se encontraron formas elipsoidales (correspondientes a las ecuaciones (2), (10) y (15)), para los elementos de detección cuya linealidad en la transmisión relativa $T^*(n)$ es mayor que la obtenida en los sensores semiesféricos.

4.3 Se encontró que los sensores con elementos de detección elipsoidales también pueden tener características de transmisión relativa $T^*(n)$ lineales en un cierto intervalo de n , o bien respuestas de tipo escalón, con el cambio en un índice de refracción n específico.

4.4 Los sensores con elementos de detección paraboloïdales mostraron una característica de transmisión relativa $T^*(n)$ con muy poco desplazamiento ante la variación en los parámetros geométricos del elemento, con respecto al índice de refracción del medio externo, quedando siempre entre $n=1$ y $n=1.2$.

4.5 Al variar el parámetro H (altura en z) en los casos analizados de los paraboloides se logra una modificación de la característica de la transmisión relativa similar a la que se obtiene al variar el diámetro de las fibras ópticas, o su apertura numérica en los sensores de forma semiesférica.

4.6 Bajo la combinación de algunos parámetros geométricos del paraboloide, se obtiene una menor no linealidad máxima $\Delta N_{m\acute{a}x}$ que la obtenida en los sensores con elementos de detección de forma semiesférica y elipsoidal. Esta no linealidad máxima, se reduce de un 5.67% hasta el 3.01% para algunos de los elementos de forma paraboloidal analizados, con intervalos de entrada mayores.

4.6.1 Si se mantienen los extremos en la dirección x del paraboloide, iguales a los de la semiesfera, para valores menores de H , se obtienen una mayor linealidad en la respuesta.

4.6.2. Si se incrementan los extremos en la dirección x del paraboloide comparados con los de la semiesfera, para valores cercanos a $H=1$ se obtiene una mayor linealidad en la respuesta que la obtenida en sensores semiesféricos, aunque los intervalos de entrada disminuyen un poco comparados con los de los paraboloides (que tienen la misma distancia en x que la semiesfera).

4.6.3 Si se decreentan los extremos en la dirección x del paraboloide, comparados con los de la semiesfera, se obtiene la mayor linealidad de la característica de transmisión relativa $T^*(n)$, para valores entre $0.4 \leq H \leq 0.8$, teniendo también los intervalos de entrada más grandes no solo que los sensores semiesféricos sino de todos los demás sensores analizados en este capítulo.

4.7 El comportamiento de los sensores de forma elipsoidal y paraboloidal ante variaciones en el índice de refracción del elemento n_e , es similar al comportamiento de la semiesfera, presentan desplazamientos, hacia la izquierda en el eje de los índices de refracción, si disminuye n_e , y hacia la derecha si aumenta n_e .

4.8. Las variaciones en la apertura numérica de las fibras ópticas modifican la forma de la característica de transmisión relativa $T^*(n)$ con cambios de forma distintos a los que aparecen en la semiesfera (no solo cambia la pendiente sino la posición de las características en la sección donde se cruzan las características para distintas aperturas numéricas), pero la parte inferior (después del punto en donde se cruzan) de todas las características no muestra ningún cambio, al igual que en el caso de los sensores de forma semiesférica.

4.9 Los cambios en el diámetro de las fibras ópticas producen un decremento de linealidad en la característica de transmisión relativa de los sensores con elementos de detección elipsoidal. En las gráficas de las características de transmisión relativa aparecen hasta 3 escalones. En los

sensores con elementos de detección paraboloidales el cambio en el diámetro del núcleo de las fibras ópticas mantiene iguales los extremos de la gráfica de transmisión relativa $T^*(n)$, pero cambia ligeramente la forma de las características. En algunos casos se observa una separación entre las gráficas, y en otros casos se observa un cambio de la concavidad de la transmisión relativa, como el que aparece en los sensores con elementos de detección semiesféricos.

4.10 El cambio en la posición de las fibras ópticas ocasiona grandes corrimientos en el eje n de la gráfica de transmisión relativa los sensores con elementos de detección elipsoidales, mostrando distintas ventanas de transmisión, al igual que en los sensores con elementos de detección semiesféricos. En los sensores con elementos de detección paraboloidales no se presenta este corrimiento, pero sí un decremento de linealidad en la gráfica de transmisión relativa $T^*(n)$.

Capítulo 5. Los resultados del modelado numérico de las características de un sensor refractométrico con una capa dieléctrica externa

Los sensores refractométricos de fibra óptica han probado su utilidad en experimentos de laboratorio y en ambientes industriales. Sin embargo cualquier contaminación de la superficie del elemento de detección puede distorsionar la respuesta del sensor al índice de refracción del medio externo. De todos los posibles tipos de contaminación, la presencia de una capa dieléctrica residual (líquida o sólida) sobre la superficie del sensor es el más común de los casos. Existe una gran variedad de sustancias que pueden contaminar la superficie del sensor durante su utilización. También pueden variar el grosor y la geometría de esta capa. Debido a esto el análisis del efecto de una capa contaminante en la respuesta del sensor representa un problema no trivial.

En este capítulo se analizarán los efectos en la respuesta del sensor ante la presencia de capas de contaminación de diferentes grosores y formas cubriendo la superficie de detección del elemento.

La forma geométrica de los transductores más utilizada y estudiada en la literatura científica ha sido la semiesférica por su facilidad de fabricación y su alto desempeño. Sin embargo en el capítulo 4, de este trabajo, se estudiaron las respuestas y características de los transductores de otras formas geométricas, que pueden tener un mejor desempeño que la forma tradicional semiesférica, para ciertas aplicaciones, o en ciertos intervalos de entrada/salida.

Por esta razón el estudio del efecto de una capa residual, se aplica a las tres formas geométricas de transductor que se analizaron en el capítulo 4: semiesférico, elipsoidal y paraboloidal.

5.1 Técnicas de modelado de un sensor refractométrico con una capa dieléctrica externa

Para el estudio de las características de un sensor refractométrico con una capa dieléctrica externa se analizaron numéricamente sensores con diferentes formas geométricas de la superficie de detección del elemento, y se colocaron en diferentes orientaciones para obtener algunas variantes de geometrías de las capas de contaminación sobre ellos (figura 5.1).

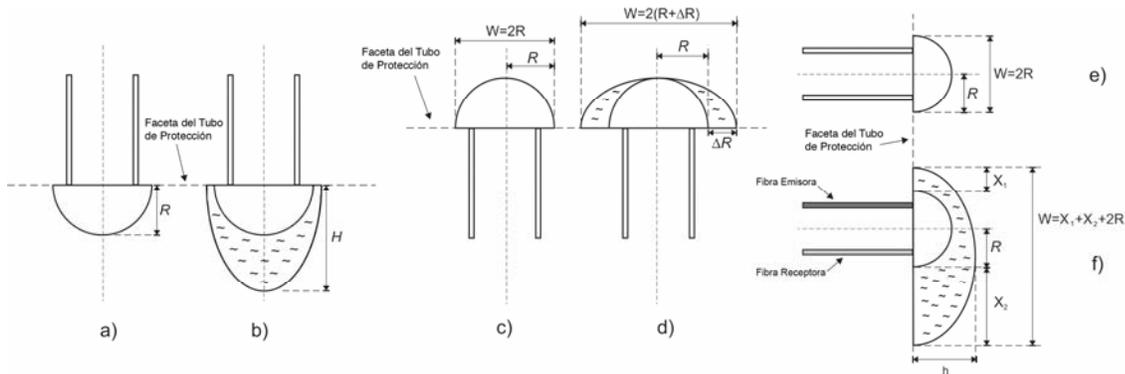


Figura 5.1 Las variantes de diferentes posiciones del transductor refractométrico y las formas resultantes de las capas dieléctricas sobre la superficie consideradas en este trabajo: posición vertical hacia abajo (a, b); posición vertical hacia arriba (c, d), posición horizontal lateral (e, f).

En este trabajo se consideraron capas de materiales dieléctricos, con características uniformes, idénticas en todo el volumen de la capa, con un índice de refracción n_{capa} y con absorción sumamente pequeña (despreciable). Se consideraron principalmente las capas de materiales líquidos que afectan la calibración del sensor en el aire. Se considera que la capa es de un material homogéneo, isotrópico, transparente.

En el caso de capas sólidas o de un líquido de alta viscosidad (grasa, aceite, etc.) puede permanecer al sumergir el sensor en un líquido y por eso ocasionar distorsiones en la medición.

Una vez obtenidas las principales formas geométricas de la capa de contaminación, se obtuvieron las ecuaciones matemáticas para representar las geometrías de las capas.

La capa o película líquida que permanece sobre la superficie del sensor una vez que ha estado en contacto con un líquido, tiene la forma de una gota, la cual puede tener distinta forma y volumen. El índice de refracción del líquido de la película n_p puede ser cercano al índice de refracción del elemento de detección óptica n_e . En este caso la reflexión puede presentarse principalmente en la superficie de la película líquida y no en la superficie de vidrio. Esto lleva a una distorsión de la transmisión del

transductor en el aire T_{aire} , la cual es importante para la calibración y la obtención de la transmisión relativa $T^*(n)$.

Los parámetros particulares de la película líquida dependen de la viscosidad, tensión superficial, tamaño del elemento de detección y su orientación en el espacio [1].

En este capítulo se analizan tres posiciones del elemento de detección, que se encuentran en las aplicaciones prácticas [2], [3]:

- 1) Elemento de detección con la punta en vertical hacia abajo
- 2) Elemento de detección con la punta en vertical hacia arriba
- 3) Elemento de detección con la punta horizontal, lateral

Los parámetros que cambian son:

La altura de la gota del líquido H , y el ancho en el eje x de la gota W como se muestra en la figura 5.1. Los parámetros H , W , X_1 , X_2 son adimensionales y están referenciados a el radio de la semiesfera base (utilizada en el capítulo 4 del presente trabajo) cuyo radio $R=W=H=1$.

A través del trazado numérico de rayos, se calcularon la transmisión de cada elemento sin capa en el aire T_{aire} y la transmisión del elemento en el aire, pero con una capa líquida $T_{p\ aire}$. Estos cálculos se llevaron a cabo, utilizando el programa desarrollado para esta tesis, que está descrito en el capítulo 3.

La información que se presenta en las siguientes secciones fue obtenida bajo los siguientes parámetros (del sensor, mismos que se utilizaron en el estudio realizado en el capítulo 4):

- Diámetro de las fibras ópticas $D=0.05$,
- Posición de las fibras con respecto al centro de la superficie $L=0.707$,
- Índice de refracción del elemento y del líquido que forma una película sobre la superficie de vidrio: $n_e = n_p = 1.55$,
- Fibras ópticas multimodo de índice escalonado,
- Apertura numérica de las fibras $AN=0.2$,
- Luz monocromática no polarizada.

5.2 Evaluación del efecto de una capa dieléctrica externa en los sensores con superficies de segundo orden

5.2.1 Análisis de características de un sensor de forma semiesférica con una capa dieléctrica de contaminación.

El elemento semiesférico utilizado, esta representado por la ecuación1:

$$x^2 + y^2 + z^2 = 1, \text{ para } z \leq 0, \quad (1)$$

5.2.1.1 Posición del sensor con la punta en vertical hacia abajo, elemento semiesférico

Las variantes analizadas para el transductor semiesférico en la posición vertical hacia abajo, fueron separadas en dos categorías: las que tienen una capa de grosor uniforme y las que tienen una capa con un grosor variable.

El transductor semiesférico con capas de grosor uniforme se muestra en la figura 5.2.

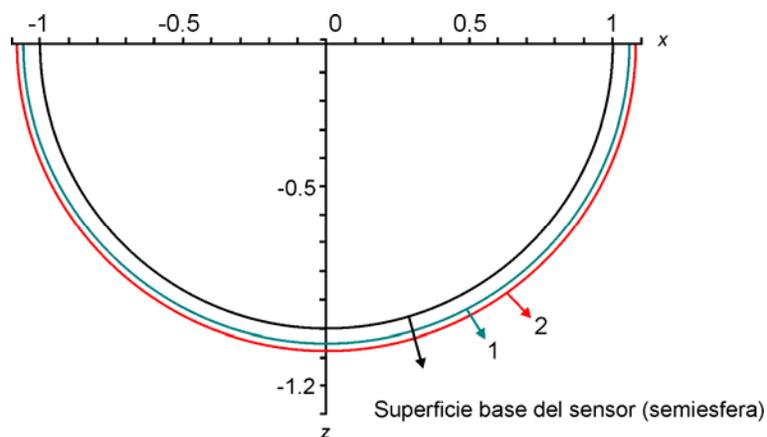


Figura 5.2 Transductor semiesférico (1) en posición vertical hacia abajo con una capa dieléctrica de grosor uniforme: 1- $W=R=H=1.15$, 2- $W=R=H=1.2$, en donde W es el ancho adimensional del elemento y H es la altura adimensional de elemento.

La respuesta del sensor semiesférico ante la presencia de capas con un grosor uniforme, disminuye la transmisión absoluta conforme el grosor va aumentando, hasta un valor de $R=1.2$, en donde se pierde la

¹ Se utiliza el mismo número de ecuación que los utilizados en el capítulo anterior.

transmisión debido a la falta de acoplamiento de las fibras por la presencia de la capa como se muestra en la figura 5.3

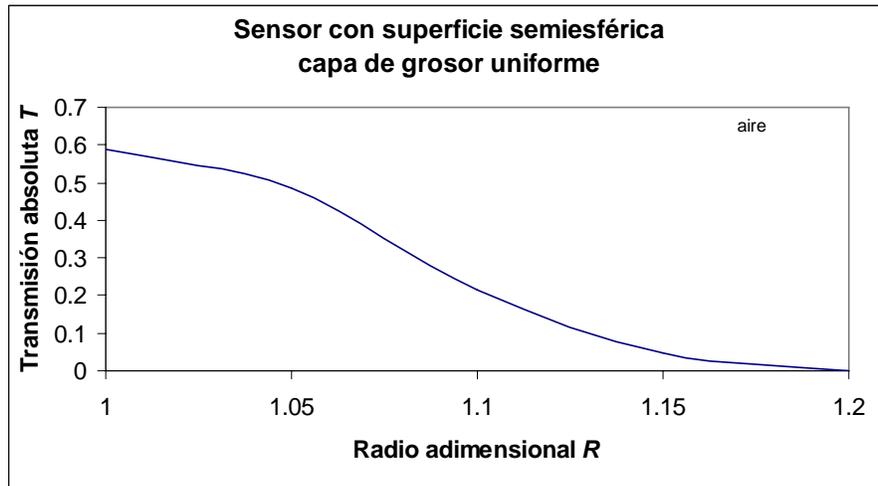


Figura 5.3. Transmisión absoluta T del sensor semiesférico con una capa dieléctrica de grosor uniforme, en función del radio adimensional R .

El número de variantes de capas con grosor no uniforme, es muy grande. Se analizó la respuesta del sensor semiesférico con capas de grosor no uniforme con las 3 variantes mostradas en la figura 5.4.

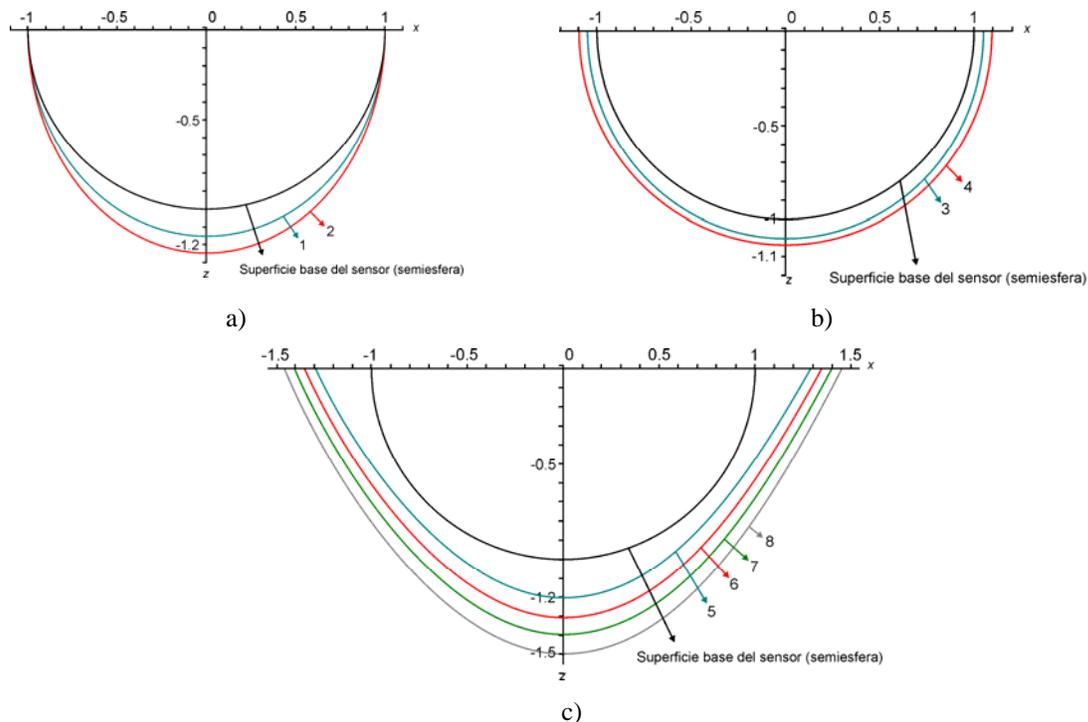


Figura 5.4. Transductor semiesférico (1) en posición vertical hacia abajo, con una capa dieléctrica de grosor no uniforme de ancho adimensional W y altura adimensional H :

a) Variante 1: $R=W=1$: 1- $H=1.15$, 2- $H=1.2$.

b) Variante 2: 3- $W=1.04$, $H=1.05$, 4- $W=1.05$, $H=1.06$.

c) Variante 3: 5- $W=1.29$, $H=1.2$, 6- $W=1.34$, $H=1.3$, 7- $W=1.4$, $H=1.4$, 8- $W=1.44$, $H=1.5$.

La variante 1, tiene capas de grosor no uniforme con los bordes coincidentes con los del sensor, cambiando el tamaño de H como se muestra en la figura 5.5. Con esta variante de capas, la transmisión absoluta del sensor disminuye conforme H se incrementa, hasta llegar a un valor máximo de $H=1.25$ en donde se pierde la transmisión como se observa en la figura 5.6.

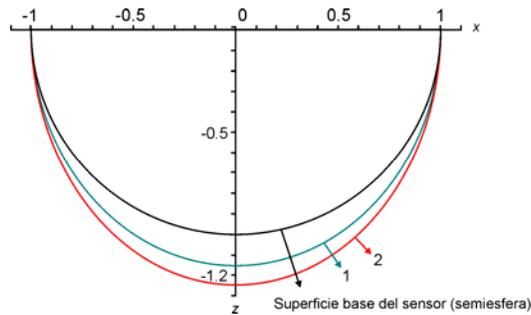


Figura 5.5. Transductor semiesférico (1) en posición vertical hacia abajo con una capa dieléctrica de grosor no uniforme de ancho adimensional W y altura adimensional H , variante 1, $R=W=H$: 1- $H=1.15$, 2- $H=1.2$.

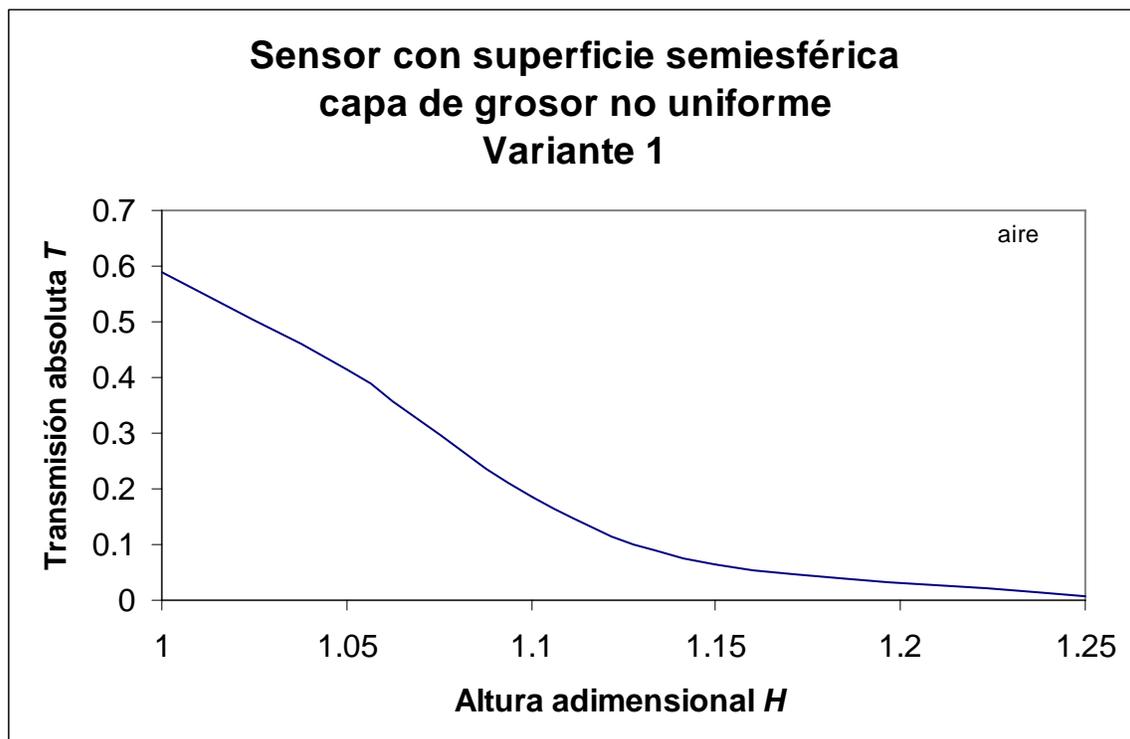


Figura 5.6. Transmisión absoluta T del sensor semiesférico para una capa dieléctrica de grosor no uniforme de la variante 1, en función de la altura adimensional H .

La pendiente de la curva de la figura 5.6, es muy parecida a la de la figura 5.3 hasta $H=R=1.1$, a partir de ese punto la pendiente es menor para la curva de las capas no uniformes, lo que ocasiona que haya transmisión para un grosor mayor de la capa, lo cual se debe a que las capas formadas en la variante 1, solo cambian en H , mientras que las de grosor uniforme cambian en W y en H , lo que ocasiona una mayor diferencia respecto al sensor sin capas.

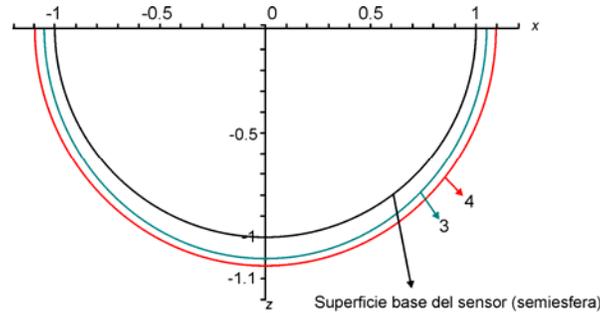


Figura 5.7. Transductor semiesférico (1) en posición vertical hacia abajo con una capa dieléctrica de grosor no uniforme, con ancho adimensional W y altura adimensional H , variante 2: 3- $W=1.04$, $H=1.05$, 4- $W=1.05$, $H=1.06$.

La variante 2 que aparece en la figura 5.7, muestra una capa de grosor no uniforme con cambios en H y en W , en donde el grosor máximo se encuentra en el centro, mientras que los extremos tienen un grosor más delgado. La transmisión absoluta de esta variante, se muestra en la figura 5.8, en donde las curvas de transmisión absoluta son menores en magnitud que para el sensor semiesférico limpio ($T=0.6$).

En esta gráfica podemos ver que para distintas relaciones de W/H la transmisión absoluta muestra un comportamiento similar para las tres gráficas, iniciando con una pendiente positiva, hasta mantenerse en un cierto valor, para después volver a descender. Conforme el valor de W aumenta, la transmisión absoluta máxima tiene un valor menor, este máximo se alcanza para las 3 curvas cuando la relación $W/H \approx 0.93$.

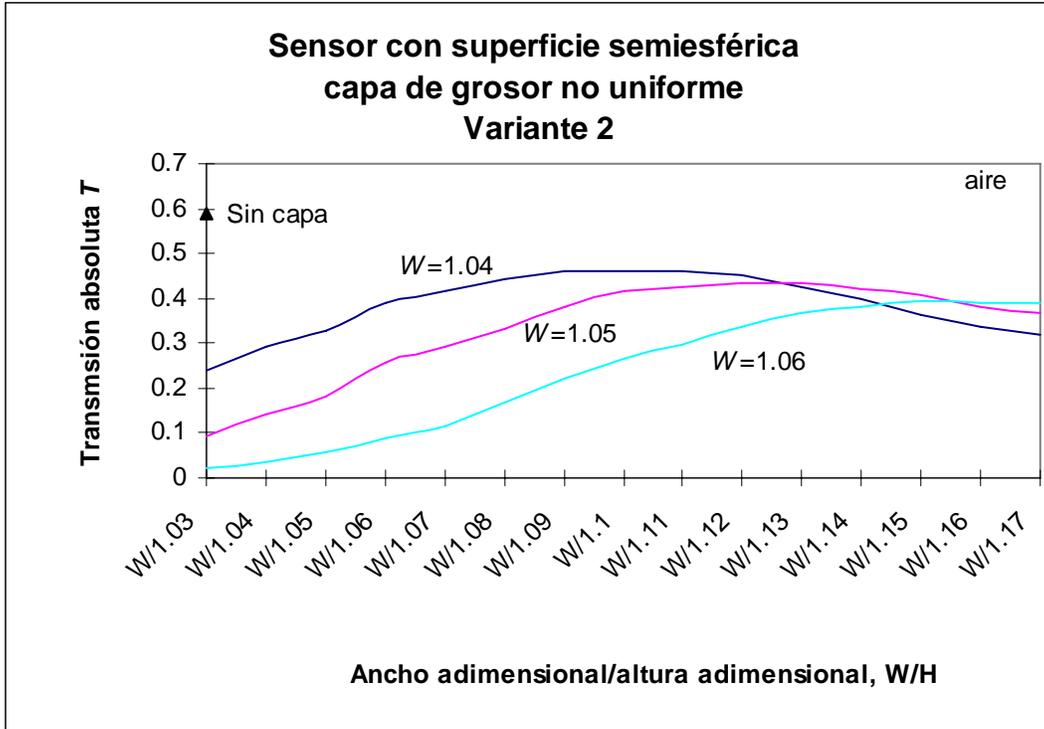


Figura 5.8. Transmisión absoluta T del sensor semiesférico para capas dieléctricas de grosor no uniforme con ancho adimensional W y altura adimensional H , de la variante 2 para diferentes valores de W/H .

La figura 5.9, muestra la variante 3, que consiste en capas de grosor no uniforme, cuyo grosor máximo se encuentra en los extremos y en el centro.

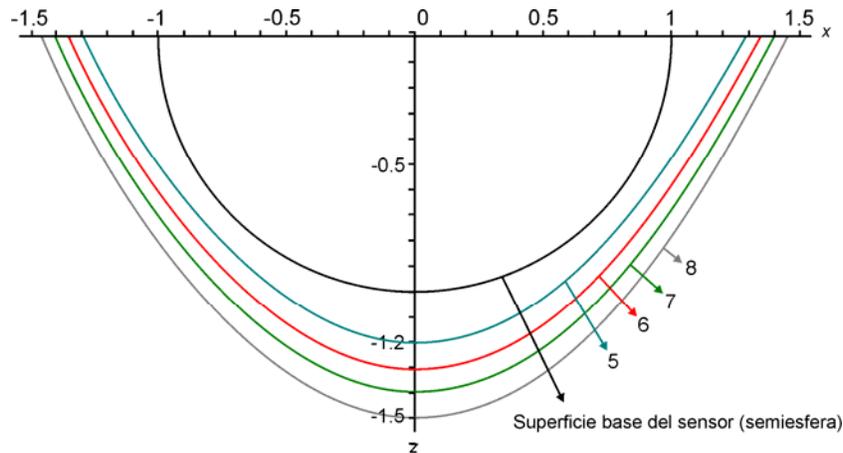


Figura 5.9. Transductor semiesférico (1) en posición vertical hacia abajo con una capa de grosor no uniforme de ancho adimensional W y altura adimensional H , variante 3: 5- $W=1.29$, $H=1.2$, 6- $W=1.34$, $H=1.3$, 7- $W=1.4$, $H=1.4$, 8- $W=1.44$, $H=1.5$.

La transmisión absoluta para la tercera variante, muestra al igual que las curvas anteriores un comportamiento decreciente, para incrementos en H de 0.1, y su parte proporcional en W como se observa en la figura 5.10.

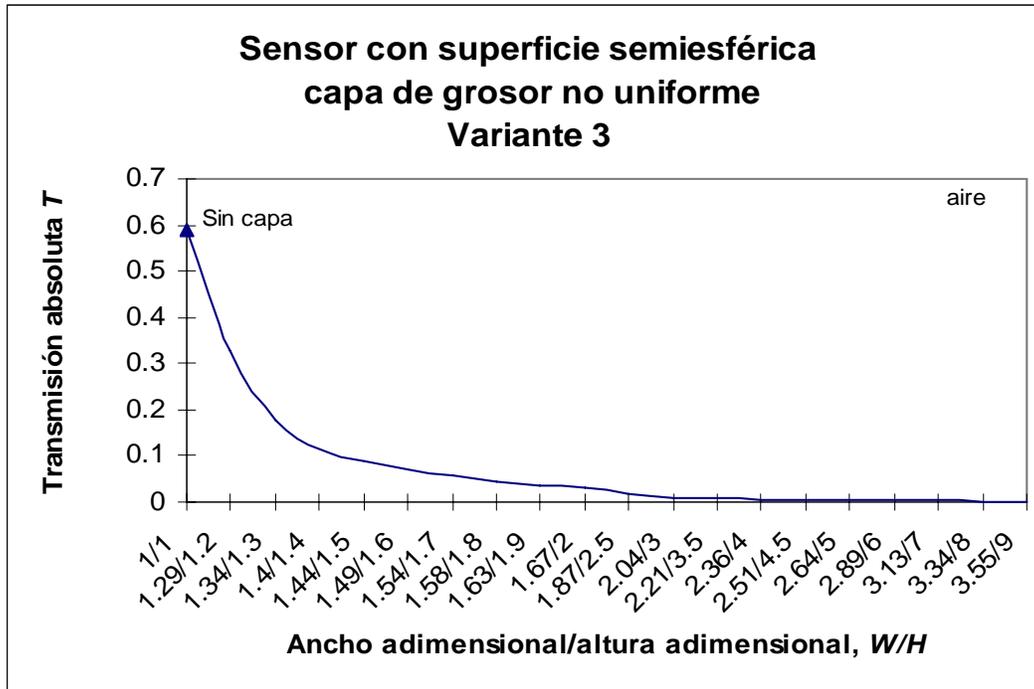


Figura 5.10. Transmisión absoluta T del sensor semiesférico para una capa dieléctrica de grosor no uniforme con ancho adimensional W y altura adimensional H , de la variante 3 para diferentes cocientes de W/H .

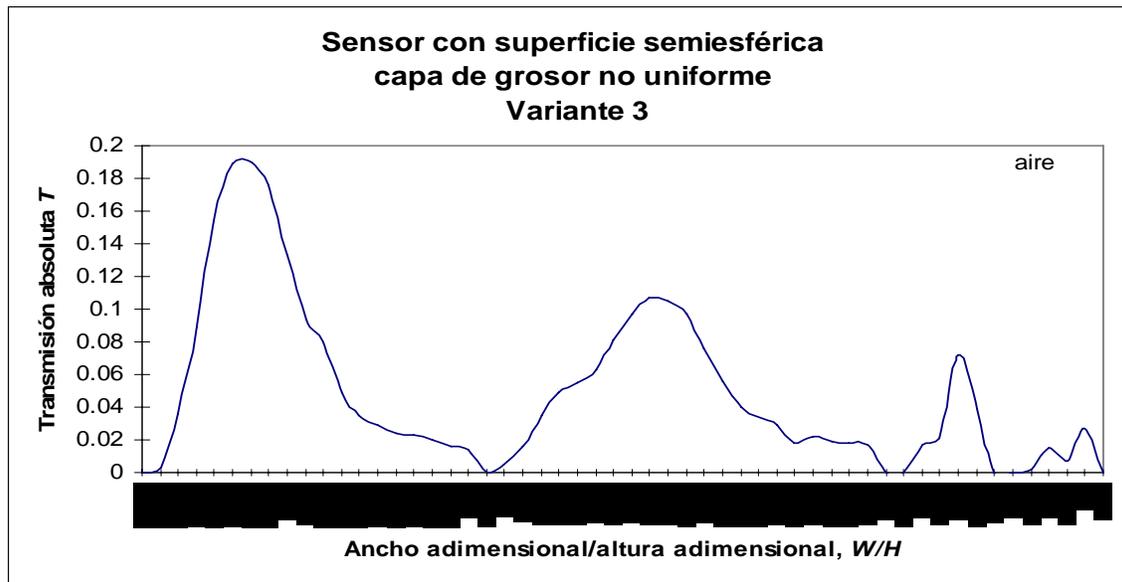


Figura 5.11. Transmisión absoluta T del sensor semiesférico para una capa dieléctrica de grosor no uniforme con ancho adimensional W y altura adimensional H , de la variante 3 para valores constantes de W y variantes en H .

En la figura 5.11 podemos observar la transmisión absoluta para un mismo valor de W , ante variaciones en H . La figura muestra que conforme el valor de W aumenta, el máximo en la transmisión relativa es inferior al igual que en la variante 2, la principal diferencia radica en que el máximo de transmisión absoluta se va moviendo para los cocientes W/H , la primer curva presenta un máximo en $W/H = 1.01$, la segunda en $W/H=0.94$, la tercera en $W/H = 0.888$ y la cuarta en $W/H = 0.85$, mientras que en la variante anterior el máximo se presenta para un mismo valor de W/H . Estas variaciones se deben a la posición de las fibras y a la geometría de la capa, en donde se puede tener un mayor o menor acoplamiento según los parámetros de la geometría de la capa.

5.2.1.2 Posición del sensor con la punta en vertical hacia arriba, elemento semiesférico

Las variantes analizadas para el transductor semiesférico en la posición vertical hacia arriba, fueron separadas en dos categorías: las que tienen una capa de grosor uniforme y las que tienen una capa con un grosor variable.

El transductor semiesférico con capas de grosor uniforme se muestra en la figura 5.12.

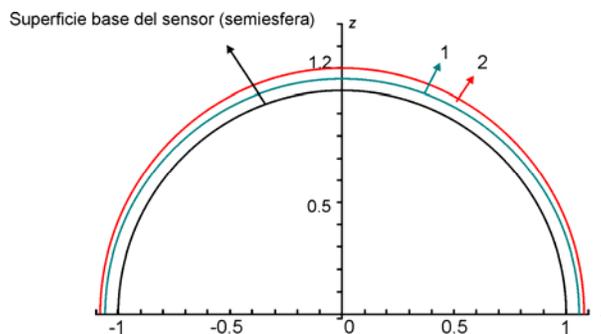


Figura 5.12. Transductor semiesférico (1) en posición vertical hacia arriba con una capa dieléctrica de grosor uniforme con ancho adimensional W y altura adimensional H : 1- $R=W=H=1.15$, 2- $R=W=H=1.2$.

La respuesta de este sensor, es la misma que la del transductor en la posición vertical hacia abajo, puesto que las capas tienen un grosor uniforme (figuras 5.2 y 5.3).

El número de variantes de capas con grosor no uniforme, es muy grande. Se analizó la respuesta del sensor semiesférico con capas de grosor no uniforme con las 3 variantes mostradas en la figura 5.13.

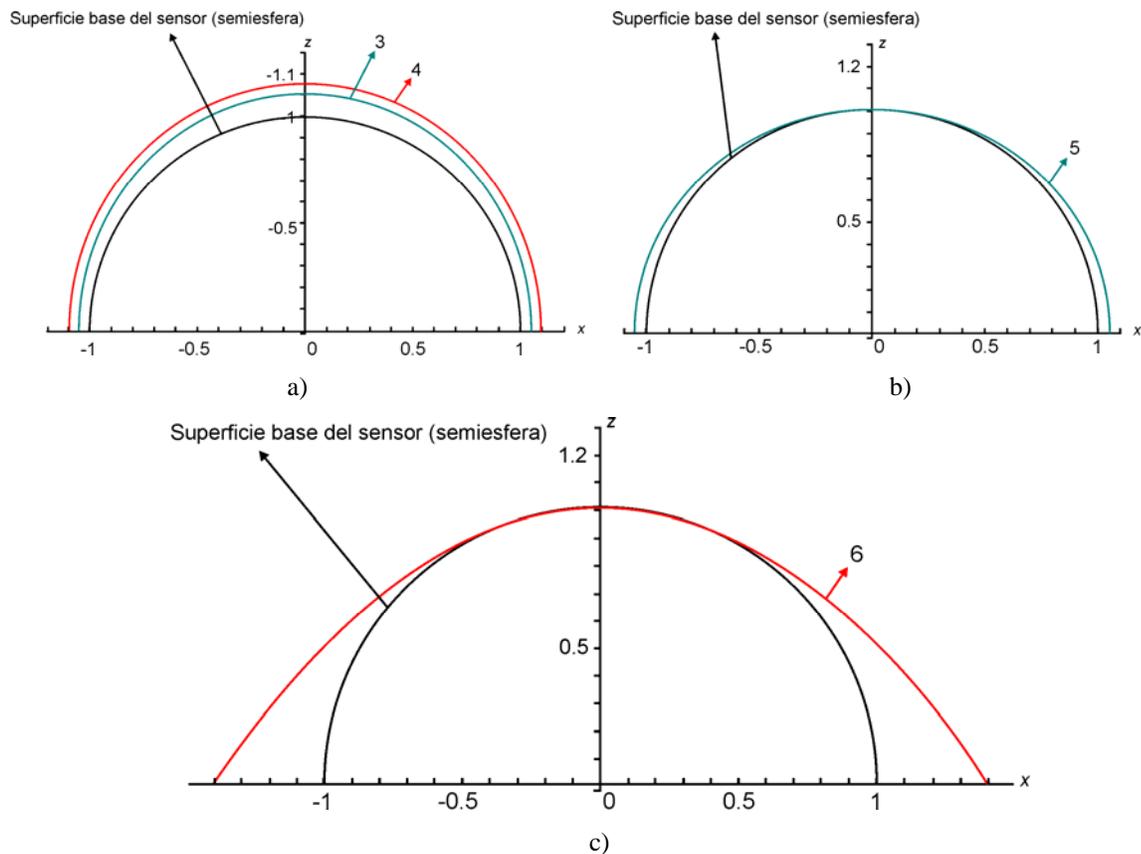


Figura 5.13. Transductor semiesférico (1) en posición vertical hacia arriba, con una capa dieléctrica de grosor no uniforme con ancho adimensional W y altura adimensional H :

a) Variante 4: 3- $W=1.04, H=1.05$, 4- $W=1.05, H=1.06$;

b) Variante 5: 5- $W=1.02, H=1$;

c) Variante 6: 6- $W=1.41, H=1$.

Se puede observar en la figura 5.13, que la variante 4 es la misma que la variantes 2 para el transductor en posición vertical hacia abajo pues la formación de esta forma de capas, puede presentarse para cualquiera de estas dos orientaciones, por lo que su respuesta sería igual a la mostrada en la figura 5.8.

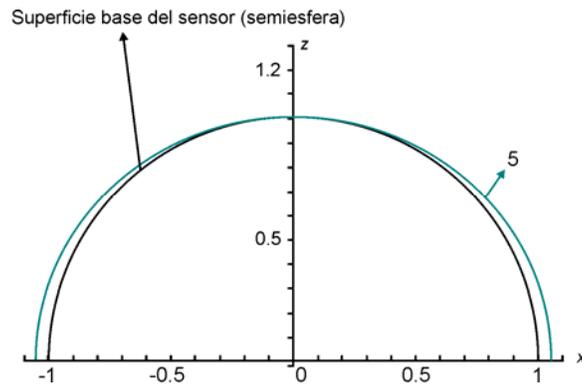


Figura 5.14. Transductor semiesférico (1) en posición vertical hacia arriba con una capa dieléctrica de grosor no uniforme con ancho dimensional W y altura dimensional H , variante 5: 5- $W=1.02$, $H=1$, capa con el mismo máximo H y extremos laterales cercanos al sensor.

La respuesta del transductor de la figura 5.14, se muestra en la figura 5.15, en la que se puede observar que una capa con esta forma tiene una menor transmisión absoluta que la del sensor sin la capa, y que conforme aumenta el ancho de la capa W , la transmisión va disminuyendo hasta $W=1.06$.

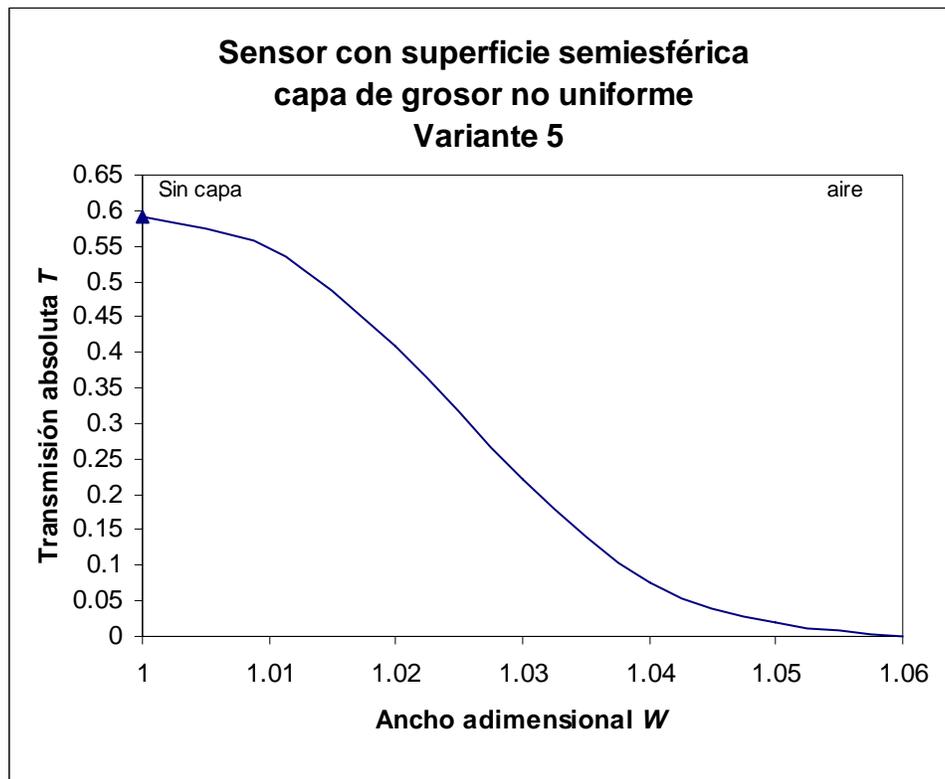


Figura 5.15. Transmisión absoluta T del sensor semiesférico para una capa dieléctrica de grosor no uniforme con ancho dimensional W y altura dimensional H , de la variante 5 en función de W .

La variante 6 para esta posición del transductor se muestra en la figura 5.16, que también tiene el mismo máximo que el sensor, pero a diferencia de la variante 5, muestra un volumen mayor en los laterales, que se encuentran mucho más alejados del sensor. Este tipo de capas hace que se pierda por completo la transmisión en el sensor, ya que esta variante necesita un valor de $W=1.3$ al menos, para poder formarse sobre la superficie del sensor (valores de $W<1.3$ producen geometrías que quedarían dentro del transductor), y en la figura 5.15, se observa que la transmisión se pierde para valores de $W>1.06$, por lo que este resultado era esperado.

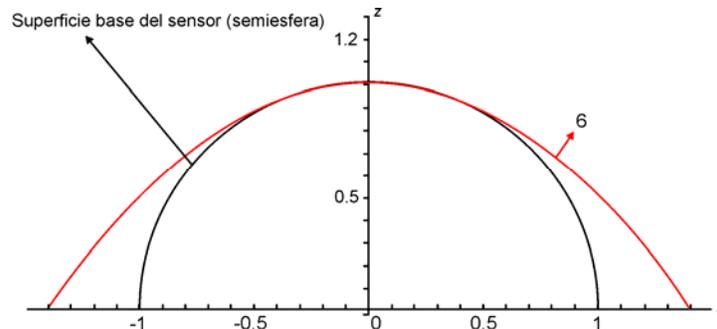
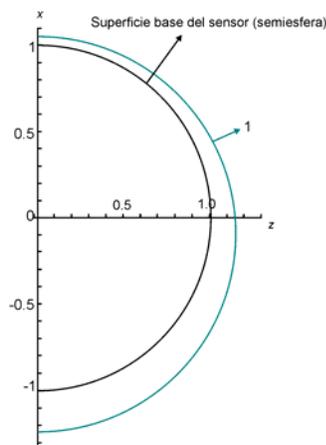


Figura 5.16. Transductor semiesférico (1) en posición vertical hacia arriba con una capa dieléctrica de grosor no uniforme con ancho adimensional W y altura adimensional H , variante 6: 6- $W=1.41$, $H=1$ capa con el mismo máximo H y extremos laterales con volumen máximo.

5.2.1.3 Posición del sensor con la punta en horizontal lateral, elemento semiesférico

Para el sensor semiesférico, con orientación horizontal lateral, se consideran capas únicamente de grosor no uniforme, que es más probable que se produzcan con esta orientación. Las variantes analizadas en esta posición se muestran en la figura 5.17.



a)

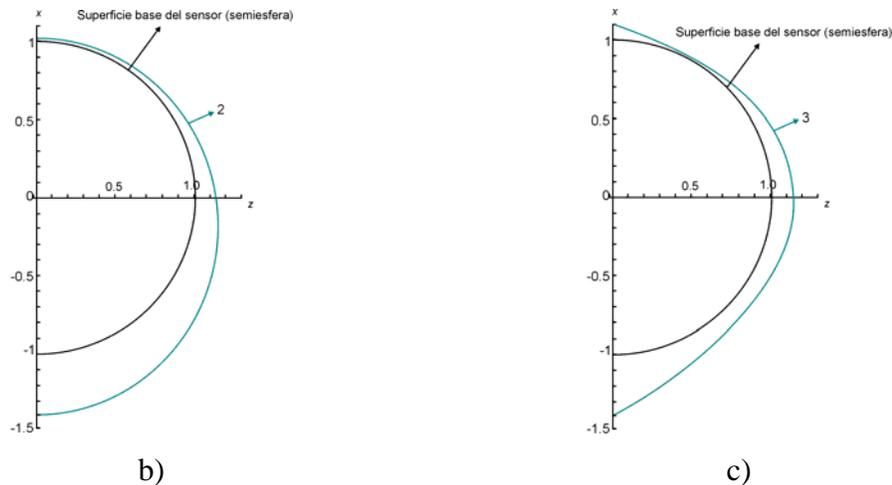


Figura 5.17. Transductor semiesférico (1) en posición horizontal lateral, distintas geometrías de capa dieléctrica con ancho adimensional W y altura adimensional H :

- a) Variante 7: 1- $W=1.2, H=1.2$;
- b) Variante 8: 2- $W=1.11, H=1.3$;
- c) Variante 9: 3- $W=1.3, H=1.25$.

Cuando el sensor semiesférico en posición horizontal lateral, tiene capas con la formas de las variantes 7 y 8 que tienen un grosor no uniforme, con el volumen máximo en la parte inferior, y que tienen un perfil curvo, se pierde la transmisión del sensor.

Para una capa de la variante 9 (figura 5.17c)), la transmisión absoluta del sensor se reduce (figura 5.18), conforme aumenta el ancho de la parte inferior de la capa X_2 , la transmisión es menor (ver figura 5.1f) para identificar los parámetros X_1, X_2 que corresponde al ancho de la capa con respecto al extremo superior del sensor (X_1) y al extremo inferior del sensor (X_2). Dado que la capa no tiene el mismo centro que el transductor, la transmisión relativa se presenta conforme cambian los 2 parámetros que se observan en la figura 5.1f). En esta orientación también es necesario tomar en cuenta la posición de la fibra transmisora, ya que si esta se encuentra en la posición inferior, la transmisión absoluta es menor que si se encuentra en la posición superior. La transmisión se pierde cuando $X_1/X_2= 0.09/0.49$.

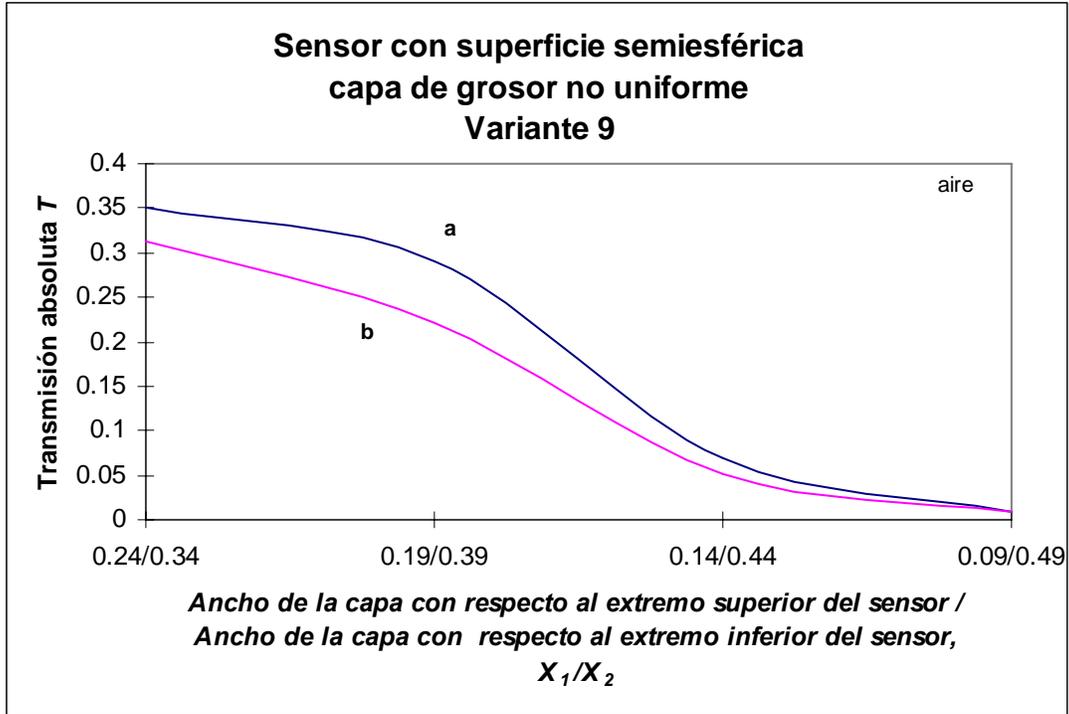


Figura 5.18. Transmisión absoluta T del sensor semiesférico (1) en la posición horizontal, en función de X_1 y X_2 : (a) con la fibra óptica transmisora en la parte superior y la receptora en la parte inferior (b) con la fibra óptica transmisora en la parte inferior y la receptora en la parte superior.

5.2.1.4 Cambios en la transmisión de un sensor semiesférico con una capa dieléctrica

La presencia de una capa dieléctrica de cualquier geometría, producirá un cambio en la respuesta del sensor, debido a un error en la calibración.

El factor de cambio de la transmisión de un sensor con una capa dieléctrica de contaminación, se define para este trabajo de la siguiente manera:

$$\zeta(n) = \frac{T_p(n)}{T_{aire}}, \quad (5.1)$$

donde $\zeta(n)$ es el factor de cambio en la transmisión del sensor, $T_p(n)$ es la transmisión absoluta del sensor con una capa de contaminación dieléctrica, y T_{aire} es la transmisión absoluta del sensor sin capa en el aire.

En resumen, todos los valores de transmisión absoluta en el aire del sensor semiesférico ante una capa de cualquier forma geométrica, disminuyen la magnitud de la transmisión absoluta T .

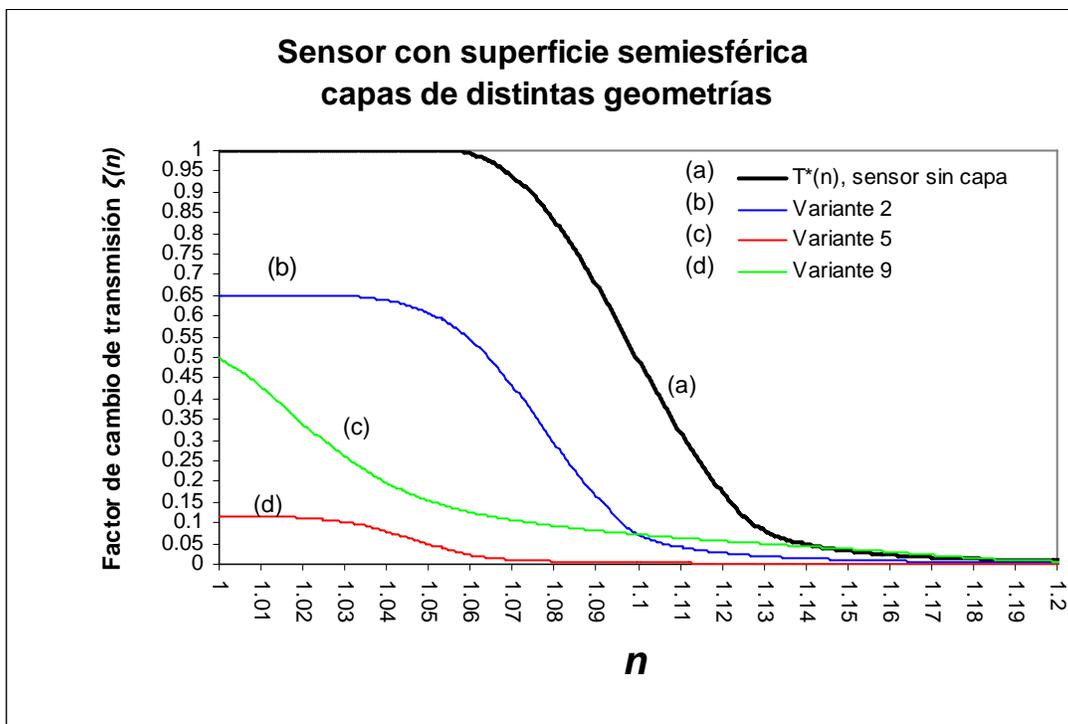
En el capítulo anterior, se analizó la transmisión relativa $T^*(n)$, en donde el factor de calibración era también la transmisión absoluta del sensor en el aire. Ahora se comparará esta curva de transmisión

absoluta $T^*(n)$ del sensor sin capa con las curvas correspondientes al factor de cambio en la transmisión $\zeta(n)$, que se presentan al tener una capa dieléctrica sobre la superficie del sensor.

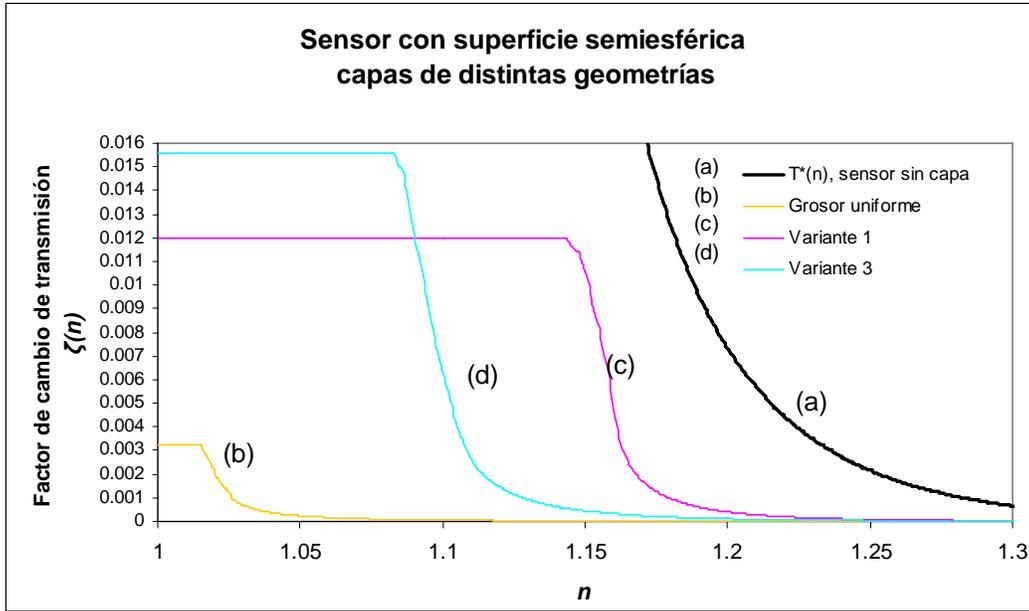
Las curvas correspondientes al factor de cambio en la transmisión, $\zeta(n)$, se presentan en la figura 5.19.

Las curvas del factor de cambio de la figura 5.19 a) muestran una forma similar a la transmisión relativa $T^*(n)$ del sensor semiesférico (1) sin capa, pero con magnitudes inferiores para las variantes 2 y 5. La variante 9 muestra una región con un intervalo más pequeño de índices de refracción para los cuales el valor máximo del factor de transmisión se mantiene constante y queda por arriba de la curva de transmisión relativa $T^*(n)$ del sensor sin capa, para los índices de refracción comprendidos entre 1.12 y 1.3. En la figura 18 b), podemos observar magnitudes inferiores a $\zeta(n)=0.16$, con intervalos hasta de $n=1.05$, con regiones constantes menores para la capa con grosor constante, para la variante 3 y la 5.

Para sensores con una superficie semiesférica, si el intervalo de entrada se encuentra entre $n=1.07$ y $n=1.12$, la presencia de cualquier tipo de capa produce mediciones erróneas, tanto si fuera utilizado en su región lineal o bien como función de tipo escalón, debido al problema de la calibración del sensor.



a)



b)

Figura 5.19. Factor de cambio de transmisión $\zeta(n)$ del sensor con una superficie semiesférica, para capas con distintas geometrías: a) magnitudes entre $0.05 < \zeta(n) < 1$, b) magnitudes de $\zeta(n) < 0.016$

Semiesfera sin capa: $W=1, H=1$

Variante 2: $W=1.04, H=1.06$

Variante 5: $W=1.04, H=1$

Variante 9: $W=1.3, H=1.25$

Semiesfera sin capa: $W=1, H=1$

Grosor uniforme: $W=H=1.09$

Variante 1: $W=1, H=1.25$

Variante 3: $W=2.6, H=5$

5.2.2 Análisis de características de un sensor con forma elipsoidal con una capa dieléctrica de contaminación

Para el caso elipsoidal se eligieron 2 transductores, uno con el eje mayor en el eje x y otro con el eje mayor en el eje z .

5.2.2.1 Elipsoide eje mayor en x

El elemento elipsoidal utilizado, esta representado por la ecuación:

$$2.34x^2 + 1.5y^2 + 2.66z^2 = 1.5, \text{ para } z \leq 0 \quad (10)$$

5.2.2.1.1 Posición del sensor con la punta en vertical hacia abajo, elemento elipsoidal con eje mayor en x

Las variantes analizadas para este caso también se dividieron en grosor uniforme y grosor no uniforme. Las capas con grosor uniforme se muestran en la figura 5.20, este tipo de capas producen una disminución en la transmisión absoluta conforme el grosor de la capa se va incrementando, la transmisión absoluta decrece como se muestra en la figura 5.21.

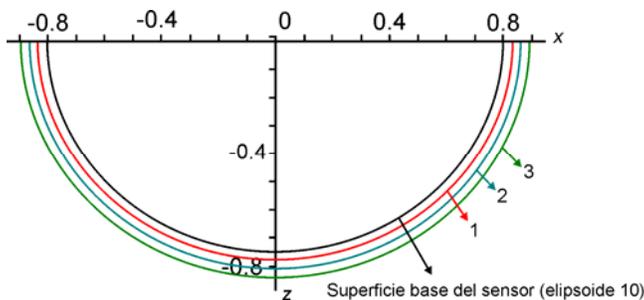


Figura 5.20. Transductor elipsoidal (10) en posición vertical hacia abajo con una capa dieléctrica de grosor uniforme, que sigue la misma forma del sensor, con ancho adimensional W y altura adimensional H : 1- $W=0.81, H=0.76$, 2- $W=0.82, H=0.77$, 3- $W=0.83, H=0.78$.

Para incrementos pequeños, gráfica se mantiene casi constante, para después decrecer con una pendiente grande hasta tener un grosor de 0.04 en donde se pierde la transmisión.

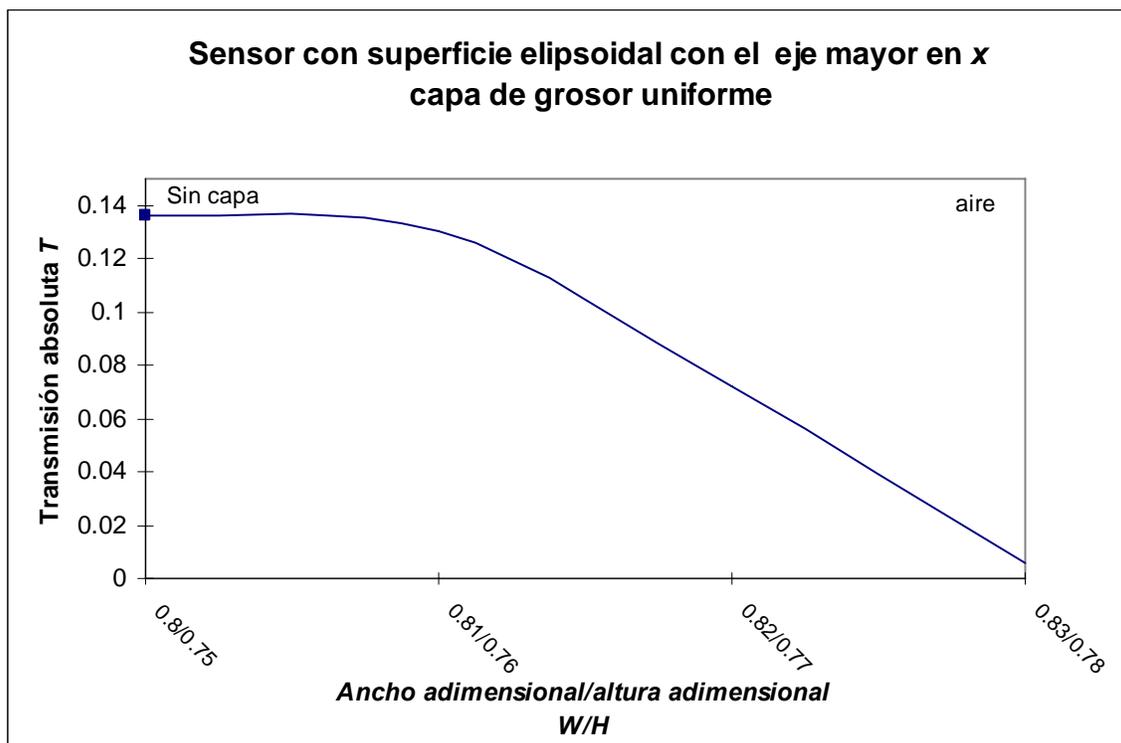


Figura 5.21. Transmisión absoluta T del sensor elipsoidal (10) para la posición vertical hacia abajo con una capa dieléctrica de grosor uniforme con ancho adimensional W y altura adimensional H en función de W/H .

Dentro de las posibilidades para capas de grosor no uniforme se analizaron las 3 variantes que aparecen en la figura 5.22.

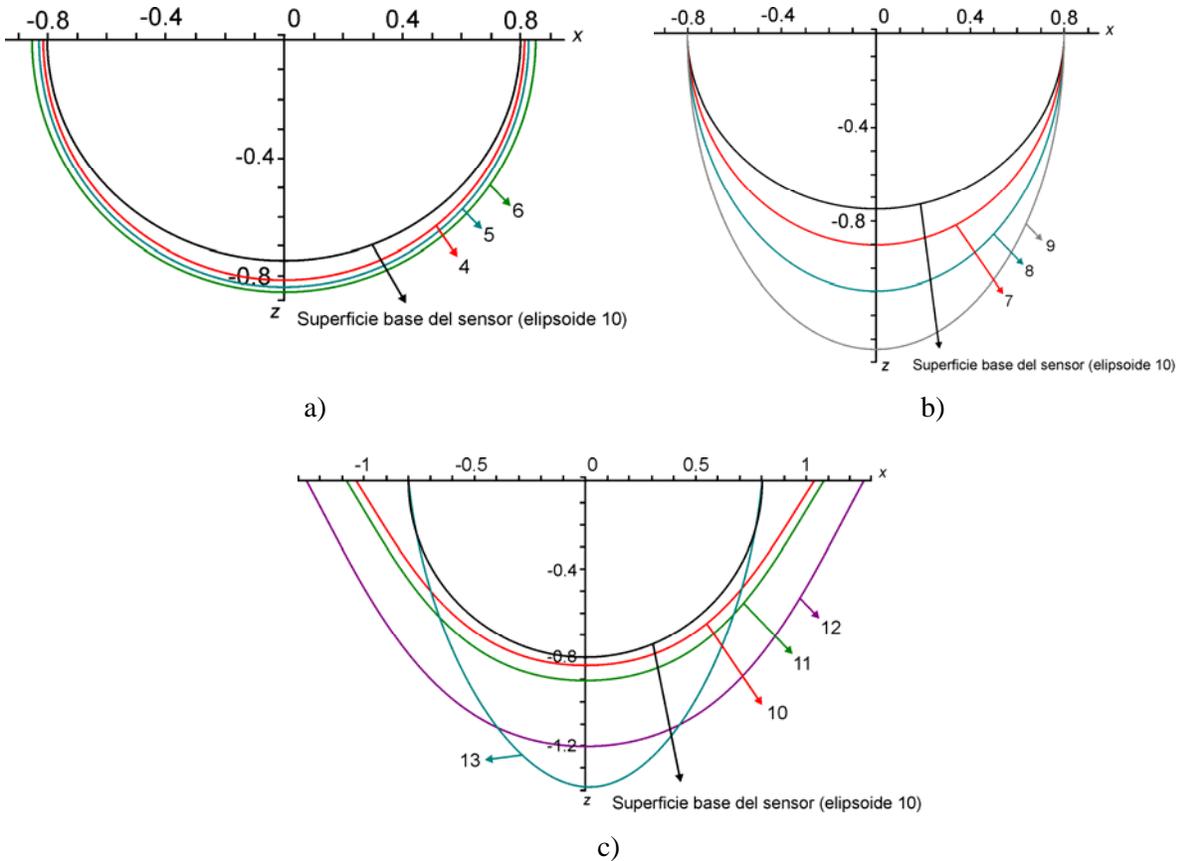


Figura 5.22. Transductor elipsoidal (10) eje mayor x en posición vertical hacia abajo con una capa dieléctrica de grosor no uniforme, con ancho adimensional W y altura adimensional H :

a) Variante 10: 4- $W=H=0.81$, 5- $W=H=0.82$, 6- $W=H=0.83$.

b) Variante 11 con $W=0.8$: 7- $H=1$, 8- $H=2$, 9- $H=4$.

c) Variante 12: 10- $W=1.05, H=0.8$, 11- $W=1.09, H=0.85$, 12- $W=1.29, H=1.2$, 13- $W=0.82, H=1.5$.

Si el elemento sensor tiene una capa de la forma de la variante 10 como se muestra en la figura 5.23, el valor de $W=H$, la transmisión absoluta del sensor ante este tipo de capa se muestra en la figura 5.24.

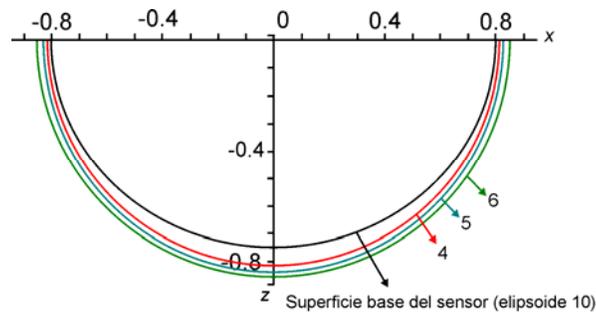


Figura 5.23. Transductor elipsoidal (10) en posición vertical hacia abajo con una capa dieléctrica de grosor no uniforme, con ancho adimensional W y altura adimensional H , variante 10: 4- $W=H=0.81$, 5- $W=H=0.82$, 6- $W=H=0.83$ que siguen la misma forma del sensor.

La transmisión absoluta T aumentará para una capa con W mayores a la del sensor sin capa hasta un incremento de 0.04, valor a partir del cual tienen una transmisión absoluta igual a la del sensor si capa, y a partir de ese momento, si se incrementa W , la transmisión decrece rápidamente hasta llegar a cero para un incremento de 0.06, como se muestra en la figura 5.24.

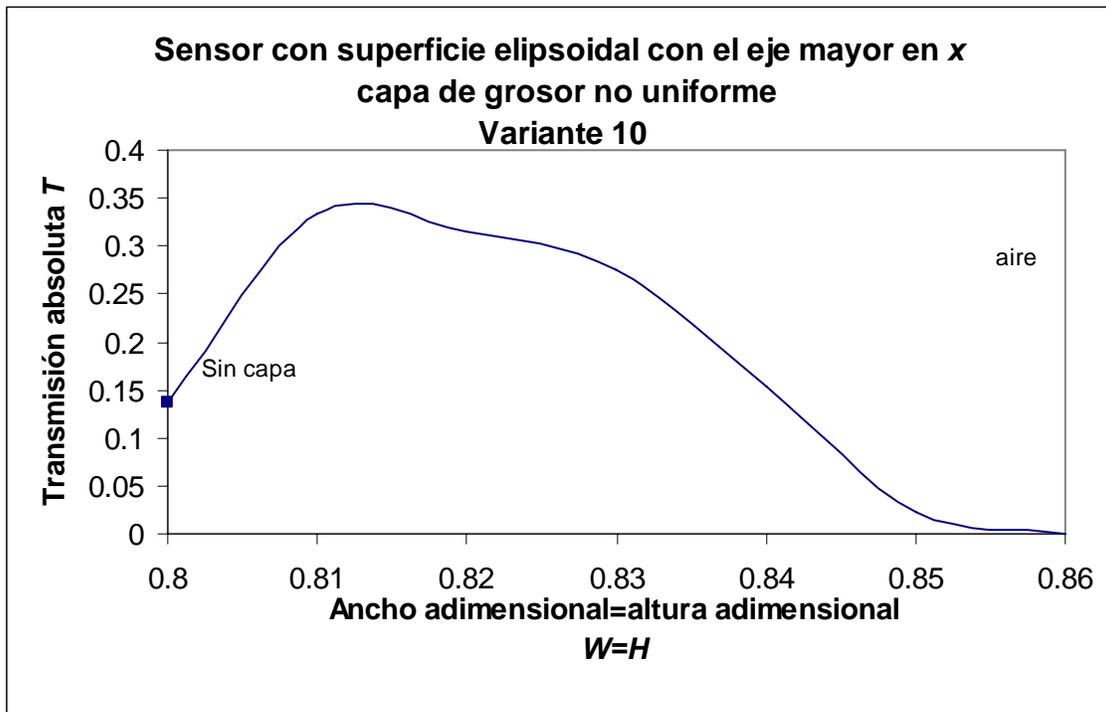


Figura 5.24. Transmisión absoluta T del sensor elipsoidal (10), con una capa dieléctrica no uniforme de la variante 10, en función del ancho adimensional W .

Este efecto se debe a las ventanas de transmisión mostradas por las capas de esta variante que asemejan semiesferas, las cuales de forma intrínseca tienen una mayor transmisión absoluta que los sensores elipsoidales cuyo eje mayor está en x . Conforme aumenta el radio de la semiesfera, la posición relativa de las fibras se aleja de las ventanas de transmisión y por eso disminuye su valor absoluto.

La variante 11 muestra una capa con bordes coincidentes con los del sensor, cuyo volumen máximo está en el centro como se muestra en la figura 5.25.

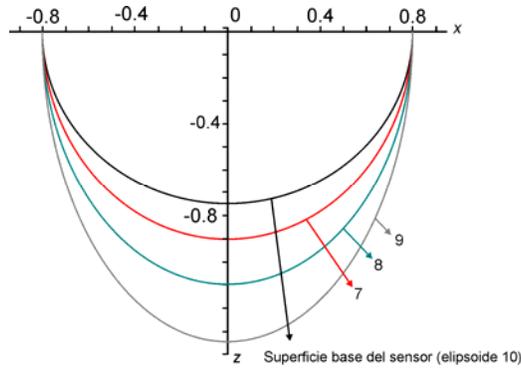


Figura 5.25. Transductor elipsoidal (10) en posición vertical hacia abajo con una capa dieléctrica de grosor no uniforme, con ancho adimensional W y altura adimensional H , variante 11 con $W=0.8$: 7- $H=1$, 8- $H=2$, 9- $H=4$, capa con bordes coincidentes y volumen máximo en el centro.

La transmisión absoluta mostrada en la figura 5.26 decrece para un intervalo entre $0.78 < H < 0.9$, a partir de este punto la transmisión con una capa cuyo cambio en H se encuentre en un intervalo de índices de refracción entre 1 y 1.4, es mayor que la transmisión absoluta del sensor elipsoidal (10) sin capa. A partir de $H=1.4$ la transmisión absoluta decrece nuevamente hasta perderse cuando $H=4$, esta es una variante en donde sigue existiendo transmisión a pesar de tener la presencia de una capa muy grande.

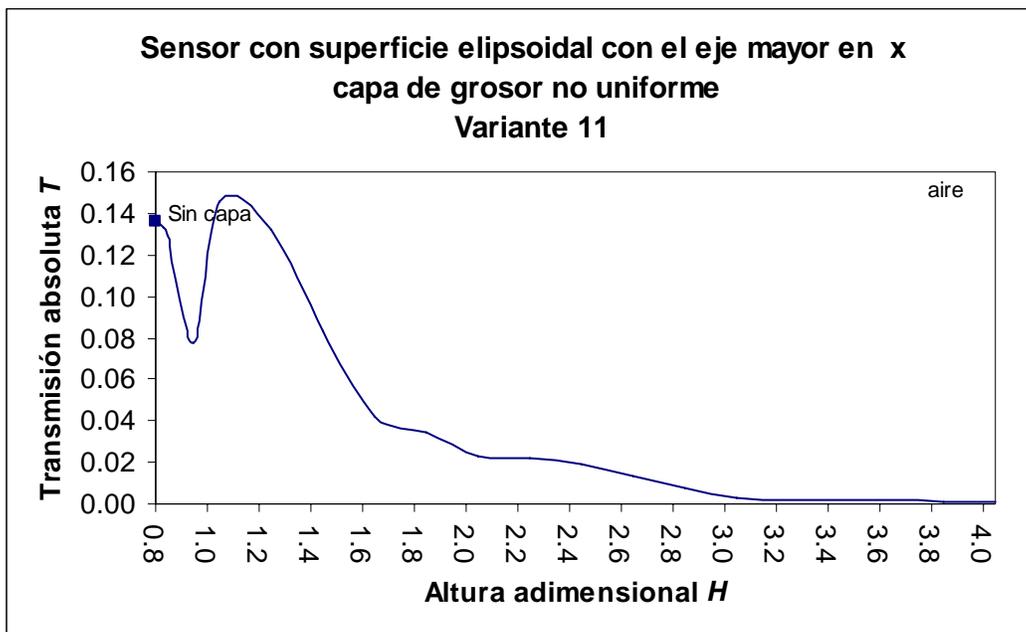


Figura 5.26. Transmisión absoluta T , del sensor elipsoidal (10) en la posición vertical hacia abajo, con una capa dieléctrica no uniforme de la variante 11, con ancho adimensional $W=0.8$, en función de la altura adimensional H , bordes coincidentes, volumen máximo al centro.

En la figura 5.27 se muestra la variante 12, en la que los bordes de la capa no coinciden con el sensor y el volumen máximo se encuentra en el centro. Aunque la variante 12 se parece a la anterior, el efecto de los bordes no coincidentes muestra una variación significativa de la transmisión absoluta (figura 5.28).

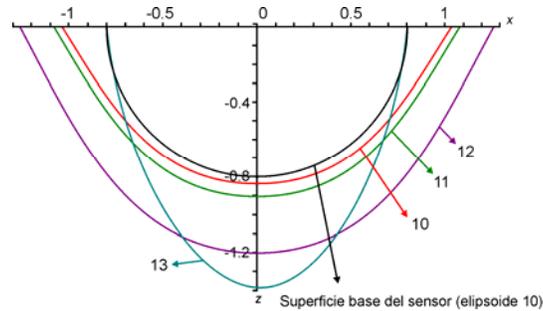


Figura 5.27. Transductor elipsoidal (10) en posición vertical hacia abajo con una capa dieléctrica de grosor no uniforme, ancho adimensional W y altura adimensional H , variante 12:
 10- $W=1.05, H=0.8$, 11- $W=1.09, H=0.85$, 12- $W=1.29, H=1.2$, 13- $W=0.82, H=1.5$, capa con los bordes cercanos al sensor y volumen máximo en el centro.

En la figura 5.28 observamos que la transmisión absoluta se incrementa ante la presencia de capas de esta variante si tanto W como H se incrementan, teniendo un máximo para una relación de $W/H=1.18$, a partir de donde empieza a disminuir. Para valores con W cercana a la del sensor, pero con un incremento en H del doble, la transmisión disminuye hasta desaparecer.

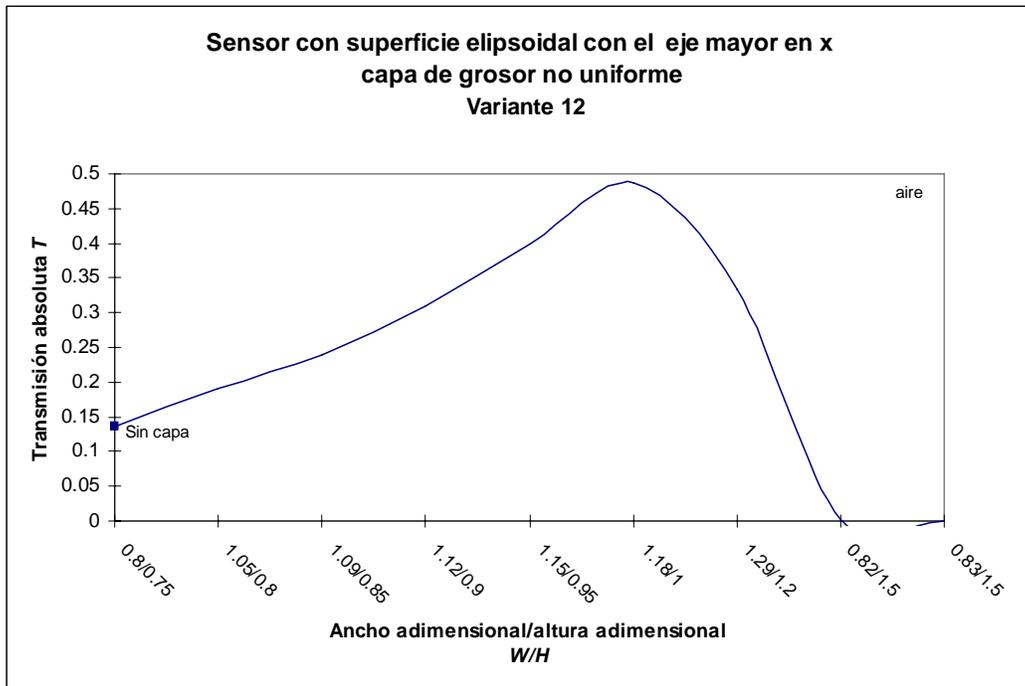


Figura 5.28. Transmisión absoluta T , del sensor elipsoidal (10) en la posición vertical hacia abajo, con una capa dieléctrica no uniforme, con ancho adimensional W y altura adimensional H , variante 12, en función de W/H .

5.2.2.1.2 Posición del sensor con la punta en vertical hacia arriba, elemento elipsoidal con eje mayor en x

Para el sensor elipsoidal (10) con eje mayor en x , cuya orientación es vertical hacia arriba, se analizaron las variantes presentadas en la figura 5.29.

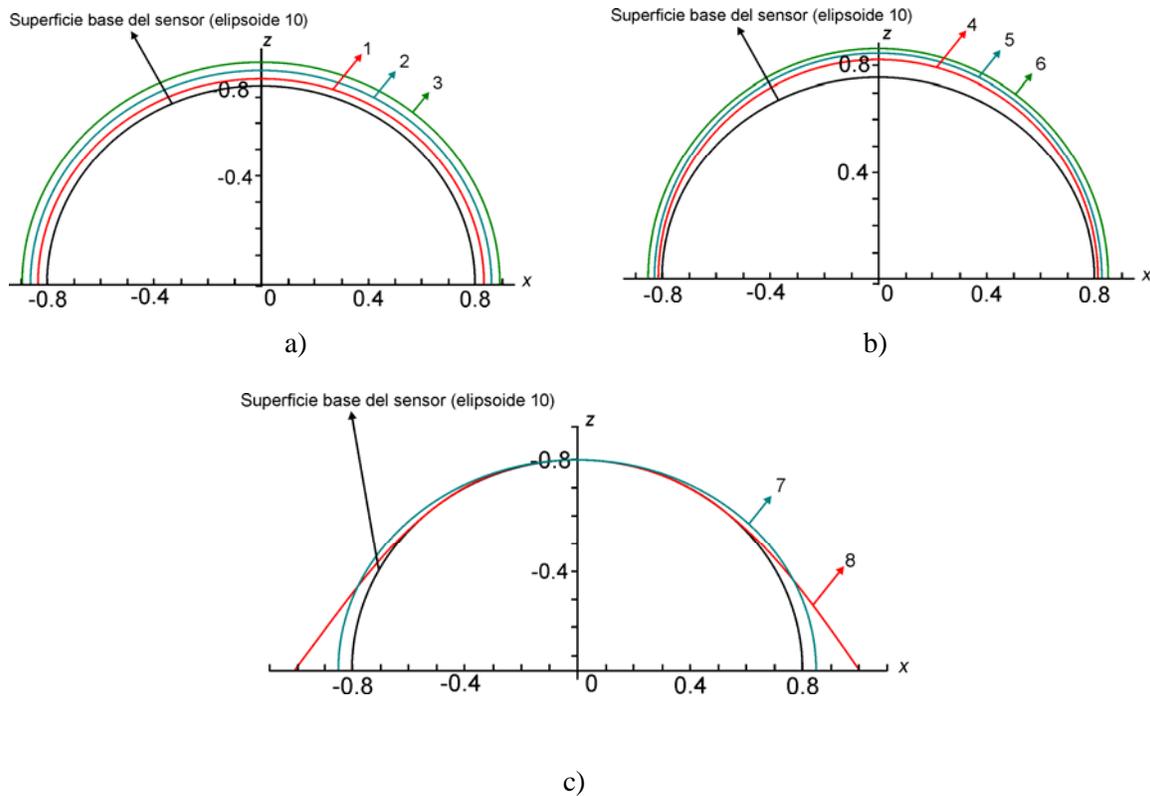


Figura 5.29. Transductor elipsoidal (10) con el eje mayor en x , en posición vertical hacia arriba, con una capa dieléctrica, con ancho dimensional W y altura dimensional H :

a) Capa de grosor uniforme: 1- $W=0.81, H=0.76$, 2- $W=0.82, H=0.77$, 3- $W=0.83, H=0.78$.

Capas de grosor variable:

b) Variante 13: 4- $W=H=0.81$, 5- $W=H=0.82$, 6- $W=H=0.83$.

c) Variante 14 con $H=0.8$: 7- $W=0.81$, 8- $W=1.01$.

Los incisos a) y b) de la figura 5.29, son los mismos casos que los analizados en la sección anterior (figuras 5.20, 5.21, 5.23 y 5.24), pues su formación puede darse para cualquiera de estas dos orientaciones.

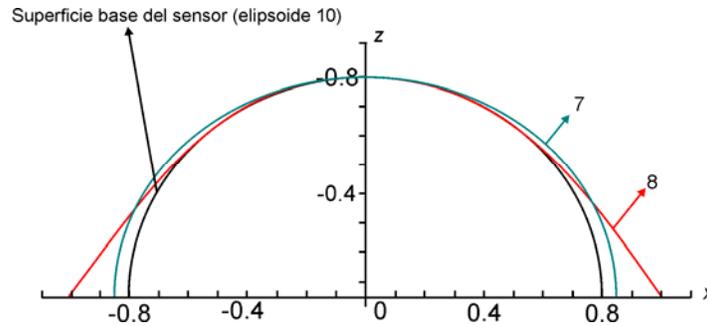
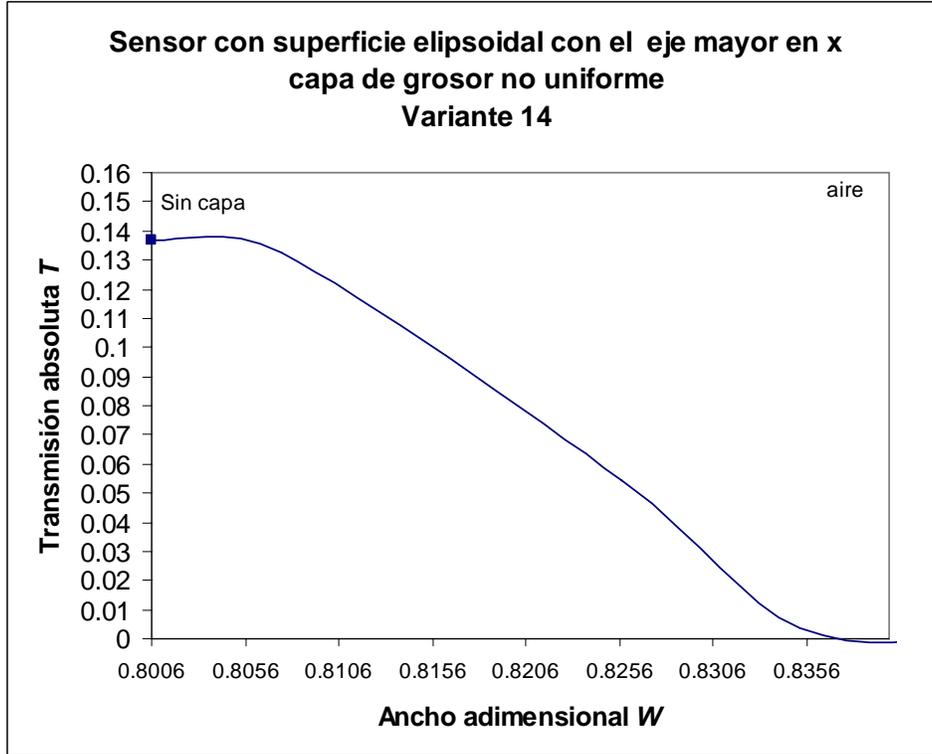


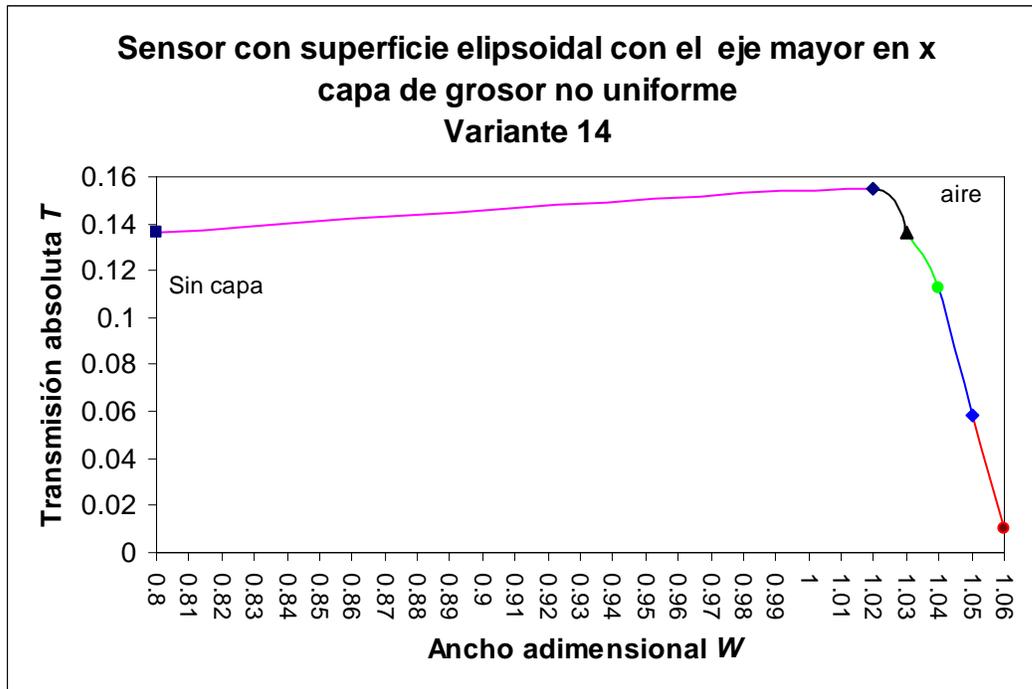
Figura 5.30. Transductor elipsoidal (10) en posición vertical hacia arriba con una capa dieléctrica de grosor no uniforme, de ancho adimensional W y altura adimensional H , variante 14 con $H=0.8$: 7- $W=0.81$, 8- $W=1.01$, capas con el mismo máximo H , y volumen máximo en los extremos.

La transmisión absoluta T para la variante 14 se presenta en la figura 5.31, la variante 14 tiene la misma altura que el transductor sin capa y tiene el volumen máximo en los extremos (figura 5.30). La transmisión absoluta como se muestra en la figura 5.31 a) se verá disminuida ante pequeñas variaciones de W , ya que al aumentar el tamaño de W , las fibras quedan más alejadas de los extremos de la capa, lo que ocasiona un menor acoplamiento entre las fibras. Sin embargo la forma de la transmisión absoluta, y el valor en el que deja de ser constante será muy similar al sensor sin la capa. Si se está trabajando en el intervalo lineal, la respuesta se verá más afectada.

Para la variante 14 (figura 5.31 b)), si los extremos están alejados del sensor $W > 1.02$, se tiene un valor de transmisión absoluta muy parecido en magnitud hasta $W=1.03$, perdiendo el acoplamiento cuando $W=1.06$, debido a que la posición de las fibras se mantiene constante, y para valores de W mayores, quedan fuera de la posición de transmisión.



a)



b)

Figura 5.31. Transmisión absoluta del sensor elipsoidal (10) en posición vertical hacia arriba, con una capa dieléctrica de la variante 14, de altura adimensional $H=0.8$, en función del ancho adimensional W : a) para bordes cercanos al sensor, b) para bordes alejados del sensor.

5.2.2.1.3 Posición del sensor con la punta horizontal lateral, elemento elipsoidal, con eje mayor en x

Para el sensor elipsoidal con eje mayor en x , cuya orientación es horizontal lateral, se analizaron las variantes de la figura 5.32, en donde todas las capas tienen un grosor no uniforme.

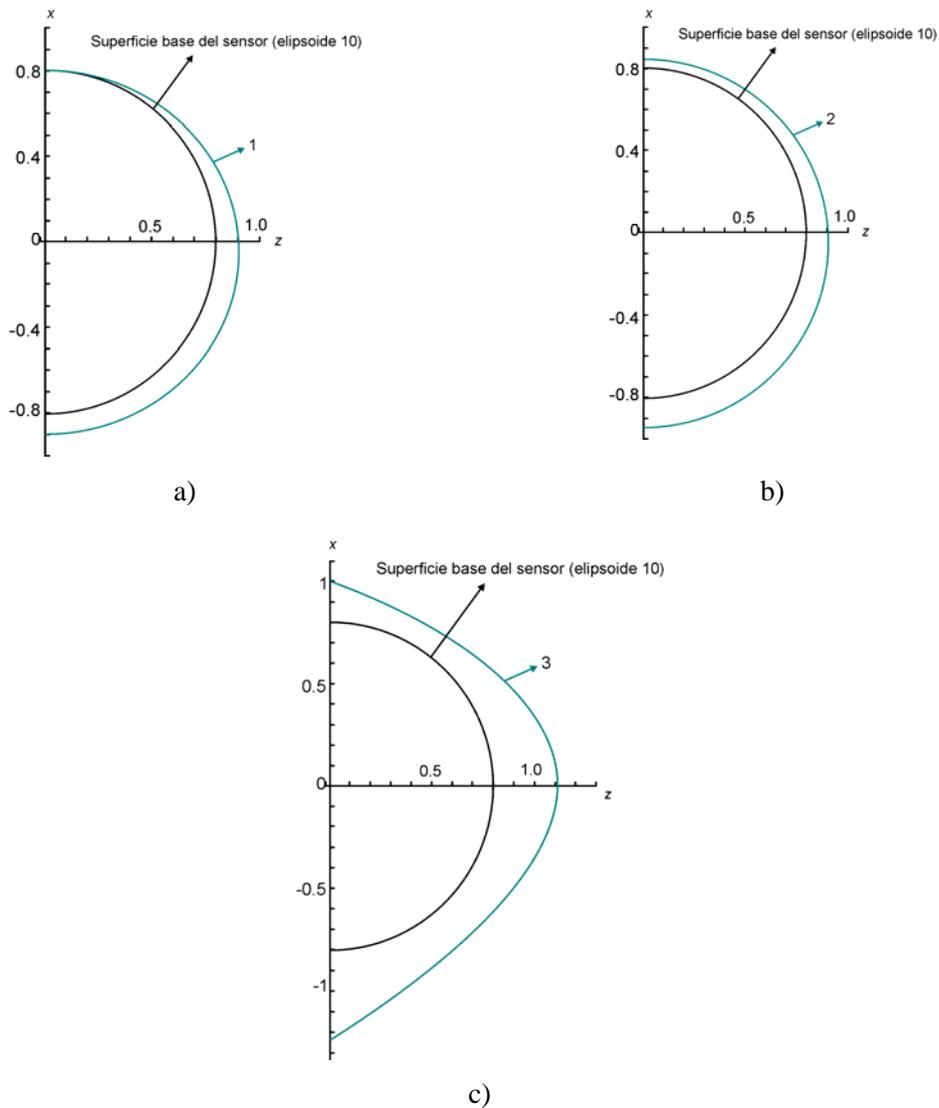


Figura 5.32. Transductor elipsoidal (10) eje mayor x en posición horizontal lateral, con una capa dieléctrica no uniforme, de ancho adimensional W y altura adimensional H :

a) Variante 15: 1- $W=0.82, H=0.82$;

b) Variante 16: 2- $W=0.81, H=0.76$;

c) Variante 17: 3- $W=1.29, H= 1.3$.

El transductor elipsoidal (10), conserva la transmisión con las distintas variantes en posición horizontal lateral. La respuesta para la variante 15 aparece en la figura 5.33.

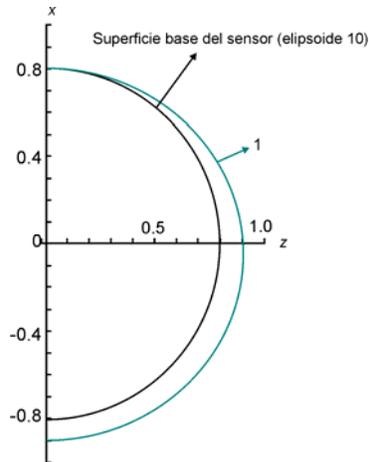


Figura 5.33. Transductor elipsoidal (10) en posición horizontal lateral, con capas de grosor no uniforme, de ancho adimensional W y altura adimensional H , variante 15: 1- $W=0.82$, $H=0.82$, capa con el borde superior coincidente con el sensor y volumen máximo en el centro.

Para la variante 15, la transmisión absoluta del sensor es mayor que la del elemento sin capa, hasta que el valor de $X_1/X_2=0.019/0.03$, a partir de donde la transmisión absoluta decrece, hasta perderse en $X_1/X_2=0.001/0.049$, como se muestra en la figura 5.34. A diferencia del sensor semiesférico, la curva de transmisión relativa cuando la fibra transmisora está en la parte inferior, queda sobre la curva donde la fibra transmisora está en la parte superior hasta valores donde $X_1/X_2=0.014/0.033$, en donde se invierten las posiciones. Esto se debe al acoplamiento de las fibras para las distintas formas que se van generando conforme X_2 aumenta o bien conforme X_1 disminuye.

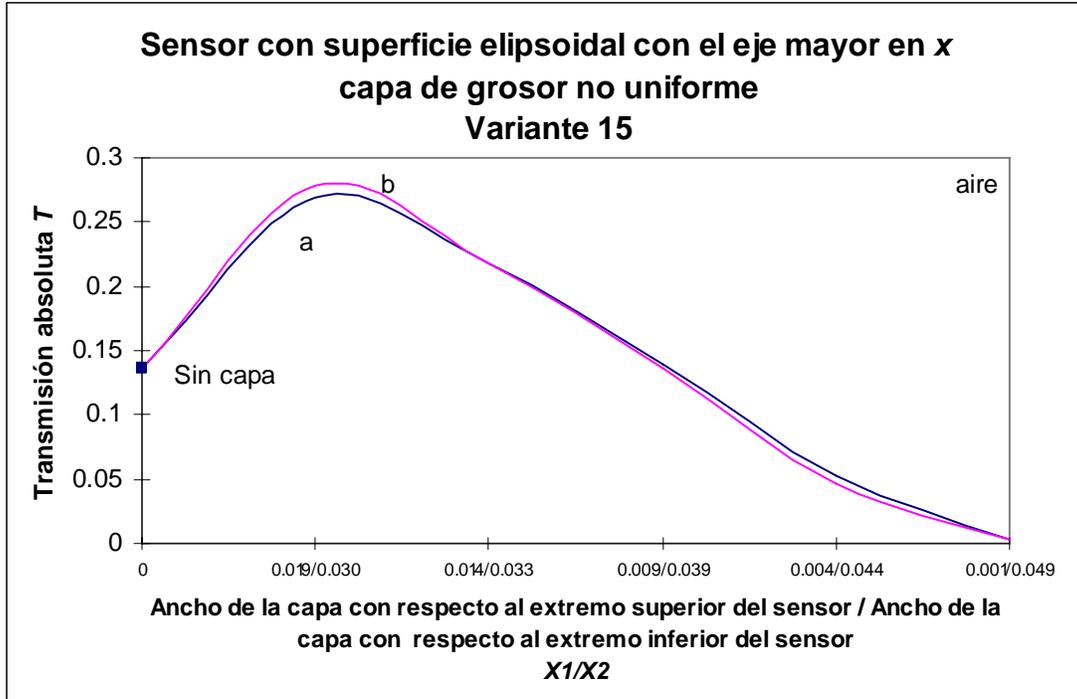


Figura 5.34. Transmisión absoluta T , del sensor elipsoidal (10) en la posición horizontal lateral, con una capa dieléctrica no uniforme de la variante 15, en función de X_1 y X_2 : a) con la fibra óptica transmisora en la parte superior, y la receptora en la parte inferior, b) con la fibra óptica transmisora en la parte inferior y la receptora en la parte superior.

La variante 16 se muestra en la figura 5.35, a diferencia de la anterior, los bordes no coinciden con los del sensor, y tiene el volumen máximo no centrado. La transmisión absoluta de esta variante (figura 5.36) es decreciente.

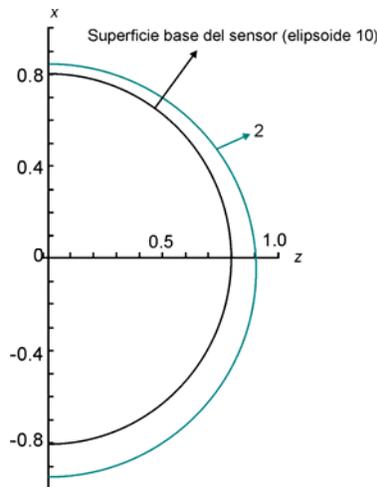


Figura 5.35. Transductor elipsoidal (10) en posición horizontal lateral, con una capa dieléctrica de grosor no uniforme, de ancho dimensional W y altura dimensional H , variante 16: 2- $W=0.81$, $H=0.76$, capa con los bordes separados del sensor, con el borde inferior más grande y volumen máximo no centrado.

La transmisión absoluta de la variante 16 (figura 5.36), es inferior que la del sensor sin la capa, para todos los valores de X_1/X_2 . La transmisión se pierde en $X_1/X_2=0.005/0.045$. En esta variante, la curva de transmisión relativa cuando la fibra transmisora está en la posición inferior queda por arriba de la curva cuando la fibra transmisora está en la posición superior. Para la variante 16 la separación entre las curvas es menor que en la variante 15, debido a que la forma de la capa es más parecida a la del transductor.

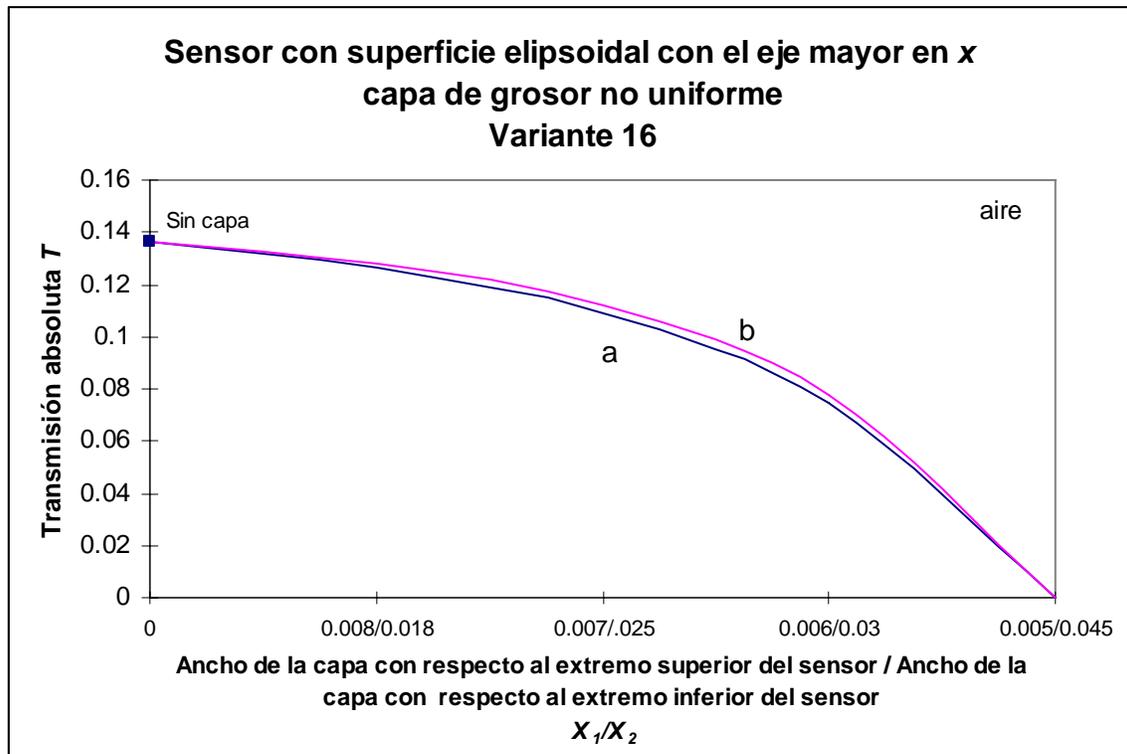


Figura 5.36. Transmisión absoluta T , del sensor elipsoidal (10), en la posición horizontal lateral, con una capa dieléctrica no uniforme de la variante 16, en función de X_1 y X_2 : a) con la fibra óptica transmisora en la parte superior, y la receptora en la parte inferior, b) con la fibra óptica transmisora en la parte inferior y la receptora en la parte superior.

La última variante para el sensor elipsoidal (10), en posición horizontal lateral, aparece en la figura 5.37. La variante 17 es una capa de mayor grosor que las anteriores, los bordes de la capa quedan más alejados del sensor que en las otras variantes, pero al igual que en los casos anteriores el borde inferior es más ancho que el superior. La forma de la capa no es similar a la del sensor como en las variantes 15 y 16, que mostraban un mayor parecido.

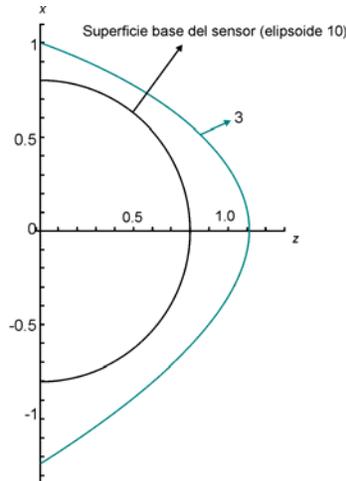


Figura 5.37. Transductor elipsoidal (10) en posición horizontal lateral, con una capa dieléctrica de grosor no uniforme, de ancho adimensional W y altura adimensional H , variante 17: 3- $W=1.29$ $H=1.3$, volumen máximo de la capa en el centro y en el borde inferior.

La gráfica de transmisión absoluta de la figura 5.38, muestra que hay un incremento en la transmisión del sensor para una capa de la forma de la variante 17 a casi el doble del valor de transmisión absoluta, cuando el sensor no tiene capa. La transmisión absoluta presenta una pequeña disminución para incrementos de 0.01/0.01 en X_1/X_2 , perdiendo la transmisión hasta $X_1/X_2=0.20/0.78$

A diferencia de la variantes 16 la gráfica de transmisión absoluta cuando la fibra óptica se encuentra en la posición superior (a) , queda por arriba de la curva obtenida para la fibra transmisora en la posición inferior (b), para todos los valores de X_1/X_2 .

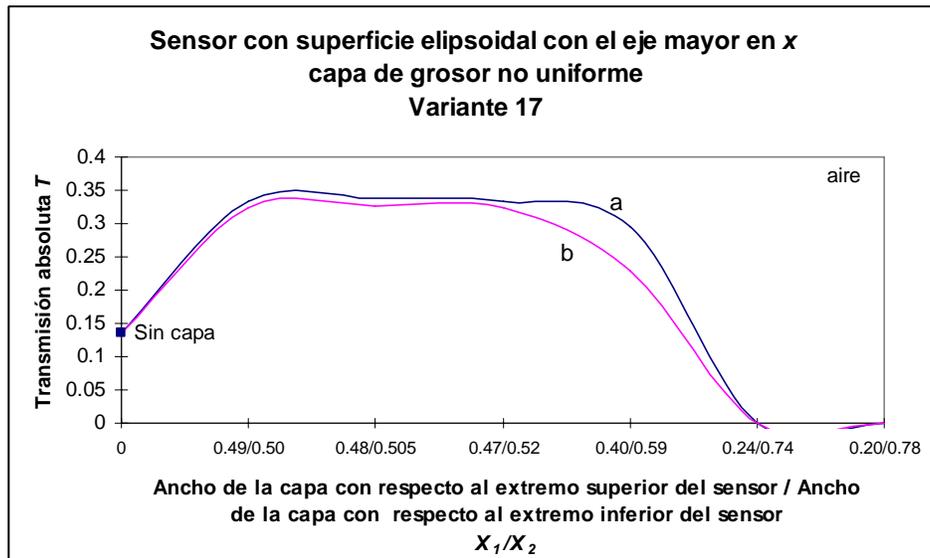


Figura 5.38. Transmisión absoluta T , del sensor elipsoidal (10) en la posición horizontal lateral, con una capa dieléctrica no uniforme de la variante 17, en función de X_1 y X_2 : a) con la fibra óptica transmisora en la parte superior, y la receptora en la parte inferior, b) con la fibra óptica transmisora en la parte inferior y la receptora en la parte superior.

La variante 17, genera valores de transmisión absoluta mayores que los del sensor sin la capa, y que las variantes 15 y 16. Además el valor de X_1/X_2 a partir del cual se pierde la transmisión, es 10 veces más grande que para las variantes 15 y casi 100 veces más grande que para la variante 16. Esto se debe a que la forma de la variante 17, asemeja a un paraboloides, los cuales pueden tener transmisión aún cuando las fibras no se encuentren en una posición simétrica con respecto al centro del sensor.

5.2.2.1.4 Cambios en la transmisión de un sensor elipsoidal con el eje mayor en x , con una capa dieléctrica

La figura 5.39 muestra la comparación entre la transmisión relativa $T^*(n)$ para el sensor elipsoidal (10) eje mayor x , sin capa y el factor de cambio de la transmisión $\zeta(n)$ para capas de distintas geometrías.

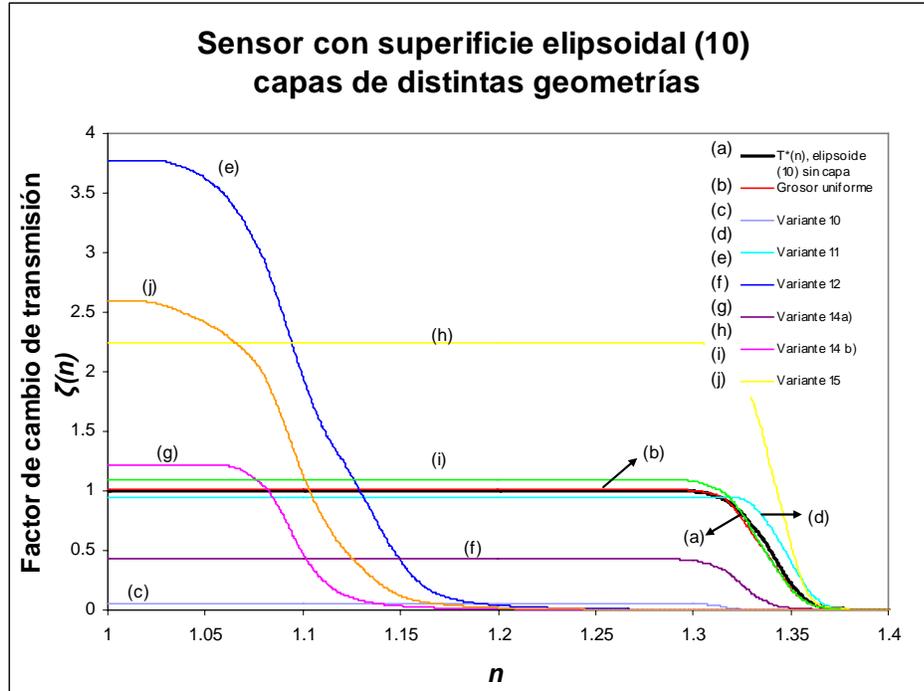
El factor de cambio en la transmisión, puede rebasar la unidad, como se muestra en la figura 5.39 a), en donde el factor de cambio $\zeta(n)$ de las variantes 12, 14b), 15, 16 y 17 tienen valores máximos de $\zeta = 3.77$, $\zeta = 1.22$, $\zeta = 2.24$, $\zeta = 1.09$ y $\zeta = 2.6$ respectivamente, debido a el error de calibración con respecto al sensor sin capa.

Sin embargo el índice de refracción mayor para las variantes 12, 14b) y 17 no llega hasta $n=1.35$ como opera el sensor sin capa. Las variantes 15 y 16 tienen un factor de cambio en la transmisión, $\zeta(n)$ en un intervalo de operación cercano al de la transmisión relativa del sensor sin capa, la variante 16 muestra la curva $\zeta(n)$, que se asemeja más a la transmisión relativa $T^*(n)$ correspondiente al sensor sin capa en su región lineal, mientras que la variante 15 muestra una pendiente mayor en la región lineal.

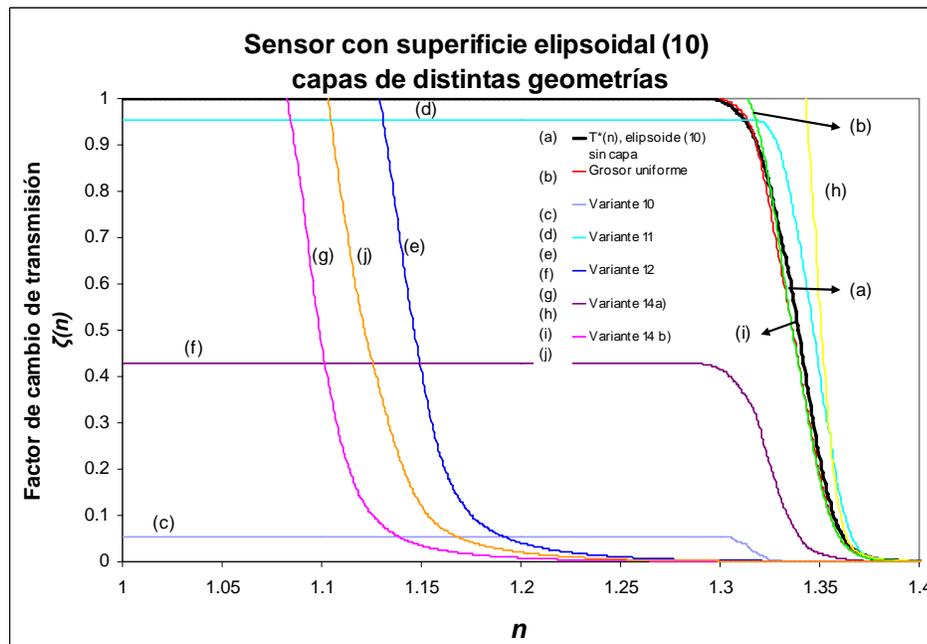
El factor de cambio $\zeta(n)$ producido por una capa de grosor constante es la que muestra el mayor parecido durante todo el intervalo, a la transmisión relativa $T^*(n)$ del sensor sin capa.

Las variantes 10, 11 y 14b) tienen un factor de cambio $\zeta(n)$ de magnitud máxima inferior que la transmisión relativa del sensor sin capa, de $\zeta = 0.05$, $\zeta = 0.43$, $\zeta = 0.98$ respectivamente. La variante 10 además de tener la magnitud más pequeña, presenta tanto una disminución en el intervalo de índices de refracción en donde la curva del factor $\zeta(n)$ es constante, además de una disminución el intervalo de índices de refracción en el que opera. La variante 14a) presenta un factor de cambio $\zeta(n)$ con menor linealidad que la transmisión relativa el sensor sin capa y una disminución en el intervalo de operación.

Por último la variante 11 tiene un factor de cambio $\zeta(n)$ de magnitud ligeramente menor que la magnitud de la transmisión relativa $T^*(n)$ del sensor sin capa, pero el intervalo de índices de refracción en donde la curva es constante para la variante 11 es mayor que el intervalo donde es constante la transmisión relativa $T^*(n)$.



a)



b)

Figura 5.39. Factor de cambio de transmisión $\zeta(n)$ del sensor con una superficie elipsoidal con el eje mayor en x , para capas con distintas geometrías: a) magnitudes entre $0 < \zeta(n) < 4$, b) magnitudes desde $\zeta(n) < 1$

Elipsoide (10) sin capa: $W=0.8, H=0.75$;

Grosor uniforme: $W=0.81, H=0.76$;

Variante 10: $W=H=1.17$;

Variante 11: $W=0.8, H=0.8$;

Variante 12: $W=1.18, H=1$.

Variante 14: a) $W=0.82, H=0.75$;

Variante 14: b) $W=1.02, H=0.75$;

Variante 15: $W=0.82, H=0.82$;

Variante 16: $W=0.813, H=0.763$;

Variante 17: $W=1.29, H=1.2$.

Si el sensor elipsoidal (10), es utilizado en la región de operación de la respuesta escalón, la presencia de una capa de la forma de las variantes 12, 14b), 10 y 17 son las que producirían el error más grande, ya que las regiones en las que son constantes son inferiores a las del sensor sin capa.

5.2.2.2 Elipsoide eje mayor en z

El elemento elipsoidal utilizado, esta representado por la ecuación:

$$x^2 + y^2 + 0.756z^2 = 1, \text{ para } z \leq 0 \quad (2)$$

5.2.2.2.1 Posición del sensor con la punta en vertical hacia abajo, elemento elipsoidal con eje mayor en z

Las variantes analizadas para este caso también se dividieron en grosor uniforme y grosor no uniforme, como se muestran en la figura 5.40.

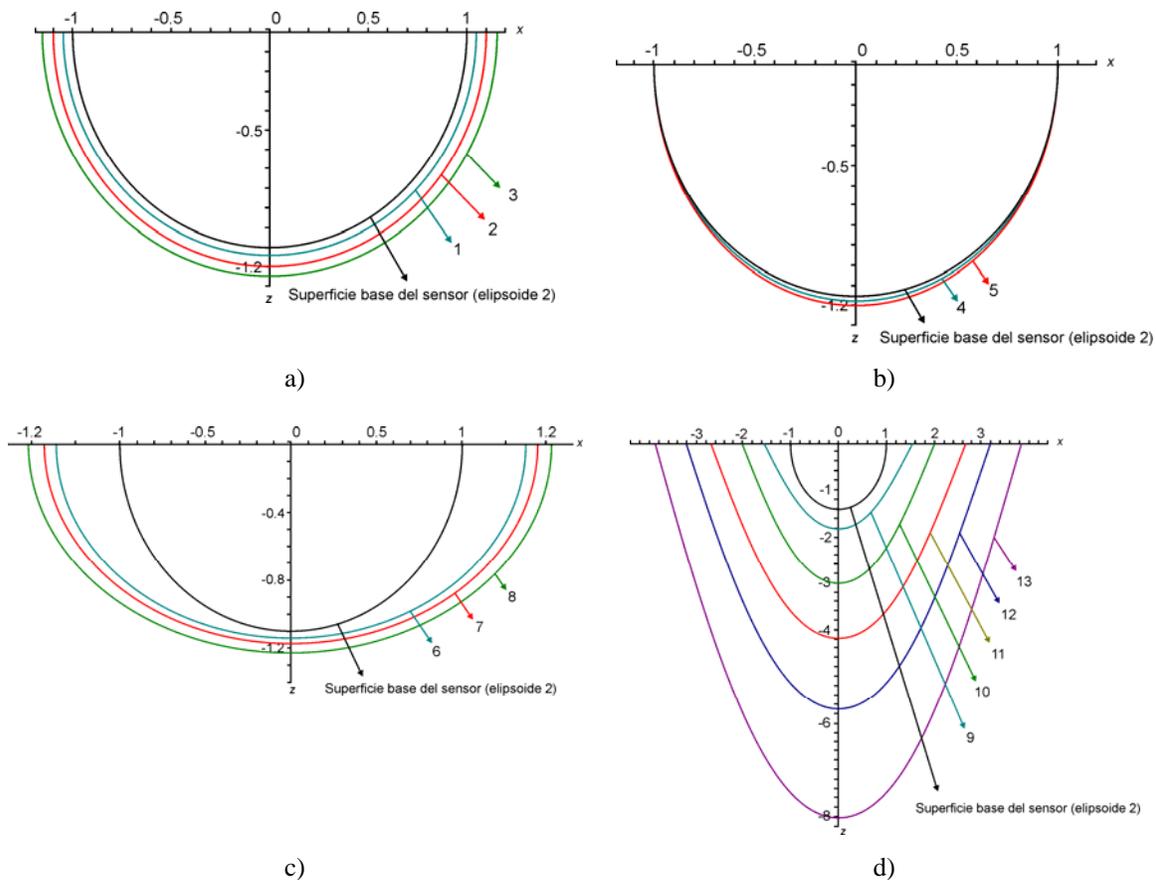


Figura 5.40. Transductor elipsoidal (2) eje mayor z en posición vertical hacia abajo de ancho adimensional W y altura adimensional H:

a) Capa dieléctrica de grosor uniforme: 1- $W=1.02, H=1.17$, 2- $W=1.05, H=1.2$, 3- $W=1.08, H=1.23$;

Capas dieléctricas de grosor no uniforme:

b) Variante 18 con $W=1$: 4- $H=1.16$, 5- $H=1.29$;

c) Variante 19: 6- $W=1.07, H=1.17$, 7- $W=1.11, H=1.19$, 8- $W=1.15, H=1.21$;

d) Variante 20: 9- $W=1.65, H=1.95$, 10- $W=2.04, H=3$, 11- $W=2.64, H=5$, 12- $W=3.13, H=6$, 13- $W=3.74, H=8$.

Las capas con grosor constante se muestran en la figura 5.40a), este tipo de capas producen una aumento en la transmisión absoluta conforme el grosor de la capa se va incrementando, hasta que el grosor es de $W/H= 0.8$, a partir de este punto la transmisión absoluta decrece como se muestra en la figura 5.41.

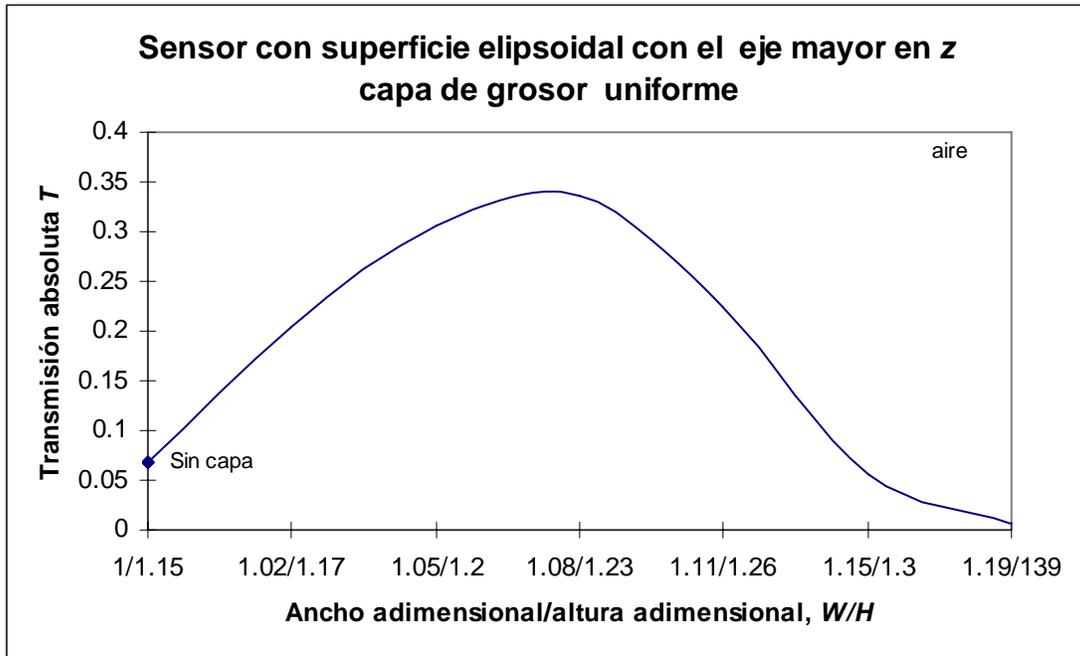


Figura 5.41. Transmisión absoluta T , del sensor elipsoidal (2) en la posición vertical hacia abajo, con una capa dieléctrica de grosor uniforme, de ancho adimensional W y altura adimensional H , en función de W/H .

La primera variante para capas de grosor no uniforme sobre esta geometría de sensor, se muestra en la figura 5.42, que muestra el sensor con una serie de capas cuyos extremos coinciden con los del sensor, y tienen el volumen máximo en el centro.

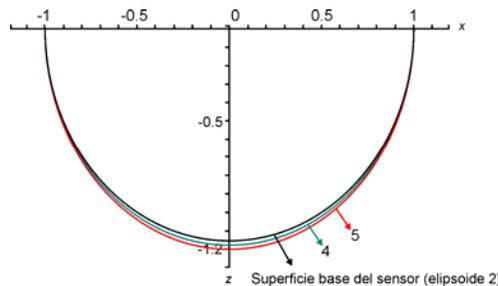


Figura 5.42. Transductor elipsoidal (2) en posición vertical hacia abajo, con una capa dieléctrica de grosor no uniforme, con ancho adimensional W y altura adimensional H , variante 18 $W=1$:
 4- $H=1.16$, 5- $H=1.29$, capa con los bordes coincidentes con el sensor y el volumen máximo al centro.

La transmisión absoluta de la variante 18 se muestra en la figura 5.43, que decrece conforme aumenta el valor de H , perdiendo la transmisión para $H=1.3$. Cuando se tienen capas de grosor constante tanto H

como W aumentan, ocasionando que ante algunas capas se tenga un valor más grande de transmisión absoluta, y teniendo transmisión para capas de grosores mayores. En cambio si solo se aumenta el parámetro H , la transmisión absoluta será siempre decreciente y el grosor donde aún se tiene transmisión, será menor.

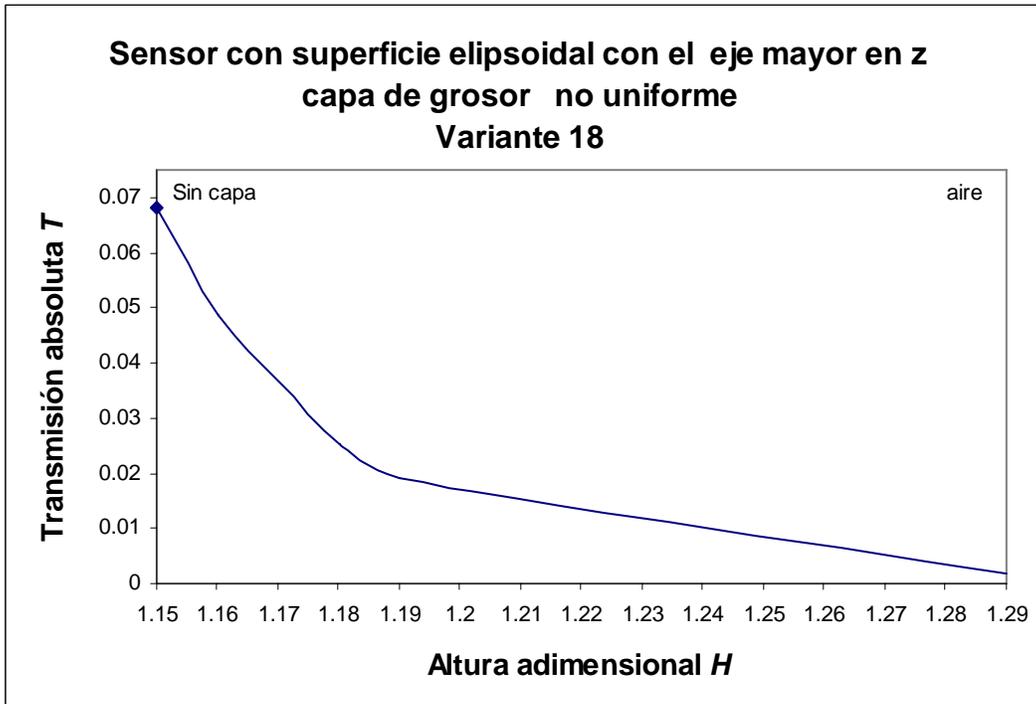


Figura 5.43. Transmisión absoluta T , del sensor elipsoidal (2) en la posición vertical hacia abajo, con una capa dieléctrica no uniforme, de la variante 18 con ancho adimensional $W=1$, en función de la altura adimensional H .

La variante 19 son capas cuyo volumen máximo se encuentra en los bordes, mientras que el centro se encuentra cercano al sensor como se observa en la figura 5.44.

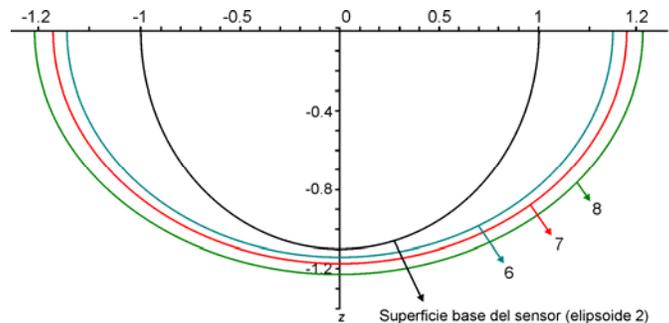


Figura 5.44. Transductor elipsoidal (2) en posición vertical hacia abajo, con una capas dieléctrica de grosor no uniforme, de ancho adimensional W y altura adimensional H , variante 19:
6- $W=1.07$, $H=1.17$, 7- $W=1.11$, $H=1.19$, 8- $W=1.15$, $H=1.21$, capa con el volumen máximo en los bordes.

La gráfica de transmisión absoluta de la variante 19 se muestra en la figura 5.45, en donde se observa un aumento en la magnitud de la respuesta para capas cuyos extremos se encuentran cercanos a los del sensor, conforme el volumen en los bordes aumenta, la transmisión disminuye hasta perderse por completo para $W/H=1.15/1.21$.

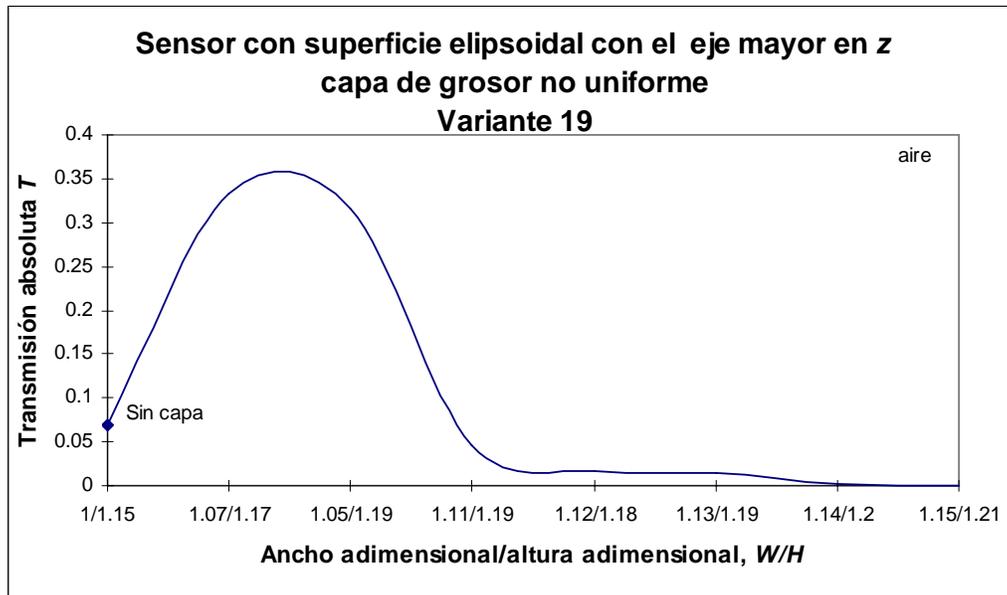


Figura 5.45. Transmisión absoluta T , del sensor elipsoidal (2) en la posición vertical hacia abajo, con una capa dieléctrica no uniforme, de ancho adimensional W y altura adimensional H , de la variante 19, en función de W/H .

La última variante analizada para el sensor elipsoidal (2), en la posición vertical hacia abajo, es la variante 20 que aparece en la figura 5.46.

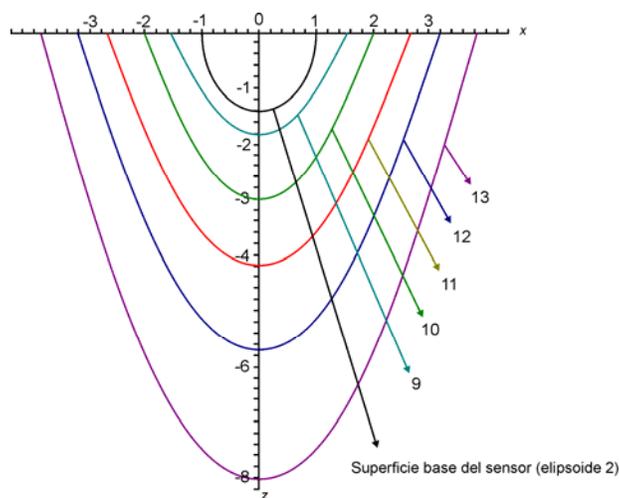


Figura 5.46. Transductor elipsoidal (2) en posición vertical hacia abajo, con una capa dieléctrica de grosor no uniforme, de ancho adimensional W y altura adimensional H , variante 20: 9- $W=1.65, H=1.95$, 10- $W=2.04, H=3$, 11- $W=2.64, H=5$, 12- $W=3.13, H=6$, 13- $W=3.74, H=8$, capa con bordes no coincidentes y volumen máximo en el centro.

La transmisión absoluta de la variante 20, se muestra en la figura 5.47. La respuesta es similar a las obtenidas tanto para la variante 19 como para capas de grosor uniforme, ya que se obtiene un incremento en la magnitud de la transmisión relativa con capas cercanas a la superficie del sensor, y después las gráficas presentan un decrecimiento, hasta que se pierde la transmisión conforme aumenta el tamaño de la capa. En el caso particular de la variante 20, cuando se tiene la misma relación (cociente) de $W/H=0.8695$ en la capa, que el del sensor elipsoidal sin capa, la transmisión absoluta tiene el mismo valor, aunque las curvas son de formas distintas. Esta variante es la que permite mantener la transmisión a pesar de tener capas muy grandes sobre la superficie del sensor.

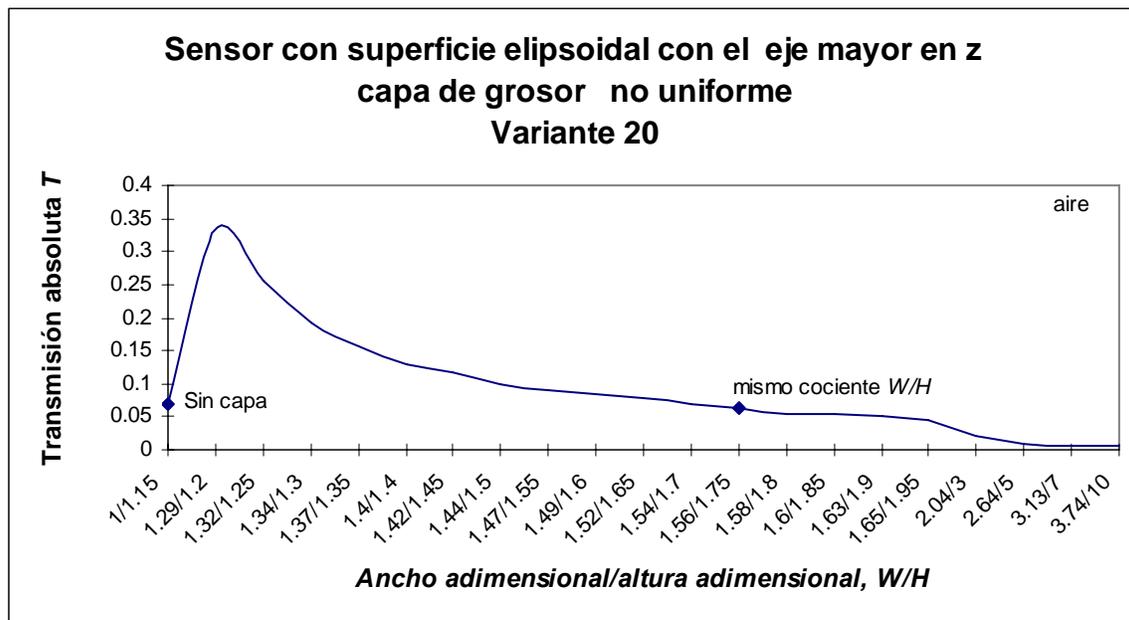


Figura 5.47. Transmisión absoluta T , del sensor elipsoidal (2) en la posición vertical hacia abajo, con una capa dieléctrica no uniforme, de ancho adimensional W y altura adimensional H , de la variante 20, en función de W/H .

5.2.2.2.2 Posición del sensor con la punta en vertical hacia arriba, elemento elipsoidal con eje mayor en z

Las variantes analizadas para este caso también se dividieron en grosor uniforme y grosor no uniforme, como se muestran en la figura 5.48.

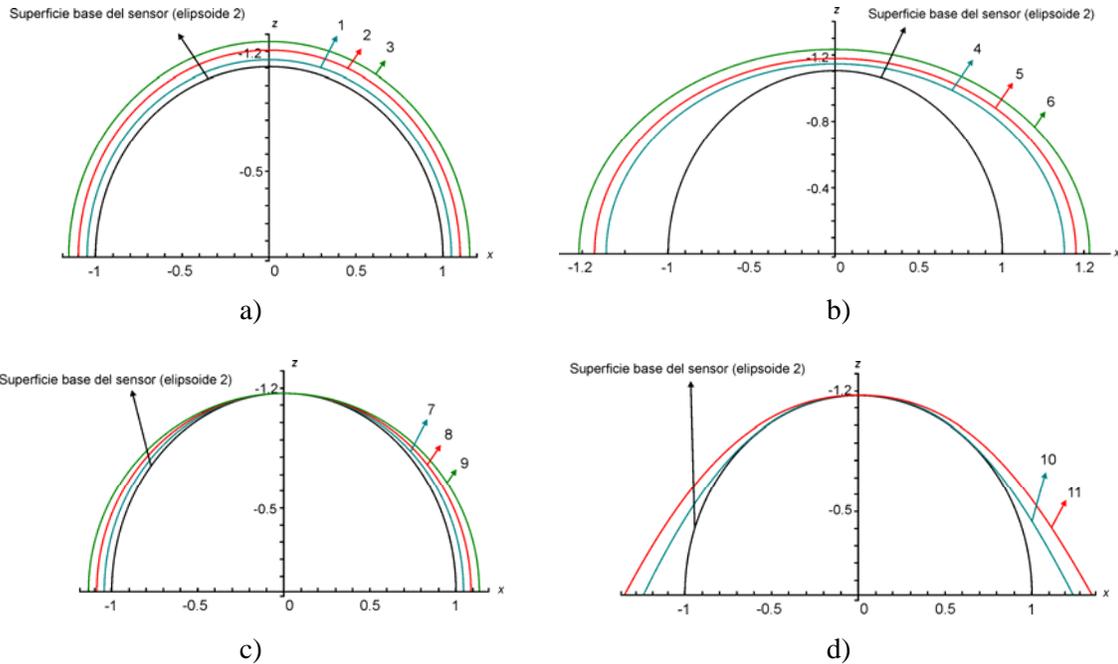


Figura 5.48. Transductor elipsoidal (2) eje mayor z en posición vertical hacia arriba, con una capa dieléctrica, de ancho adimensional W y altura adimensional H :

a) Capa de grosor uniforme: 1- $W=1.02$, $H=1.17$, 2- $W=1.05$, $H=1.2$, 3- $W=1.08$, $H=1.23$;

Capas de grosor no uniforme:

b) Variante 21: 4- $W=1.07$, $H=1.17$, 5- $W=1.11$, $H=1.19$, 6- $W=1.15$, $H=1.21$;

c) Variante 22 con $H=1$: 7- $W=1.02$, 8- $W=1.06$, 9- $W=1.1$;

d) Variante 23 con $H=1$: 10- $W=1.24$, 11- $W=1.3$.

Los casos de capas representados en la figura 5.48a) y b) son los mismos que los analizados en la sección anterior, ya que se podrían presentar para cualquiera de estas dos orientaciones.

La variante 22 son capas cuyo centro es coincidente con el del sensor, y tienen el volumen máximo en los bordes, que se encuentran cercanos a los bordes del sensor como se muestra en la figura 5.49.

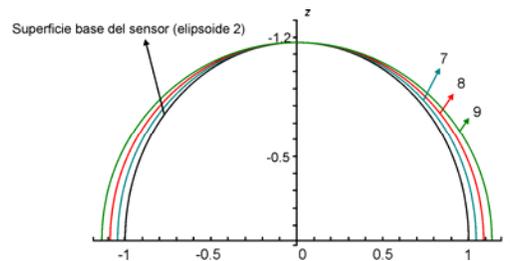


Figura 5.49. Transductor elipsoidal (2) en posición vertical hacia arriba, con una capa dieléctrica de grosor no uniforme, de ancho adimensional W , variante 22 de altura adimensional $H=1$:

7- $W=1.02$, 8- $W=1.06$, 9- $W=1.1$, capa con la misma altura H que el sensor sin capa, extremos cercanos al sensor.

La transmisión absoluta de la variante 22, se muestra en la figura 5.50, en la que nuevamente aparece la misma forma de respuesta que para las variantes 19, 20 y para capas de grosor uniforme. La transmisión

absoluta aumenta cuando los bordes de las capas se encuentran cercanos a los del sensor, para esta variante, a partir de $W=1.05$, la curva comienza a decrecer, hasta perder la transmisión por completo cuando $W=1.14$.

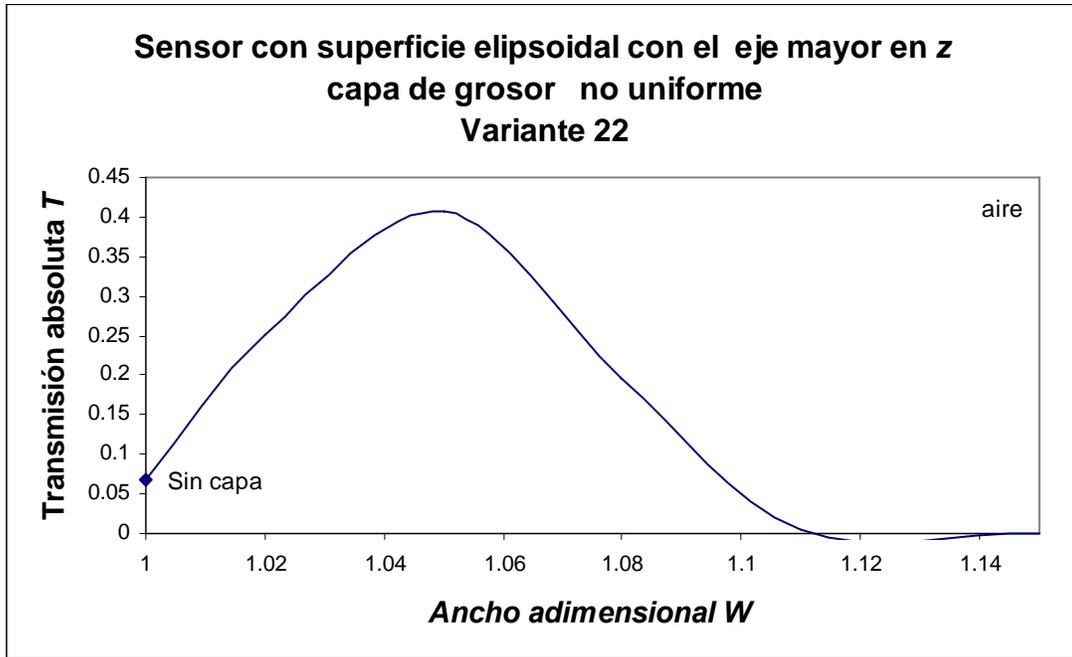


Figura 5.50. Transmisión absoluta T , del sensor elipsoidal (2) en la posición vertical hacia arriba, con una capa dieléctrica de grosor no uniforme, de la variante 22 para una altura dimensional $H=1$, en función del ancho dimensional W .

La variante 23, también tiene el mismo máximo en H , tiene el volumen máximo en los bordes pero los extremos de las capas están más alejados a los extremos del sensor como se muestra en la figura 5.51. Esta variante de capas, anulan por completo la transmisión del sensor.

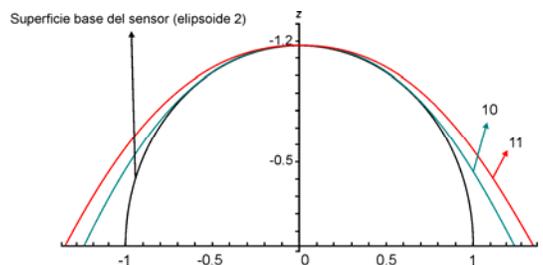


Figura 5.51. Transductor elipsoidal (2) en posición vertical hacia arriba, con una capa dieléctrica de grosor no uniforme, de ancho dimensional W , variante 23 con altura dimensional $H=1$:
10- $W=1.24$, 11- $W=1.3$, capa con la misma altura H que el elipsoide (2) y volumen máximo en los bordes.

5.2.2.2.3 Posición del sensor con la punta en horizontal lateral, elemento elipsoidal con eje mayor en z

Para el sensor elipsoidal con eje mayor en z, cuya orientación es horizontal lateral, se analizaron las variantes de la figura 5.52, en donde todas las capas tienen un grosor no uniforme.

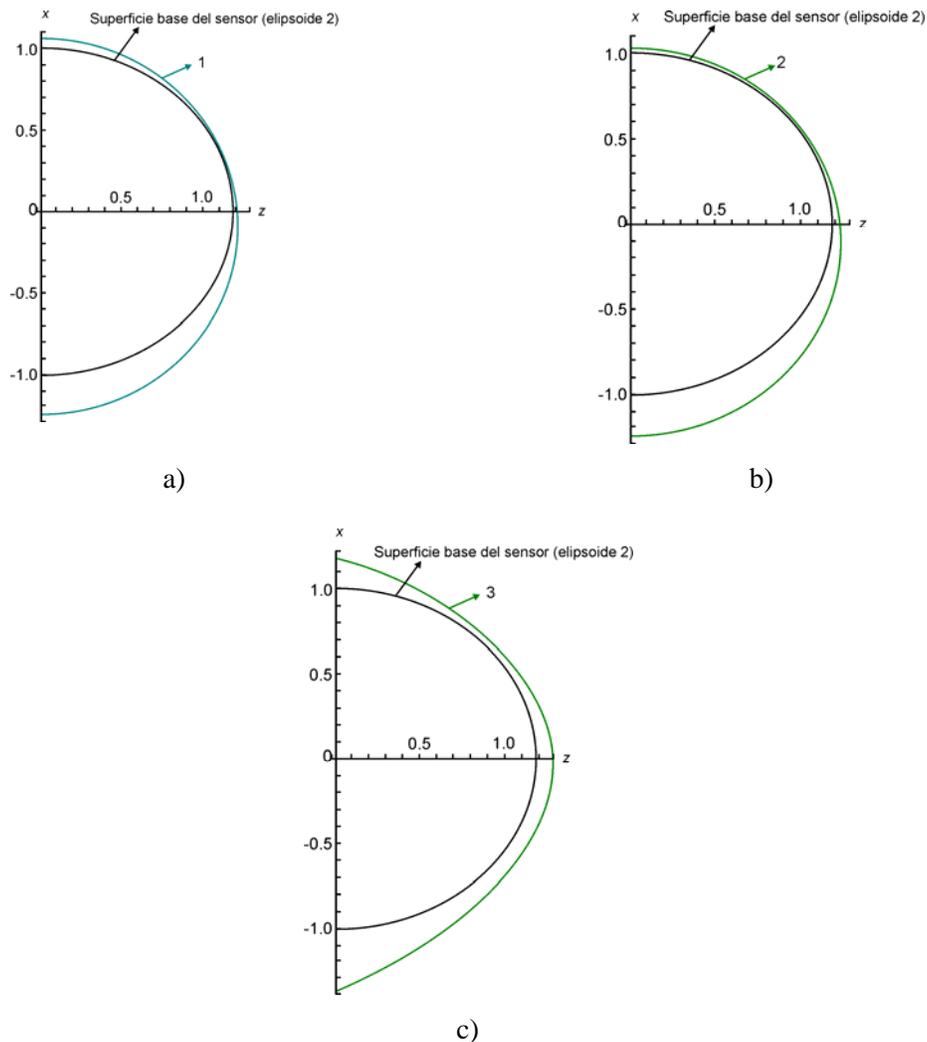


Figura 5.52. Transductor elipsoidal (2) eje mayor z en posición horizontal lateral, con una capa dieléctrica de grosor no uniforme, de ancho adimensional W y altura adimensional H :

- a) Variante 24: 1- $W=1.18, H=1.18$;
- b) Variante 25: 2- $W=1.11, H=1.19$;
- c) Variante 26: 3- $W=1.37, H=1.35$.

La variante 24 que se muestra en la figura 5.53, tiene el volumen máximo en el borde inferior, y el borde superior separado del extremo del sensor. Con capas de esta variante, la transmisión se pierde por completo.

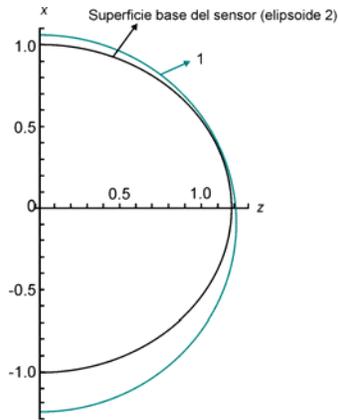


Figura 5.53. Transductor elipsoidal (2) en posición horizontal lateral, con una capa dieléctrica de grosor no uniforme, de ancho adimensional W y altura adimensional H , variante 24:
1- $W=1.18$, $H=1.18$, capa con el volumen máximo en borde inferior, y el borde superior cercano al transductor.

La variante 25 se muestra en la figura 5.54, tiene el volumen máximo en el borde inferior, mientras que el extremo superior se encuentra cercano al sensor hasta casi el centro.

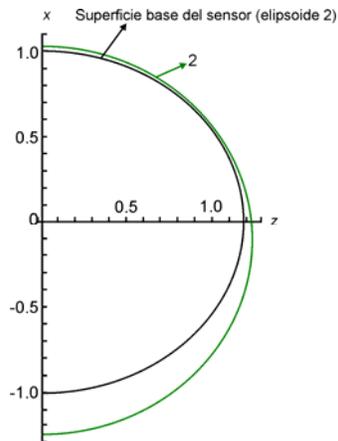


Figura 5.54. Transductor elipsoidal (2) en posición horizontal lateral, con una capa dieléctrica de grosor no uniforme, de ancho adimensional W y altura adimensional H , variante 25:
2- $W=1.11$, $H=1.19$, capa con el volumen máximo en el borde inferior, y el borde superior muy cercano al transductor.

La transmisión absoluta de la variante 25 se muestra en la figura 5.55. La transmisión absoluta es decreciente para conforme aumenta el tamaño de X_2 o disminuye el tamaño de X_1 (ver figura 5.1f)), hasta perder la transmisión en $X_1/X_2=0.09/0.14$. La curva de transmisión absoluta cuando la fibra óptica transmisora está en la posición superior, tiene una magnitud mayor que la de la curva obtenida cuando la posición de la fibra óptica transmisora se encuentra en la posición inferior, aunque la forma de las dos curvas es muy parecida.

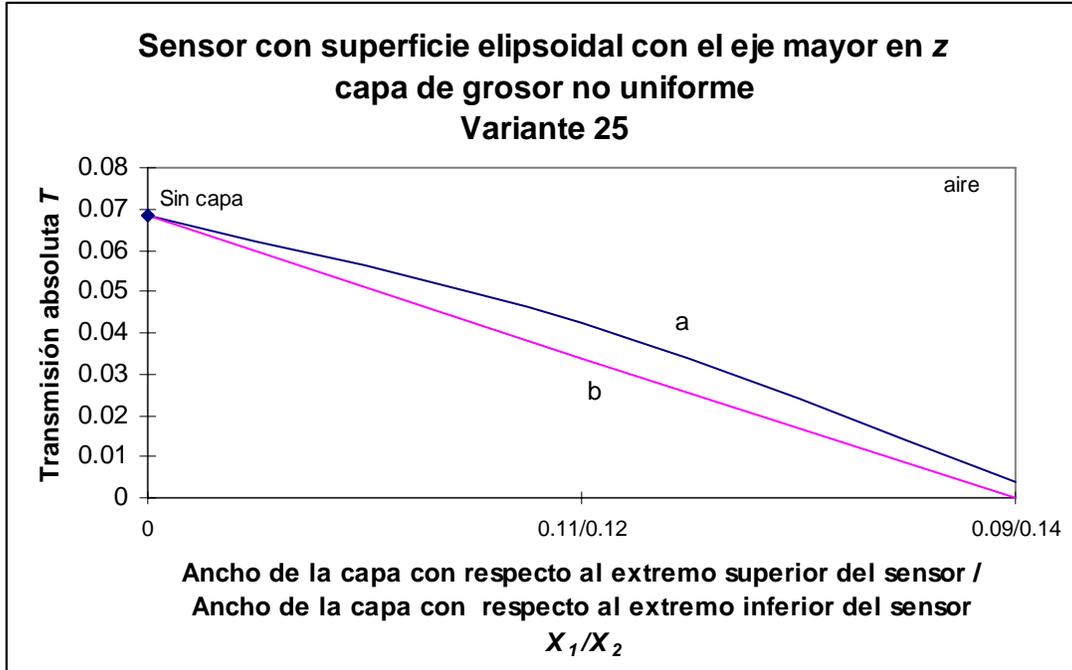


Figura 5.55. Transmisión absoluta T , del sensor elipsoidal (2) en la posición horizontal lateral, con una capa no uniforme de la variante 25, en función de X_1/X_2 : a) sensor con la fibra óptica transmisora en la posición superior y la fibra óptica receptora en la inferior, b) sensor con la fibra óptica transmisora en la posición inferior y la fibra óptica receptora en la superior.

La última variante analizada para este sensor es la 26 y se muestra en la figura 5.56. Esta capa tiene una forma muy diferente a la del sensor, tiene el volumen máximo en el borde inferior, pero también presenta un incremento del grosor en la parte central, y en el borde superior.

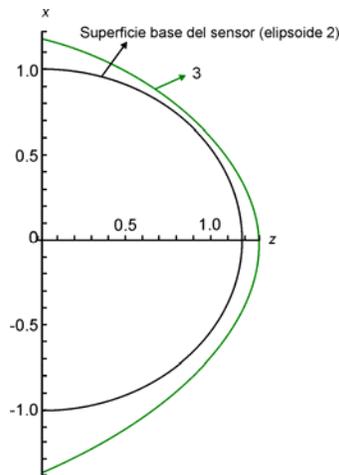


Figura 5.56. Transductor elipsoidal (2) en posición horizontal lateral, con una capa dieléctrica de grosor no uniforme, de ancho adimensional W y altura adimensional H , variante 26: 3- $W=1.37$, $H=1.35$, capa con el volumen máximo en borde inferior, grosor intermedio en la parte central y el borde superior de la capa se encuentra separado del sensor.

La transmisión absoluta de la variante 26 se presenta en la figura 5.57, la transmisión absoluta es mayor que la del sensor sin capa. Los cambios en la transmisión son pequeños, para valores $X_1/X_2=0.27/0.47$, a partir de donde empieza a decrecer, hasta perder la transmisión para $X_1/X_2=0.2/0.55$. Al igual que para la variante 25, la transmisión absoluta obtenida cuando la fibra óptica transmisora se encuentra en la posición superior, tiene una magnitud mayor y queda por arriba de la transmisión absoluta del sensor cuando la fibra transmisora se encuentra en la posición inferior. La forma de las dos gráficas de transmisión absoluta es muy parecida. El aumento en la magnitud de la transmisión se debe a que la forma de esta variante, se asemeja a un paraboloides, los cuales han mostrado buena transmisión para las fibras en posiciones asimétricas con respecto a los bordes del sensor.

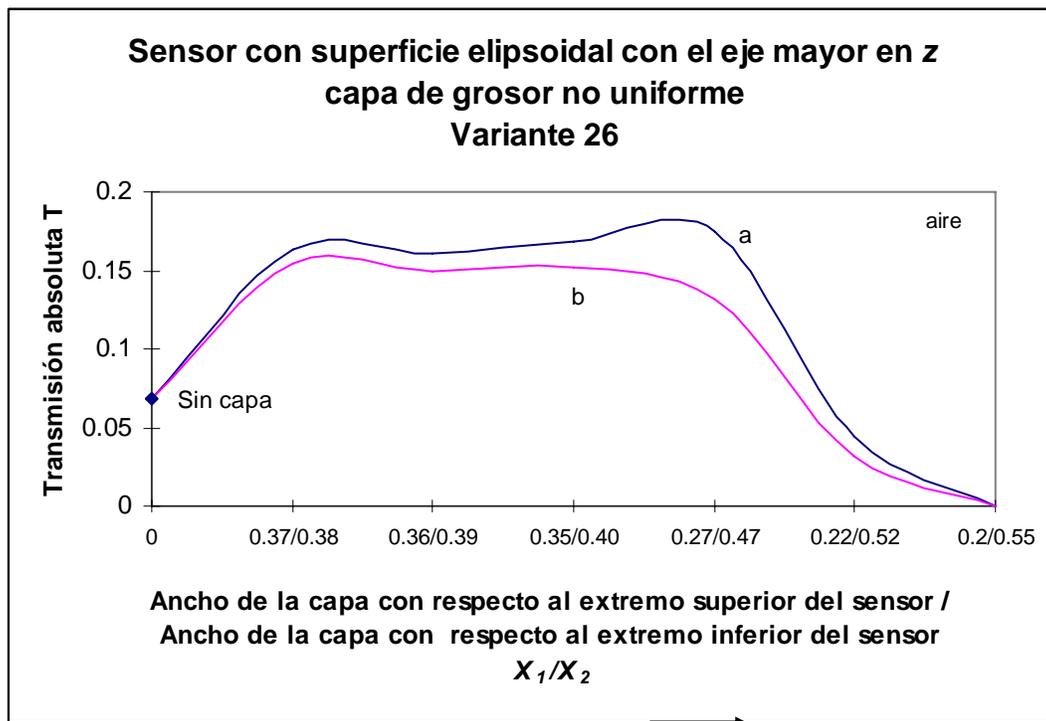


Figura 5.57. Transmisión absoluta T , del sensor elipsoidal (2) en la posición horizontal lateral, con una capa dieléctrica de grosor no uniforme, de ancho adimensional W y altura adimensional H , de la variante 26, en función de X_1/X_2 : a) sensor con la fibra óptica transmisora en la posición superior y la fibra óptica receptora en la inferior, b) sensor con la fibra óptica transmisora en la posición inferior y la fibra óptica receptora en la superior.

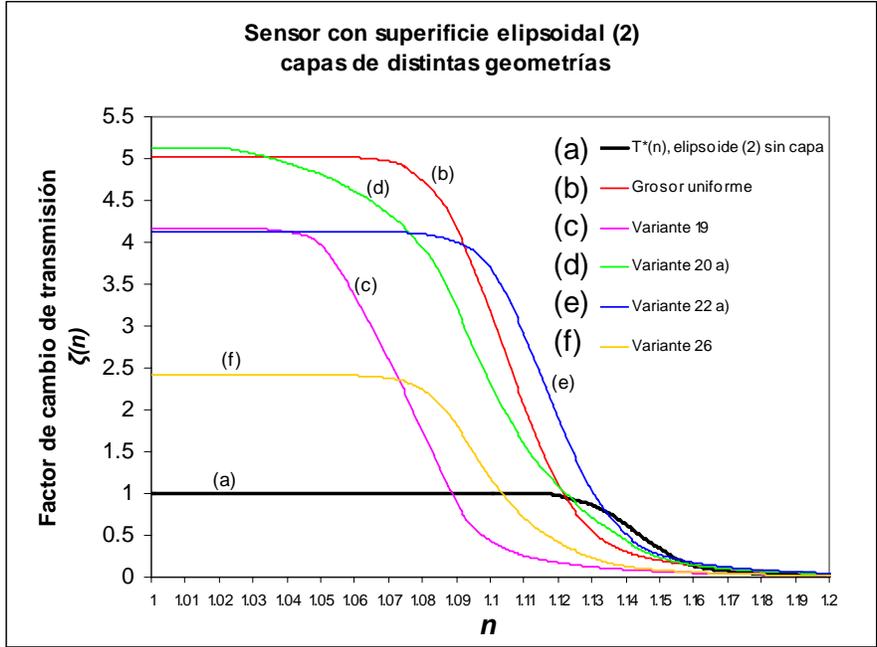
5.2.2.2.4 Cambios en la transmisión de un sensor elipsoidal con el eje mayor en z , con una capa dieléctrica

La figura 5.58 presenta el factor de cambio de transmisión $\zeta(n)$ para distintas geometrías de capa, sobre el sensor elipsoidal (2), y la transmisión relativa $T^*(n)$ para el sensor elipsoidal (2) sin capa. En la figura 5.58a) encontramos las gráficas para geometrías que producen magnitudes máximas superiores a $\zeta > 1$, mientras que en el inciso b) se muestran las curvas de las geometrías que producen magnitudes máximas inferiores a $\zeta < 0.7$.

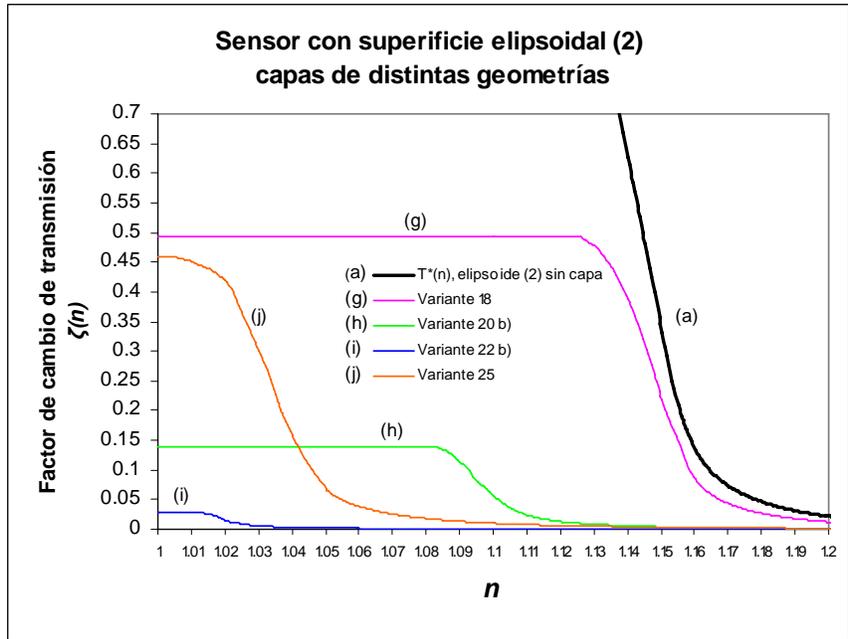
El factor de cambio de transmisión $\zeta(n)$ puede rebasar la unidad, como se muestra en la figura 5.59a) en donde $\zeta(n)$ de la capa con grosor uniforme y las variantes 19, 20a), 22a), y 26 tienen valores máximos de $\zeta = 5.02$, $\zeta = 4.16$, $\zeta = 5.12$, $\zeta = 4.12$ y $\zeta = 2.41$ respectivamente, debido al valor de calibración que está definido con respecto al valor de transmisión absoluta T en el aire, del sensor elipsoidal (2) sin capa. Todas estas variantes tienen un factor de cambio $\zeta(n)$ con un intervalo más pequeño, que el de la transmisión relativa $T^*(n)$, en donde la magnitud es constante, lo que ocasionará resultados erróneos cuando se utiliza el sensor en la región donde opera como un escalón.

También hay cambios en el intervalo en donde el factor de cambio $\zeta(n)$ tiene un comportamiento aproximado a una función lineal, pues todas las variantes de la figura 5.58a) inician su sección lineal para índices de refracción menores que $n=1.117$ que es el valor donde termina la parte constante de la transmisión relativa $T^*(n)$ del sensor sin capa.

Las variantes 20a) y 22a) fueron seleccionadas con parámetros que producen una transmisión absoluta mayor que la del sensor sin la capa.



a)



b)

Figura 5.58. Factor de cambio de transmisión $\zeta(n)$ del sensor con una superficie elipsoidal con el eje mayor en z , para capas con distintas geometrías: a) magnitudes entre $0 < \zeta < 5.5$, b) magnitudes desde $\zeta < 0.7$

Elipsoide (2) sin capa $W=1, H=1.15$;
 Grosor uniforme $W=1.05, H=1.19$;
 Variante 19 $W=1.1, H=1.29$;
 Variante 20 a) $W=1.29, H=1.15$;
 Variante 22 a) $W=1.02, H=1.15$;
 Variante 26 $W=1.34, H=1.35$.

Elipsoide (2) sin capa $W=1, H=1.15$;
 Variante 18 $W=1, H=1.17$;
 Variante 20 b) $W=2.6, H=5$;
 Variante 22 b) $W=1.11, H=1.15$;
 Variante 25 $W=1.11, H=1.12$.

El factor de cambio puede no alcanzar la unidad como se muestra en la figura 5.58b), en donde las variantes 18, 20b), 22b) y 25 tienen una magnitud inferior a 1 que es la magnitud de la transmisión relativa $T^*(n)$ del sensor sin capa, de $\zeta = 0.49$, $\zeta = 0.15$, $\zeta = 0.03$ y $\zeta = 0.45$ respectivamente. Las variantes 20b) y 22b) además de tener las magnitudes más pequeñas, presentan tanto una disminución en el intervalo de índices de refracción en donde la curva es constante, como una disminución el intervalo de índices de refracción en el que opera comparadas con la transmisión relativa $T^*(n)$ del sensor sin capa. La variante 25 no tiene ninguna sección donde el factor de cambio de transmisión $\zeta(n)$ sea constante y el intervalo de operación es menor que el de la transmisión relativa del sensor sin capa. El factor de cambio de transmisión, más parecido a la transmisión relativa $T^*(n)$ del sensor elipsoidal (2) sin capas, es el de la variante 18, que aunque tiene una magnitud menor, la forma es similar a $T^*(n)$, aunque desplazada hacia abajo, también el intervalo de operación de la variante 18 es el más parecido al del sensor sin capa.

5.2.3 Análisis de características de un sensor de forma paraboloidal

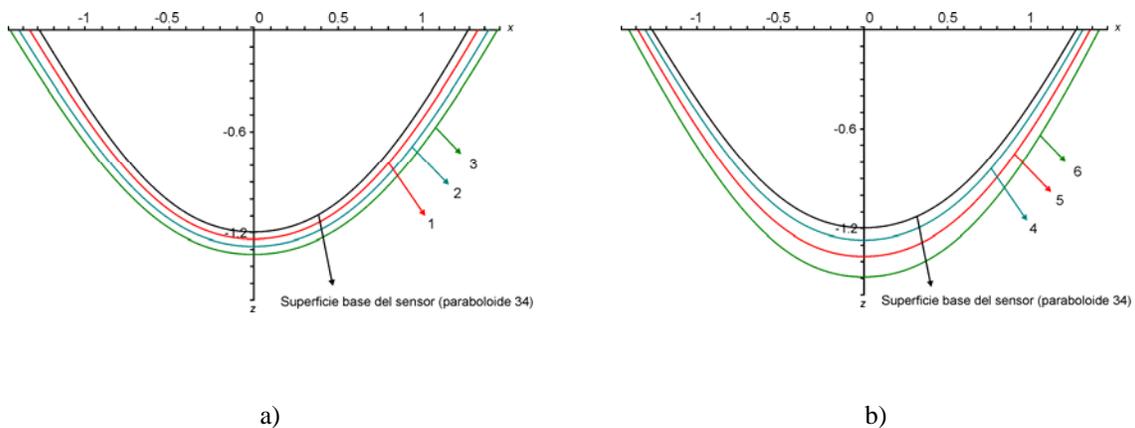
El elemento paraboloidal utilizado, esta representado por la ecuación:

$$0.714x^2 + 0.714y^2 - z = 1.2, \text{ para } z \leq 0 \quad (34)$$

5.2.3.1 Posición del sensor con la punta en vertical hacia abajo, elemento paraboloidal

Las variantes analizadas para el transductor paraboloidal en la posición vertical hacia abajo, fueron separadas en dos categorías: las que tienen una capa de grosor uniforme y las que tienen una capa con un grosor variable.

Las variantes analizadas se muestran en la figura 5.59.



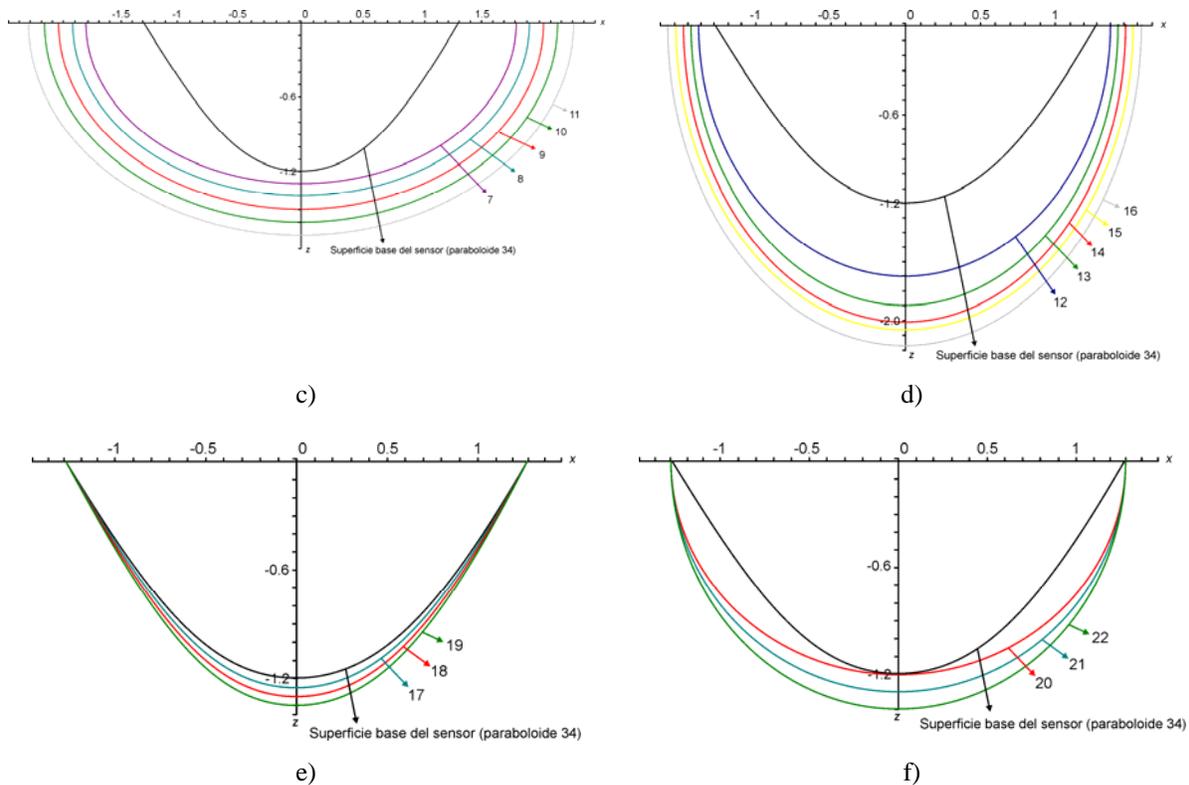


Figura 5.59. Transductor paraboloidal (34) en posición vertical hacia abajo, con una capa dieléctrica, de ancho adimensional W y altura adimensional H :

a) Capa de grosor uniforme: 1- $W=1.31, H=1.21$, 2- $W=1.34, H=1.24$, 3- $W=1.36, H=1.26$;

Capas de grosor no uniforme:

b) Variante 27: 4- $W=1.4, H=1.4$, 5- $W=1.49, H=1.6$, 6- $W=1.67, H=2$;

c) Variante 28: 7- $W=1.8, H=1.3$, 8- $W=1.9, H=1.31$, 9- $W=2, H=1.32$, 10- $W=2.1, H=1.33$, 11- $W=2.4, H=1.36$;

d) Variante 29: 12- $W=1.37, H=1.7$, 13- $W=1.4, H=1.9$, 14- $W=1.45, H=2.1$, 15- $W=1.55, H=2.23$, 16- $W=1.6, H=2.5$;

e) Variante 30 con $W=1.3$: 17- $H=1.22$, 18- $H=1.25$, 19- $H=1.28$;

f) Variante 31 con $W=1.3$: 20- $H=1.2$, 21- $H=1.3$, 22- $H=1.4$.

La presencia de capas de grosor uniforme como las de la figura 5.59 a), mantienen la transmisión del sensor, si las capas son delgadas (grosos uniformes menores a 0.07). La transmisión absoluta se muestra en la figura 5.60, en la que se observa que una capa con un grosor uniforme $W/H=0.01$, aumenta la magnitud de la transmisión absoluta, mientras que a partir de ese valor la magnitud comienza a decrecer, hasta que se pierde la transmisión si la capa tiene un grosor de $W/H=0.7$

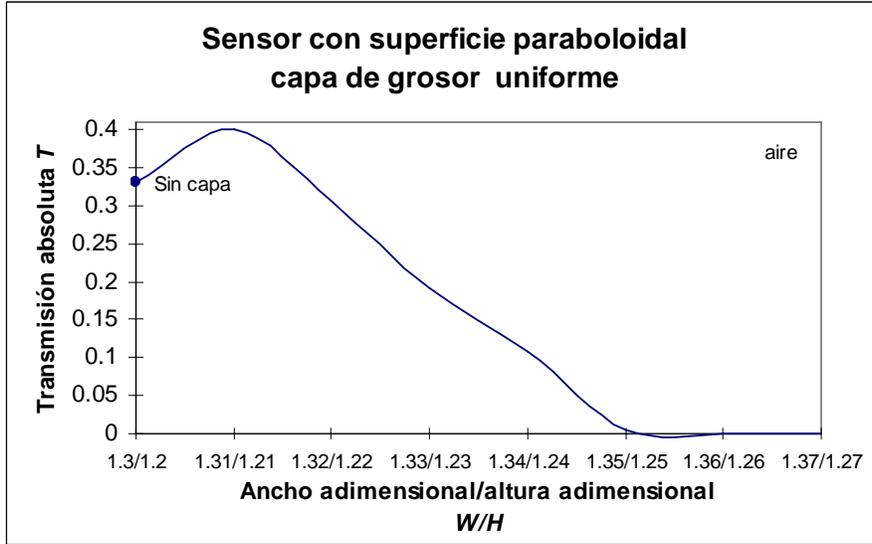


Figura 5.60. Transmisión absoluta del sensor paraboloidal (34) en posición vertical hacia abajo con una capa de grosor uniforme, de ancho adimensional W y altura adimensional H , en función de W/H .

La variante 27 se muestra en la figura 5.61, que son capas de grosor uniforme, cuyo volumen máximo se encuentra en el centro, los bordes de las capas se encuentran ligeramente separados del sensor, y la forma de la capa es similar a la del sensor.

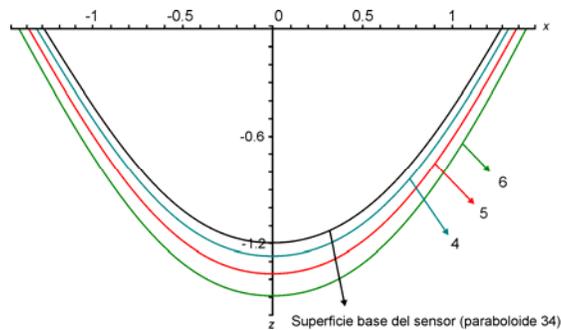


Figura 5.61. Transductor paraboloidal (34) en posición vertical hacia abajo, con una capa dieléctrica de grosor no uniforme, de ancho adimensional W y altura adimensional H , variante 27:
 4- $W=1.4$, $H=1.4$, 5- $W=1.49$, $H=1.6$, 6- $W=1.67$, $H=2$, capa con el volumen máximo al centro, bordes separados y forma similar a la del sensor.

La transmisión relativa de la variante 27, se muestra en la figura 5.62, en donde se observa que la respuesta es decreciente conforme aumenta el tamaño de las capas, pero como el grosor de estas capas no es uniforme, el grosor tanto en el centro como en los extremos pueden ser mayores que en el caso de grosor uniforme, y la transmisión aunque disminuye en magnitud, no se pierde para capas más gruesas.

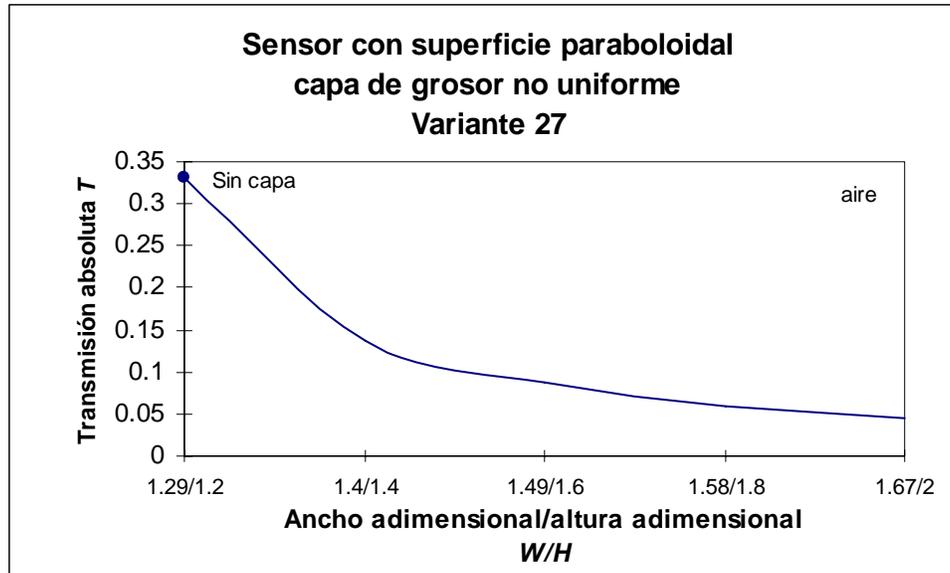


Figura 5.62. Transmisión absoluta del sensor paraboloidal (34) en posición vertical hacia abajo con una capa dieléctrica de grosor no uniforme, de ancho adimensional W y altura adimensional H , variante 27, en función de W/H .

La variante 28 tiene un volumen mínimo en el centro y máximo en los bordes, como se muestra en la figura 5.63, esta variante de capas no tiene una forma similar a la del sensor.

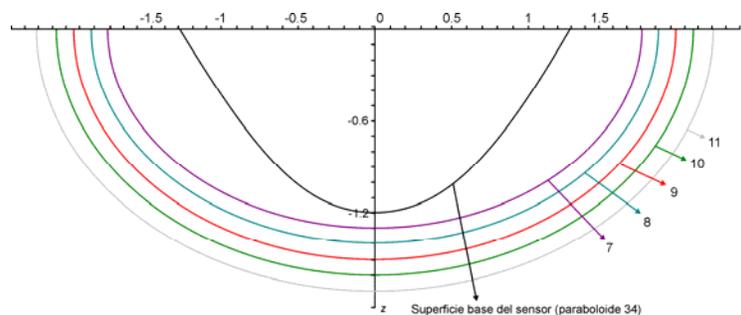


Figura 5.63. Transductor paraboloidal (34) en posición vertical hacia abajo, con una capa dieléctrica de grosor no uniforme, de ancho adimensional W y altura adimensional H , variante 28:

7- $W=1.8, H=1.3$, 8- $W=1.9, H=1.31$, 9- $W=2, H=1.32$, 10- $W=2.1, H=1.33$, 11- $W=2.4, H=1.36$, capa con el volumen mínimo al centro, con los bordes de la capa separados del paraboloide, en donde se concentra el volumen máximo.

La transmisión para la variante 28 se muestra en la figura 5.64, la magnitud de la transmisión absoluta es mucho menor (en un factor de 2000 aproximadamente), que la del sensor paraboloidal sin capas. La curva muestra una pendiente creciente para las capas mas cercanas al sensor, pero a partir de $W/H=1.9/1.32$, la pendiente de la curva de transmisión comienza a decrecer. Con esta variante de capas, se puede tener un grosor en W hasta 1.7 veces el valor de W del sensor y aunque la magnitud es muy pequeña sigue habiendo transmisión.

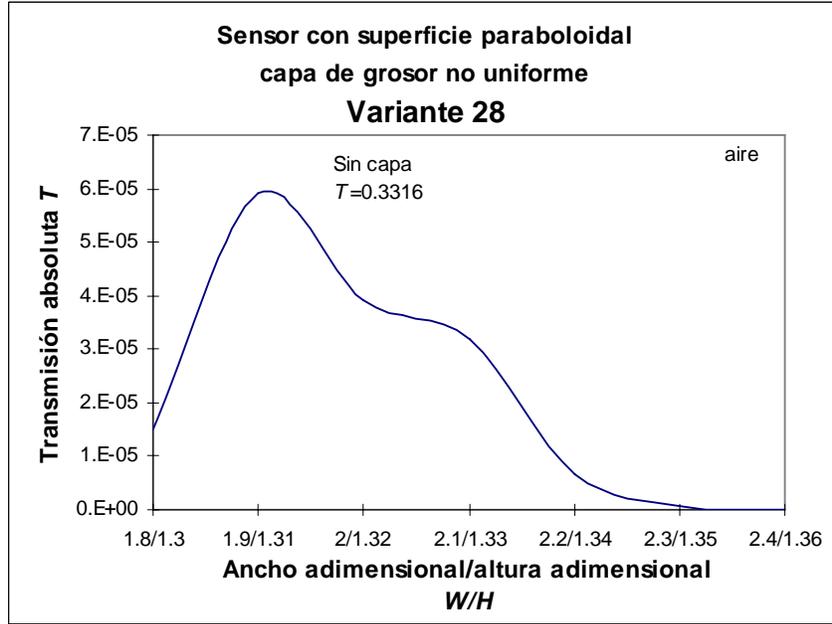


Figura 5.64. Transmisión absoluta del sensor paraboloidal (34) en posición vertical hacia abajo con una capa dieléctrica de grosor no uniforme, de ancho adimensional W y altura adimensional H variante 28, en función de W/H .

A diferencia de la variante 28, la variante 29 tiene un volumen máximo en el centro y los bordes de las capas más cercanos al sensor que en la variante anterior, como se muestra en la figura 5.65. Esta variante tampoco tiene capas con una forma similar a la del sensor paraboloidal.

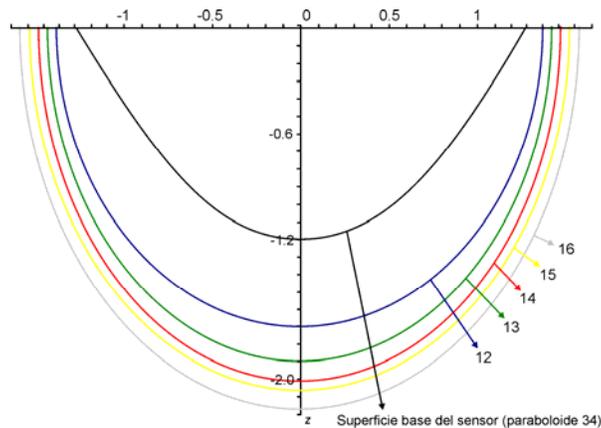


Figura 5.65. Transductor paraboloidal (34) en posición vertical hacia abajo, con una capa dieléctrica de grosor no uniforme, de ancho adimensional W y altura adimensional H , variante 29: 12- $W=1.37$, $H=1.7$, 13- $W=1.4$, $H=1.9$, 14- $W=1.45$, $H=2.1$, 15- $W=1.55$, $H=2.23$, 16- $W=1.6$, $H=2.5$, capa con el volumen máximo al centro, con los bordes de la capa cercanos al paraboloide.

La figura 5.66 muestra la transmisión absoluta de la variante 29, la cual es menor en magnitud que la transmisión del sensor paraboloidal sin capa (en un factor de 100 aproximadamente). El comportamiento es decreciente conforme aumenta el grosor de la capa, perdiéndose por completo la transmisión cuando

$W/H= 1.65/1.25$, con esta variante sigue existiendo la transmisión aunque el grosor en el centro H sea haya aumentado al doble del valor de H del sensor.

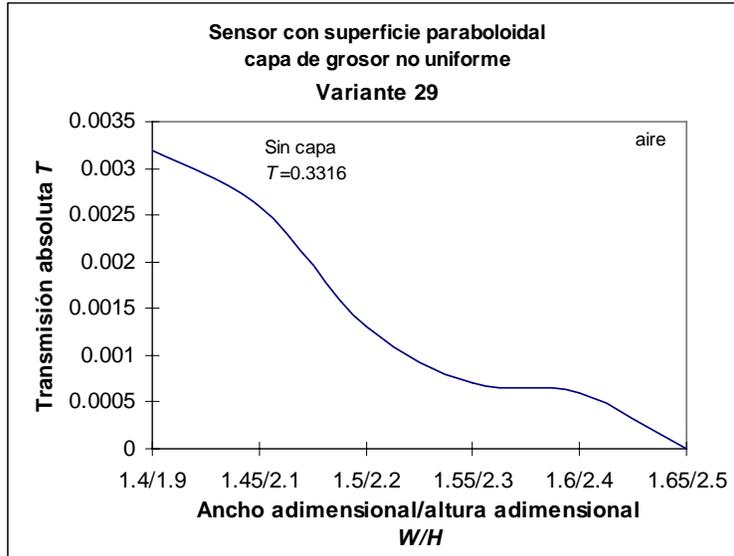


Figura 5.66. Transmisión absoluta del sensor paraboloidal (34) en posición vertical hacia abajo con una capa dieléctrica de grosor no uniforme, de ancho adimensional W y altura adimensional H , variante 29, en función de W/H .

Las variantes 30 y 31 tienen los bordes coincidentes con los del sensor. La variante 30 tiene el volumen máximo en el centro, y la forma de las capas es similar a la del sensor como se muestra en la figura 5.67.

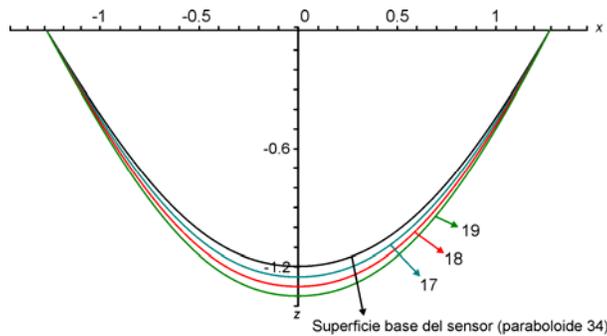


Figura 5.67. Transductor paraboloidal (34) en posición vertical hacia abajo, con una capa dieléctrica de grosor no uniforme, con altura adimensional H , variante 30 ancho adimensional $W=1.3$: 17- $H=1.22$, 18- $H=1.25$, 19- $H= 1.28$, capa con los extremos coincidentes con los del paraboloide, con el volumen máximo al centro y forma similar a la del transductor.

La transmisión absoluta de la variante 30 se encuentra en la figura 5.68, que muestra una disminución de la transmisión conforme aumenta el valor de H de la capa, hasta que desaparece la transmisión en $H=1.31$.

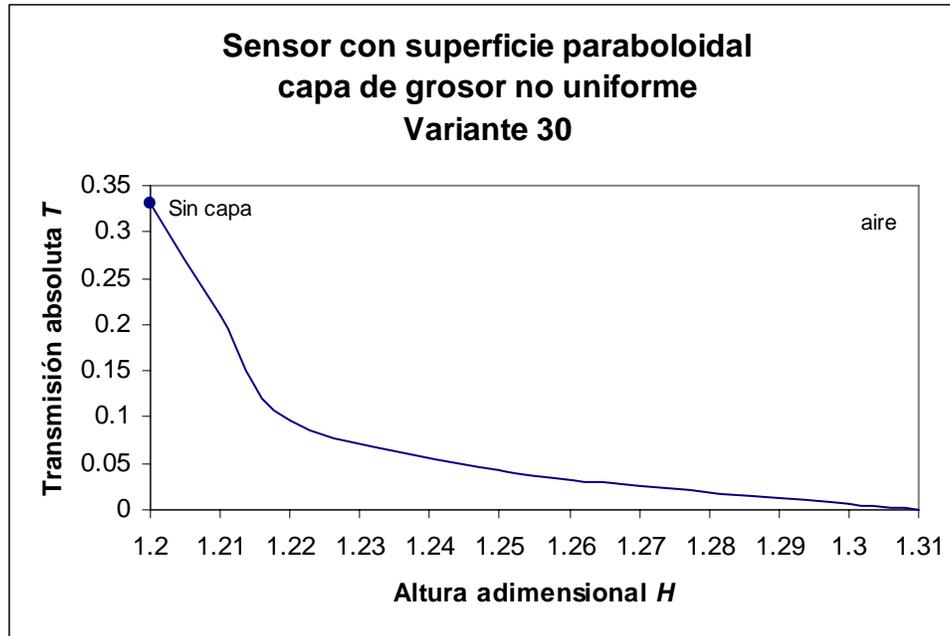


Figura 5.68. Transmisión absoluta del transductor paraboloidal (34) en posición vertical hacia abajo con una capa dieléctrica de grosor no uniforme de la variante 30, ancho adimensional $W=1.3$, en función de H .

La última variante analizada es esta posición es la 31, mostrada en la figura 5.69. Esta variante tiene los bordes coincidentes con los extremos del sensor, estas capas no tienen una forma similar a la del sensor, y el volumen máximo queda en los laterales del sensor.

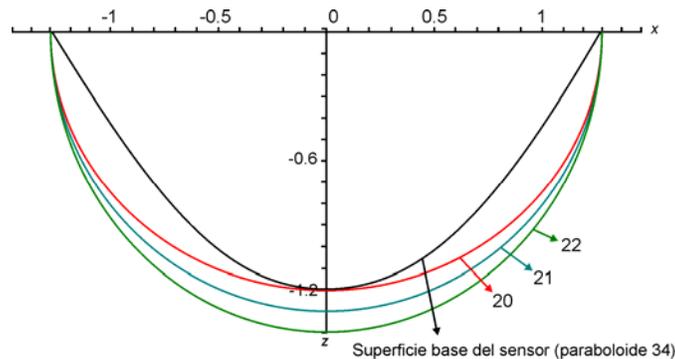


Figura 5.69. Transductor paraboloidal (34) en posición vertical hacia abajo, con una capa dieléctrica de grosor no uniforme, de altura adimensional H , variante 31, ancho adimensional $W=1.3$: 20- $H=1.2$, 21- $H= 1.3$, 22- $H= 1.4$, capa con los extremos coincidentes con los del paraboloide, con el volumen máximo en los laterales.

La transmisión absoluta de la variante 31 se muestra en la figura 5.70, las capas para esta variante tienen un valor de $W=1.3$, dado que los bordes son coincidentes. Las capas de esta variante que tienen el centro cercano al sensor (cuyo valor de H se encuentra entre $1.2 < H < 1.6$) no permiten la transmisión. Para valores mayores si existe transmisión absoluta, aunque con una magnitud inferior (un factor de 4

aproximadamente) a la del sensor sin la capa. Para el intervalo entre $1.6 < H < 2$, la pendiente de la curva es creciente, mientras que a partir de $H=2$, la pendiente comienza a decrecer, hasta que la transmisión absoluta se pierde nuevamente para un valor de $H=1.9$.

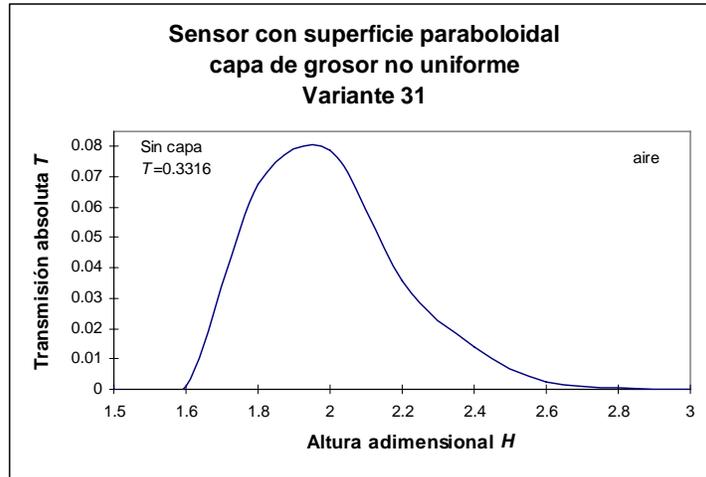
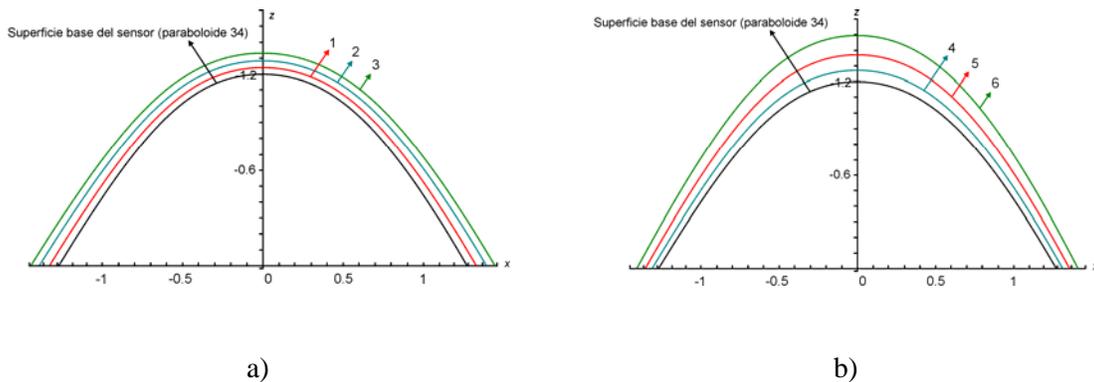


Figura 5.70. Transmisión absoluta del transductor paraboloidal (34) en posición vertical hacia abajo con una capa dieléctrica de grosor no uniforme, de ancho adimensional $W=1.3$ y altura adimensional H , variante 31, en función de H .

5.2.3.2 Posición del sensor con la punta en vertical hacia arriba, elemento paraboloidal

Las variantes analizadas para el transductor paraboloidal en la posición vertical hacia arriba, fueron separadas en dos categorías: las que tienen una capa de grosor uniforme y las que tienen una capa con un grosor variable.

Las variantes analizadas se muestran en la figura 5.71.



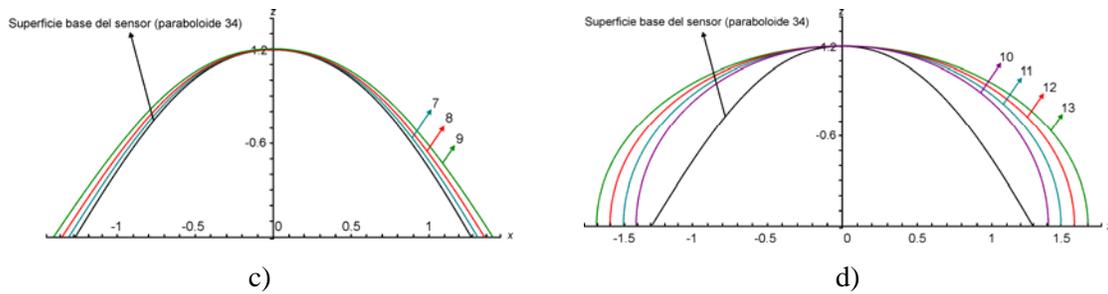


Figura 5.71. Transductor paraboloidal (34) en posición vertical hacia arriba con una capa dieléctrica de ancho adimensional W y altura adimensional H :

a) Capa de grosor uniforme: 1- $W=1.31, H=1.21$, 2- $W=1.34, H=1.24$, 3- $W=1.36, H=1.26$;

Capas de grosor no uniforme:

b) Variante 32: 4- $W=1.4, H=1.4$, 5- $W=1.49, H=1.6$, 6- $W=1.67, H=2$;

c) Variante 33 con $H=1.2$: 7- $W=1.31$, 8- $W=1.32$, 9- $W=1.33$;

d) Variante 34 con $H=1.2$: 10- $W=1.6$, 11- $W=1.7$, 12- $W=1.8$, 13- $W=1.9$.

Las capas que se muestran en la figura 5.71a) y 5.71b), ya fueron analizadas en la sección anterior, dado que su formación se puede presentar en cualquiera de las dos orientaciones.

La variante 33 se muestra en la figura 5.72, la parte central del sensor coincide con las capas, y los bordes se encuentran separados de los extremos del sensor. Esta variante tiene capas de forma similar a la del sensor.

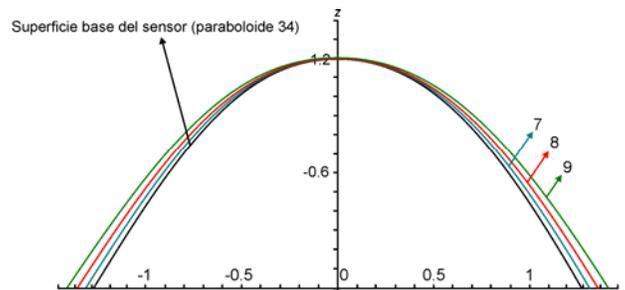


Figura 5.72. Transductor paraboloidal (34) en posición vertical hacia arriba, con una capa dieléctrica de grosor no uniforme, de ancho adimensional W y altura adimensional $H=1.2$, variante 33:

7- $W=1.31$, 8- $W=1.32$, 9- $W=1.33$, capa de altura coincidente con la del paraboloide, con el volumen máximo en los bordes y forma de la capa similar a la del transductor.

La transmisión absoluta de la variante 33 se muestra en la figura 5.73, en donde para incrementos pequeños de W , la respuesta permanece constante, para incrementos mayores que $W=1.3$ la curva de transmisión decrece, hasta que se pierde la transmisión en $W=1.325$.

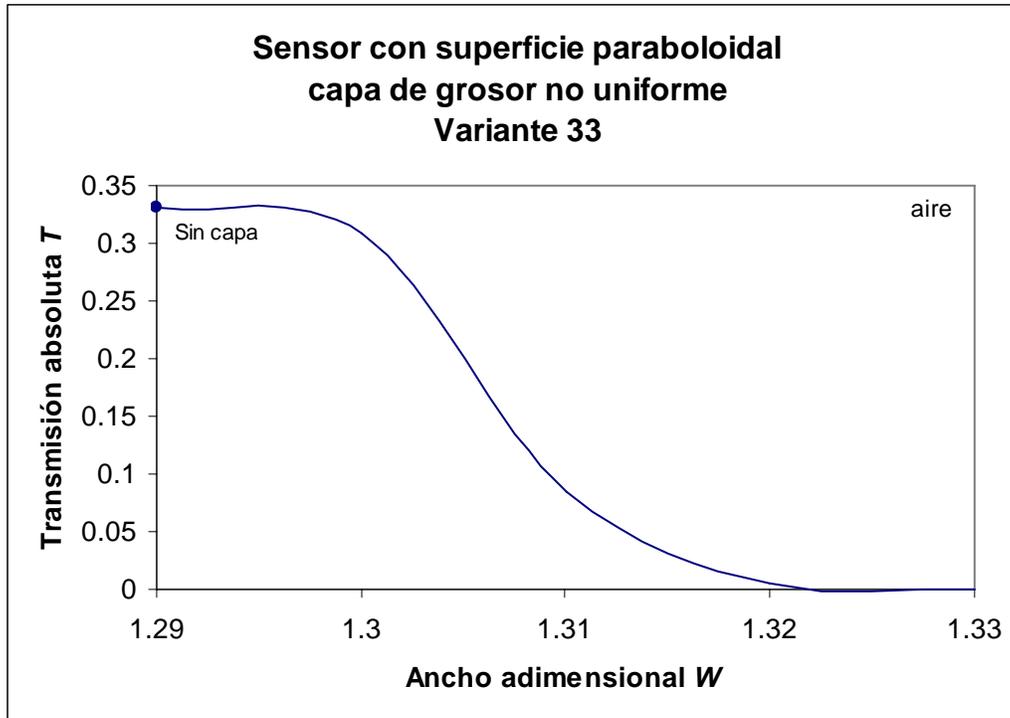


Figura 5.73. Transmisión absoluta del sensor paraboloidal (34) en posición vertical hacia arriba con una capa dieléctrica de grosor no uniforme, con altura de $H=1.2$, variante 33, en función de el ancho adimensional W .

La variante 34 se muestra en la figura 5.74, también tiene el centro coincidente con el del sensor, pero el volumen máximo se encuentra en los laterales, y las capas tienen una forma diferente a la del sensor. La respuesta de transmisión absoluta se muestra en la figura 5.75.

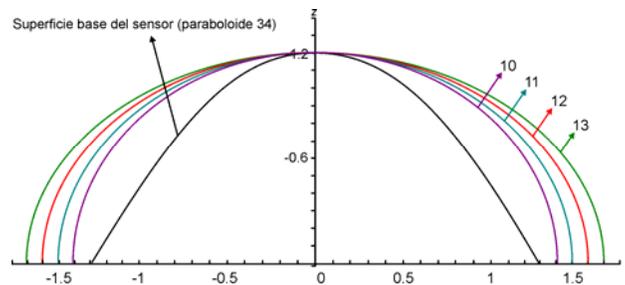


Figura 5.74. Transductor paraboloidal (34) en posición vertical hacia arriba, con una capa dieléctrica de grosor no uniforme, con ancho adimensional W y altura adimensional $H=1.2$, variante 34:
10- $W=1.6$, 11- $W=1.7$, 12- $W=1.8$, 13- $W=1.9$, capa con la altura H , coincidente con la del paraboloide, volumen máximo en los laterales.

Las capas cercanas a la superficie del sensor anulan la transmisión, hasta $W=1.6$, a partir de donde vuelve a darse la transmisión. La curva crece hasta $W=1.8$, a partir de donde empieza a decrecer, para volver a perder la transmisión en $W=2.2$. La magnitud de esta curva es menor aproximadamente 2000 veces que la del sensor sin la capa.

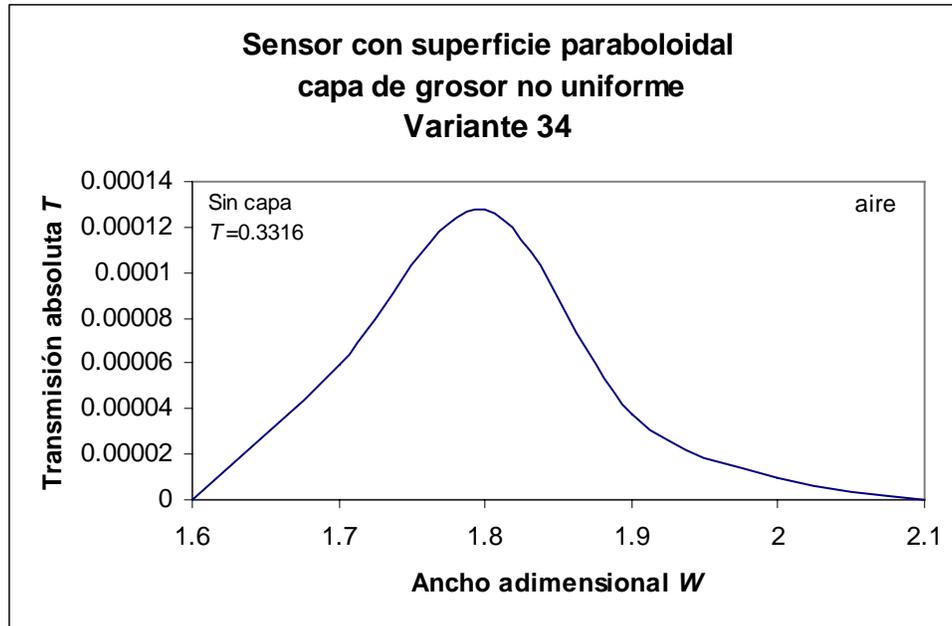
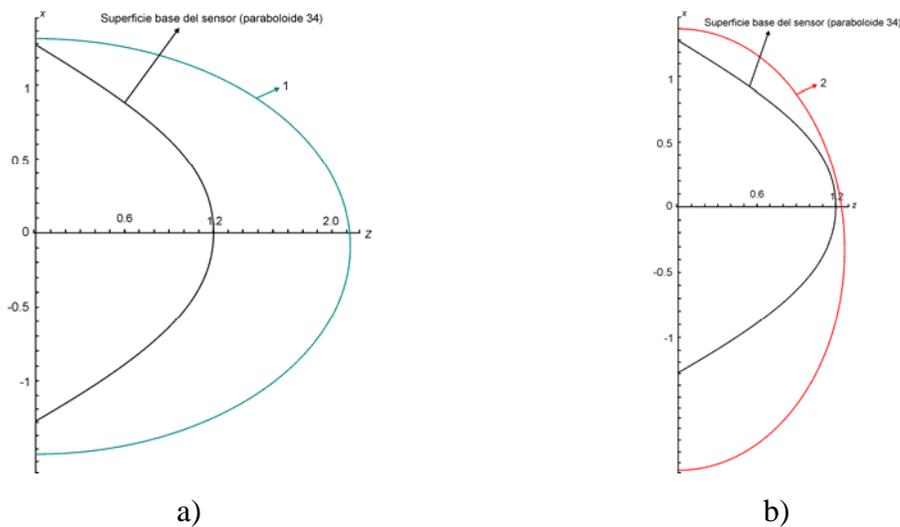
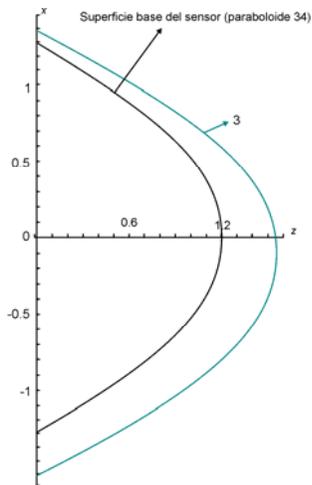


Figura 5.75. Transmisión absoluta del transductor paraboloidal (34) en posición vertical hacia arriba con una capa dieléctrica de grosor no uniforme, altura adimensional $H=1.2$, variante 34, en función del ancho adimensional W .

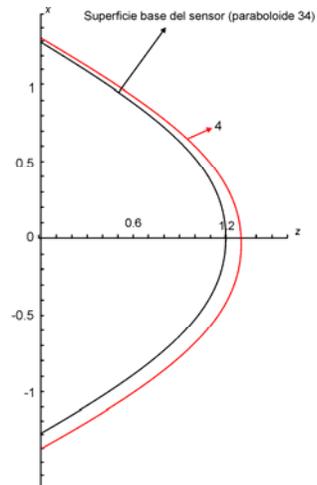
5.2.3.3 Posición del sensor con la punta en horizontal lateral, elemento paraboloidal

Para el sensor paraboloidal, cuya orientación es horizontal lateral, se analizaron las variantes de la figura 5.76, en donde todas las capas tienen un grosor no uniforme.





c)



d)

Figura 5.76. Transductor paraboloidal (34) en posición horizontal lateral, con una capa dieléctrica de grosor no uniforme, de ancho adimensional W y altura adimensional H :

- a) Variante 35: 1- $W=1.41, H=1.41$;
- b) Variante 36: 2- $W=1.4, H= 2.2$;
- c) Variante 37: 3- $W=1.49, H= 1.5$;
- d) Variante 38: 4- $W=1.49, H= 1.3$.

La variante 35 se muestra en la figura 5.77, en esta variante el borde superior de la capa coincide con el del sensor, y tiene el volumen máximo al centro un poco desplazado hacia abajo.

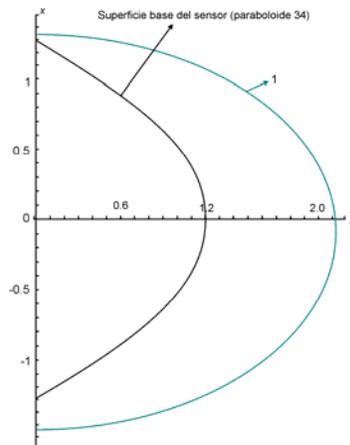


Figura 5.77. Transductor paraboloidal (34) en posición horizontal lateral, con una capa dieléctrica de grosor no uniforme, de ancho adimensional W y altura adimensional H , variante 35:

- 1- $W=1.41, H=1.41$, capa con el borde superior coincidente con el del paraboloide, y volumen máximo al centro.

La transmisión absoluta de la variante 35 se muestra en la figura 5.78. La magnitud de la transmisión absoluta se ve disminuida por un factor de 13 aproximadamente, comparada con la del sensor sin capa. La

respuesta es decreciente para todos los valores de X_1/X_2 , y la transmisión se pierde por completo para $X_1/X_2=0.0777/0.129$ (figura 5.38a)) y para $X_1/X_2=0.0767/0.13$ (figura 5.38b)). Cuando la posición de la fibra óptica transmisora queda en la parte superior, la transmisión absoluta tiene una magnitud inferior, que cuando la fibra óptica transmisora se encuentra en la posición superior.

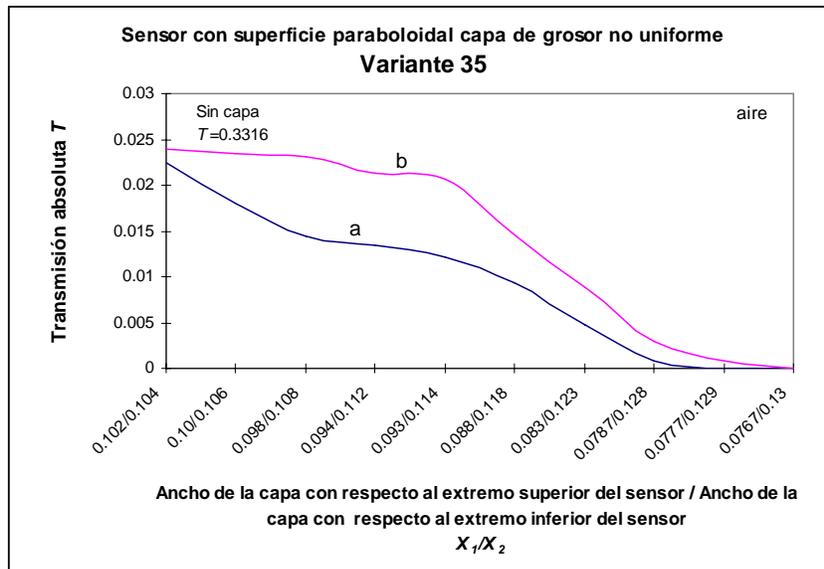


Figura 5.78. Transmisión absoluta del sensor paraboloidal (34) en posición horizontal lateral con una capa dieléctrica de grosor no uniforme de la variante 35, para distintos valores de X_2 : a) sensor con la fibra óptica transmisora en la posición superior y la fibra óptica receptora en la inferior, b) sensor con la fibra óptica transmisora en la posición inferior y la fibra óptica receptora en la superior.

En la figura 5.79 se muestra la variante 36, que tiene el volumen máximo en el borde inferior, el volumen mínimo en la parte central del sensor y el borde superior de la capa cercano (pero no coincidente) con el extremo del sensor.

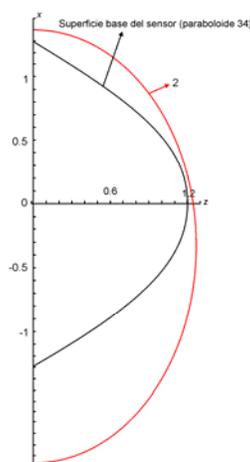


Figura 5.79. Transductor paraboloidal (34) en posición horizontal lateral, con una capa dieléctrica de grosor no uniforme, de ancho adimensional W y altura adimensional H , variante 36:
2- $W=1.4$, $H= 2.2$, volumen máximo en el borde inferior, volumen mínimo cercano al centro y borde superior cercano al extremo del transductor.

La transmisión absoluta para la variante 36 se presenta en la figura 5.80, la cual tiene una magnitud casi 700 veces inferior que la transmisión absoluta del sensor sin capa. La forma de las dos gráficas para distintas posiciones de las fibras, es parecida. Para esta variante las gráficas de transmisión absoluta, según la posición de las fibras, no quedan en una posición fija con respecto a la otra (una curva siempre arriba de la otra o siempre abajo, como para la variante 35), sino que alternan lugares.

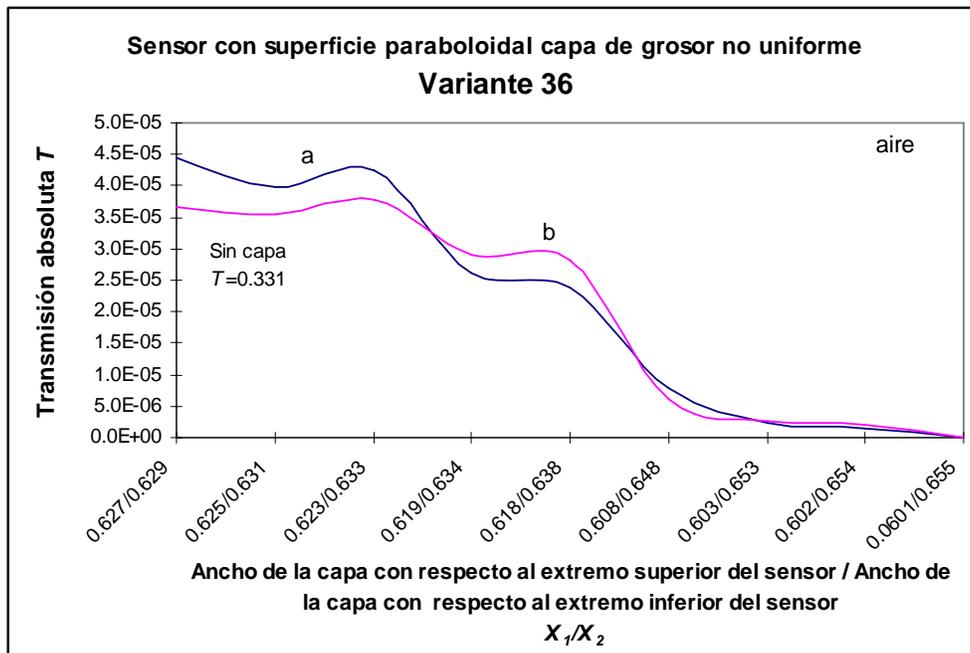


Figura 5.80. Transmisión absoluta del sensor paraboloidal (34) en posición horizontal lateral con una capa dieléctrica de grosor no uniforme de la variante 36, para distintos valores de X_2 : a) sensor con la fibra óptica transmisora en la posición superior y la fibra óptica receptora en la inferior, b) sensor con la fibra óptica transmisora en la posición inferior y la fibra óptica receptora en la superior.

Las variantes 37 y 38 son capas con una forma similar a la del sensor. La variante 37 tiene el volumen máximo en el centro y en el borde inferior, mientras que el borde superior se encuentra cercano al extremo del sensor, pero no son coincidentes, como se muestra en la figura 5.81.

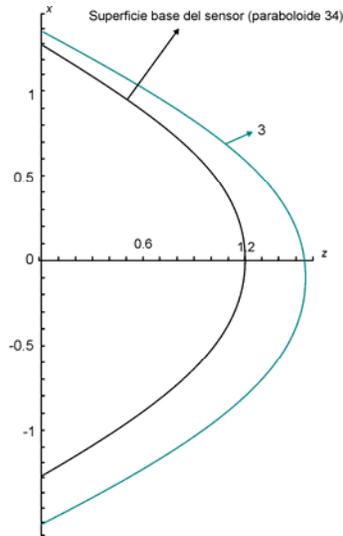


Figura 5.81. Transductor paraboloide (34) en posición horizontal lateral, con una capa dieléctrica de grosor no uniforme, de ancho adimensional W y altura adimensional H , variante 37: $3-W=1.49$, $H=1.5$, volumen máximo en el centro y en el borde inferior, borde superior cercano al extremo del transductor, capa con forma similar a la del transductor.

La transmisión absoluta de la variante 37 se muestra en la figura 5.82. La magnitud de la transmisión absoluta es casi 4 veces menor que la del sensor paraboloide sin la capa. Las curvas para las distintas posiciones de las fibras tienen una forma similar. Para esta variante la gráfica correspondiente a la transmisión absoluta cuando la fibra óptica transmisora se encuentra en la posición superior (y por tanto la receptora se encuentra en la posición inferior), queda por encima de la gráfica de transmisión absoluta con la fibra transmisora en la posición inferior, para todos los valores de X_1/X_2 . La transmisión se pierde para un valor de $X_1/X_2=0.005/0.40$.

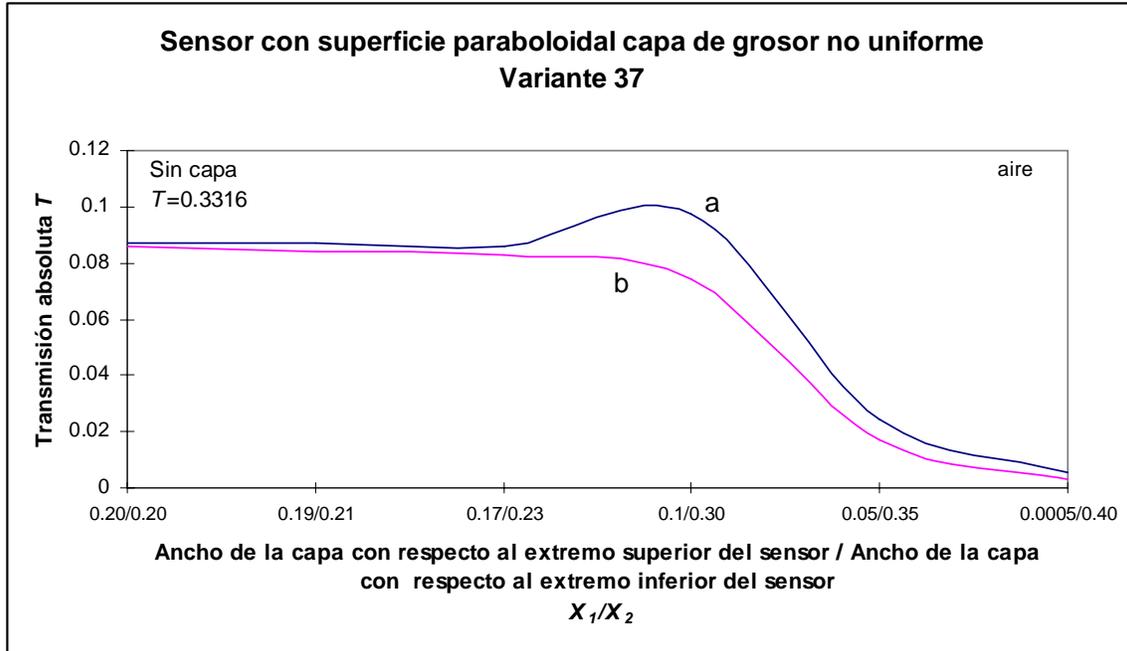


Figura 5.82. Transmisión absoluta del sensor paraboloidal (34) en posición horizontal lateral con una capa dieléctrica de grosor no uniforme de la variante 37, para distintos valores de X_2 : a) sensor con la fibra óptica transmisora en la posición superior y la fibra óptica receptora en la inferior, b) sensor con la fibra óptica transmisora en la posición inferior y la fibra óptica receptora en la superior.

La variante 38 no tiene un volumen tan grande en el centro como la variante 37, sino que se distribuye desde el centro hacia el borde inferior, mientras que el borde superior de la capa coincide con el extremo del sensor.

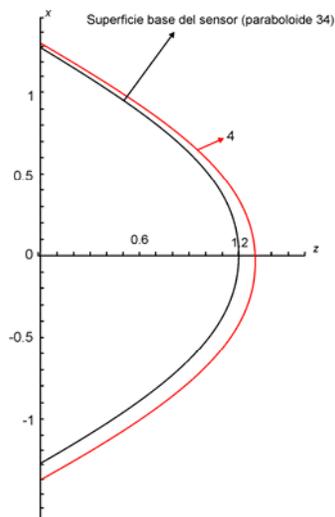


Figura 5.83. Transductor paraboloidal (34) en posición horizontal lateral, con capas de grosor no uniforme, variante 38: 4) $W=1.49$ $H= 1.3$, volumen máximo en el borde inferior, borde superior coincidente.

La transmisión absoluta de la variante 38, es mayor en magnitud en un factor de 1.2 que la magnitud del sensor sin capa. La transmisión absoluta tiene una sección casi constante, hasta $X_1/X_2=0.056/0.076$, a partir de donde se vuelve decreciente. La magnitud de esta variante se pierde cuando $X_1/X_2=0.02/0.2$. Las gráficas para las dos posiciones de las fibras tienen una forma similar, pero no mantienen una posición fija una con respecto a la otra. La transmisión se pierde primero para la gráfica de transmisión (a) que para la (b).

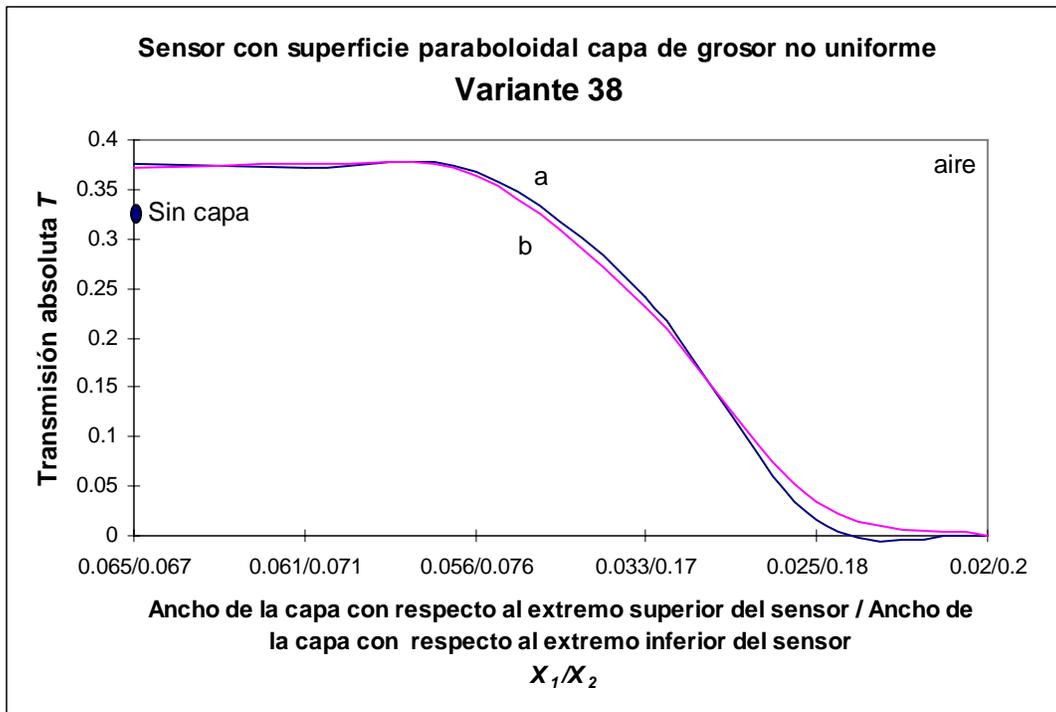
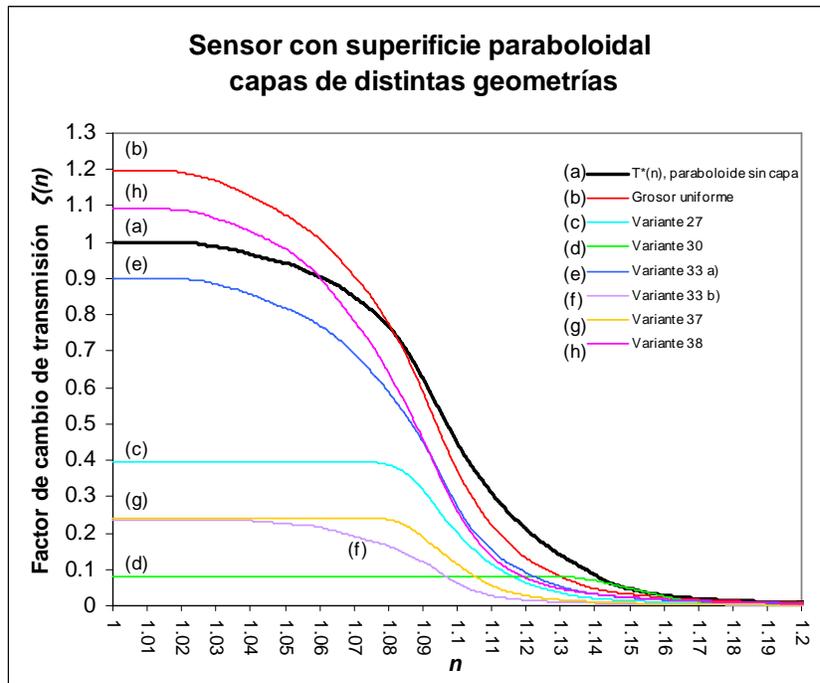


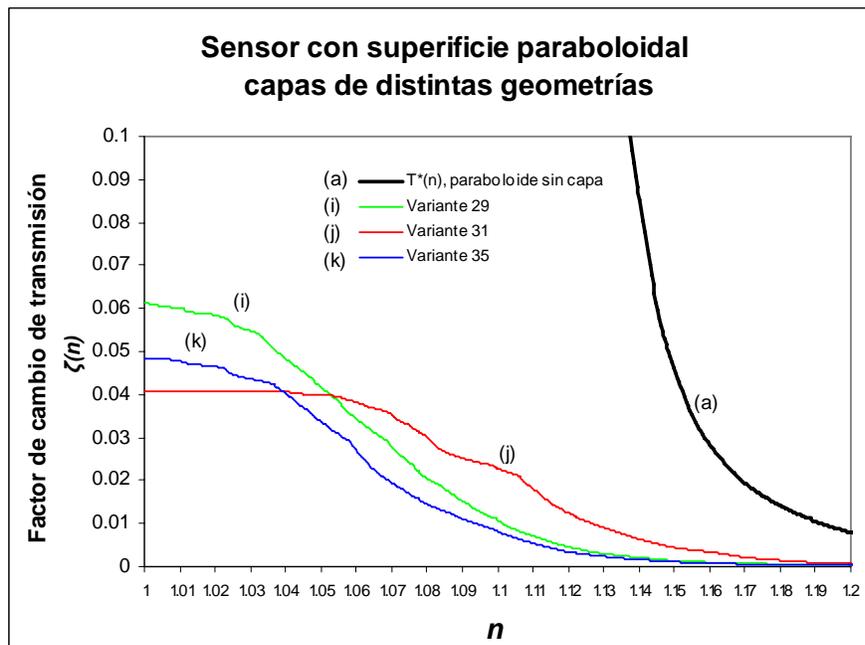
Figura 5.84. Transmisión absoluta del transductor paraboloidal (34) en posición horizontal lateral con capas de grosor no uniforme de la variante 38, para distintos valores de X_2 : a) fibra transmisora en la posición superior, b) fibra transmisora en la posición inferior.

5.2.3.4 Cambios en la transmisión de un sensor paraboloïdal con una capa dieléctrica.

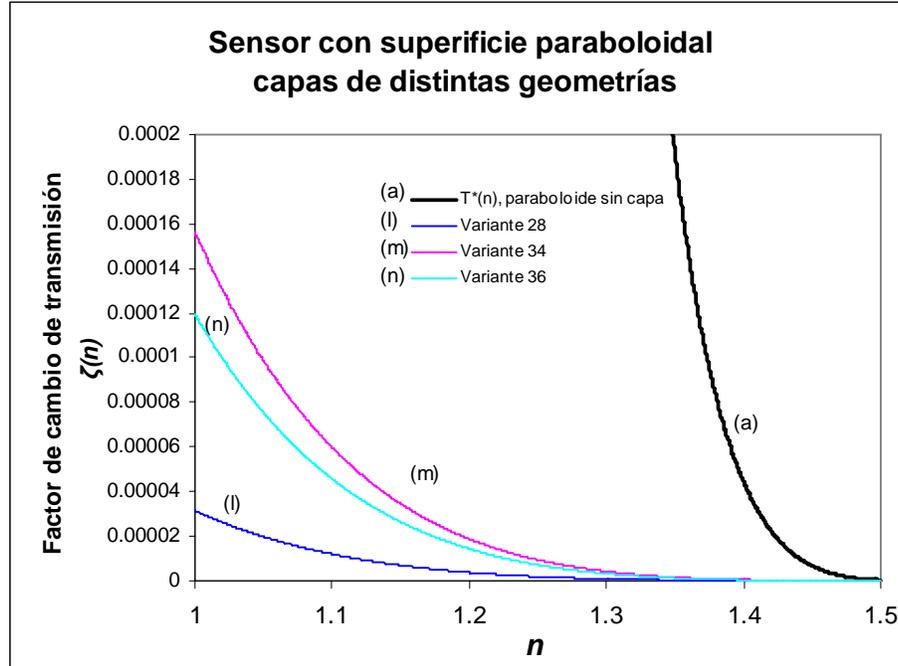
La figura 5.85, muestra el factor de cambio en la transmisión $\zeta(n)$, para capas con distintas geometrías, así como la transmisión relativa $T^*(n)$ del sensor paraboloïdal sin capa.



a)



b)



c)

Figura 5.85. Factor de cambio de transmisión $\zeta(n)$ del sensor con superficie paraboloidal, para capas con distintas geometrías:

a) Magnitudes entre $0 < \zeta < 1.3$, b) magnitudes entre $0 < \zeta < 0.07$, c) magnitudes $\zeta < 0.00016$

Paraboloide (34) sin capa: $W=1.24, H=1.29$;

Grosor uniforme: $W=1.31, H=1.31$;

Variante 27: $W=1.4, H=1.4$;

Variante 30: $W=1.3, H=1.3$;

Variante 33a): $W=1.3, H=1.29$;

Variante 33b): $W=1.32, H=1.29$;

Variante 37: $W=1.5, H=1.5$;

Variante 38: $W=1.36, H=1.54$.

Paraboloide (34) sin capa: $W=1.24, H=1.29$;

Variante 29: $W=1.4, H=2.2$;

Variante 31: $W=1.3, H=2.4$;

Variante 35: $W=1.39, H=2.24$.

Paraboloide (34) sin capa: $W=1.24, H=1.29$;

Variante 28: $W=2.13, H=1.3$;

Variante 34: $W=1.7, H=1.29$;

Variante 36: $W=1.92, H=1.35$.

En la figura 5.85a) hay dos gráficas del factor de cambio de transmisión $\zeta(n)$, que quedan por arriba de la gráfica de transmisión relativa $T^*(n)$ del sensor paraboloidal sin capa, correspondientes a una capa de grosor constante y a la variante 38. El intervalo en el cual las gráficas mantienen un valor constante, es más pequeño para estas dos variantes que el de la transmisión relativa del sensor sin capa. La pendiente de estas dos gráficas es mayor que la del sensor si capa, por lo cual, el índice de refracción máximo que se

puede detectar para estas dos curvas es de $n=1.15$, siendo menor que el índice máximo² de la transmisión relativa.

La siguiente gráfica del factor de cambio $\zeta(n)$ corresponde a la variante 33a) (seleccionada con parámetros que hacen que la transmisión absoluta sea mayor que la del sensor paraboloidal sin capa mostrada en la figura 5.73). Esta respuesta inicia en $\zeta=0.9$, y aunque tiene una forma similar a la transmisión relativa del sensor sin capa, muestra un desplazamiento hacia abajo. El intervalo en donde la magnitud de la gráfica de $\zeta(n)$ es constante para la variante 33a), es igual al de la transmisión relativa del sensor si capa, pero el desplazamiento hacia abajo del factor de cambio ocasiona que el índice de refracción máximo que alcanza a detectar el sensor con esta forma de capa sea de $n=1.18$.

Las siguientes gráficas de $\zeta(n)$ son las de las variantes 27 y 37, las cuales muestran un comportamiento muy similar entre sí, aunque con magnitudes máximas de $\zeta=0.4$ y $\zeta=0.24$ respectivamente. El comportamiento del factor de cambio para estas dos capas es muy distinto al de la transmisión relativa del sensor sin capa, dado que la $\zeta(n)$ se mantiene constante por un intervalo mucho mayor que para $T^*(n)$, y los valores máximos de índices de refracción en donde hay detección se encuentran en $n=1.18$ y $n=1.14$ respectivamente.

La variante 33b) (seleccionada con parámetros que hacen que la transmisión absoluta sea menor que la del sensor paraboloidal sin capa mostrada en la figura 5.73, tiene una respuesta con una magnitud inferior de $\zeta=0.23$, también tiene un intervalo más grande, que el de $T^*(n)$ del sensor sin la capa, en donde la respuesta es constante, aunque este intervalo es menor comparado con el de las variantes 27 y 37. El índice de refracción máximo de esta variante también es menor que para el sensor sin capa, y es de $n=1.14$.

La última gráfica de la figura 5.85a) corresponde a la variante 30, la cual tiene una magnitud máxima de $\zeta=0.09$, y el mayor intervalo de índices de refracción, en donde la respuesta es constante hasta $n=1.14$, y un índice de refracción máximo de $n=1.18$, lo cual hace que esta gráfica sea muy distinta a la transmisión relativa del sensor sin capa.

En la figura 5.85b), aparecen las respuestas para las variantes 29 y 35, que tienen un valor máximo de $\zeta=0.06$ y $\zeta=0.049$, y una forma muy parecida entre ellas, aunque la variante 35 tiene una gráfica de factor de cambio de transmisión con un desplazamiento hacia abajo. El comportamiento de estas gráficas es siempre decreciente, y no hay ningún intervalo para el que permanezcan constantes. El intervalo de

² El índice de refracción máximo se refiere al valor de n donde $\zeta(n)$ o $T^*(n)$ son cero.

índices de refracción para ambas respuestas es el mismo, teniendo como máximo $n=1.17$, el cual es inferior que el de $T^*(n)$ del sensor sin capa.

La última gráfica de la figura 5.85b), corresponde a la variante 31, con una magnitud máxima del factor de cambio en la transmisión $\zeta = 0.04$. Esta variante tiene un intervalo en el que la respuesta permanece constante (hasta $n=1.05$), mayor que el de $T^*(n)$ del sensor sin capa. El índice de refracción máximo que alcanza es $n=1.19$.

Por último en la figura 5.85c) se muestran las respuestas para las variantes 28, 34 y 36, las cuales tienen magnitudes muy pequeñas, tanto comparadas con el valor de $T^*(n)$, como con los valores de $\zeta(n)$ para otras variantes. Ninguna de las 3 gráficas tiene un intervalo para el cual sean constantes, y el índice de refracción máximo es de $n=1.4$.

Con capas de estas variantes cuyo factor de cambio de la transmisión tiene una magnitud tan pequeña, se puede decir que el sensor deja de transmitir ante la presencia de esta variante de capas.

5.3 Conclusiones

5.1 Los efectos de una capa dieléctrica de contaminación no pueden ser ignoradas para ningún tipo de sensor, ni para ninguna geometría de capa.

5.2 Los sensores semiesféricos sufren una mayor distorsión en su respuesta cuando su orientación es vertical hacia abajo, que cuando la orientación es vertical hacia arriba.

5.3 Cualquier geometría de capa sobre la semiesfera, ocasiona una disminución en su transmisión absoluta.

5.4 Para un sensor semiesférico, el factor de cambio en la transmisión $\zeta(n)$ que tiene la menor magnitud y por tanto se encuentra más alejado de la transmisión relativa del sensor sin contaminación, es originado por capas de contaminación de grosor uniforme.

5.5 Si la capa tiene la forma de las variantes 4, 6, 7 y 8 (figuras 5.13a), 5.13c), 5.17a) y 5.17 b)), se pierde la transmisión en los sensores semiesféricos.

5.6 Se puede disminuir el efecto de las capas en los elementos semiesféricos, si se colocan las fibras en alguna de las ventanas de transmisión que se encuentran en los extremos del sensor como en $x=0.924$ ó $x=0.951$.

5.7 Los sensores elipsoidales con eje mayor en x , sufren una menor distorsión en su respuesta cuando están orientados hacia abajo, si la capa formada tiene un grosor constante (figura 5.20) o si tiene las características de la variante 10 (figura 5.23).

5.8 Los sensores elipsoidales con eje mayor en x , tienen un número más grande (6) de variantes que producen una magnitud máxima del factor de cambio en la transmisión $\zeta(n)$ mayor a la unidad:

- En la posición vertical hacia abajo- Capas de grosor constante (figura 5.20) y variante 12 (figura 5.27)
- En la posición vertical hacia arriba- Variante 14 (figura 5.29c)).
- En la posición horizontal lateral- Variantes 15, 16 y 17 (figura 5.32a), b) y c)).

5.9 La orientación horizontal lateral de los sensores elipsoidales con eje mayor en x , produce valores de transmisión absoluta con una magnitud mayor que la del sensor sin capa. La mayoría de las variantes que se forman con esta orientación, tienen una gráfica de factor de cambio de transmisión $\zeta(n)$ parecidas a la de $T^*(n)$ del sensor sin capa. La variante 17 es la que tiene un factor de cambio en la transmisión $\zeta(n)$ que menos se parece a $T^*(n)$.

5.10 Los sensores elipsoidales con eje mayor en z , producen las variantes de capa que tiene las magnitudes más grandes del factor de cambio en la transmisión $\zeta(n)$ de todas las variantes analizadas en este trabajo.

5.11 Las variantes con las mayores magnitudes del factor de cambio son:

- posición vertical hacia abajo - capas de grosor uniforme ($\zeta = 5$), variantes 19 ($\zeta = 4.3$) y 20 ($\zeta = 5.2$).
- posición vertical hacia arriba - variante 22 ($\zeta = 4.2$).
- posición horizontal lateral – variante 26 ($\zeta = 2.45$).

5.11 Ninguna de las variantes que producen que el factor de cambio tenga una magnitud mayor a la unidad, tiene un intervalo tan grande como en la transmisión relativa $T^*(n)$ del sensor sin capa, en donde el factor de cambio es constante.

5.12 La variante 18 que se forma en la posición vertical hacia abajo, es la que tiene una gráfica de $\zeta(n)$ más parecida a $T^*(n)$ del sensor sin la capa, aunque de menor magnitud.

5.13 Las variantes 20 b), 22 b) y 25, que se obtienen en cada una de las tres orientaciones: vertical hacia abajo, vertical hacia arriba y horizontal lateral respectivamente, presentan magnitudes en la $\zeta(n)$ inferiores que la $T^*(n)$ del sensor sin capa, y una reducción de los intervalos de operación.

5.14 Tanto la variante 23 (vertical hacia arriba), como la 24 (horizontal lateral), ocasionan una pérdida total de la transmisión.

5.15 Los sensores paraboloidales tienen el mayor número de variantes en las 3 distintas orientaciones en las que hay transmisión, por lo que se puede considerar que esta geometría de sensor, es la que tiene menores probabilidades de perder por completo la transmisión ante la presencia de una capa dieléctrica de contaminación.

5.16 Por otra parte, las variantes de capa para esta forma de sensor tienen un factor de cambio en la transmisión $\zeta(n)$, muy distinto de la transmisión relativa $T^*(n)$ del sensor sin capa, por lo que se producirán errores en las respuestas, tanto si se trabaja con la respuesta tipo escalón, como con la sección lineal.

5.17 Los sensores paraboloidales son los que tienen el menor número de variantes (capas de grosor uniforme y la variante 38) con un factor de cambio de transmisión $\zeta(n)$ superiores en magnitud a $T^*(n)$ del sensor sin capa.

5.18 Se puede considerar que las variantes 28, 34 y 36 (que se forman en cada una de las 3 orientaciones posibles) anulan la transmisión, ya que la magnitud de la transmisión absoluta es muy pequeña (del orden de 10^{-5}).

5.19 En la orientación vertical hacia abajo con el sensor paraboloidal la mitad de las variantes (3 de un total de 6) producen respuestas con magnitudes muy pequeñas (10^{-2} , 10^{-5}).

5.20 En la orientación vertical hacia arriba con el sensor paraboloidal, 2 de las 3 variantes producen magnitudes de transmisión relativa muy pequeñas (10^{-2} , 10^{-5}).

5.21 En la orientación horizontal lateral con el sensor paraboloidal, la mitad de las variantes (2 de 4) producen respuestas con magnitudes muy pequeñas (10^{-2} , 10^{-5}).

CONCLUSIONES GENERALES

1. En este trabajo se determinaron las propiedades de los sensores refractométricos basados en fibras ópticas de algunas nuevas formas geométricas.
2. Se descubrieron las nuevas y diferentes características inherentes a los sensores con elementos de detección basados en superficies de segundo orden (semiesfera, elipsoides y paraboloides).
3. Se mostró que con las formas de los elementos de detección elipsoidales y paraboloidales hay una mayor facilidad, para la modificación de la respuesta del sensor al índice de refracción del medio externo, que en el caso de la forma semiesférica conocida anteriormente.
4. Se revelaron los efectos de una capa dieléctrica, cuando esta se encuentra en la superficie del sensor, esta capa puede formarse en diferentes situaciones prácticas y distorsionar el funcionamiento del sensor.
5. Se demostró las siguientes propiedades de los sensores de las formas elipsoidales:
 - 5.1. En estos sensores, se puede mover la característica del sensor $T^*(n)$ sobre el eje n , tanto en la dirección de grandes como pequeños n ; esto permite obtener sensores para medios con índices de refracción que no podían haber sido alcanzados por los sensores basados en superficies semiesféricas.
 - 5.2. Se puede obtener la respuesta del sensor de una mayor linealidad para un intervalo de índices de refracción específico, que en el caso de los sensores basados en superficies semiesféricas.
 - 5.3 Para cierto tipo de elipsoides es posible obtener una característica de la forma escalón unitario, con el escalón que corresponde a un índice de refracción específico.
 - 5.4. Se observó que el cambio en la posición de las fibras ópticas ocasiona grandes corrimientos de la característica de transmisión relativa en el eje n , mostrando distintas ventanas de transmisión.

6. Propiedades de los sensores de las formas paraboloidales:

- 6.1. Los sensores de formas paraboloidales tienen una característica de transmisión relativa $T^*(n)$ con muy pocos cambios ante la variación en sus parámetros geométricos, para algunos intervalos del índice de refracción del medio externo n .
- 6.2. La variación de la altura H de los paraboloides permite una modificación de la forma de la transmisión relativa $T^*(n)$ similar a la que se obtiene en los sensores semiesféricos mediante la variación del diámetro de las fibras ópticas, o su apertura numérica.
- 6.3. Se demostró que existen paraboloides con una respuesta mucho más lineal que las obtenidas con los sensores semiesféricos y elipsoidales, y para intervalos de n mayores.

7. Efectos de una capa dieléctrica en la superficie del sensor:

- 7.1 La respuesta del sensor siempre sufre variaciones cuando hay una capa dieléctrica en la superficie del sensor, sin importar la forma de superficie del sensor, o la forma de la capa. El efecto varía desde atenuaciones en la magnitud de la respuesta, cambios en la forma de la respuesta, errores por el factor de calibración, hasta la pérdida completa de la transmisión.
- 7.2 Las tres formas de sensores estudiadas (semiesfera, elipsoide, paraboloides) sufren una menor alteración de la respuesta ante la presencia de una capa dieléctrica, cuando los sensores se utilizan en la posición vertical hacia abajo. Aunque la respuesta ante la presencia de una capa, sufre modificaciones, existe un mayor número de variantes en esta posición en las que las alteraciones son moderadas.
- 7.3 Los sensores semiesféricos son más sensibles ante la presencia de una capa dieléctrica, cuando son colocados en la posición horizontal lateral, pues en la mayoría de variantes se pierde por completo la transmisión, mientras que los elipsoidales son los que tienen un mayor número de variantes en donde se mantiene la transmisión en esta posición.
- 7.4 Se debe de tomar en cuenta la posible presencia de una capa dieléctrica de contaminación en la superficie del sensor en la calibración del mismo; en este trabajo fueron desarrolladas las recomendaciones correspondientes.

8. Los principales resultados de la investigación realizada en esta tesis fueron presentados en cuatro congresos internacionales (con publicaciones en extenso en las memorias de los congresos) y publicados en forma de tres artículos de investigación científica en las revistas arbitradas de circulación internacional.

Trabajo a futuro

En el futuro, sería interesante e útil desarrollar un módulo de optimización para el simulador para el diseño de sensores para aplicaciones específicas. Conectado a un algoritmo de optimización (por ejemplo, un algoritmo genético) se pueda obtener la mejor combinación de parámetros de acuerdo a una aplicación específica del sensor a diseñar.

También sería interesante continuar con el análisis de transductores con superficies de orden superior para determinar el efecto de las imperfecciones que podrían aparecer en la fabricación de los sensores.

Además, hay perspectivas grandes en el desarrollo de las aplicaciones multisensores utilizando distintas longitudes de onda, esto podría llevar a la elaboración de un dispositivo de tipo “lengua opto-electrónica”, para la identificación de diferentes sustancias y su concentración, en una mezcla.

ANEXO 1.

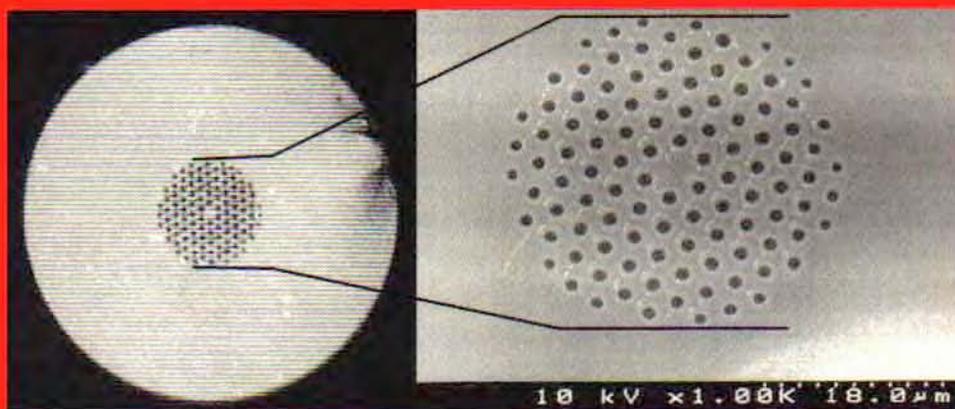
Artículo: Optical-fibre sensor system for monitoring the performance of the gas-propellant centrifuge separator of a spacecraft

Measurement Science and Technology

Volume 15 Number 8 August 2004

Special issue: Optical Fibre Sensors 16

Online: www.iop.org/journals/mst



Optical-fibre sensor system for monitoring the performance of the gas–propellant centrifuge separator of a spacecraft

Katya E Romo-Medrano¹, Sergei N Khotiaintsev²
and Victor García-Garduño²

¹ Department of Electrical and Electronics Engineering, Mexico City Campus,
Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey, Mexico, DF, CP 14380, Mexico

² Faculty of Engineering, National Autonomous University of Mexico, Mexico, DF,
CP 04510, Mexico

E-mail: kerm@itesm.mx and sergeikh@hotmail.com

Received 31 December 2003

Published 19 July 2004

Online at stacks.iop.org/MST/15/1568

doi:10.1088/0957-0233/15/8/024

Abstract

An optical-fibre sensor system is presented for monitoring void fraction distribution in a spacecraft's gas and propellant centrifuge separator. The system could be used at the separator development stage or for monitoring, during ground tests, the elements of the spacecraft propulsion system. Our sensor system employs an array of point optical-fibre refractometric transducers installed in the form of several linear radial arrays on the separator rotating blades. We employed a small-size hemispherical optical detection element as the transducer and we optimized its parameters through numerical ray-tracing. The aim is to minimize the effect of the thin film of liquid that forms on the transducer's surface in this application. The features of this sensor system are: (1) an efficient matrix-type multiplexing scheme, (2) the installation of the main optoelectronic unit of the sensor in a hermetically sealed container inside the separator tank located on the rotating shaft and (3) the spark-proof and explosion-proof design of the sensor circuits and elements. The sensor is simple, reliable, low-cost and is capable of withstanding the factors involved during operation of the propulsion system such as cryogenic temperatures and chemically aggressive liquids. The novel elements and design concepts implemented in this sensor system can also find applications in other sensors for spacecraft propulsion systems and also in a variety of optical-fibre sensors used in scientific research and industry.

Keywords: void fraction, two-phase flow, refractive index, refractometry, optical-fibre sensors, propellant, propulsion system, spacecraft, aircraft

1. Introduction

In space technology, the stable operation of a propulsion system presents many challenges. In particular, on board a

pressurizing gas to enter the discharge pipe. If this gas or a mixture of this gas and liquid reaches the engine (figure 1), combustion stability problems may occur or this may even result in catastrophic damage to the engine [1]. Therefore, the

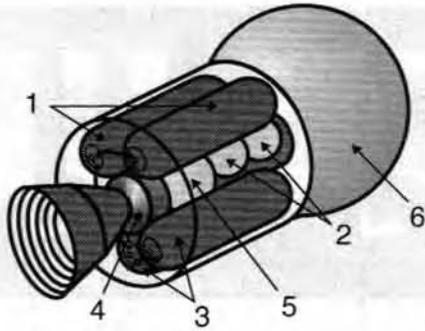


Figure 1. Generic propulsion system of a spacecraft: (1) fuel storage tank, (2) helium tank, (3) oxidizer tank, (4) engine, (5) separator, (6) crew module.

under pressure, which do not let the fuel or oxidizer spread over the tank. This technique, however, is difficult to implement in the case of large tanks or in tanks with reinforcing vanes projecting inwards and there is always the probability of the pressurizing gas mixing with the propellant and entering the discharge pipe.

One possible solution to this problem is to employ a centrifuge-type separator of liquid and gas between the storage tank and the engine. However, the task of developing such a separator presents many difficulties. In particular, the separator must have an extremely high separation capacity for various temperatures of the liquid (and hence, different viscosities) and for different flow rates corresponding to different engine thrusts. The separator also has to meet the requirements of minimum size and weight and needs to be of high reliability. These are the typical requirements for all space technology components.

The engineers involved in the design of a propulsion system need to know the actual distribution of the liquid and gas inside the separator under different operational regimes. This knowledge allows for the assessment of the effect of different geometrical and operational parameters of the separator on its performance leading to the optimal separator design. In particular, the separator performance is significantly dependent on the number and shape of the blades, their rate of rotation and the shape and position of the inlet and outlet tubes.

Traditional methods employed in hydromechanics research such as visual observation, photography, video recording, interferometry [2], optical tomography [3, 4] and particle image velocimetry [5] are of limited use in this application because the separator structure is complex. Also, there is not much space between the blades, and the two-phase gas-liquid flow in the separator is a very inhomogeneous optical medium. Therefore, it is difficult to obtain visual images of the flow in the separator. Also, the processing and quantitative interpretation of the visual data are more difficult than obtaining this data.

Thus, the design and development engineers need a sensor system which will provide quantitative data on the void fraction presence and distribution in the separator. Optical-fibre sensors are a good choice for this application because of their well-known advantages over traditional types of sensors.

flow. Among these, two-phase flow constitutes an important sector of potential applications. Although various fibre-optic devices have been proposed for void fraction measurement in two-phase flow [6-15], it remains difficult to satisfy the operational needs of some applications.

In space applications, the most critical issues include: adequate level of performance, reliability, lifetime, small size and small weight. In addition, many specific technical factors may be involved including chemically corrosive and inflammable environments, high pressure and a wide operating temperature range. In applications involving cryogenic fuels and oxidizers, the extremely low temperatures impose many additional constraints. In particular, the small refractive index of cryogenic liquids presents difficulties for optical discrimination between the gas and the liquid [16, 17].

In this work, we present an optical-fibre sensor system designed for monitoring of the void fraction distribution in a centrifuge-type gas-propellant separator of a spacecraft propulsion system. This version of the sensor is intended for use during the separator design stage and during the ground tests of various elements of the propulsion system. For this reason, the present version of the sensor is intended to operate with model liquids: water and water-glycerine solutions. However, all sensor elements and the complete sensor system are designed in such a way that they can operate with actual propellants. Also, the sensor can operate in a cryogenic environment with a variety of cryogenic propellants, including liquid hydrogen. This was shown in our previous work [18].

The present sensor is a multi-point, multiplexed system of optical-fibre refractometric transducers installed on the rotary blades of the separator. The sensor employs the following unique elements:

- (1) Small-size optical fibre refractometric transducers with a step-like response which are not sensitive to the presence of a thin film of liquid on the transducer surface.
- (2) In-tank installation of the sensor together with its optoelectronic elements and electronic circuits in a hermetically sealed container on the rotating shaft.
- (3) Spark-proof and explosion-proof design of the sensor circuits and elements.
- (4) An efficient sensor multiplexing scheme.

This paper will examine how these elements contribute to sensor performance.

2. The principle of operation

The present sensor accesses the spatial distribution of void fraction in two-phase flow of the gas-propellant centrifuge separator of the spacecraft propulsion system. The generic centrifuge separator is shown schematically in figure 2. It consists of a spherical tank (1) and a rotor. The rotor is composed of a tubular shaft (2) and a number of rotor blades (3) attached to the shaft. The liquid, mixed with gas bubbles, comes from the inlet pipe (4). This mixture is put in rotational motion by the rotating blades. Centrifugal force separates the liquid

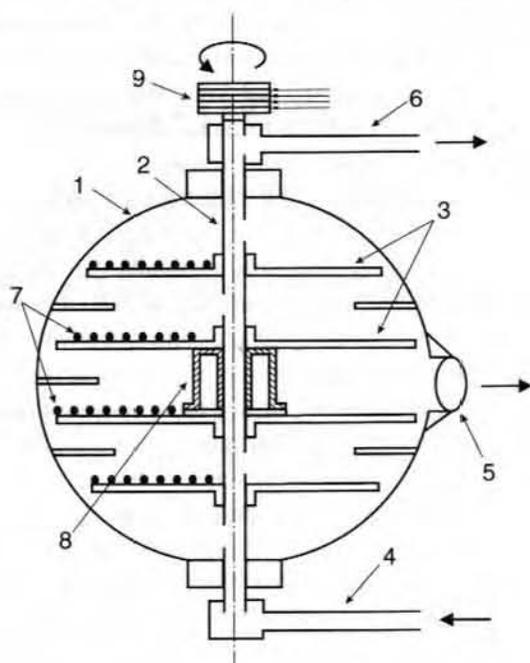


Figure 2. Schematic view of the centrifuge separator of propellant and gas: (1) spherical tank, (2) tubular shaft, (3) rotor blades, (4) inlet pipe, (5) propellant outlet pipe, (6) gas outlet pipe, (7) optical-fibre transducers, (8) optoelectronic unit, (9) rotary contact device.

so it gathers in the central part of the separator near its axis. From here, the gas is sucked away via the hollow rotor shaft through the gas outlet pipe (6).

In certain regimes, due to a number of inadequate combinations of parameters, gas bubbles of different size and shape (*the void fraction*) can be carried off by the liquid. This produces a two-phase flow in the separator. This regime is potentially dangerous because some gas bubbles may get as far as the separator outlet pipe and then into the engine.

The current sensor is intended to access the distribution of void fraction in the separator in two dimensions: in the radial (r) and the axial (z) directions. The azimuthal (θ) distribution is not of significance because of the axial symmetry of the separator. For this reason, the azimuthal distribution of void fraction is not accessed in the present sensor. The sensor employs an array of discrete optical transducers which discriminate between the gas and the liquid at a large number of fixed points in the separator. As sketched in figure 2, the optical-fibre transducers (7) are installed on the rotor blades (3) in the form of linear radial arrays. The spacing is even between the transducers.

During the dynamic operation of the separator, the rotor blades rotate at a constant angular velocity. The liquid in the separator is carried off in the azimuthal direction by the rotor blades. Simultaneously, the liquid moves outwards in the radial direction at a rate proportional to the liquid drain. Under the steady angular motion of the rotor, the angular velocity of the liquid is less than that of the rotor, due to the friction of liquid against the separator wall. Thus, the liquid is in motion both in radial and azimuthal directions relative to the transducers. The same is valid for the gas bubbles, although

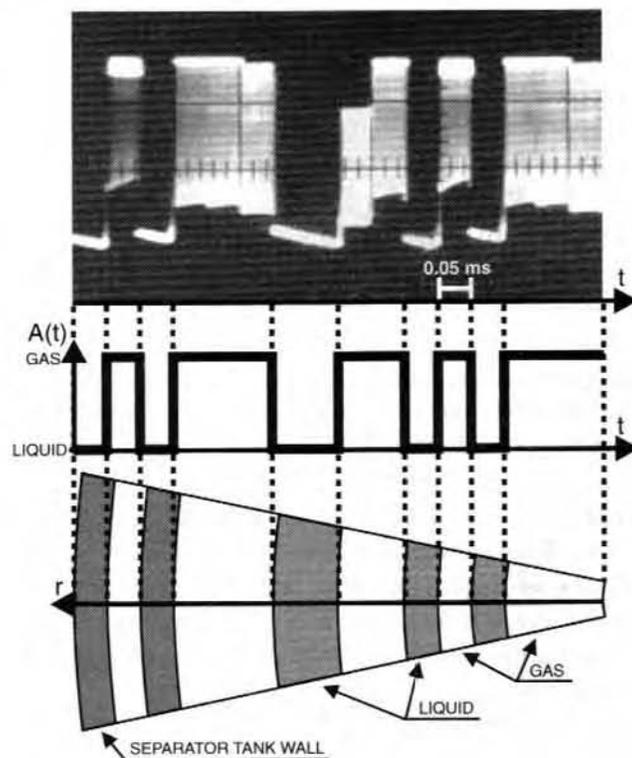


Figure 3. Multiplexed electrical signal of the radial array of 16 transducers (top), the comparator output (centre), and the estimated void fraction distribution in the azimuthal plane of the separator (bottom).

a different radial direction with respect to the flow. Although each particular radial direction is not known, a statistically significant distribution of void fraction in the radial direction is obtained by multiple sampling. The arrays installed in the other rotor blades allow access to the radial distribution in other azimuthal planes of the separator. In this way, we obtain the void fraction distribution in two dimensions: r , z . The volume fraction of each phase is estimated by averaging the residence time (the detection element spends being immersed in each of the phases) and accounting the radial r and axial z coordinates of each detection element. Figure 3 illustrates the multiplexed electrical signal from the radial array of the 16 transducers, the comparator output and the model employed for the interpretation of the measurements.

3. The optical-fibre transducer

The critical elements of the present sensor system are the transducers. The function of the optical-fibre transducers in the current application is simply to discriminate between the liquid and the gas. Though the physical principles involved may be relatively straightforward, the optical and hydrodynamic processes can be uncoupled due to the characteristic times involved in each phenomenon [10]. In addition, the dynamic interaction of the gas bubbles with the transducer and the resulting optical signal is complex. In particular, the signal evolution is very complex in nature during the piercing of the interface between the liquid and the gas [11]. Therefore, accurate determination of the start and the end of each

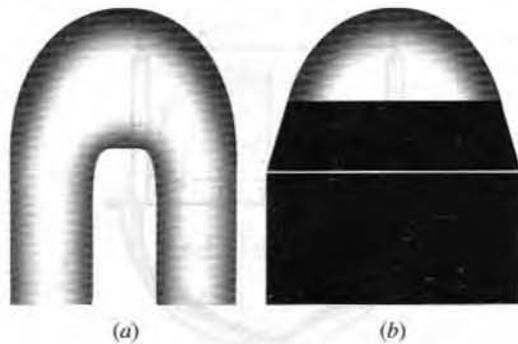


Figure 5. (a) The refractometric optical-fibre transducer. (b) The transducer installed in the protective tube.

corresponds to a larger number of serial internal reflections in the detection element.

The liquid layer effectively increases the element radius and this results in a decrease in the number of serial internal reflections. Thus, the minimum separation between the two fibres ($\Lambda \approx 0.7R$), which corresponds to two serial reflections in the element under the total internal reflection condition, leaves no place for the reduction of the number of reflections and hence leads to the complete deterioration of the transducer performance when the film of liquids builds up on the transducer surface. In contrast, a large separation between the fibres corresponds to multiple serial internal reflections in the transducer.

The effective increase in the detection element radius due to the liquid film formation results in a decrease in the number of serial reflections. However, this does not result in a significant decrease in the coupling between the fibres until the minimum possible number of serial internal reflections is reached (two serial reflections).

For this reason, we selected a relatively large parameter $\Lambda = 0.88R$ for the present application. The choice of the other parameters was made as described in [20] in order to achieve a step-like optical transmission characteristic, which contributes to the reliable discrimination between the fluid and the air.

The optical-fibre transducer was manufactured by heating and fusing two sections of silica fibre together. The radiation from a CO₂ laser was used to heat and melt the silica fibres. This was done in a special technological facility developed in our laboratory. The working surface of the fabricated detection elements was very close to the theoretical hemispherical shape (figure 5(a)).

After fabrication, the transducer was installed in a protective tube and fixed in it (figure 5(b)). An important advantage of this transducer consists in the monolithic integration of the detection element and the connecting optical fibres. The material employed for the detection element and the connecting optical fibres was silica. This provides high mechanical strength to the transducer. The transducer is immune to heat and vibration and is stable to alkalis and acids.

The smooth and symmetric, droplet-like shape of the transducer allows for fast and uniform decrease in the thickness

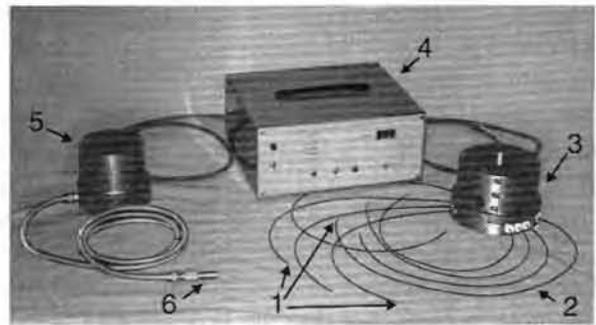


Figure 6. General view of optical-fibre sensor system: (1) optical-fibre transducers, (2) optical fibre guides, (3) electronic unit, (4) processing and display unit, (5) electronic unit, (6) tubular housing of the outlet pipe void fraction sensor with four optical-fibre transducers installed.

4. The sensing system

The essential elements of the developed sensor system are shown in figure 6. The elements are: (1) an array of optical-fibre refractometric transducers, (2) the connecting optical fibres of different lengths, (3) the optoelectronic unit and (4) the processing unit. The sensor system also has an electronic display (not shown in figure 6).

The optical-fibre transducers (1) are installed at even intervals over the separator blade radius in the form of linear arrays (see figure 2). The current version of the sensor employs four arrays of 16 transducers, totalling 64 transducers. The connecting optical fibres are accommodated in grooves made in the separator blade plates. The optical fibres extend along the blade to the optoelectronic unit (3).

The optoelectronic unit (3) accommodates the electrical and optical interfaces, the control circuits, the optical transmitters and receivers and the associated electronics. The optoelectronic unit is installed in the separator interior (see figure 2) on the rotor shaft in the central part between the two adjacent blades.

Due to its central location in the separator, the optoelectronic unit has almost no effect on the fluid flow and hence does not have any significant effect on the separator performance. The interconnection between the transducers and the optoelectronic unit and the multiplexing of the transducers is simplified by placing the optoelectronic unit inside the separator on the same rotating frame as the transducers. This allows the use of just one communication link (electrical signal cable) between the rotating system of sensors inside the separator and the exterior processing and display unit.

The electrical signal cable and the power cable of the optoelectronic unit are installed in the hollow rotor shaft of the separator. These two cables are hermetically sealed at a shaft termination and extend to the shaft exterior. Here they are connected to the ring contacts installed on the shaft termination. The sensor is connected to the remote processing unit and the electronic display by an electrical link via the rotary ring contacts. The optoelectronic unit is powered from the remote low-voltage power supply by means of electrical cables in the separator rotor shaft.

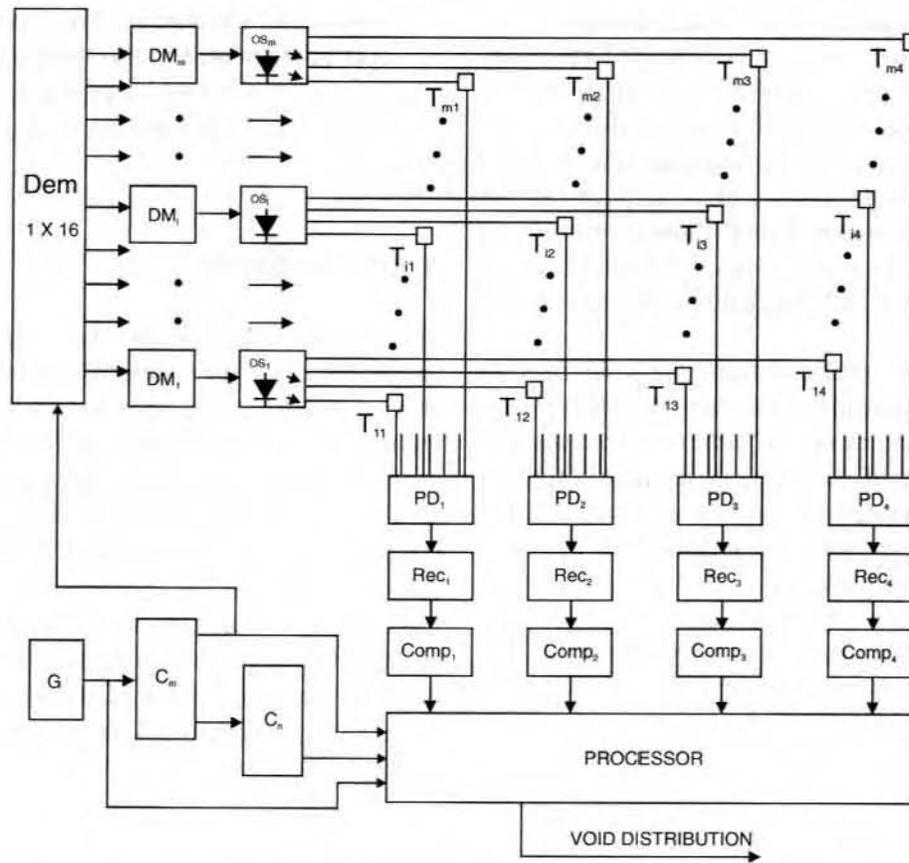


Figure 7. Time and space-division multiplexing scheme of the sensor: G—pulse generator, C—counter, Dem—demultiplexor, DM—driver-modulator, OS—optical source (GaAs LED), T—refractometric transducers, PD—photodetector, Rec—receiver, Comp—comparator.

removable cylindrical section which allows the installation of the container on the rotor shaft in a concentric position. The optoelectronic unit features a spark-proof and explosion-proof design in accordance with the existing standards. The sensor system was certified for operation in a hazardous environment.

In this developed system, the centrifuge void fraction sensor, as described above, is complemented with a similar but simpler sensor which has the function of detecting the gas bubbles which may possibly penetrate into the separator outlet pipe. This sensor employs only four liquid-sensitive optical transducers. The transducers are installed in a protective tubular housing (6). The sensor also features a hermetic, spark-proof and explosion-proof design. However, the elements of this sensor are placed outside the separator tank and are not subjected to rotation.

5. The experiment

A prototype void fraction sensor system was constructed and tested using an experimental version of a centrifuge separator. The separator was of a spherical shape with an inner diameter of 0.9 m. The tests were performed using a model liquid of water-glycerine solutions of different concentrations at normal operational temperatures. The two-phase flow in the separator was obtained by injecting air into the water-glycerine solution in the separator inlet pipe.

For transducer interrogation we employed a matrix-type,

and also the fact that these arrays are installed in different locations (separator blades). For these reasons we used the same number of optical detectors and receivers as arrays (four) and used the number of the optical transmitters equal to that of the transducers in the array (16). The substantial difference in the number of the optical transmitters ($m = 16$) and that of the optical receivers ($n = 4$) is due to the lower cost and lower complexity of the optical transmitter in comparison to the optical receiver. (In the optical transmitters, we used GaAs light emitting diodes with corresponding driving circuits. The choice of using LEDs instead of semiconductor injection lasers resulted in the low cost and increased reliability of the sensor.)

Other system features also contribute to the low cost and high reliability. In particular, we do not employ any optical fibre couplers. Instead, each of 16 LEDs is coupled to four transducers using four parallel multimode optical fibres. In turn, each of these transducers is coupled to one of the four receivers. Thus, the activation of one optical source and one photoreceiver allows the interrogation of one particular transducer out of the total of 64 transducers.

Assessment of the void fraction distribution is by means of periodic interrogation of all transducers. The signal is interpreted in a discrete manner, applying a single threshold level whose intersection with the signal determines the succession of residence times [10].

In this experiment, we employed a full-scale electronic unit with all associated components and one array of 16 optical

distribution of gas and liquid in one azimuthal plane of the separator. The signal high level corresponds to the voids (gas bubbles) and the low level corresponds to the liquid. The sensor system operates under the interrogation rate of 0.25 kHz. This corresponds to an interrogation time of 50 μ s for one transducer. This is a relatively high sampling rate for a mechanical or hydraulic system which allowed us to obtain factual data sufficient for statistically significant calculation of void fraction distribution in different azimuthal planes of the separator.

Similar signals were obtained from the void fraction sensor installed in the outlet pipe of the separator. However, in this case the processing algorithm was different. The presence of a void fraction in any of the four measurement channels corresponding to the four optical transducers located in the same pipe simply generated a binary signal which indicated an improper separator operation.

The complete system, including all sensor elements, perfectly withstood a numerous series of dynamic tests. The system also withstood a wet environment in the interior of the separator during long periods of time between the tests.

6. Conclusions

The multipoint void fraction sensor, as described in this work, allows the monitoring of the void fraction distribution and the estimation of its volumetric content in centrifuge gas-propellant separators of a spacecraft propulsion system.

This sensor is different to the existing types of void fraction sensors in the following three ways:

1. The sensor monitors the void fraction distribution in spinning two-phase flow of arbitrary velocity directions.
2. The sensor is designed to provide statistically significant data on the void fraction distribution in two dimensions. Specifically, in the meridional plane of the separator (in this application, the third azimuthal dimension is of no significance because of the azimuthal symmetry of the separator).
3. The sensor is low-cost, simple and reliable.

These advantages are the result of several innovations, including:

- An improved refractometric transducer.
- A simple and effective multiplexing technique and
- A rational design of all sensor elements.

To our knowledge, this is the first report of an experimental characterization of the void fraction distribution in spinning two-phase flow. Also, this is the first report of the development of a practical optical-fibre void-fraction sensor system designed for entirely submerged in-tank operation.

In the next stage, the transducer installation techniques will be improved to meet the requirement of fast and easy change of rotor blades during experimentation on the separator. This will be followed by an increase in the number of transducers and the installation of transducer arrays on various

at cryogenic temperatures. The novel elements and design concepts implemented in this device can find applications in other sensors for spacecraft propulsion systems and also in a variety of optical-fibre sensors used in scientific research and in industry.

Acknowledgments

The authors acknowledge the support of the Faculty of Engineering of the National Autonomous University of Mexico (UNAM), the Program for Support of Research and Innovation Projects (PAPIIT) of the UNAM under the research grant IN113799 and IN100502 and the National Science & Technology Council of Mexico (CONACyT) under the research grant 3727-A and 35001-A. The authors acknowledge the support of the Department of Electrical and Electronics Engineering and the Division of Engineering and Architecture of the Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey, Mexico City Campus. The authors are grateful to Nick Boris and Victor Cabrera for their useful suggestions on the manuscript.

References

- [1] Sutton G P 2000 *Rocket Propulsion Elements: An Introduction to the Engineering of Rockets* 7th edn (New York: Wiley)
- [2] Kawahara N, Tomita E and Kamakura H 2002 Unburned gas temperature measurement in a spark-ignition engine using fibre-optic heterodyne interferometry *Meas. Sci. Technol.* **13** 125–31
- [3] Yan C *et al* 2002 A novel optical fibre process tomography structure for industry process control *Meas. Sci. Technol.* **13** 1898–902
- [4] Yan C, Liao Y, Lai S and Yang Z 2003 Design of a novel optical tomography sensor array *Meas. Sci. Technol.* **14** 164–71
- [5] Tu X and Trägårdh C 2002 Methodology development for the analysis of velocity particle image velocimetry images of turbulent, bubbly gas–liquid flows *Meas. Sci. Technol.* **13** 1079–86
- [6] Abuaf N, Jones O C Jr and Zimmer G A 1978 Optical probe for local void fraction and interface velocity measurements *Rev. Sci. Instrum.* **49** 1090–4
- [7] Vince M A, Breed H, Kryczuk G and Lahey R T Jr 1982 Optical probe for high-temperature local void fraction determination *Appl. Opt.* **21** 886–92
- [8] Takeo T and Hattori H 1983 Fluid observation with an optical fiber photorefractometer *Japan. J. Appl. Phys.* **22** 1920–4
- [9] Morris D, Teysseidou A, Lapierre J and Tapucu A 1987 Optical fiber probe to measure local void fraction profiles *Appl. Opt.* **26** 4660–4
- [10] Cartelier A 1990 Optical probes for local void fraction measurements: characterisation of performance *Rev. Sci. Instrum.* **61** 874–85
- [11] Cartelier A 1992 Simultaneous void fraction measurement, bubble velocity and size estimate using a single optical probe in gas–liquid two-phase flows *Rev. Sci. Instrum.* **63** 5442–53
- [12] Xuereb K and Riba J P 1995 A double optical-fiber probe to

- [14] Ramos R T, Holmes A, Wu X and Dussan E 2001 A local optical probe using fluorescence and reflectance for measurement of volume fractions in multi-phase flows *Meas. Sci. Technol.* **12** 871–6
- [15] Ramos R T and Fordham E J 1999 Fluid discrimination in two-phase flow *13th Int. Conf. on Optical Fiber Sensors* ed B Y Kim and K Hotate *Proc. SPIE* **3746** 553–6
- [16] Khotiaintsev S *et al* 1995 Fibre-optic multipoint high-resolution level-sensor for biomedical applications *Proc. SPIE* **2631** 121–6
- [17] Yang C, Chen S and Kazemi A 2001 Fiber-optical liquid level sensor under cryogenic environment *Proc. SPIE* **4204** 206–15
- [18] Khotiaintsev S, Matiuch V and Svirid V 1992 Discrete multipoint fiber-optic level-sensor for liquid helium and other cryogenic liquids *Lightwave Technology and Communications* ed A Altintash *Proc. Int. Conf. on Lightwave Technology and Communications (Bilkent University, Ankara, Turkey)* pp 130–4
- [19] Svirid V, Khotiaintsev S and Swart P L 2002 Novel optical fiber refractometric transducer employing hemispherical detection element *Opt. Eng.* **41** 779–87
- [20] Svirid V, Khotiaintsev S and Swart P L 2003 Linear and step-like characteristics in an optical fiber refractometric transducer with hemispherical detection element *Opt. Eng.* **42** 1383–9
- [21] Svirid V and Khotiaintsev S 1990 Problems and prospects of creating discrete fibre-optic fluid level meters *Instrum. Exp. Tech.* **6** 29–31
- [22] Khotiaintsev S and Svirid V 1999 Optoelectronic multipoint liquid-level sensor for light petro-chemical products *Proc. SPIE* **4148** 262–8e
- [23] Svirid V, De León V and Khotiaintsev S 2000 A prototype fiber-optic discrete level-sensor for liquid propane-butane *IEICE Trans. Electron. Japan* **E83-C** 303–8

Measurement Science and Technology

Volume 15

Number 8

August 2004

SPECIAL ISSUE: OPTICAL FIBRE SENSORS 16

EDITORIAL: Optical Fibre Sensors 16

PAPERS

- 1441 **How to reliably measure composite-embedded fibre Bragg grating sensors influenced by transverse and point-wise deformations?**
S Lebid, W Habel and W Daum
- 1448 **Non-contact torsion sensor using fibre Bragg gratings**
L Kruger, P L Swart, A A Chtcherbakov and A J van Wyk
- 1453 **Superimposed Bragg gratings in high-birefringence fibre optics: three-parameter simultaneous measurements**
I Abe, H J Kalinowski, O Frazão, J L Santos, R N Nogueira and J L Pinto
- 1458 **Guided-acoustic-wave Brillouin scattering observed backward by stimulated Brillouin scattering**
Y Tanaka, H Yoshida and T Kurokawa
- 1462 **Displacement measurement of a grating using moiré modulation of an optical spectrum**
S Nakadate, T Tokudome and M Shibuya
- 1467 **Fabrication and characterization of long-period-grating temperature sensors using Ge-B-co-doped photosensitive fibre and single-mode fibre**
T Mizunami, T Fukuda and A Hayashi
- 1474 **Principle of functioning of a self-compensated fibre-optical displacement sensor based on diffraction-grating-ended POF**
M Lomer, J Zubía, J Arrue and J M López Higuera
- 1479 **A new optical fibre sensor for multipoint radiation measurement with sensing regions in its cladding**
E Takada, D Yamada and H Kuroda
- 1484 **Fibre-optic thermometer using sensor materials with long fluorescence lifetime**
H Aizawa, H Uchiyama, T Katsumata, S Komuro, T Morikawa, H Ishizawa and E Toba
- 1490 **A novel ultrasound fibre optic sensor based on a fused-tapered optical fibre coupler**
R Chen, G F Fernando, T Butler and R A Badcock
- 1496 **Measurements of sensitivity of the single-mode photonic crystal holey fibre to temperature, elongation and hydrostatic pressure**
W J Bock, W Urbańczyk and J Wójcik
- 1501 **Distributed temperature sensing using a chirped fibre Bragg grating**
P C Won, J Leng, Y Lai and J A R Williams
- 1506 **Long-term radiation effects on fibre Bragg grating temperature sensors in a low flux nuclear reactor**
A Fernandez Fernandez, A Gusarov, B Brichard, M Decréton, F Berghmans, P Mégret and A Delchambre
- 1512 **Elongation of measurement range by successively shifting measurement window in a high spatial resolution reflectometry for optical subscriber networks by synthesis of optical coherence function**
M Kashiwagi and K Hotate
- 1519 **Novel schemes for optical signal generation using laser injection locking with application to Brillouin sensing**
L Thévenaz, S Le Floch, D Alasia and J Troger
- 1525 **A novel all-fibre configuration for a flexible polarimetric current sensor**

- 1531 **High-speed simultaneous measurement of refractive index and thickness of transparent plates by low-coherence interferometry and confocal optics**
M Ohmi, H Nishi, Y Konishi, Y Yamada and M Haruna
- 1536 **FBG laser sensor with intracavity dispersive fibre based on mode-locking frequency interrogation**
S Yamashita and A Inaba
- 1539 **High spatial resolution microwave detection system for Brillouin-based distributed temperature and strain sensors**
M N Alahbabi, N P Lawrence, Y T Cho and T P Newson
- 1544 **100 km distributed temperature sensor based on coherent detection of spontaneous Brillouin backscatter**
M N Alahbabi, Y T Cho and T P Newson
- 1548 **Enhanced performance of long range Brillouin intensity based temperature sensors using remote Raman amplification**
Y T Cho, M N Alahbabi, M J Gunning and T P Newson
- 1553 **Sensing characteristics of plastic optical fibres measured by optical time-domain reflectometry**
I R Husdi, K Nakamura and S Ueha
- 1560 **Interpreting complex data from a three-sensor multipoint optical fibre ethanol concentration sensor system using artificial neural network pattern recognition**
D King, W B Lyons, C Flanagan and E Lewis
- 1568 **Optical-fibre sensor system for monitoring the performance of the gas-propellant centrifuge separator of a spacecraft**
K E Romo-Medrano, S N Khotiaintsev and V García-Garduño
- 1576 **Long-period grating Michelson refractometric sensor**
P L Swart
- 1581 **Sub-picosecond time jitter suppression using an optical feedback mechanism for a laser diode short pulse generator**
K Nonaka and H Mizuno
- 1586 **A large core polymer optical fibre sensor for x-ray dosimetry based on luminescence occurring in the cladding**
C Fitzpatrick, C O'Donoghue, J Schöbel, B Bastiaens, P van der Slot, E Lewis and D Pendrill
- 1591 **High performance quantum well intermixed superluminescent diodes**
T-K Ong, M Yin, Z Yu, Y-C Chan and Y-L Lam
- 1596 **Interrogation of fibre Bragg gratings with a tilted fibre Bragg grating**
C Jáuregui and J M López-Higuera
- 1601 **Temperature dependence of the stress response of fibre Bragg gratings**
R R J Maier, W N MacPherson, J S Barton, J D C Jones, S McCulloch and G Burnell
- 1607 **Thermal dependence of the strain response of optical fibre Bragg gratings**
M J O'Dwyer, C-C Ye, S W James and R P Tatam
- 1614 **A 'smart' bed for non-intrusive monitoring of patient physiological factors**
W B Spillman, M Mayer, J Bennett, J Gong, K E Meissner, B Davis, R O Claus, A A Muelenaer and X Xu
- 1621 **Development of fibre laser systems for ring-down and intracavity gas spectroscopy in the near-IR**
G Stewart, P Shields and B Culshaw
- 1629 **Theoretical analysis of a methane gas detection system, using the complementary source modulation method of correlation spectroscopy**
P Chambers, E A D Austin and J P Dakin
- 1637 **Sagnac interferometer-type fibre-optic current sensor using single-mode fibre down leads**
M Takahashi, K Sasaki, A Ohno, Y Hirata and K Terai

(Continued from inside back cover)

- 1642 Pitch and roll sensing using fibre Bragg gratings in multicore fibre**
W N MacPherson, G M H Flockhart, R R J Maier, J S Barton, J D C Jones, D Zhao, L Zhang and I Bennion
- 1647 Implementation of vectorial bend sensors using long-period gratings UV-inscribed in special shape fibres**
D Zhao, K Zhou, X Chen, L Zhang, I Bennion, G Flockhart, W N MacPherson, J S Barton and J D C Jones
- 1651 A novel method for location of buried optical cables, where an incident EM wave modulates the polarization of guided light, using the Faraday effect**
S J Russell, A B Lewis, R J Clarke, B R Fleury and J P Dakin
- 1659 Dispersion and refractive index measurement for Ge, B-Ge doped and photonic crystal fibre following irradiation at MGy levels**
W N MacPherson, R R J Maier, J S Barton, J D C Jones, A Fernandez Fernandez, B Brichard, F Berghmans, J C Knight, P StJ Russell and L Farr
- 1665 Blank beam fabrication of regenerated type IA gratings**
G Simpson, K Kalli, K Zhou, L Zhang and I Bennion

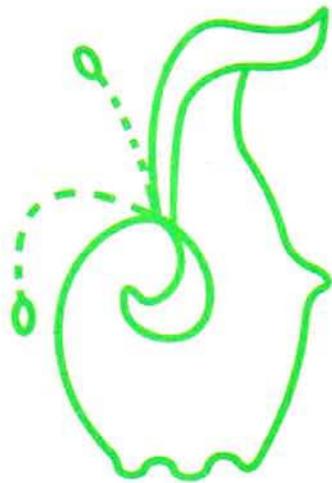
ANEXO 2.

Artículo: Refractometric fiber-optical detectors of liquids: effect of residual liquid film

REVISTA
-2
MEXICANA DE
FÍSICA

S

SUPLEMENTO LATINOAMERICANO
DE LA SOCIEDAD MEXICANA DE FÍSICA



www.smf.mx/rmf/
www.ejournal.unam.mx

VOLUMEN 52
NUMERO 2
FEBRERO 2006
PÁGINAS 1-107

CODEN: RMFXFAT
Ejemplar \$170.00

Refractometric fiber-optical detectors of liquids: effect of residual liquid film

K.E. Romo-Medrano

*Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica,
Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey, Campus Ciudad de México,
Tel.: +52 (55) 5483 2204,
e-mail: kerm@itesm.mx*

K.S. Khotiaintsev

*Facultad de las Ciencias de la Computación, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla,
C.U., Puebla, Pue.
Tel: +52(222)225 5500,
e-mail: konstakh@hotmail.com*

V. García-Garduño and S.N. Khotiaintsev

*Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México,
C.U., México, D. F.,
Tel.: +52 (55) 5622 3055
e-mail: sergeikh@hotmail.com, victorg@verona.fi-p.unam.mx*

Recibido el 27 de octubre de 2004; aceptado el 19 de mayo de 2005

We analyze the response of the optical refractometric detection element of a hemispherical shape in the presence of a contamination in the form of a film of liquid on its surface. We show that the liquid film distorts the detector's response to the refractive index of the surrounding medium. This distortion is more pronounced in the case of small-size detection elements, such as those employed in the fiber-optical refractometric sensors.

Keywords: Refractive index; refractometry; optical fiber sensors.

En el presente trabajo, analizamos la respuesta de un transductor óptico refractométrico de una forma semiesférica, cuando su superficie está contaminada por una película de líquido. Demostramos que la película de líquido distorsiona la respuesta del transductor al índice de refracción del medio externo. Esta distorsión es más pronunciada en el caso de los transductores miniatura, como los utilizados en los sensores refractométricos de fibra óptica.

Descriptores: Índice de refracción; refractometría; sensores de fibra óptica.

PACS: 42.81 Pa; 42.81 Wg

1. Introduction

In recent years, fiber-optical refractometric sensors have proven their utility in laboratory experiments and in industrial conditions [1-3] because of their small size, immunity to electromagnetic interference, ability to work in hazardous media, etc. The fiber-optical refractometric sensors are used:

- 1) for the refractive index measurement of fluids, and
- 2) for liquid level measurement [4].

However, any contamination of the optical detection element's surface can distort the sensor's response to the refractive index of the surrounding medium. Among all possible types of contamination, the presence of a residual film of liquid on the sensor's surface is the most common case. There is a large variety of liquid substances that can contaminate the optical detection element's surface during the exploitation of the sensor. Also, the quantity of liquid on the element's surface may be different and it can form different geometrical shapes. Because of this, the analysis of the effect of the contaminating liquid film on the sensor's response presents a complex non-trivial problem.

In this work, we analyze the effect of the residual liquid film, of different shapes and thicknesses covering the optical detection element's surface, on the performance of the refractometric sensor. The present study is restricted to the case of the hemispherical fiber-optical refractometric detection elements described in our previous works [4,5]. The refractometric sensors of this type have already found a variety of important applications in scientific research and industry.

2. Sensor description

We considered a refractometric transducer composed of a hemispherical solid transparent dielectric detection element and a pair of step-index multimode optical fibers (Fig. 1) that connect the detection element with the remote light source and the photometer (not shown in Fig. 1) [4,5]. The two optical fibers are coupled due to the internal reflection of light at the element's hemispherical surface when the element is in the air. The optical transmission of the element depends on the refractive index of the surrounding medium n and thus serves to access this quantity. In order to exclude the intrinsic

optical loss in the detection element, the transducer's relative transmission $T^*(n)$ is employed:

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

T_{air} , I_{2air} are the transducer's transmission and the output light intensity respectively when the surrounding medium is the air [5]. For the case of a clean transducer surface (no contaminating liquid film on it), the behavior of T_{air} and $T^*(n)$ under different combinations of the transducer parameters is studied in detail in Ref. 5.

The liquid film that remains on the detection element surface after it has been in contact with a liquid has the shape of a drop, which may have a different volume and form. The refractive index of the liquid n_f may be rather close to that of the optical detection element n_e . In this case, the internal reflection may take place mainly on the liquid film surface and not on the glass surface. This leads to the distortion of the transducer's transmission in the air T_{air} , which is important for the transducer calibration and derivation of $T^*(n)$ in accordance with (1).

The particular parameters of the liquid film depend on the liquid viscosity, wetting, and detection element orientation in space. In this work, we have considered three principal cases of the detection element position as shown in Fig. 2. We assumed that the spatial form of the liquid film was an ellipsoid in the cases (d) and (f), and a symmetrical paraboloid in case (b). The parameter that we changed was the liquid drop's dimensionless height H in the case of the vertical "down" position of the detection element (Fig. 2b), the liquid drop's dimensionless radius R in the case of the vertical "up" position of the detection element (Fig. 2d), and the liquid drop's dimensionless radius R and height H in the case of the horizontal sideways position of the detection element (Fig. 2f).

3. Results

We calculated T_{air} and $T^*(n)$ by means of numerical ray-tracing, employing a specially developed computer program. The data were obtained under the following parameters: a

symmetric position of the two identical step-index multimode optical fibers at a dimensionless distance $\Lambda=0.707R$ with respect to the transducer axis, the detection element radius $R = 1$; the fiber core radius $r = 0.05$; the optical fiber numerical aperture in the air $NA = 0.2$; the refractive index of the fiber core is equal to that of the detection element $n_e = 1.55$. We employed these parameters because they were used in Ref. 5. In the present work, we assumed the refractive index of a liquid n_f equal to that of the optical detection element n_e : $n_f = n_e = 1.55$.

The detection element oriented vertical down.

The paraboloidal detection elements of Figs. 3b and 3c are represented by the equations $z = 0.714x^2 + 0.714y^2 - 1.5$ and $z = 0.714x^2 + 0.714y^2 - 2$ respectively. The results of the numerical ray-tracing are shown in Fig. 3, a-c. One can see in Fig. 3 that, in spite of the change in form and size of the element's surface due to the formation of the drop of liquid on it (from a to b and then c), there exists a sufficiently good coupling between the transmitting and receiving optical

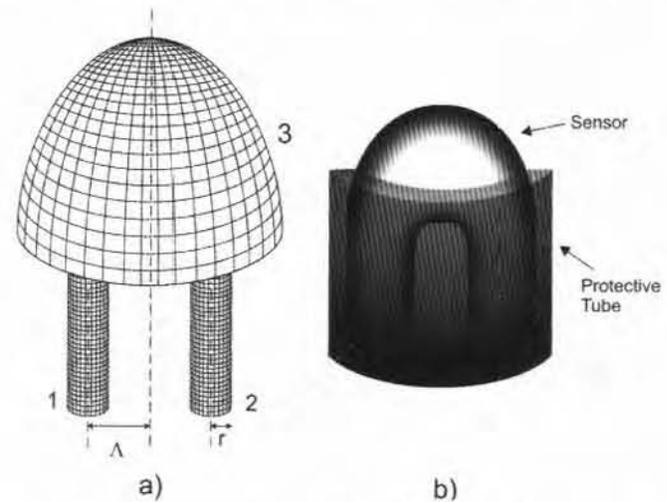


FIGURE 1. Generic refractometric transducer with hemispherical optical detection element (a); the refractometric transducer in the protective tubular housing (b).

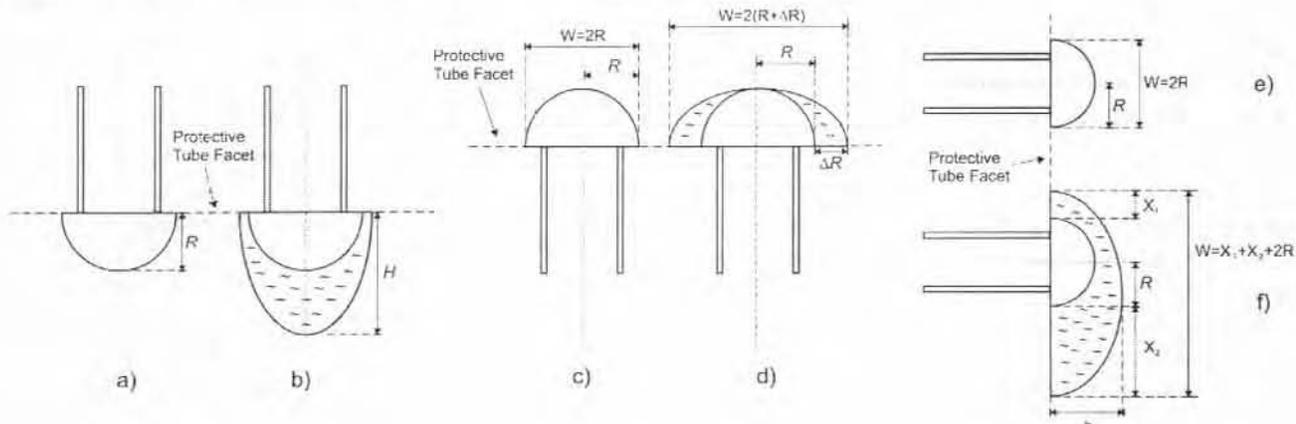


FIGURE 2. Different positions of the refractometric transducer and the resulting shape of the residual liquid film on its surface: vertical down position (a,b); vertical up position (c,d); horizontal sideways position (e,f).

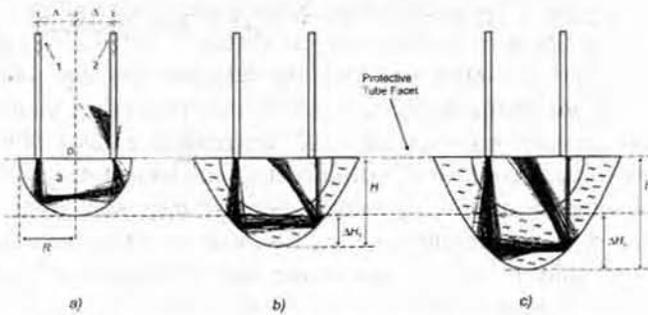


FIGURE 3. Light propagation in the refractometric transducer in the case of vertical down position, in the air: clean transducer surface (a); relatively small drop of liquid stuck to the surface (b); large drop of liquid stuck to the surface (c).

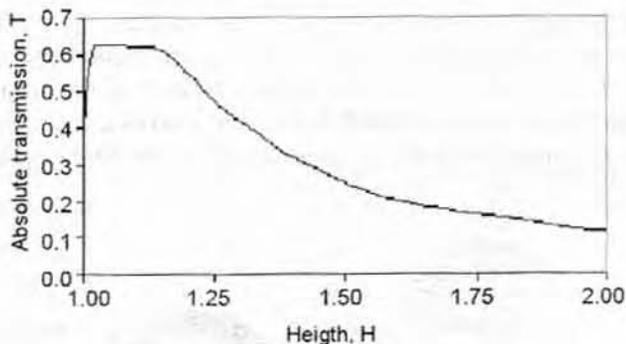


FIGURE 4. Transducer transmission in the air T_{air} versus detection element's dimensionless effective height H .

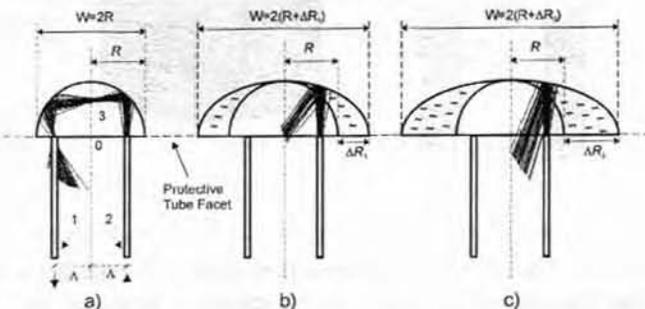


FIGURE 5. Light propagation in the refractometric transducer in the case of the vertical up position, in the air: clean transducer surface (a); small amount of liquid stuck to the surface (b); relatively large amount of liquid stuck to the transducer surface (c)

fibers. This is due to the fact that with the increase in the liquid drop volume, it extends mainly downwards (the height of the paraboloid H increases). The element's resulting surface curvature and local radius do not experience a drastic change in the regions where the optical beam is reflected internally. In addition, the incidence angle increases at some reflection points. Altogether, this contributes to an increase in the optical beam diameter, which in turn makes the coupling between the two optical fibers less critical to the deviations of the detection element surface from its ideal hemispherical shape. The quantitative data on the effect of the height H on T_{air} are plotted in Fig. 4. One can see that for the in-

terval $1 < H < 1.3$, the absolute transmission T increases, due to a better coupling of the optical fibers. For $H < 1.3$, T decreases monotonically with the increase in H reaching $T \approx 0.12$ at $H = 2$.

The detection element oriented vertical up.

The equations that describe the ellipsoids of Figs. 5 b, c are:

$$\frac{1}{2.25}x^2 + 1y^2 + 1z^2 = 1 \quad (2)$$

and

$$\frac{1}{4}x^2 + 1y^2 + 1z^2 = 1 \quad (3)$$

respectively. Unlike from the previous case, as shown in Fig. 5, the increase in the liquid drop size and volume results primarily in the increase in the drop's width $W = 2(R + \Delta R)$ and not its height H . The detection element surface becomes flatter, the incidence angle is reduced (Figs. 5b,c) with respect to the clean surface case (Fig. 5a), the optical beam becomes less divergent than in the case of the clean surface, and the number of serial internal reflections reduces to just one. These changes contribute to an abrupt decrease and then complete vanishing of the optical coupling of the transmitting and receiving fibers.

The detection element oriented horizontally sideways

The equations that describe the ellipsoid of Fig. 6b is:

$$\frac{1}{4}x^2 + 1y^2 + \frac{1}{2.25}z^2 = 1. \quad (4)$$

One can see in Fig. 6, that the effective surface of the detection element becomes flatter than the surface of the clean glass element. In addition, the whole effective surface is displaced downwards with respect to the element's axis. The combination of these two factors leads to an even more rapid decrease and the vanishing of the optical coupling in the transducer than the previous case of the vertical upwards orientation of the detection element. Quantitative analyses show

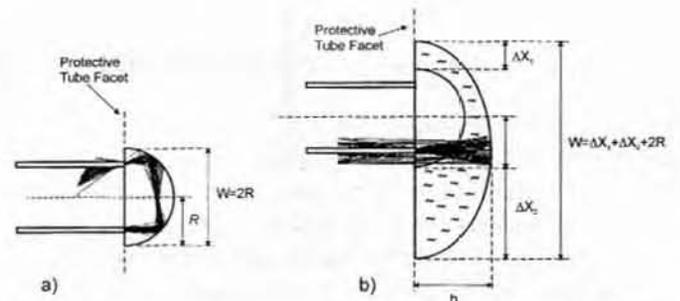


FIGURE 6. Light propagation in the refractometric transducer in the case of the horizontal sideways position, in the air: clean transducer surface (a); a drop of liquid stuck to the transducer surface (b).

that under the liquid drop's dimensionless radius R as small as $R=1.06$ and dimensionless height $H=1.5$, the optical coupling vanishes completely in the transducer.

The approach developed in this work permits one to determine the effect of the residual liquid film on the performance of various refractometric transducers and different geometrical parameters of optical detection elements, liquid films and material constants.

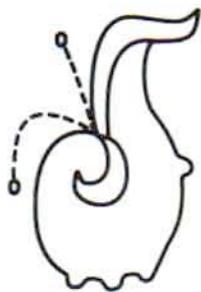
4. Conclusions

A residual liquid film on the surface of the hemispherical optical detection element of the fiber-optical refractometric

transducer can significantly alter the transducer response (its optical transmission) in the air, which is used for transducer calibration. The amount of the effect depends on the thickness of the liquid film, its shape, and on the spatial orientation of the transducer. The vertical downward orientation of the transducer secures the minimum effect of the residual liquid film. The horizontal sideways position is the worst one, because the distortions of the optical detection element surface are the most severe in this case. The effect of the residual liquid is more significant in the case of small-size detection elements, such as those employed in the fiber-optical refractometric sensors.

-
1. A. Cartelier, *Rev. Sci. Instrum.* **63** (1992) 5442.
 2. V. De León and S. Khotiaintsev, *Instrumentation and Development* **4** (1999) 31.
 3. V. Svirid, V. De León, and S. Khotiaintsev, *Institute of Electronics, Informatics and Communications Engineers (IEICE) Transactions on Electronics (Japan)* **E83-C** (2000) 303.
 4. K.E. Romo-Medrano *et al.*, *Multiplexed Optical Fiber System for Monitoring the Void Fraction Distribution in Fuel/Gas Centrifuge Separator of a Spacecraft*, Technical Digest, 16th International Conference on Optical Fiber Sensors Japan, The Institute of Electronics, Information and Communication Engineers (IEICE) (2003) 424.
 5. V. Svirid, S. Khotiaintsev, and P.L. Swart, *Optical Engineering* **42** (2003) 1383.

Suitability of the PLZTN 54/46 ceramic system for designing pulse-echo sensors, A. SUÁREZ-GÓMEZ, M.D. DURRUTHY, A. PELÁIZ-BARRANCO, F. CALDERÓN-PIÑAR, J. DE FRUTOS, AND J.M. SANIGER BLESÁ	36–38
The effect of Er ³⁺ doping on the physical properties of CdSe thin films deposited by chemical bath, R.B. LÓPEZ-FLORES, O. PORTILLO-MORENO, R. LOZADA-MORALES, R. PALOMINO-MERINO, M.A. HERNÁNDEZ ESPINOSA, N. KORNEEV ZABELLO, A.G. ROJAS HERNÁNDEZ, S.A. TOMAS, AND O. ZELAYA-ANGEL	39–41
Tin oxide micro/nano fibers from electrostatic deposition, Y. WANG, M. APONTE, N. LEÓN, I. RAMOS, R. FURLAN, N. PINTO, AND J.J. SANTIAGO-AVILÉS	42–44
Modelling the C-V characteristics of MOS capacitor on high resistivity silicon substrate for PIN photodetector applications, J.A. LUNA-LÓPEZ, M. ACEVES-MIJARES, OLEKSANDR MALIK, AND R. GLAENZER	45–47
Ciliary motion in PECVD silicon carbide and silicon oxynitride microstructures, G. REHDER AND M.N.P. CARREÑO	48–49
Design of a JFET and radiation PIN detector integrated on a high resistivity silicon substrate using a high temperature process, A.T. MEDEL DE GANTE, M. ACEVES-MIJARES, AND A. CERDEIRA ALTUZARRA	50–53
Optical sensitivity of Al/SRO/Si MOS diodes, Z. YU, M. ACEVES, AND J. CARRILLO	54–56
Large area P-I-N image sensitive devices deposited on plastic substrates, M. VIEIRA, P. LOURO, M. FERNANDES, AND R. SCHWARZ	57–60
An analysis of a displacement sensor based on optical fibers, V. SVYRYD, N.N. SOLIS OSORNO, AND MA.E. ENRÍQUEZ SALAZAR	61–63
Refractometric fiber-optical detectors of liquids: effect of residual liquid film, K.E. ROMO-MEDRANO, K.S. KHOTIAINTSEV, V. GARCÍA-GARDUÑO, AND S.N. KHOTIAINTSEV	64–67
Optical sensor for the quantification of monoclonal antibodies, B. RIQUELME, O. RUBIO, AND J. VALVERDE	68–71
Design of an optical-fiber refractometric transducer with hemispherical detection element, V. SVYRYD AND S. KHOTIAINTSEV	72–74
Refractometric sensors based on long period optical fiber gratings, I. FLORES LLAMAS, O. KOLOKOLTSEV, AND V. SVYRYD	75–78
A real-time colour and image processing p-i-n/p-i-n device with optical readout, M. VIEIRA, M. FERNANDES, P. LOURO, A. FANTONI, G. LAVAREDA, C.N. CARVALHO, AND Y. VYGRANENKO	79–82



REVISTA MEXICANA DE FÍSICA S

VOLUMEN 52
NUMERO 2
FEBRERO
2006

CONTENIDO/CONTENTS

Foreword	iii-iv
Bionanostructures and their integration into electrochemical sensing system. A review of DNA applications, A.MERKOÇI, M.DEL VALLE, AND S. ALEGRET	1-5
CO sensitivity of undoped-ZnO, Cr-ZnO and Cu-ZnO thin films obtained by spray pyrolysis, J.L. GONZÁLEZ-VIDAL, M. DE LA L. OLVERA, A. MALDONADO, A. REYES-BARRANCA, AND M. MELÉNDEZ-LIRA	6-10
Chemical sensitivity of Mo gate MOS capacitors, R.M. LOMBARDI AND R. ARAGÓN	11-13
SnO ₂ thick film gas sensors additivated with noble metal nanoparticles obtained by chemical synthesis, L.B. FRAIGI, A. WEINSTOCK, AND C.A. MOINA	14-16
Potentiometric behavior of graphite-epoxy electrochemical transducers towards anions, cations and pH in aqueous media, L.A. RODRÍGUEZ HUERTA, C.A. GALÁN-VIDAL, G.A. ÁLVAREZ ROMERO, AND M.E. PÁEZ-HERNÁNDEZ	17-19
Conductimetric Response linearity in γ' -Bi ₂ MoO ₆ , C.M.C. VERA AND R. ARAGÓN	20-22
Response enhancement of sprayed ZnO thin film-based NO ₂ sensor by indium-doping, R. FERRO, J. A. RODRÍGUEZ, P. BERTRAND, M. HENRY, AND C. POLEUNIS	23-25
Preliminary studies of PVC membranes based on 1-furoyl-3-phenylthiourea by impedance spectroscopy, O. ARIAS DE FUENTES, C. JIMENEZ, AND A. BRATOV	26-28
Highly porous tungsten-oxide-based films obtained by spray-gel for gas sensing applications, J.L. SOLIS, J. RODRIGUEZ, AND W. ESTRADA	29-31
Thin film sensors produced at low temperature: a trade-off between carbon composition and spectral response, P. LOURO, M. FERNANDES, AND M. VIEIRA	32-35

continuación/continued

ANEXO 3.

Artículo: An optical-fibre refractometric liquid-level sensor for liquid nitrogen

----- Original Message -----

From: "Sharon D'Souza" <mst@iop.org>

To: <kerm@itesm.mx>

Sent: Sunday, December 03, 2006 6:24 PM

Subject: Optical Fibre Sensors 17 (OFS-17) and MST

> Dear Professor Romo-Medrano

>

> I would like to thank you again for contributing to the invited special

> issue Optical Fibre Sensors 17 (OFS-17), published in May 2006 in

> Measurement Science and Technology (MST)

> (<http://www.iop.org/journals/mst>).

>

> I am delighted to let you know that your own contribution 'An

> optical-fibre refractometric liquid-level sensor for liquid nitrogen' has

> so far been downloaded 174 times.

>

> The Optical Fibre Sensors 17 (OFS-17) special issue represents a key

> contribution to the ongoing success of MST, which currently enjoys an

> Impact Factor of 1.079.

>

> We would be delighted to receive future research papers from you and your

> group and I hope that you will consider MST as your first choice journal.

> Please let us know if you have a paper which you would like us to consider

> for publication. We can usually make a decision within 2 months.

>

> Thank you once again for contributing to what is an excellent collection.

>

> With best regards,

>

> Sharon D'Souza

>

> Publisher

> Measurement Science and Technology

>

> To see the latest issue of MST, visit <http://www.iop.org/journals/mst>.

>

> *Data Protection*

> If you would prefer not to receive updates on our journals in future,

> please reply to this e-mail, entering the word 'Unsubscribe' in the body

> of your e-mail (please leave the subject line).

>

> IOP Publishing Limited is the data controller (data.protection@iop.org).

> We will take all reasonable measures to prevent unauthorised or unlawful

> processing.

>

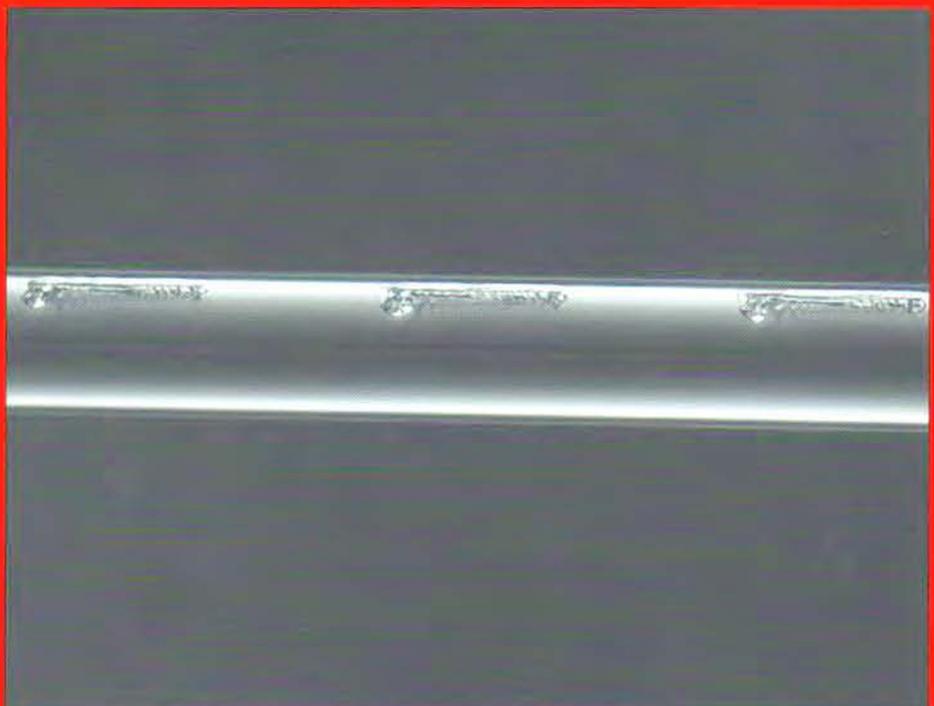
Measurement Science and Technology

Volume 17 Number 5 May 2006

Special issue: Optical Fibre Sensors 17 (OFS-17)

Guest Editors: R P Tatam and J D C Jones

Online www.iop.org/journals/mst



An optical-fibre refractometric liquid-level sensor for liquid nitrogen

Katya E Romo-Medrano¹ and Sergei N Khotiaintsev²

¹ Department of Electronic & Electrical Engineering, Mexico City Campus, Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey, DF, c.p. 14380, Mexico

² Faculty of Engineering, National Autonomous University of Mexico, CU, DF, c.p. 04510, Mexico

E-mail: kerm@itesm.mx and sergeikh@hotmail.com

Received 18 July 2005, in final form 22 September 2005

Published 7 April 2006

Online at stacks.iop.org/MST/17/998

Abstract

This paper presents a prototype optical-fibre refractometric liquid-level sensor which can access the static and dynamic levels of liquid nitrogen in large cryogenic systems. This version of the sensor is intended for use in various tests of cryogenic systems such as used in rocketry, during the design stage. The sensor employs a vertical linear array of 140 highly sensitive optical-fibre refractometric transducers. The liquid-level measurement range is 1.6 m with a resolution of up to 5 mm. The optical transducers are multiplexed using a matrix-type optical-fibre network which employs a robust level tracking algorithm. This type of sensor can be used for measuring the level of other cryogenic liquids such as liquid hydrogen.

Keywords: liquid-level measurement, optical-fibre sensors, liquid nitrogen, liquid hydrogen, cryogenic liquids, cryogenic propellants, aviation, rocketry, space technology

1. Introduction

The advantages of optical-fibre sensors, as compared to traditional sensors, are very pronounced under some extreme environmental conditions. Traditional sensors will not withstand conditions such as very high temperatures, very low temperatures, high pressure, harsh ionizing radiation environment, etc [1–5]. Equipment which operates under such extreme environmental conditions often requires that certain parameters are monitored [6–8]. Cryogenic fluids such as liquid nitrogen, liquid oxygen, liquid hydrogen and liquid helium are finding more applications in industry, aviation, space technology and scientific research [9–12]. This leads to a great deal of research and development work being carried out on various large-scale cryogenic systems [12–15].

One area of research is in the science of rocketry. The dynamic behaviour of cryogenic liquids in large cryogenic

with a great deal of useful information. However, it is difficult to satisfy the operational needs of the users for the following reasons:

- (1) The required measurement range of the level may be relatively large, up to several tens of metres [19].
- (2) The required resolution of the level may be as small as a fraction of a millimetre [20].
- (3) The rate of change of the liquid level may be of the order of several metres per second. This requires a fast response time of the liquid-level sensor and this characteristic is difficult to find in existing sensors [20].

Other authors have proposed various optical-fibre liquid-level sensors for use with liquids at normal [21] and cryogenic [22] temperature. In our previous works [23, 24] we described the optical-fibre transducer and in [25] we described a complete optical-fibre system for measuring the level of liquids at conventional temperature. However, measuring the

1.205 (at $\lambda = 0.589$ nm and $T = 4.16$ K) [26], the refractive index of liquid helium (LHe) is 1.0245 (at $\lambda = 0.546$ nm and $T = 83$ K) [27] and the refractive indices of other cryogenic liquids fall between these two values [27]. The small refractive index of these liquids makes it difficult to discriminate between the cryogenic liquid and any gas which may cover the liquid such as in a flask, tank or pipe.

- (2) The surface of the optical transducer can be covered by a residual film of liquid which can distort the transducer performance [28, 29].
- (3) The cryogenic environment presents many special factors and challenges which have to be taken into account in the design of the sensor. These include (a) the choice of suitable materials, (b) the provisions for reducing heat ingress into the cryogenic system, (c) the measures required for the hermetical sealing of joints, etc [9–12, 16].

Following is the description of the novel optical-fibre liquid-level sensor for liquid nitrogen and its essential elements.

2. Sensor description

The sensor described in this work is designed to access the level of liquid nitrogen. Liquid nitrogen is non-toxic, non-flammable and a relatively cheap cryogenic liquid [9]. For these reasons, liquid nitrogen is widely used for testing cryogenic devices and installations. There are many other uses for liquid nitrogen such as at launching sites and test sites [14–16].

We developed a prototype device for measuring fast changes of the cryogen level. Specifically, the sensor is designed for use in a damping tank whose function is to suppress unwanted oscillations of pressure and liquid flow in other elements of a large cryogenic system during the filling and emptying of large tanks.

The sensor is a discrete array type device. It employs the optical-fibre refractometric transducers described in detail in the next section. The distinctive features of this sensor are as follows:

- (1) A relatively large measurement range of 1.6 m.
- (2) A high resolution of 5 mm in the central 400 mm region (this corresponds to 25% of the total active length) and a resolution of 20 mm in the upper and lower regions.
- (3) A fast response time which is sufficient to measure the level that changes at a rate of up to 1 m s^{-1} .

A higher resolution is used in the central 400 mm region because, on average, the tank is expected to be half full of cryogen during system operation. Also, the dynamic behaviour of the cryogen level in the vicinity of its average level is of particular interest to development engineers because it allows the evaluation of the damping device. In contrast, the use of higher steps between the transducers in different regions allows a reduction in the number of transducers in the array.

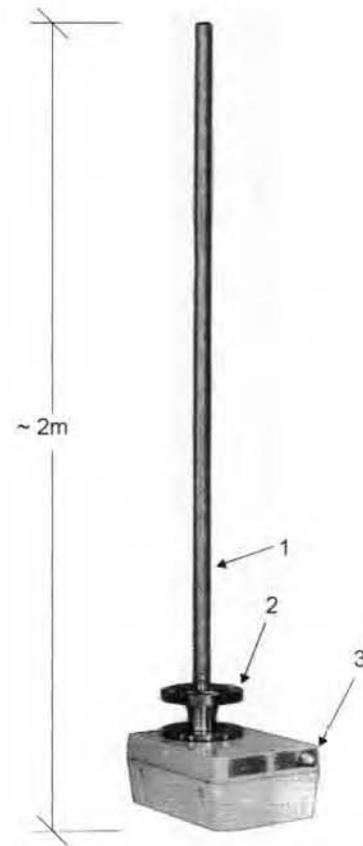


Figure 1. The prototype optical-fibre liquid-level sensor for liquid nitrogen: 1—tubular probe accommodating the transducer array, 2—gas-tight coupling, 3—electronic unit. The sensor is shown in its normal operational position as mounted on a flange in the bottom part of a tank.

The sensor features an array of 140 optical-fibre transducers placed over the length of the probe (1). The probe is made of stainless steel and has an external diameter of 32 mm. The optical-fibre transducers are integrated with an optical-fibre network. The optical fibres extend through the gas-tight coupling (2) and up to the electronic unit (3). The electronic unit accommodates the optical transmitters and receivers and the control circuits. An optical-fibre link connects the sensor output to the remote control and display unit (figure 3). Electrical cables power the sensor from the remote low-voltage power supply. The probe (1) and the electronic unit (3) are hermetically sealed. The probe can withstand the maximum excess pressure of 50 atm (5 MPa). The sensor meets the specifications for operating in a flammable or explosive environment. The sensor will not cause electrical sparks, fire or explosion under normal or fault conditions. Generally, this condition is a requirement in aviation, rocketry and in many industrial applications.

The novel features of this sensor include the following:

- (1) Small-size point optical-fibre transducers that are used as detectors of the liquid. These transducers have the sensitivity to discriminate between liquid nitrogen and

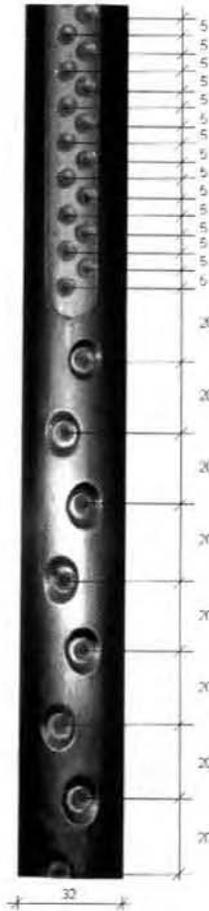


Figure 2. The central part of the tubular probe showing regions with different steps between the point optical fibre transducers.



Figure 3. Remote control and display unit of the liquid-level sensor.

(3) A fast and robust level-tracking operational algorithm (see section 6).

A description of how these elements contribute to the sensor performance characteristics follows.

3. The optical-fibre refractometric transducer for liquid nitrogen

A distinctive feature of liquid nitrogen is a small refractive index ($n_{LN_2} \approx 1.2$). Due to this small refractive index, a refractometric transducer with a step-like optical response to a change in the surrounding medium from liquid nitrogen to gas and vice versa [23] is required for reliable discrimination between the liquid nitrogen and the gas (see measurement

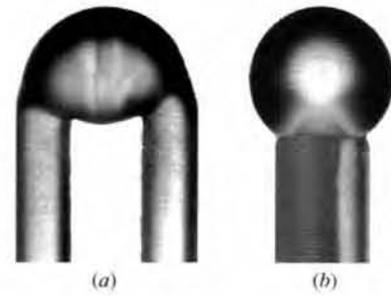


Figure 4. Photograph of the optical-fibre refractometric transducer for liquid nitrogen: (a) front view, (b) side view.

[23], by its *relative transmission*:

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

where $T(n) = I_2(n)/I_1$, I_1 is the intensity of the transducer input light, $I_2(n)$ is the light intensity at the transducer output and T_{air} and $I_{2\text{air}}$ are the transducer optical transmission and the output light intensity when the surrounding medium is air, respectively.

In the present application, the step of the function $T^*(n)$ has to be in the interval of $n = 1.0\text{--}1.2$. According to theoretical predictions, the hemispherical optical-fibre refractometric transducer described in our previous work [23] features the step of the relative transmission function in the necessary interval of n . Such a transducer (figure 4) is composed of a small-size optical refractometric detection element together with a pair of multimode optical fibres that connect the detection element with the optical transmitter and the optical receiver. The two fibres are coupled optically due to the total internal reflection of the light at the detection element's curved surface when the element is in a gas. In our case, when non-polarized light is used, the reflection coefficient is in accordance with the Fresnel formulae [30]:

$$R = [R_p + R_s]/2, \quad (2)$$

$$R_p = \left\{ \frac{[(n_2/n_1)^2 \cos \alpha - \sqrt{(n_2/n_1)^2 - \sin^2 \alpha}]}{[(n_2/n_1)^2 \cos \alpha + \sqrt{(n_2/n_1)^2 - \sin^2 \alpha}]} \right\}^2 \quad \text{for } \alpha < \alpha_c,$$

and $R_p = 1$ for $\alpha > \alpha_c$;

$$R_s = \left\{ \frac{[\cos \alpha - \sqrt{(n_2/n_1)^2 - \sin^2 \alpha}]}{[\cos \alpha + \sqrt{(n_2/n_1)^2 - \sin^2 \alpha}]} \right\}^2 \quad \text{for } \alpha < \alpha_c$$

and $R_s = 1$ for $\alpha > \alpha_c$; n_1, n_2 are the refractive indices of the detection element material and the external medium, respectively; α is the incidence angle and α_c is the critical angle, $\alpha_c = \arcsin(n_2/n_1)$.

In accordance with these formulae, when the detection element is immersed in a liquid, the internal reflection becomes smaller. It almost disappears when the refractive index of the liquid approaches the index of the detection element material. The difference in the internal reflectivity of the detection element surface when it is in a gas as compared to when it is in a liquid allows the detection element to discriminate between a liquid and a gas.

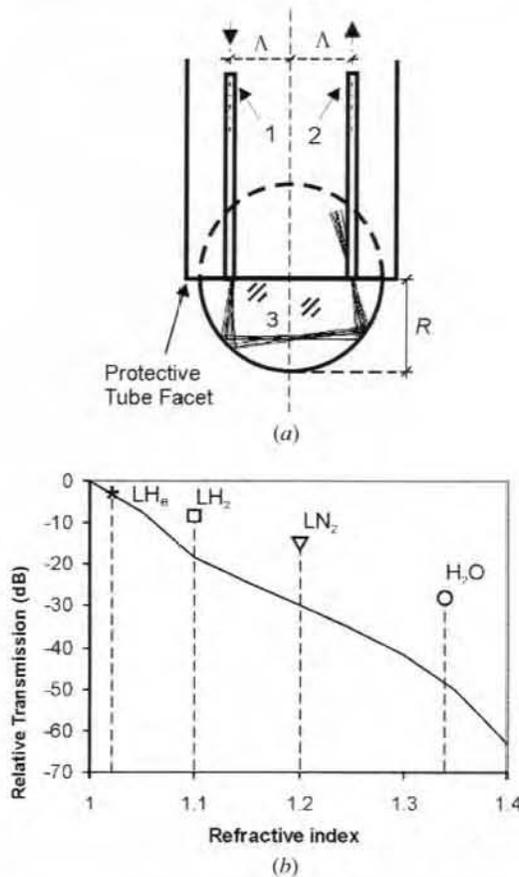


Figure 5. (a) The theoretical model of the optical-fibre refractometric transducer: 1, 2—the input and output optical fibres, respectively, 3—the transparent dielectric detection element. (b) Predicted (solid line) and experimentally obtained transducer's relative transmission $T^*(n)$ for water (\circ), liquid nitrogen (∇), liquid hydrogen (\square) and liquid helium ($*$).

4. Optical response of the transducer to different cryogenic fluids

We accessed the transducer's optical response (its relative transmission $T^*(n)$) by numerical modelling and also experimentally.

We assumed during modelling that the transducer shown in figure 4 comprises two identical step-index multimode optical fibres (see figure 5(a)). These fibres are connected to the flat surface of the detection element at a dimensionless distance $L = 0.707R$ with respect to the transducer's longitudinal axis z , where R is the detection element radius ($R = 1$); the optical-fibre core radius $r = 0.005R$; the optical-fibre numerical aperture in air $NA = 0.2$; the refractive index of the optical-fibre core n_c is equal to that of the detection element $n_1 = 1.45$. We employed these parameters because they were used in our previous work [24]. We assumed the excitation of the input optical fibre (1) by the light emitting diode (LED). We assumed the measurement of the transmitted light intensity at the output optical-fibre (2) exit by a photometer.

We accessed the transducer's relative transmission $T^* = f(n)$ by means of numerical ray-tracing employing a specially developed mathematical model of the transducer and the

point (or serial incidence points) on the element's surface was calculated. Next the reflection coefficient was calculated for each ray at each incidence point according to the Fresnel formulae (2).

The integral reflection coefficient for each ray was calculated as the product of the partial reflection coefficients at each incidence point. Next the fraction of light that reached the receiving optical-fibre aperture and was coupled to the optical-fibre core was calculated, and then the relative transmission function $T^*(n)$ was found. The calculated light trajectories in the transducer are plotted in figure 5(a); the function $T^*(n)$ is plotted in figure 5(b) with a solid line.

Experimentally, we measured the transducer's transmission in air and in the following liquids: water at normal temperature, liquid nitrogen, liquid hydrogen and liquid helium.

The relative transmission T^* for water and the cryogenic liquids listed above was obtained experimentally and is plotted in figure 5(b). Figure 5(b) shows that the observed response of the transducer to the change in the surrounding medium from gas to the liquid nitrogen is of the order of 16 dB. This is approximately 10 dB less than that of the predicted response. For cryogenic liquids with a smaller refractive index the difference between the observed and predicted behaviour is smaller. We attribute the difference in the observed and predicted response of the transducer to possible deviations of the factual transducer's geometry from the ideal shape that was used in the modelling.

Nevertheless, the transducer's observed response to the liquid nitrogen is sufficiently large for practical purposes. This transducer was therefore used in the current liquid-level sensor for liquid nitrogen.

5. The effect of a film of liquid of different shape and size on the detection element surface

A residual film of a transparent liquid covering the transducer effectively enlarges the transducer and simultaneously distorts the shape of its working surface. Therefore, this residual liquid film can decrease the optical transmission in the transducer when it is in a gas (in air). This can result in an erroneous reading which may correspond to that of a 'liquid', when in fact the transducer is located in a gas or in air. Thus, the residual liquid film on the detection element surface may prevent the reliable discrimination between a gas and a liquid.

The effect of the residual liquid film covering the detection element surface was investigated using numerical modelling of light propagation in the detection element having residual liquid film on its surface. We studied the effect of the liquid film and different forms and thicknesses under different spatial orientations of the transducer in the sensor as shown in figure 6. We used the same transducer geometry as described in section 4.

For the purpose of numerical modelling, we assumed that the residual liquid film has a second-order surface. In its

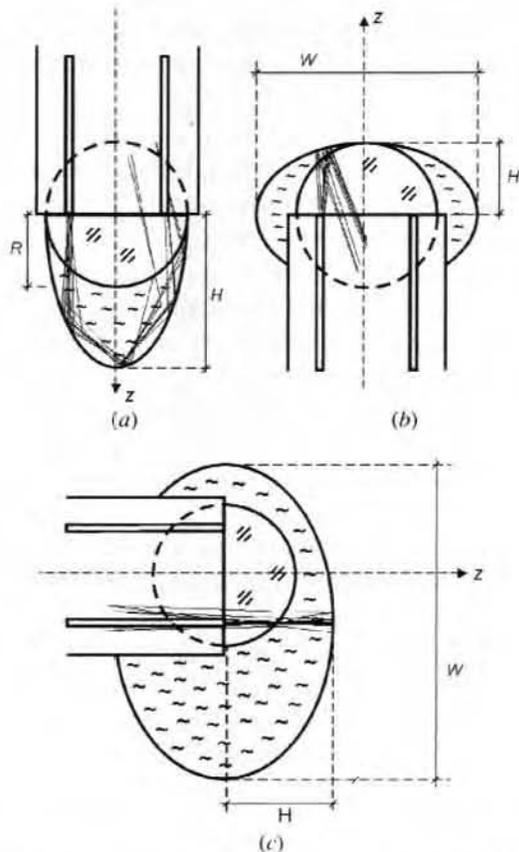


Figure 6. Distortion of the detection element surface by a residual liquid film, for different spatial orientations of the transducer in a sensor, and the results of the ray-tracing: (a) vertical down position, (b) vertical up position and (c) horizontal sideways position of the transducer.

in space, as shown in figure 6. One can see in this figure that the distortions of the effective transducer surface are of a different character under the three transducer positions that were analysed: *a*, *b* and *c*.

In case (*a*) with the transducer in the vertical down position, the shape of the liquid film was approximated by the paraboloidal surface represented by the equation $z = 1.85x^2 + 1.85y^2 - 2$.

In case (*b*) with the transducer in the vertical up position, the liquid film surface is close to an ellipsoid. It was described by the equation $0.45x^2 + y^2 + z^2 = 1$.

In case (*c*) with the transducer in the horizontal sideways position, the liquid film surface was described by the equation $0.25x^2 + y^2 + 0.45z^2 = 1$.

The results of ray-tracing corresponding to the case of $n_1 = n_2 = 1.45$ are shown in figure 6. One can see in this figure that, in all three cases (*a*), (*b*) and (*c*), the light propagation pattern is significantly different from the one corresponding to the clean transducer surface shown in figure 5. However, the alteration of the light propagation pattern, its effect on the optical coupling in the transducer and the alteration of the transducer's optical transmission are different for different positions of the transducer.

In case (*a*), in spite of the increase in the effective height H of the detection element, a sufficiently good optical coupling

In case (*b*), the residual liquid film on the element's surface causes an increase of the detection element effective width W but does not change the height H . Therefore, the effective surface of the detection element becomes flatter and the angle of incidence of light on the surface is less when compared with a detection element with no residual film on its surface. These changes contribute to a sharp decrease in the optical coupling in the transducer as the liquid film thickness and volume increase.

In case (*c*), the detection element's effective surface also becomes flatter, but in addition to this, the complete surface is displaced downwards when compared to the detection element with no residual film on its surface. The combined effect of these two factors leads to a very fast decrease in the optical coupling in the transducer as the liquid film thickness and volume increase.

Thus, the results of our simulation showed that the vertical downward orientation of the detection element in the sensor reduces the negative effect of residual liquid film on the transducer surface when compared to the horizontal and vertical upward positions. These theoretical results will be verified experimentally and then they will be used in the next versions of the level sensor.

6. Multiplexed optical-fibre network and level tracking operational algorithm

We employed the matrix-type multiplexing scheme described in our previous work [24]. The main advantage of the matrix-type multiplexing scheme consists in a significant reduction in the number of elements (optical transmitters and optical receivers) required for the interrogation of large sensor arrays.

Differently from [24], we employed a non-symmetric matrix of 10 optical transmitters and 14 optical receivers in the present sensor. We employed GaAs LEDs as the optical sources. Each LED of the optical transmitter was coupled to a group of 14 optical fibres, which were in turn coupled to 14 optical refractometric transducers. The transducers' outputs were arranged in groups of 10 and these groups were coupled to different optical receivers in such a way that each particular transmitter–receiver combination corresponded to one particular refractometric transducer. The interrogation of any particular refractometric transducer was performed by activation of the corresponding transmitter–receiver pair. Figure 7 illustrates the optical receiver module of the current liquid-level sensor.

The multiplexed optical refractometric transducers were interrogated under the level tracking algorithm. The aim of the level-tracking algorithm is to eliminate information redundancy which exists under the parallel or sequential interrogation of all transducers of the array.

In the discrete array type liquid level sensor only one transducer provides information about the liquid level at any given time: the lowest non-immersed transducer of the array. Therefore, level tracking is the sequential interrogation of the lowest non-immersed transducer of the array and the

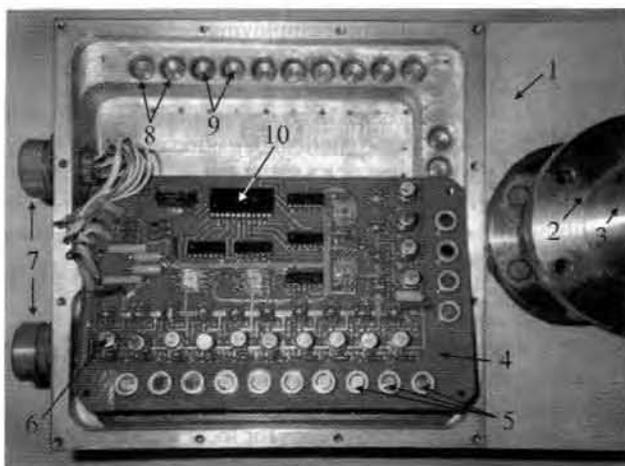


Figure 7. The optical receiver module, shown in an inverted position before its installation in the electronic unit of the level sensor: 1—electronic unit body, 2—sensor mounting flange, 3—sensor tubular probe, 4—optical receiver board, 5—photo detectors, 6—operational amplifiers, 7—cable connectors, 8—photo detector sockets, 9—optical fibre sockets, 10—receiver integrated circuits.

with this transducer and the interrogation switches to this and to the next lower transducer. If the liquid level rises the upper transducer of the current pair becomes immersed in liquid and its optical transmission decreases. Interrogation now shifts by one transducer upwards until a transducer with high optical transmission is encountered. This transducer is now associated with the new level of liquid. Therefore, under the level tracking algorithm only two transducers of the array are interrogated sequentially at any one time interval. This leads to very fast detection of changes in liquid level.

One very important property of this sensor is that its performance is practically not affected by the failure of one or even several transducers of the array. Of all possible failures, the most probable failure would be the breaking of an optical fibre. This would result in a decrease in the optical transmission of the corresponding transducer. However, since the level of the liquid is associated with the lowest transducer in the array which features a high optical transmission, the breaking of the optical fibre would not lead to a complete sensor failure but would increase the error in the determination of the liquid level in the vicinity of the faulty transducer. For large arrays, the effect of such an error would be negligible.

The level tracking algorithm that was used required only minor modifications in order to function normally with some faulty transducers. The modification required the interrogation of several additional transducers of the array. This measure also allowed the ability to some degree to ignore false signals caused by the boil-off in the cryogenic liquid.

The level-tracking was complemented with a periodic interrogation of all transducers of the array.

The combination of all the technical solutions described here contributed to sensor simplicity, robustness, reduced cost and increased lifetime.

7. Conclusions

cryogenic systems. It has a large level measurement range, high level of resolution and will detect fast changes in the cryogen level. The field tests demonstrated sufficiently good and robust performance of the sensor. The prototype device that was developed successfully measured the level of liquid nitrogen in tanks and in other elements of cryogenic systems during various operational cycles.

Acknowledgments

The authors acknowledge the support of the National Autonomous University of Mexico (UNAM), in particular, the support of the Faculty of Engineering and the research grants provided by the General Directorate of the Academic Personnel (DGAPA). The authors also acknowledge Victor Cabrera and Nick Boris for useful suggestions to the manuscript. KRM acknowledges the support of the Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey, Mexico City Campus.

References

- [1] Bosselman T 2005 Innovative applications of fibre-optic sensors in energy and transportation *Proc. SPIE* **5855** 188–93
- [2] Fernandez A F, Gusarov A I, Brichard B, Bodart S, Lammens K, Berghmans F, Decreton M C, Megret P, Blondel M and Delchambre A 2002 Temperature monitoring of nuclear reactor cores with multiplexed fiber Bragg grating sensors *Opt. Eng.* **41** 1246–54
- [3] Henschel H, Körfer M, Kuhnenn J, Weinand U and Wulf F 2004 Fibre optic radiation sensor system for particle accelerators *Nucl. Instrum. Methods in Phys. Res. A* **526** 537–50
- [4] Dewynter V, Rougeault S, Boussoir J, Rousselto N and Ferdinand P 2005 Instrumentation of borehole with fiber Bragg grating thermal probes: study of the geotechnic behaviour of rocks *Proc. SPIE* **5855** 1016–9
- [5] Legge T F H, Swart P, Van Zyl G and Chitchebakov A 2005 Development of a fibre-optic stress cell for geotechnical applications *Proc. SPIE* **5855** 743–6
- [6] Ecke W, Latka I, Willsch R, Reutlinger A and Graue R 2001 Fibre optic sensor network for spacecraft health monitoring *Meas. Sci. Technol.* **12** 974–80
- [7] Mizutani T, Hayashi K, Okabe Y and Takeda N 2003 Strain monitoring of a composite LH2 tank for a reusable rocket vehicle using an onboard FBG demodulator *Technical Digest, 16th Int. Conf. on Optical Fiber Sensors* (Japan: IEICE) pp 440–43
- [8] Romo-Medrano K E, Khotiaintsev S and Garcia-Garduno V 2004 Optical fibre sensor system for monitoring the performance of the gas-propellant centrifuge separator of a spacecraft *Meas. Sci. Technol.* **15** 1568–75
- [9] Scott R B 1959 *Cryogenic Engineering* (Princeton, NJ: Van Nostrand)
- [10] Bell J H 1963 *Cryogenic Engineering* (Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall)
- [11] Adelberg M et al 1963 *Cryogenic Technology* ed R W Vance (New York: Wiley)
- [12] Scurlock R G (ed) 1992 *History and Origins of Cryogenics* (Oxford: Clarendon)

- [15] Brickwedde F G, Hammel E F and Keller W E 1992 The history of cryogenics in the USA. Part I Cryoengineering *History and Origins of Cryogenics* ed R G Scurlock (Oxford: Clarendon)
- [16] Sutton G P 2001 *Rocket Propulsion Elements: An Introduction to the Engineering of Rockets* 7th edn (New York: Wiley)
- [17] Flachbart R H, Hedayar A and Holt K A 2002 Modeling and test data analysis of a tank rapid chill and fill system for the advanced shuttle upper stage (ASUS) concept *Adv. Cryogenic Eng.* **47** 1284–91
- [18] Zhang L, Lin W S, Lu X S and Gu A Z 2004 Geysering inhibiting research for single feeding line in cryogenic propellant transfer system *Cryogenics* **44** 643–8
- [19] Haberbush M 2002 Ultra-light flexible temperature and liquid level sensing probe for cryogenic propellant mass gauging systems *Adv. Cryogenic Eng.* **47** 1292–9
- [20] Karunanithi R, Jacob S and Kasthuriangan S 2000 Development of discrete array type fluid level indicator for cryogenic fluids *Adv. Cryogenic Eng.* **48** 1803–08
- [21] Dakin J and Culshaw B 1997 *Optical Fibre Sensors* 4 (Boston, MA: Artech House)
- [22] Yang C, Chen S and Kazemi A A 2001 Fibre-optical liquid level sensor under cryogenic environment *Proc. SPIE* **4204** 206–15
- [23] Svirid V, Khotiaintsev S and Swart P 2002 Novel optical-fibre refractometric transducer employing hemispherical detection element *Opt. Eng.* **41** 779–87
- [24] Svirid V, Khotiaintsev S and Swart P 2003 Linear and step-like characteristics in an optical fibre refractometric transducer with hemispherical detection element *Opt. Eng.* **42** 1383–9
- [25] Svirid V, De Leon V and Khotiaintsev S 2000 A prototype fibre-optic discrete level-sensor for liquid propane–butane *IEICE Trans. Electron.* **83** 303–8
- [26] *Smithsonian Physical Tables* 9th revised edn 1954 *Smithsonian Miscellaneous Collection* vol 120 (Washington, DC: Smithsonian Institution)
- [27] Lide D R (ed) 2000 *CRC Handbook of Chemistry and Physics* (Boca Raton, FL: CRC Press)
- [28] Cartelier A 1990 Optical probes for local void fraction measurements: characterisation of performance *Rev. Sci. Instrum.* **61** 874–85
- [29] Cartelier A 1992 Simultaneous void fraction measurement, bubble velocity and size estimate using a single optical probe in gas–liquid two-phase flows *Rev. Sci. Instrum.* **63** 5442–53
- [30] Born M and Wolf E 1965 *Principles of Optics* 4th edn (Oxford: Pergamon)

Measurement Science and Technology

Volume 17

Number 5

May 2006

SPECIAL ISSUE: OPTICAL FIBRE SENSORS 17 (OFS-17)

EDITORIAL

Optical Fibre Sensors 17 (OFS-17)

R P Tatam and J D C Jones

PAPERS

- 943 **Milling micro-structures using focused ion beams and its application to photonic components**
P M Nellen and R Brönnimann
- 949 **Tailoring the temperature and strain coefficients of Type I and Type IA dual grating sensors—the impact of hydrogenation conditions**
K Kalli, A G Simpson, K Zhou, L Zhang and I Bennion
- 955 **Effect of photobleaching on radiation-induced transmission loss of fused-silica-core optical fibres under gamma-ray and 14 MeV neutron irradiation**
K Toh, T Shikama, S Nagata, B Tsuchiya, M Yamauchi and T Nishitani
- 960 **Long-period gratings in a standard telecom fibre fabricated by high-intensity femtosecond UV and near-UV laser pulses**
D N Nikogosyan
- 968 **Spectral modification of type IA fibre Bragg gratings by high-power near-infrared lasers**
K Kalli, A G Simpson, K Zhou, L Zhang, D Birkin, T Ellingham and I Bennion
- 975 **Nitrogen-doped silica-core fibres for Bragg grating sensors operating at elevated temperatures**
O V Butov, E M Dianov and K M Golant
- 980 **Single and low order mode interrogation of a multimode sapphire fibre Bragg grating sensor with tapered fibres**
D Grobnic, S J Mihailov, H Ding, F Bilodeau and C W Smelser
- 985 **Influence of temperature and electrical fields on propagation properties of photonic liquid-crystal fibres**
T R Wolinski, K Szaniawska, S Ertman, P Lesiak, A W Domanski, R Dabrowski, E Nowinowski-Kruszelnicki and J Wojcik
- 992 **Fibre Bragg grating photowriting in microstructured optical fibres for refractive index measurement**
M C Phan Huy, G Laffont, Y Frignac, V Dewynter-Marty, P Ferdinand, P Roy, J-M Blondy, D Pagnoux, W Blanc and B Dussardier
- 998 **An optical-fibre refractometric liquid-level sensor for liquid nitrogen**
K E Romo-Medrano and S N Khotiaintsev
- 1005 **Achievement of broadband uniform modal birefringence in an index-guiding holey fibre using a novel circular hollow ring defect structure**
S Kim, Y Jung and K Oh
- 1009 **Long-term thermal stability tests at 1000 °C of silica fibre Bragg gratings made with ultrafast laser radiation**
D Grobnic, C W Smelser, S J Mihailov and R B Walker
- 1014 **Broadband spectrally flat and high power density light source for fibre sensing purposes**
S Martin-Lopez, M Gonzalez-Herraez, A Carrasco-Sanz, F Vanholsbeeck, S Coen, H Fernandez, J Solis, P Corredera and M L Hernanz
- 1020 **A depolarized Er-doped superfluorescent fibre source with a 3-section Lyot fibre depolarizer**
M Matar, I M Bassett, J H Haywood and A M Michie

- 1032 Quantum dots as self-referenced optical fibre temperature probes for luminescent chemical sensors**
P A S Jorge, M Mayeh, R Benrashid, P Caldas, J L Santos and F Farahi
- 1039 Radial-basis function network for the approximation of FBG sensor spectra with distorted peaks**
A S Paterno, J C C Silva, M S Milczewski, L V R Arruda and H J Kalinowski
- 1046 An interrogator for fibre Bragg grating sensors using an ultrasonically induced long-period optical fibre grating**
N Fukuma, K Kubota, K Nakamura and S Ueha
- 1052 1×2 optical switch devices based on semiconductor-to-metallic phase transition characteristics of VO_2 smart coatings**
M Soltani, M Chaker, E Haddad and R Kruzelesky
- 1057 Dual Bragg grating sensor for concurrent torsion and temperature measurement**
P L Swart, A A Chtcherbakov and A J van Wyk
- 1065 Significance of coherent Rayleigh noise in fibre-optic distributed temperature sensing based on spontaneous Brillouin scattering**
K De Souza
- 1070 Monitoring technique for a hybrid PS/WDM-PON by using a tunable OTDR and FBGs**
S Hann, J-S Yoo and C-S Park
- 1075 Distributed fibre optics polarimetric chemical sensor**
S Caron, C Paré, P Paradis, J-M Trudeau and A Fougères
- 1082 Long-range distributed temperature and strain optical fibre sensor based on the coherent detection of spontaneous Brillouin scattering with in-line Raman amplification**
M N Alahbabi, Y T Cho and T P Newson
- 1091 The effects of gamma-radiation on the properties of Brillouin scattering in standard Ge-doped optical fibres**
D Alasia, A Fernandez Fernandez, L Abrardi, B Brichard and L Thévenaz
- 1095 Fibre Bragg gratings as high dose radiation sensors?**
K Krebber, H Henschel and U Weinand
- 1103 Optical dosimetry for ionizing radiation fields by infrared radioluminescence**
T Shikama, K Toh, S Nagata and B Tsuchiya
- 1107 Gas detection based on optical correlation spectroscopy using a single light source**
A Cheung, W Johnstone and D Moodie
- 1113 Fibre Bragg grating gas temperature sensor with fast response**
A J van Wyk, P L Swart and A A Chtcherbakov
- 1118 Palladium-based hydrogen sensing for monitoring of ageing materials**
R R J Maier, J S Barton, J D C Jones, S McCulloch, B J S Jones and G Burnell
- 1124 Fibre gratings for hydrogen sensing**
A Trouillet, E Marin and C Veillas
- 1129 Compact three segmented multimode fibre modal interferometer for high sensitivity refractive-index measurement**
Y Jung, S Kim, D Lee and K Oh
- 1134 Combined fibre-optic sensor for colour and refractive index (CI) monitoring**
J M Trudeau, P Paradis, C Paré, C Meneghini, A Cournoyer, E Savard, G Doyon, A-C Jacob-Poulin and A Fougères
- 1140 Implementation of optical chemsensors based on HF-etched fibre Bragg grating structures**
K Zhou, X Chen, L Zhang and I Bennion
- 1146 Multiplexed fibre Bragg grating Fabry-Perot interferometers for measuring the coefficients of thermal expansion of anisotropic solids**
P L Swart, A A Chtcherbakov and A J van Wyk

- 1152 Determination of setting expansion of dental materials using fibre optical sensing**
M S Milczewski, J C C da Silva, I Abe, L Carvalho, R N Nogueira, A S Paterno, H J Kalinowski and J L Pinto
- 1157 Plastic optical fibre with structural imperfections as a displacement sensor**
A Babchenko, Z Weinberger, N Itzkovich and J Maryles
- 1162 Fast four-channel fibre-optic displacement sensor for measuring impact waves at low cost**
B Nilsson, D Tilt, A Temun, T E Carlsson and L Mattsson
- 1167 A fibre Bragg grating sensor system monitors operational load in a wind turbine rotor blade**
K Schroeder, W Ecke, J Apitz, E Lembke and G Lenschow
- 1173 A fibre Bragg grating stress cell for geotechnical engineering applications**
T F H Legge, P L Swart, G van Zyl and A A Chtcherbakov
- 1180 Tunnel monitoring using multicore fibre displacement sensor**
W N MacPherson, M Silva-Lopez, J S Barton, A J Moore, J D C Jones, D Zhao, L Zhang, I Bennion, N Metje, D N Chapman and C D F Rogers
- 1186 Application of the fibre-optic Sagnac interferometer in the investigation of seismic rotational waves**
L R Jaroszewicz, Z Krajewski, L Solarz and R Teisseyer
- 1194 Single camera three component planar velocity measurements using two-frequency planar Doppler velocimetry (2 ν -PDV)**
T O H Charrett and R P Tatam
- 1207 Nanostructured optical fibre sensors for breathing airflow monitoring**
Y Kang, H Ruan, Y Wang, F J Arregui, I R Matias and R O Claus
- 1211 Development of an ordered microarray of electrochemiluminescent nanosensors**
A Chovin, P Garrigue, G Pecastaings, H Saadaoui and N Sojic
- 1220 Sensing properties of buffered and not buffered carbon nanotubes by fibre optic and acoustic sensors**
M Consales, S Campopiano, A Cutolo, M Penza, P Aversa, G Cassano, M Giordano and A Cusano
- 1229 Electric field and voltage sensing using thermally poled silica fibre with a simple low coherence interferometer**
A Michie, I Bassett and J Haywood

ERRATUM

- 1235 Sensor application of fibre ultrasonic waveguide**
J-R Lee and H Tsuda 2006 *Meas. Sci. Technol.* **17** 645

REFERENCIAS

Referencias Capítulo 1

- [1] Francis Y. & Xiangyang Y., **Introduction to Optical Engineering**, Cambridge University Press, USA, 1997.
- [2] Zanger H. & Zanger C., **Fiber Optics, Communications and Other Applications**, Maxwell MacMillan Editions, Singapore, 1991.
- [3] Marcou J. (ed.), **Plastic Optical Fibres: Practical Applications**, Club Des Fibres Optiques Plastiques (Cfop) France, John Wiley & Sons, Belgium, 1997.
- [4] Khotiaintsev S., **Fundamentos de operación de los sensores de fibra óptica**, División de Ingeniería Eléctrica, Departamento de Telecomunicaciones, UNAM, México, 2000.
- [5] García-Valenzuela A., Peña-Gomar M., García-Segundo C., Flandes-Aburto V., “Dynamic reflectometry near the critical angle for high-resolution sensing of the index of refraction”, *Sensors & Actuators B*, Vol. 52, pp. 236-242, 1998.
- [6] García-Valenzuela A., Peña-Gomar M., Fajardo-Lira C., “Measuring and sensing a complex refractive index by laser reflection near the critical angle,” *Opt. Eng.*, Vol. 41, pp. 1-13, 2002.
- [7] Peña-Gomar M., García-Valenzuela A., Rosete-Aguilar M., “Design of an optical probe based on angle scanning reflectometry near the critical angle,” *Opt. Eng.*, Vol. 42, pp. 1-9, 2003.
- [8] Villatoro J., & García-Valenzuela A., “Sensitivity of optical sensors based on laser-excited surface-plasmon waves,” *Applied Optics*, Vol. 38, No. 22, pp. 4837-4844, 1999.
- [9] Abuaf N., Jones O.C. Jr., Zimmer G.A., “Optical probe for local void fraction and interface velocity measurements,” *Rev. Sci. Instrum.*, Vol. 49, No. 8, pp. 1090-1094, 1978.
- [10] Spenner K., Singh M.D., Schulte H., Boehnel H.J., “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] Svirid V., Khotiaintsev S., Swart P., "Mathematical modeling of optical-fiber refractometric device," *Recent Advances in Simulation Computational Methods and Soft Computing*, Electrical & Computer Engineering Series, Nikos E. Mastorakis, pp. 134-139, 2002.
- [12] Svirid V., Khotiaintsev S., Swart P., "Novel optical fiber refractometric transducer employing hemispherical detection element," *Opt. Eng.*, Vol. 41, No. 4, pp. 779-786, 2002.
- [13] Svirid V., Khotiaintsev S., Swart P., "Linear and step-like characteristics in an optical fiber refractometric transducer with hemispherical detection element," *Opt. Eng.*, Vol. 42, No. 5, pp. 1383-1389, 2002.
- [14] Khotiaintsev S., Svirid V., Swart P., "Novel fiber-optical refractometric sensor employing hemispherically-shaped detection element," *Advances in Systems Science: Measurement*, Circuits and Control, Electrical and Computer Engineering Series, pp. 595-599, 2001.
- [15] Svirid V., De León V., Khotiaintsev S., "A prototype fiber-optic discrete level-sensor for liquid propane-butane," *IEICE Trans. Electron.*, Vol. E83-C, No. 3, pp. 303-308, 2000.
- [16] Cartelier A., "Optical probes for local void fraction measurements: characterization of performance," *Rev. Sci. Instrum.*, Vol. 61, No. 21, pp. 874-885, 1990.
- [17] David D.J, Shaw D., Tucker H., Unterleitner F.C., "Design, development, and performance of a fiber optic refractometer: Application to HPLC", *Rev. Sci. Instrum.*, Vol. 47, No. 9, pp. 989-997, 1976.

Referencias Capítulo 2

- [1] Svirid V., Khotiaintsev S., Swart P., “Mathematical modeling of optical-fiber refractometric device”, *Recent Advances in Simulation Computational Methods and Soft Computing, Electrical & Computer Engineering Series*, Nikos E. Mastorakis, pp. 134-139, 2002.
- [2] Svirid V., Khotiaintsev S., Swart P., “Novel optical fiber refractometric transducer employing hemispherical detection element”, *Optical Engineering*, Vol. 41, No. 4, pp. 779-786, 2002.
- [3] Svirid V., Khotiaintsev S., Swart P., “ Linear and step-like characteristics in an optical fiber refractometric transducer with hemispherical detection element”, *Optical Engineering*, Vol. 42, No. 5, pp. 1383-1389, 2002.
- [4] Khotiaintsev S., Svirid V., Swart P., “Novel Fiber-Optical Refractometric Sensor Employing Hemispherically-Shaped Detection Element”, *Advances in Systems Science: Measurement, Circuits and Control, Electrical and Computer Series*, 2001.
- [5] Svirid V., De León V., Khotiaintsev S., “A prototype fiber-optic discrete level-sensor for liquid Propane-Butane”, *IEICE Trans. Electron.*, E83-C, No. 3, pp. 303-308, 2000.
- [6] Deimel P., “Calculations for integral lenses on surface-emitting diodes”, *Applied Optics*, Vol. 24, No. 3, pp. 457-462, 1985.
- [7] Brosseau C., *Fundamentals of Polarized Light*, John Wiley & Sons, USA, 1998.
- [8] Azzam R.M.A. & Bashara N.M., *Ellipsometry and Polarized Light*, North-Holland Personal Library, Netherlands, 1988.
- [9] Aleksandrov A. D., Kolmogorov A. N., Lavrent’ev M. A., *Mathematics: its content, methods and meaning*, Dover Publications, USA, 1999.
- [10] McCallum W. G., Gleason A. M., Hughes-Hallett D., *Cálculo de Varias Variables*, CECSA, México, 1998.
- [11] Svirid V., *Sensores Refractométricos en fibra óptica*, Tesis Doctoral, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, 2001.
- [12] Gåsvik K. J., *Optical Metrology*, Wiley & Sons, Second Edition, UK, 1995.
- [13] Klein M.V. & Furtak T.E., *Optics*, John Wiley & Sons, 2nd Edition, USA, 1986.

Referencias Capítulo 3

- [1] Svirid V., Khotiaintsev S., Swart P., “Mathematical modeling of optical-fiber refractometric device”, *Chapter: Recent Advances in Simulation Computational Methods and Soft Computing, Electrical & Computer Engineering Series*, Nikos E. Mastorakis, Ed. WSES Press, Grecia-Brazil, pp. 134-139, 2002.
- [2] Svirid V., Khotiaintsev S., Swart P., “Novel optical fiber refractometric transducer employing hemispherical detection element”, *Optical Engineering*, Vol. 41, No. 4, pp. 779-786, 2002.
- [3] Svirid V., Khotiaintsev S., Swart P., “Linear and step-like characteristics in an optical fiber refractometric transducer with hemispherical detection element”, *Optical Engineering*, Vol. 42, No. 5, pp. 1383-1389, 2002.
- [4] Khotiaintsev S., Svirid V., Swart P., “Novel Fiber-Optical Refractometric Sensor Employing Hemispherically-Shaped Detection Element”, *Chapter: Advances in Systems Science: Measurement, Circuits and Control, Electrical and Computer Series*, Ed. WSES Press, Grecia-Brazil, pp. 595-599, 2001.

Referencias Capítulo 4

- [1] Svirid V., Khotiaintsev S., Swart P., “Linear and step-like characteristics in an optical fiber refractometric transducer with hemispherical detection element”, *Optical Engineering*, Vol. 42, No. 5, pp. 1383-1389, 2002.
- [2] Svirid V., Khotiaintsev S., Swart P., “Novel optical fiber refractometric transducer employing hemispherical detection element”, *Optical Engineering*, Vol. 41, No. 4, pp. 779-786, 2002.
- [3] Svirid V., Khotiaintsev S., Swart P., “Mathematical modeling of optical-fiber refractometric device”, *Chapter: Recent Advances in Simulation Computational Methods and Soft Computing, Electrical & Computer Engineering Series*, Nikos E. Mastorakis, Ed. WSES Press, Grecia-Brazil, pp. 134-139, 2002.

Referencias Capítulo 5

- [1] White F. M., *Mecánica de fluidos*, McGraw Hill, USA, 759 p., 1979.
- [2] Romo Medrano K. E., Khotiaintsev K. S., Khotiaintsev S. N., García-Garduño V., “Refractometric Fiber-Optical Detectors of Liquids: Effect of Residual Liquid Film”, *Revista Mexicana de Física*, S 52 (2), pp. 64-67, 2006.
- [3] Romo Medrano K. E., and Khotiaintsev S. N., “Optical-fibre refractometric liquid-level sensor for liquid nitrogen”, *Measurement Science and Technology*, Vol. 17, No. 5, pp. 998-1004, 2006.