



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

---

---

FACULTAD DE INGENIERIA  
DIVISION DE INGENIERIA ELECTRICA

*MODELADO MATEMÁTICO DE SENSORES  
REFRACTOMÉTRICOS BASADOS EN FIBRAS  
ÓPTICAS*

**TÉSIS**

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE  
INGENIERO EN TELECOMUNICACIONES

PRESENTA:

*MIGUEL ÁNGEL GUEVARA TORRES*

**TUTOR:**

M.I. SELENE PÉREZ GARCÍA



Ciudad Universitaria, octubre de 2011

*A mis papás, mi hermano y a la vida.*

# Agradecimientos

Es muy difícil sintetizar en unas cuantas palabras a todos aquellos a quienes les estamos agradecidos por la huella que forman en uno.

Primero que nada quiero agradecer a todos y cada uno de mis compañeros de Telecomunicaciones. Ustedes han sido pieza fundamental en los años que convivimos. Han iluminado todos esos momentos en los que parecía que el alba nunca iba a llegar.

A Fundación Ethos, por haber creído en mí, pero sobre todo a cada uno de ustedes que ha sembrado tantas ideas en mí: Azpiroz, Des, Jessikuku, Marce, Sergio y Valeria les estoy enormemente agradecido por todo lo que he aprendido de ustedes.

A Sebastian Ortega por haberme incitado (aunque no lo creas) a aventarme contigo a esa desquiciada aventura que fue San Diego. A todos mis amigos de San Diego por haber sido tan ustedes, por ser tan espectaculares como seres humanos.

A Deborah Silberer por estar siempre ahí, por criticarme, por hacer que me auto cuestionara, por guiarme en ese camino espinoso de las ideas. A Diego Noreña, por compartir esa pasión por la música en estos años y por aguantarme.

A toda la gente que conocí en Aquixtla, Puebla, gracias por su ejemplo.

A Carlos Aguilar, Eduardo Sverdlin, Inés Martínez y Omar Backhoff por haberme acompañado en todo momento durante estos años.

A mis abuelas, a mis tíos, tías, primos. A cada uno de ustedes que me ha escuchado, orientado siempre con el mejor espíritu y me han ayudado.

A mis sinodales por sus valiosos comentarios.

A Armando, Luis David y Marinie. Pocas personas me hacen reír como ustedes, han alegrado y hecho memorables tantos momentos y les estoy eternamente agradecido (iuk).

A mi asesora de Tesis, Selene. Gracias por tu paciencia, por tus comentarios, por tu accesibilidad, en suma por todo. Sin ti, este trabajo no hubiera sido posible.

Una mención especial merecen Andrés Muñoz y Jacinta Pérez Gavilán. Sin ustedes no hubiera llegado a la recta final. Han sido la mayor y mejor fuente de ayuda y crítica que jamás hubiera podido encontrar. Sus palabras, su energía, su pasión por vivir fueron siempre mi inspiración constante. Ustedes le dieron sabor a estos años.

Finalmente a los culpables de mi existencia: a mis papás y a mi hermano. No soy nada por mí mismo, ustedes me han dado todo, me han guiado, pero sobre todo han estado siempre al lado de mí, en cada aventura que emprendo, en cada salto al abismo que doy, nunca han dejado de creer en mí, de apoyarme, de quererme sin límites, les debo todo y no hay forma humana, literaria para decirles cuanto les estoy agradecido, pero sobre todo, cuanto los quiero.

# Índice

Capítulo 1 .....	7
1.1 Planteamiento del problema .....	7
1.2 Objetivo de la propuesta .....	8
1.3 Metas .....	8
1.4 Metodología.....	8
1.5 Resultados esperados .....	9
1.6 Bibliografía .....	9
Capítulo 2 .....	10
2.1 Estado del arte .....	10
2.2 Sensores refractométricos basados en fibras ópticas .....	12
2.3 Bibliografía .....	14
Capítulo 3 .....	16
3.1 Modelado matemático .....	16
3.1.1 Superficie de trabajo.....	16
3.1.2 Coordenadas iniciales del rayo .....	17
3.1.3 Segmentos de semi-esfera.....	20
3.1.4 Coordenadas de intersección del rayo con la interfaz del dieléctrico .....	23
3.1.5 Ángulo de incidencia y ángulo crítico .....	24
3.1.6 Potencia reflejada .....	25
3.1.7 Dirección del rayo reflejado.....	26
3.1.8 Comprobación de entrada del rayo a la fibra óptica.....	27
3.2.1 Algoritmo.....	28
3.2.2 Número de rayos.....	32
3.3 Interfaz gráfica .....	32
3.4 Bibliografía .....	35
Capítulo 4 .....	36
4.1 Introducción.....	36
4.2 Definición de variables.....	36

4.3 Resultados.....	37
Capítulo 5.....	55
5.1 Logros obtenidos.....	55
5.2 Discusión.....	55
5.3 Bibliografía.....	58
Apendice A Índices de refracción.....	59
Apendice B Listado del Programa.....	61

# Capítulo 1

## 1.1 Planteamiento del problema

Las comunicaciones ópticas surgieron a partir de la confluencia de 4 tecnologías: internet, los láseres basados en diodos semiconductores, la computadora y las fibras ópticas de bajas pérdidas. El resultado: hoy más de 2.000 millones de personas están conectadas a internet, de acuerdo con la O.N.U. [1]. Las computadoras de hoy en día son mucho más rápidas que las de hace 20 años y para interconectar esas computadoras, se han tendido millones de kilómetros de fibras ópticas. Los enlaces por fibras ópticas son los backbones de la infraestructura de comunicaciones del mundo. Básicamente todo el tráfico de voz y datos es enruteado a través de enlaces de fibras ópticas, terrestres o marinos.

Las fibras ópticas son un medio apropiado para la transmisión en el rango espectral que va desde el ultra violeta, pasando por el visible hasta el infrarrojo cercano. Este amplio espectro provee fuentes sintonizables y atractivas para diversas aplicaciones de investigación y medición, así como la prueba de diversos componentes ópticos.

En años recientes se han descubierto diversas aplicaciones para las fibras ópticas, como sensores para medir la concentración de etanol en mezclas de gasolina [2], monitoreo de calidad del agua a través de sensores optoelectrónicos capaces de detectar concentraciones de amonio en el agua a temperatura ambiente [3], en la detección de líquidos altamente explosivos en lugares remotos [4], entre otras aplicaciones.

Los sensores basados en fibras ópticas ofrecen diversas ventajas sobre los sensores tradicionales mecánicos o eléctricos. Entre las ventajas de estos dispositivos, se encuentran las ya conocidas ventajas de una fibra óptica: inmunidad a la interferencia electromagnética, inmunidad al ruido, mayor resistencia a condiciones ambientales extremas, seguridad en la instalación, fácil mantenimiento, dimensiones, peso, alta sensibilidad en mediciones y control de varias cantidades físicas.

En el departamento de Ingeniería Telecomunicaciones de la Facultad de Ingeniería de la U.N.A.M. se trabaja en sensores refractométricos basados en fibras ópticas para diversas aplicaciones [5]-[8]. Los resultados alcanzados a la fecha demuestran la funcionalidad de estos dispositivos, y evidencian que existen oportunidades para desarrollar diseños más complejos que permitan incrementar la sensibilidad de éstos en la medición de índices de refracción. El objetivo de esta tesis es realizar un modelado matemático de la sensibilidad al índice de refracción externo con diferentes diseños que incluyen: variación en las características de la fibra óptica (diámetro, apertura numérica, índice de la fibra, posición de la fibra, entre otras) y la rotación de éstas respecto a los ejes de coordenadas.

## 1.2 Objetivo de la propuesta

Desarrollo de un programa de simulación numérica que permita modificar las características teóricas de un sensor refractométrico y así obtener nuevos conocimientos sobre la sensibilidad de ciertas configuraciones a los cambios de índices de refracción en un medio externo.

## 1.3 Metas

Desarrollar un simulador numérico de un sensor refractométrico.

Determinar teóricamente la transmisión resultante al modificar la simulación de segmentos de esfera, los parámetros físicos de las fibras ópticas y la posición de éstas.

## 1.4 Metodología

La metodología incluye exclusivamente métodos teóricos. Se utilizarán modelos de geometría analítica para modelar las diferentes estructuras dieléctricas y el comportamiento de los haces de luz dentro de éstas. Se utilizarán métodos de solución de ecuaciones algebraicas lineales, análisis de datos, métodos numéricos, métodos de integración, entre otros.

Se desarrollará un algoritmo que en primera instancia sólo realizará cálculos para una figura simple, como por ejemplo: una semi-esfera, que no representa una alta complejidad matemática en el cálculo de las ecuaciones correspondientes a estos modelos.

Para implementar este algoritmo, se pueden seleccionar diversos lenguajes de programación existentes en el mercado, como por ejemplo: C, C++, C#, Java, Visual Basic, Matlab, entre otros. Posteriormente el algoritmo se implementará en Matlab. Se ha escogido Matlab debido a la maleabilidad del lenguaje, y por ser uno que permite realizar modificaciones sin mayores problemas y de amplio conocimiento entre ingenieros eléctricos y de telecomunicaciones, esto permite que se le realicen posteriores modificaciones de manera más ágil y sencilla. Además es un lenguaje altamente usado entre ingenieros en telecomunicaciones.

En la primera fase de la tesis, se ubicaron las fuentes de información que aportaron un panorama más completo sobre el problema de sensibilidad de índices de refracción, con modelos basados en fibras ópticas.

En la segunda fase, se identificó el material que podía ser de mayor utilidad para la presente tesis y se usará como referencia para desarrollar un primer algoritmo. Sin embargo el material puede ser cambiado a voluntad del usuario.

En la tercera fase se implementó el algoritmo diseñado, y se observaron los resultados y se compararon con resultados obtenidos previamente.



En una cuarta fase, se realizarán modificaciones al algoritmo para que pueda procesar configuraciones más complejas y así poder diseñar sensores de índices de refracción más precisos.

## 1.5 Resultados esperados

Inicialmente se espera tener un modelo que pueda calcular la transmisión relativa en la fibra óptica receptora. Se tendrá un modelo que se pueda modelar para diferentes índices de refracción que rodean el medio dieléctrico. Además se espera que se pueda modelar para diferentes características físicas de la fibra óptica, como: posición, diámetro, apertura numérica o rotación de las fibras. Finalmente, se identificarán campos de oportunidad para la investigación y desarrollo tecnológico.

## 1.6 Bibliografía

- 1.6.1 Unión Internacional de Telecomunicaciones, Sala de prensa, Comunicado de Prensa. Octubre 2010. [En línea]. Disponible en: [http://www.itu.int/net/pressoffice/press\\_releases/2010/39-es.aspx](http://www.itu.int/net/pressoffice/press_releases/2010/39-es.aspx).
- 1.6.2. E. Molina Flores, R.B. Lopez Flores, J.A. Davila Pintle, E. Reynoso Lara, Y.E. Bravo Garcia, M. Rendon Marin and L. Cortez Georgevna, "Discrete optical fiber microsensor of immiscible liquid interfaces," *Advanced Optoelectronics and Lasers, 2008. CAOL 2008. 4th International Conference on* , vol., no., pp.313-315, Sept. 29 2008-Oct. 4 2008.
- 1.6.3. M. Pisco, M. Consales, R. Viter, V. Smyntyna, S. Campopiano, M. Giordano, A. Cusano and A. Cutolo, *Int. Sc. Journal Semiconductor Physics, Quantum Electronics and Optoelectronics*, vol. 8, 2005.
- 1.6.4. G. Possetti, M. Muller and J.-L. Fabris, "Refractometric optical fiber sensor for measurement of ethanol concentration in ethanol-gasoline blend," *Microwave and Optoelectronics Conference (IMOC), 2009 SBMO/IEEE MTT-S International* , vol., no., pp.616-620, 3-6 Nov. 2009.
- 1.6.5. V. De Leon and S. Khotiaintsev, "Ray tracing in the design of micro-optical sensors used for the determination of refractive index of surrounding media," *Proc. SPIE*, Vol. 2817, pp. 299-311, 1996.
- 1.6.6. V. De Leon and S. Khotiaintsev, "Microoptical paraboloidal-shaped sensing elements for refractometric transducers," *Instrumentation & Development*, vol. 4, no. 1, pp. 31-39, 1999.
- 1.6.7. V. Svirid, S. Khotiaintsev and P. Swart, "Novel optical fiber refractometric transducer employing hemispherical detection element", *Optical Engineering*, Vol. 41 No 4, pp. 779-786, April 2002.
- 1.6.8. V. Svirid, S. Khotiaintsev and P. Swart, "Linear and steplike characteristics in an optical fiber refractometric transducer with hemispherical detection element", *Optical Engineering*, Vol.42 No 5, pp. 1383-1389, May 2003.

# Capítulo 2

## 2.1 Estado del arte

La primera transmisión de sonidos óptica registrada en la historia de la humanidad a través de un dispositivo fue en el “fotófono” de Alexander Graham Bell. Este evento histórico marcó la demostración de que la información podía ser transmitida a través de la luz.

A través de la historia de las transmisiones inalámbricas y la transmisión de datos por cables, se ha observado una tendencia a utilizar frecuencias cada vez más altas. Esto se debe a que de esta manera, se puede incrementar la capacidad del canal. Con la invención del láser en 1960 las fuentes de radiación electromagnética coherentes alcanzaron las frecuencias visibles del espectro electromagnético y a partir de esto comenzaron los intentos para usar el láser en los sistemas de comunicaciones.

En la ausencia de guías de onda apropiadas, los primeros sistemas consistieron de transmisión de luz a través de la atmósfera [1]. Sin embargo, a diferencia de los sistemas de radio que usan longitudes de onda mayores, la propagación de la luz en el espacio es severamente afectada por la lluvia.

En los comienzos de las fibras ópticas los materiales dieléctricos llegaban a tener pérdidas de hasta 1000 dB/km [2]. Después de un conjunto de investigaciones y de que se determinara que las altas pérdidas se debían a la impureza de iones que podían ser eliminadas de los materiales [3], hoy en día existen fibras ópticas que llegan a tener pérdidas menores a 0.25 dB/cm [4]. De esta forma, se convirtió a las fibras ópticas en una mejor opción con respecto al cable coaxial debido a las bajas pérdidas observadas.

La transmisión con fibras ópticas tiene diferentes ventajas, adicionalmente al gran ancho de banda. Entre éstas, podemos mencionar: baja susceptibilidad a la interferencia electromagnética, son fuertes, flexibles, de tamaño pequeño, bajo peso y aislamiento dieléctrico. Además, el costo de éstas es altamente competitivo en sistemas que requieren grandes anchos de bandas con baja distorsión, convirtiéndolas en una tecnología de comunicaciones superior a las existentes.

Debido a su inmunidad a la interferencia electromagnética, las fibras ópticas han sido usadas en diversas aplicaciones, como por las compañías eléctricas del Japón [5] que necesitaban de un medio de transmisión confiable y de alta calidad que pudiera ayudarles a manejar la crecientemente compleja red eléctrica de ese país asiático a fines de la década de los 70's.

Las fibras ópticas han sido una de las mayores innovaciones en el campo de las telecomunicaciones. Las propiedades únicas de las fibras ópticas y la gran versatilidad de los sistemas basados en éstas son algunos de los factores que han contribuido al rápido desarrollo de esta tecnología.

Actualmente, las fibras ópticas están dejando de ser utilizadas únicamente como "backbones" de los sistemas de comunicaciones. Éstas comienzan a ser introducidas como medios de última milla [6], que llegan directamente al hogar del suscriptor, ofreciendo servicios de voz y datos con mayores anchos de banda. Hoy en día las compañías de telecomunicaciones, los países y los continentes están intercomunicados por fibras ópticas, cuando alguna de éstas llegan a fallar, miles de usuarios quedan sin servicio y sin acceso a internet.

A diferencia de lo que muchas veces se piensa, las aplicaciones de las fibras ópticas no se restringen exclusivamente al campo de las telecomunicaciones. El rango de aplicaciones va desde militares, biomédicas hasta mecánicas, de medición, etcétera.

Un ejemplo del uso de las fibras ópticas en sistemas militares es en aviones de combate. Estos aviones, debido a su complejidad tecnológica y a la gran cantidad de información que tienen que procesar, proveniente de todos sus sensores y a la redundancia que la información debe tener, usan sistemas de fibras ópticas para transmitir la información. Sin embargo, estos sistemas tienen una doble utilidad [7]. Pueden funcionar además como sistemas híbridos que incorporen capacidades sensoriales. Estos sensores pueden llegar a medir el estrés al que una superficie, como la de un avión, llega a ser sometida con resultados muy similares a los instrumentos usados comúnmente (calibradores de tensión, extensómetros).

En general, los sensores basados en fibras ópticas pueden detectar cambios en temperatura, acústica, campos eléctricos y magnéticos, aceleraciones rotacionales y lineales [8].

Las fibras ópticas, además, son altamente resistentes a condiciones extremas. Otra aplicación en aviones de combate, es como medidores de temperatura. En un estudio reciente [9] se desarrolló un sensor capaz de medir temperaturas hasta los 600°C y soportar hasta 4 g's de aceleración, además de ser inmune a un deterioro de su superficie. Pueden ser usadas también

para detectar los agentes corrosivos en el ambiente [10] que pueden comprometer la estructura de un avión, y así realizar un mantenimiento preventivo efectivo.

Son además usadas en sistemas de radar y sismología. A diferencia de los radares convencionales o sensores ubicados en el lecho marino, que requieren de sistemas electrónicos complejos y un diseño eficiente, debido a la corrosión existente en el mar, el peso de éstos, sus constantes fallas, filtración de agua entre otros, se puede diseñar un arreglo de fibras ópticas [11] que desempeñe las mismas funciones pero con la ventaja de no contar con los problemas arriba mencionados y una alta sensibilidad acústica.

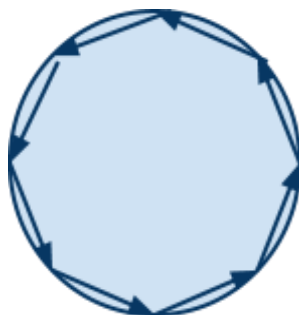
Las aplicaciones de las fibras ópticas no se restringen al complejo campo militar, son usadas también en diversos campos de la medicina. Se han desarrollado sensores incrustados en la ropa para así poder monitorear movimientos respiratorios [12] mientras se realiza una resonancia magnética, con una resolución de elongaciones de entre 0% y 3%. Las posibilidades de estas aplicaciones médicas se extienden hasta el poder medir la actividad cardiaca, la temperatura corporal, el pulso oximétrico, sensores de pH [13], de presión [14] entre otros.

En el campo de la mecánica [15], las fibras ópticas también tienen un lugar reservado. En estas aplicaciones, el costo del diseño tiene una consideración mayor que la que se puede encontrar en los casos militares o médicos mencionados anteriormente. Es de interés conocer la dureza de un material, su flexibilidad, desplazamiento, proximidad y vibración, flujo de fluidos y gases, velocidad, aceleración, momento angular, etc. Para realizar estas mediciones, también es útil usar fibras ópticas.

## **2.2 Sensores refractométricos basados en fibras ópticas**

Un sensor refractométrico es un transductor que transforman las variaciones de índice de refracción en cambios de intensidad eléctrica. Existen diferentes tipos de sensores.

Los basados en resonadores en micro esferas [16], en los cuales la luz se propaga en forma de “Whispering Gallery Modes”, (WGM, o Modos de Suspiro en Galería) que puede ser apreciado en la *Figura 2-1*. Deben su nombre al efecto que se llega a presentar en la galería localizada en el domo de la catedral de San Pablo en Londres. En esta galería cuando dos personas hablan muy bajo en lados opuestos a una distancia de 42 metros, la otra lo puede escuchar claramente. Curiosamente, este efecto no se da cuando el interlocutor habla en voz alta, de ahí su nombre.



**Figura 2-1** Efecto WGM. Rayos de luz (flechas) sufriendo reflexiones internas en una superficie de vidrio delimitada por la circunferencia del círculo.

En la versión microscópica de este efecto, se coloca luz dentro de una esfera de vidrio y ésta empieza a sufrir reflexiones múltiples, siempre y cuando el ángulo de incidencia en el vidrio sea mayor al ángulo crítico. Esto permite una baja pérdida de energía, ya que poca luz llega a ser transmitida al medio externo. Debido a que la luz viajará millones de veces dentro de la esfera, sufrirá interferencia con ella misma y sólo algunas longitudes de onda discretas prevalecerán. Esto resulta en modos de transmisión que son de muy bajas pérdidas.

Estos resonadores inyectan la luz a las esferas a través de un prisma fusionado con la esfera que está sumergida en un líquido, como por ejemplo agua con etanol. Las resonancias de los modos WGM cambian en función del medio que esté cubriendo la esfera.

Existen también resonadores a base de fibras ópticas en embobinado. Funcionan de la siguiente manera: primero se coloca una pequeña varilla y se le rodea de un polímero de bajas pérdidas (teflón por ejemplo), después alrededor de este polímero se enrolla un cable de fibra óptica y al final se rellena toda la estructura de un polímero de nuevo. Al final se retira la varilla y es en este espacio en donde se coloca el líquido a medir. Una de las grandes ventajas de este sistema es que esencialmente no existen pérdidas de inserción [17] como en otros dispositivos sensores a base de resonadores.

Existen sensores basados en resonancia superficial de plasmones (Surface plasmon resonance) [18] que ofrecen entre sus ventajas: un pequeño tamaño, robustez, y un alto potencial para sensores remotos. Sin embargo, son particularmente sensibles a las deformaciones de la fibra óptica. La sensibilidad de estos dispositivos puede llegar hasta 3100 nm/RIU y su resolución hasta  $5 \times 10^{-7}$  RIU

Finalmente, se encuentran los sensores basados en elementos semiesféricos [19] o semicilíndricos o con otras formas (en forma de primas o cónicos) [20]. El elemento semiesférico está hecho de un dieléctrico (generalmente vidrio) al que son conectadas dos

fibras ópticas, una emisora y otra receptora que están acopladas debido a las reflexiones internas en el dieléctrico. Se ha observado que la transmisión en estos dispositivos depende del medio que rodee al dieléctrico. Las reflexiones internas dependen del índice de refracción del medio externo, y es por eso, que la transmisión observada en la fibra depende de éste.

En la fibra óptica emisora, generalmente, se coloca un diodo emisor (LED) o un láser, la luz es transmitida hacia el dieléctrico, en donde sufre reflexiones múltiples, y una parte del haz de luz entra en la fibra óptica receptora. Al final de ésta se encuentra un foto receptor, que mide y transforma la intensidad de la luz en intensidad eléctrica, de esta manera es posible conocer la cantidad de energía transmitida en el dispositivo.

## 2.3 Bibliografía

- 2.4.1. T. S. Chu and D. C. Hogg, "Effects of precipitation on propagation at 0.63, 3.5, and 10.6 microns," *Bell Syst. Tech. J.*, 47, pp. 723-759, 1968.
- 2.4.2. A. R. Tynes, A. David Pearson, and D. L. Bisbee, "Loss Mechanisms and Measurements in Clad Glass Fibers and Bulk Glass," *J. Opt. Soc. Am.* **61**, 143-153 (1971).
- 2.4.3. K.C. Kao and G.A. Hockham, "Dielectric-fibre surface waveguides for optical frequencies," *Optoelectronics, IEE Proceedings J* , vol.133, no.3, pp.191-198, June 1986.
- 2.4.4. G. Fischbeck, R. Moosburger, C. Kostrzewa, A. Achen and K. Petermann, "Singlemode optical waveguides using a high temperature stable polymer with low losses in the 1.55  $\mu\text{m}$  range," *Electronics Letters* , vol.33, no.6, pp.518-519, 13 Mar 1997.
- 2.4.5. F. Aoki, and H. Nabeshima, "Optical-fiber communications for electric power companies in Japan," *Proceedings of the IEEE* , vol.68, no.10, pp. 1280- 1285, Oct. 1980.
- 2.4.6. P.E. Green, "Fiber to the home: the next big broadband thing," *Communications Magazine, IEEE* , vol.42, no.9, pp. 100- 106, Sept. 2004.
- 2.4.7. B.D. Zimmermann, "Compatibility of multiplexed optical fiber sensors with optical communications systems onboard military and commercial aircraft," *Aerospace and Electronics Conference, 1993. NAECON 1993., Proceedings of the IEEE 1993 National* , vol., no., pp.1123-1128 vol.2, 24-28 May 199.
- 2.4.8. T. Giallorenzi, J. Bucaro, A. Dandridge, G. Sigel, J. Cole, S. Rashleigh and R. Priest, "Optical fiber sensor technology," *Quantum Electronics, IEEE Journal of* , vol.18, no.4, pp. 626- 665, Apr.

- 2.4.9. M.L. Tuma, T. Sawatari, Yuping Lin and K.A. Elam, "Flight tests on a fiber optic temperature sensor," *Digital Avionics Systems Conference, 1998. Proceedings., 17th DASC. The AIAA/IEEE/SAE*, vol.1, no., pp.D15/1-D15/7 vol.1, 31 Oct-7 Nov 1998.
- 2.4.10. K.R. Cooper, J. Elster, M. Jones and R.G. Kelly, "Optical fiber-based corrosion sensor systems for health monitoring of aging aircraft," *AUTOTESTCON Proceedings, 2001. IEEE Systems Readiness Technology Conference*, vol., no., pp.847-856, 200.
- 2.4.11. G.A. Cranch, P.J. Nash and C.K. Kirkendall, "Large-scale remotely interrogated arrays of fiber-optic interferometric sensors for underwater acoustic applications," *Sensors Journal, IEEE*, vol.3, no.1, pp. 19- 30, Feb. 2003.
- 2.4.12. A. Grillet, D. Kinet, J. Witt, M. Schukar, K. Krebber, F. Pirotte and A. Depre, "Optical Fiber Sensors Embedded Into Medical Textiles for Healthcare Monitoring," *Sensors Journal, IEEE*, vol.8, no.7, pp.1215-1222, July 2008.
- 2.4.13. R. Wolthuis, D. McCrae, E. Saaski, J. Hartl, and G. Mitchell, "Development of a medical fiber-optic pH sensor based on optical absorption," *Biomedical Engineering, IEEE Transactions on*, vol.39, no.5, pp.531-537, May 1992.
- 2.4.14. E. Cibula, D. Donlagic and C. Stropnik, "Miniature fiber optic pressure sensor for medical applications," *Sensors, 2002. Proceedings of IEEE*, vol.1, no., pp. 711- 714 vol.1, 2002.
- 2.4.15. A.W. Domanski, "Application of optical fiber sensors in mechanical measurements," *Instrumentation and Measurement Technology Conference, 1997. IMTC/97. Proceedings. 'Sensing, Processing, Networking'.*, IEEE, vol.1, no., pp.700-702 vol.1, 19-21 May 1997. 16. Niranjana M. Hanumegowda, Caleb J. Stica, Bijal C. Patel, Ian White, Xudong Fan; "Refractometric sensors based on microsphere resonators", *Appl. Phys. Lett.* 87, 201107, 2005.
- 2.4.16. Niranjana M. Hanumegowda, Caleb J. Stica, Bijal C. Patel, Ian White, and Xudong Fan, "Refractometric Sensors based on microsphere resonators", *Appl. Phys. Lett.* 87, 201107 (2005); doi:10.1063/1.2132076.
- 2.4.17. Fei Xu, Peter Horak, and Gilberto Brambilla, "Optical microfiber coil resonator refractometric sensor," *Opt. Express* 15, 7888-7893, 2007.
- 2.4.18. Radan Slavi'k, Jiri' Homola, Jiri' Ctyroky and Eduard Brynda, "Novel spectral fiber optic sensor based on surface plasmon resonance, Sensors and Actuators B: Chemical", Volume 74, Issues 1-3, Proceedings of the 5th European Conference on Optical Chemical Sensors and Biosensors, 15 April 2001, Pages 106-111, ISSN 0925-4005.
- 2.4.19. Vladimir Svirid, Sergei Khotiaintsev and Pieter L. Swart, "Novel optical fiber refractometric transducer employing hemispherical detection element", *Opt. Eng.* 41, 779, 2002.
- 2.4.20. V.A. Svirid, "Sensores refractométricos en Fibra Óptica", Tesis Doctoral, Facultad de Ingeniería, UNAM, México, D.F., Mayo 2001.

## Capítulo 3 Algoritmo y programa

### 3.1 Modelado matemático

#### 3.1.1 Superficie de trabajo

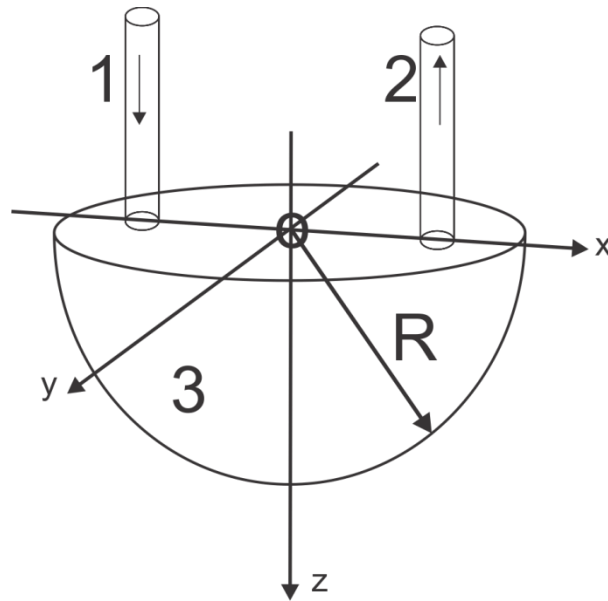
El sensor refractométrico consiste en una semi-esfera de material dieléctrico (generalmente vidrio) con dos fibras ópticas que se encuentran tocando la superficie ortogonalmente, las fibras ópticas tienen un radio determinado y además se encuentran a una distancia simétrica respecto al origen o el centro de la semiesfera dieléctrica. Entre los parámetros que se pueden variar del sensor se encuentra: La distancia entre las fibras respecto al eje x, la inclinación de éstas, su apertura numérica, el material dieléctrico del que está hecha la esfera (generalmente vidrio, que posee un índice de refracción entre 1.44 y 1.9) y la cantidad de rayos emitidos.

En todos los casos del modelado matemático, se trabajó con una esfera, de radio variable, descrita por la ecuación cartesiana.

$$x^2 + y^2 + z^2 = r^2 \quad 3.1$$

La esfera se encuentra centrada en el centro del sistema y el radio puede variar de acuerdo a las necesidades del usuario. La ilustración gráfica se encuentra en la *Figura 3-1* en donde se puede identificar, el origen de éste, los ejes cartesianos, la fibra óptica transmisora (1), la fibra óptica receptora (2), el elemento dieléctrico (3).





**Figura 3-1** Sensor semiesférico de fibra óptica. (1) fibra óptica transmisora, (2) fibra óptica receptora, (3) elemento dieléctrico.

El sistema está definido como: la composición de los elementos necesarios para poder realizar las mediciones requeridas, dentro de esta categoría se incluyen: la fibra óptica receptora, la transmisora y la semiesfera de vidrio ( $n_e=1.55$ ). El centro del sistema, será entonces el punto en el que esté centrada la semiesfera de vidrio.

### 3.1.2 Coordenadas iniciales del rayo

El rayo tendrá como punto de salida una ubicación que se encuentre en los límites del círculo que se ubica en el plano xy o el plano en el que se encuentre la fibra, que tiene como radio el de la fibra óptica. Las coordenadas iniciales del punto son determinadas de la siguiente forma:

$$r_i = r \cdot \sqrt{x_1}$$

$$\Phi_i = 2\pi x_2 \quad \mathbf{3.2}$$

En donde  $r$  es el radio de la fibra,  $x_1$  y  $x_2$  son números aleatorios en un intervalo de 0 a 1. De esta forma se garantiza la aleatoriedad de la posición de los rayos, para poder realizar un muestreo más efectivo. Las ecuaciones anteriores se encuentran referenciadas a un sistema de coordenadas polares, en el sistema cartesiano, los puntos se pueden encontrar de la siguiente forma:

$$x_i = r_i \cos \Phi_i - \Lambda$$

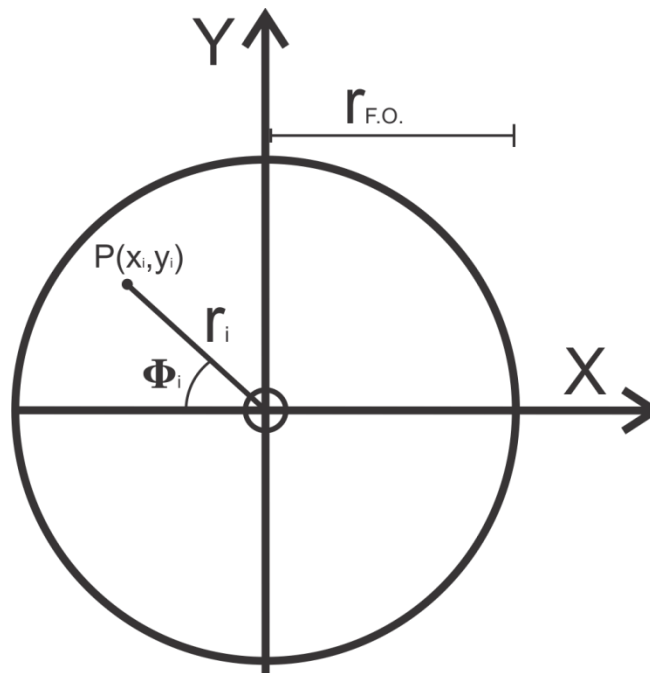
$$y_i = r_i \text{sen} \Phi_i$$

$$z_i = z_{\text{fibra}}$$

3.3

En donde  $\Lambda$  es la distancia del centro de la esfera al centro de la fibra.

Lo anterior se encuentra mejor ilustrado en la *Figura 3-2*. En donde P es el punto de salida del rayo,  $r_i$  es la distancia del centro de la fibra óptica al punto de salida P,  $\Phi_i$  es el ángulo respecto al eje x y la circunferencia marca el parrea delimitada por la fibra óptica transmisora. El radio de esta circunferencia es igual al de la fibra óptica.



**Figura 3-2** Coordenadas iniciales del rayo dentro de la fibra óptica. P, punto de salida del rayo,  $r_i$  distancia del punto al centro de la fibra óptica,  $\Phi_i$  ángulo respecto al eje x. El área de la F.O. se encuentra delimitada por la circunferencia.

A la salida de la fibra óptica se debe de calcular la dirección del rayo. La dirección de éste, al igual que su posición tiene que ser aleatoria. Se encuentra la dirección realizando el cálculo del ángulo de salida respecto al plano en el que se encuentra la fibra óptica, que puede ser el plano xy cuando la rotación de la fibra óptica es cero grados, o la inclinación determinada puntualmente en el experimento respecto a los ejes coordenados. La dirección es también aleatoria y se encuentra en un rango físico permisible. Para encontrar la dirección se deben de usar dos ángulos directores, que determinarán la dirección del haz, el intervalo en el que existen estos ángulos tiene como valor mínimo 0 y como valor máximo:

$$\alpha_i = \arcsin\left(\frac{NA}{ne}\right) x_3 \quad 3.4$$

Donde  $NA$  es la apertura numérica de la fibra óptica,  $ne$  es el índice de refracción del elemento dieléctrico y  $x_3$  es un número aleatorio entre 0 y 1. De esta forma, el máximo valor que puede alcanzar el ángulo de salida se encuentra dentro de los límites físicos permitidos por la interacción de características entre la fibra óptica y el medio. El máximo ángulo permitido será:

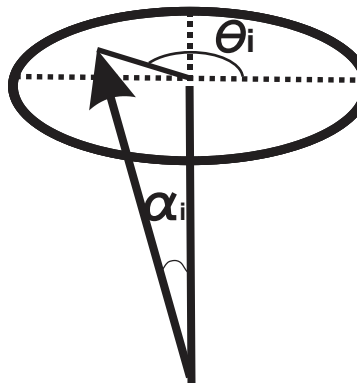
$$\alpha_i = \arcsin\left(\frac{NA}{ne}\right) \quad 3.5$$

Si la luz no se encuentra en este rango permisible, se reflejará y no pasará al elemento dieléctrico, por lo que tendremos reflexión interna.

El segundo ángulo direccionador se encuentra en un intervalo entre 0 y  $2\pi$ , por lo que se calcula de la siguiente forma:

$$\theta_i = 2\pi x_4 \quad 3.6$$

Lo anterior está mejor descrito en la *figura 3-3*:



**Figura 3-3** Geometría del problema. Dirección del haz de luz que sale de la fibra óptica (delimitada por la circunferencia).  $\theta_i$  y  $\alpha_i$ : ángulos directores

El vector de dirección queda determinado de la siguiente forma:

$$\begin{aligned} X_i &= \text{sen}\theta_i \cos\alpha_i \\ Y_i &= \text{sen}\theta_i \text{sen}\alpha_i \\ Z_i &= \cos\theta_i \end{aligned} \quad \mathbf{3.7}$$

De esta forma, se encuentra la dirección del vector, garantizando la aleatoriedad de éste.

### 3.1.3 Segmentos de semi-esfera

Uno de los problemas a resolver en esta tesis, es la modelación de segmentos de semi-esfera aumentados. Los modelos anteriores, usaban dos fibras paralelas como se muestra en la figura 3-1 compuestos por dos F.O. paralelas, la fibra óptica transmisora (1), la fibra óptica receptora (2) y el elemento dieléctrico (3).

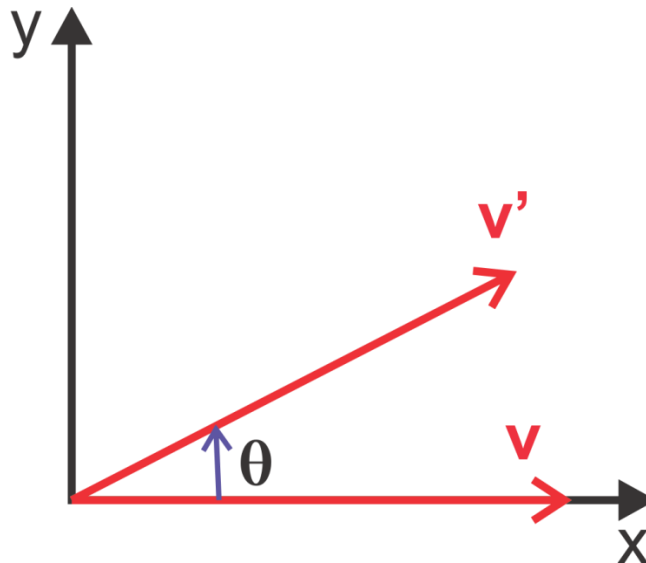
La respuesta de estos sensores estaba limitada en un rango de índices de refracción, que comprendía generalmente a los líquidos. Una de las intenciones de darle inclinación a las fibras ópticas, radica en la posibilidad de obtener resultados diferentes a los obtenidos en experimentos previos, en los que no se consideraba la inclinación de las fibras ópticas, y así poder medir el índice de refracción de materiales diferentes a los líquidos.

Consideremos una matriz en  $R^2$  que rota un vector  $\mathbf{v}$  en uno  $\mathbf{v}'$  a un ángulo  $\theta$  en sentido contrario a las manecillas del reloj. De tal forma que:

$$R_\theta = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\text{sen}\theta \\ \text{sen}\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \quad \mathbf{3.8}$$

Por lo que:  $\mathbf{v}' = \mathbf{R}_\theta \mathbf{v}$

En donde  $\mathbf{v}'$  es el vector rotado. Lo anterior, queda ilustrado en la *Figura 3-4*:



**Figura 3-4** Rotación de un vector  $\theta$  grados respecto al eje x.

El caso que nos ocupa, no es en dos dimensiones sino en tres dimensiones. Para poder darle inclinación a las fibras ópticas en torno a un ángulo referenciado a alguno de los ejes coordenados mostrados en la figura 3-3, se utilizaron las matrices de rotación. Cuando se habla de rotación existen dos posibles convenciones: rotación de ejes y la rotación de un objeto respecto a ejes fijos. En el caso de esta tesis, se utilizará la segunda.

Éstas son transformaciones lineales que conservan la norma en el espacio vectorial. Las transformaciones básicas, para el caso de tres dimensiones y respecto a los ejes x y y, son las siguientes:

$$R_x(\theta) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\theta) & -\sin(\theta) \\ 0 & \sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix}$$

$$R_y(\theta) = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & 0 & \sin(\theta) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin(\theta) & 0 & \cos(\theta) \end{bmatrix}$$

**3.9**

En donde  $R_x(\theta)$  es la rotación con un ángulo  $\theta$  en sentido contrario a las manecillas del reloj respecto al eje x, y  $R_y(\theta)$  es la rotación con un ángulo  $\theta$  en sentido contrario a las manecillas del reloj respecto al eje y.

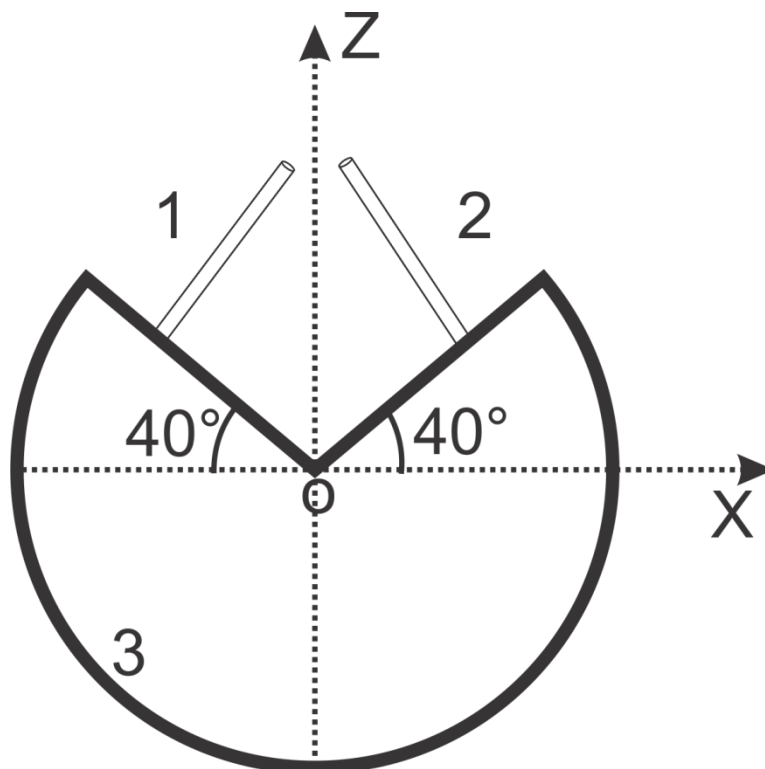
Se pueden obtener diversos tipos de rotaciones usando las matrices de rotación básicas mostradas anteriormente a través de la multiplicación de éstas, por ejemplo el siguiente producto es una composición de rotaciones respecto al eje x y después respecto al eje y:

$$R_t = R_x(\theta)R_y(\theta) \quad 3.10$$

Para el caso de la fibra emisora, la rotación obedeció a una transformación como la mostrada anteriormente, para el caso de la fibra receptora, la rotación fue de la siguiente forma:

$$R_t = R_x(\theta)R_y(-\theta) \quad 3.11$$

Las rotaciones mencionadas anteriormente, quedan como se muestra abajo en la *Figura 3-5* en donde se observa la fibra óptica Transmisora (1), la fibra óptica Receptora (2) y el elemento dieléctrico (3). Además las fibras tienen una distancia respecto al eje z.



**Figura 3-5** Segmento de semiesfera de 40° respecto al eje x con fibras ópticas ortogonales a la superficie dieléctrica. (1) fibra óptica transmisora, (2) fibra óptica receptora, (3) segmento de circunferencia del material dieléctrico.

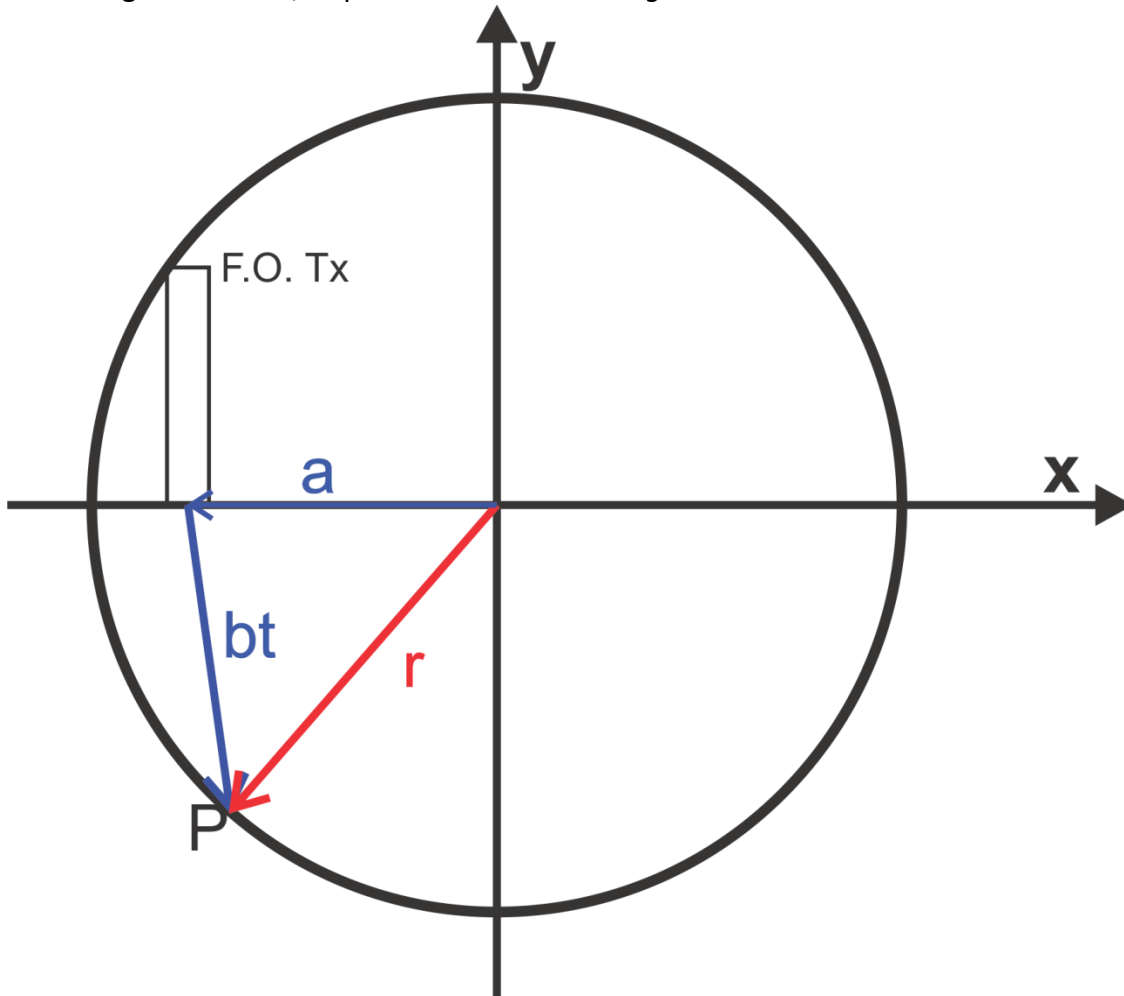
En el caso de la *Figura 3-5* el segmento de semiesfera tiene un ángulo de 40° respecto al eje x, las fibras ópticas tanto transmisora como receptora están a una distancia de 0.46 del eje z respecto al origen y además son ortogonales a la superficie plana del segmento de semiesfera. La esfera tiene un radio igual a la unidad.

### 3.1.4 Coordenadas de intersección del rayo con la interfaz del dieléctrico

El análisis se realizó de forma vectorial. Como se mencionó anteriormente la dirección del haz quedó determinada por un vector aleatorio. Al tener el vector de posición y de dirección del rayo se puede obtener la ecuación vectorial de la recta (lado izquierdo de la ecuación 3.12) que describe la dirección del haz, asimismo es fácil ver que la suma de estos dos (el vector de posición y el de dirección) dará un tercer vector que cambia proporcionalmente al parámetro  $t$ . Cuando la norma de este tercer vector sea igual al radio de la fibra óptica, el rayo ha entonces interceptado la superficie de la esfera del dieléctrico. Expresado matemáticamente se ve que:

$$| \mathbf{a} + \mathbf{bt} |^2 = r^2 \quad 3.12$$

Descrito gráficamente, se puede observar en la *Figura 3-6*.



**Figura 3-6** Cálculo de intersección del haz con la esfera en el punto P.

Desarrollando la ecuación anterior se obtiene:

$$t^2(b_1^2 + b_2^2 + b_3^2) + 2 \cdot t \cdot (a_1 \cdot b_1 + a_2 \cdot b_2 + a_3 \cdot b_3) + (a_1^2 + a_2^2 + a_3^2) = r^2 \quad 3.13$$

Al resolverla, se encuentra el valor de  $t$  para el cual el haz intersecta la esfera. En otras palabras se puede observar que el único parámetro que cambia en la ecuación 3.13 es  $t$ , por lo que el momento en el que lado izquierdo sea igual al derecho, implica, en este caso, que el tercer vector compuesto por la suma entre el vector de posición del haz y el vector de dirección tiene la misma norma que el radio de la esfera. Como sabemos, la distancia del centro de una esfera a la superficie siempre es igual al radio. Es por esto que al igualar los dos lados de la ecuación 3.14 obtenemos la intersección del haz con la esfera.

Posteriormente, se sustituye el valor encontrado de  $t$  en la ecuación paramétrica de la recta y se encuentra el punto de intersección.

$$\mathbf{p} = (a_1 + b_1t, a_2 + b_2t, a_3 + b_3t) \quad 3.14$$

### 3.1.5 Ángulo de incidencia y ángulo crítico

Siguiendo la línea de análisis vectorial presentada anteriormente, el ángulo de incidencia se puede calcular con el producto punto entre dos vectores: el que describe la dirección del haz y el normal a la superficie en el punto de intersección. El primero es uno conocido, y el segundo es un vector que conecta el centro de la esfera con el punto de intersección, las componentes vectoriales en cada dirección ( $xyz$ ) del vector normal, son las coordenadas del punto. Por lo que el ángulo de incidencia queda determinado por:

$$\alpha = \text{acos} \left( \frac{\mathbf{b} \cdot \mathbf{p}}{\sqrt{|\mathbf{b}| \cdot |\mathbf{p}|}} \right) \quad 3.15$$

En donde  $\mathbf{p}$  es el vector que conecta el centro de la esfera con el punto de intersección (el vector normal a la superficie en el punto de intersección) y  $\mathbf{b}$  el vector de dirección del haz.

Así mismo, para poder determinar si el haz se refleja o se refracta, se debe de calcular el ángulo crítico, que es el ángulo máximo con el que puede incidir el rayo para que pueda reflejarse dentro de la esfera, de lo contrario se refracta. Éste ángulo está determinado por la siguiente relación:



$$\beta = a \sin\left(\frac{n_i}{n_e}\right) \quad 3.16$$

Donde  $n_i$  es el índice de refracción del medio que rodea la esfera y que a su vez varía en cada iteración del programa, y  $n_e$  el índice del material del que está hecha la esfera

### 3.1.6 Potencia reflejada

Si el rayo se refleja, en cada reflexión tendrá una relación de potencia saliente diferente a la entrante, siempre menor, es decir, el haz sufre una atenuación en cada reflexión dentro de la esfera. La potencia reflejada tiene la siguiente relación con la incidente:

$$P_2 = P_1 R \quad 3.17$$

En donde  $R$  es el coeficiente de reflexión entre los medios,  $P_2$  es la potencia saliente y  $P_1$  la potencia incidente. De acuerdo con las fórmulas de Fresnel existen dos planos de reflexión: el de posición paralela  $R_{TM}$  al plano de polarización de la luz y el de posición perpendicular  $R_{TE}$  a éste mismo, descritos por las siguientes relaciones:

$$R_{TM} = \begin{cases} \frac{(n_2/n_1)^2 \cos \alpha - \sqrt{(n_2/n_1)^2 - \sin^2 \alpha}}{(n_2/n_1)^2 \cos \alpha + \sqrt{(n_2/n_1)^2 - \sin^2 \alpha}} & , \text{ para } \alpha < \alpha_c \\ 1, & \text{ para } \alpha > \alpha_c \end{cases}$$

$$R_{TE} = \begin{cases} \frac{\cos \alpha - \sqrt{(n_2/n_1)^2 - \sin^2 \alpha}}{\cos \alpha + \sqrt{(n_2/n_1)^2 - \sin^2 \alpha}}, & \text{ para } \alpha < \alpha_c \\ 1, & \text{ para } \alpha > \alpha_c \end{cases} \quad 3.18$$

En donde  $n_1$  y  $n_2$  son los índices de refracción del medio dieléctrico y el medio circundante al dieléctrico, respectivamente,  $\alpha$  es el ángulo de incidencia del haz con la superficie dieléctrica y  $\alpha_c$  es el ángulo crítico.

Para la luz polarizada, con ángulo  $\beta$  entre el plano de incidencia y el de polarización el coeficiente de reflexión es:

$$R = R_{TM} \cos^2 \beta + R_{TE} \sin^2 \beta \quad 3.19$$

Para la luz no polarizada el coeficiente de reflexión es:

$$R = \frac{R_{TM} + R_{TE}}{2} \quad 3.20$$

### 3.1.7 Dirección del rayo reflejado

Se puede escoger entre un enfoque analítico de resolución de este problema, o seguir con la línea vectorial tomada desde el principio del análisis de esta tesis. El primer enfoque implica una mayor cantidad de operaciones matemáticas y en consecuencia un tiempo mayor de cómputo. El segundo es más sencillo y se determina de la siguiente forma.

Se toma la proyección del vector incidente sobre el vector normal a la superficie, y después se restan 2 veces este resultado al vector incidente. El método es mejor descrito en la *figura 3-7*.

Cabe mencionar que la ilustración mostrada en la *figura 3-7* muestra solamente un cuarto de una circunferencia. Esto se debe a que el objetivo de la figura es mostrar el método para obtener el rayo reflejado. La figura ilustra la incidencia de un haz en la superficie del material dieléctrico. El haz incidente está representado por el vector **b**. Asimismo, se muestra el vector normal a la circunferencia, llamado **n**. En los incisos *i)*, *ii)* y *iii)* se detalla el método descrito anteriormente de una forma gráfica para un mayor entendimiento del lector.

En la parte izquierda de la ilustración podemos ver un borde en el que incide un rayo con vector de dirección **b** y el vector normal a ese punto **n**.

Podemos ver en *i)* la descomposición vectorial del rayo incidente y además la proyección de éste sobre el vector normal.

En *ii)* vemos a la proyección multiplicada por 2 e invertida de dirección, y finalmente en *iii)* podemos ver el resultado de la suma, que es un vector reflejado con el mismo ángulo de incidencia que el ángulo **b** pero que se dirige en sentido opuesto al haz incidente.

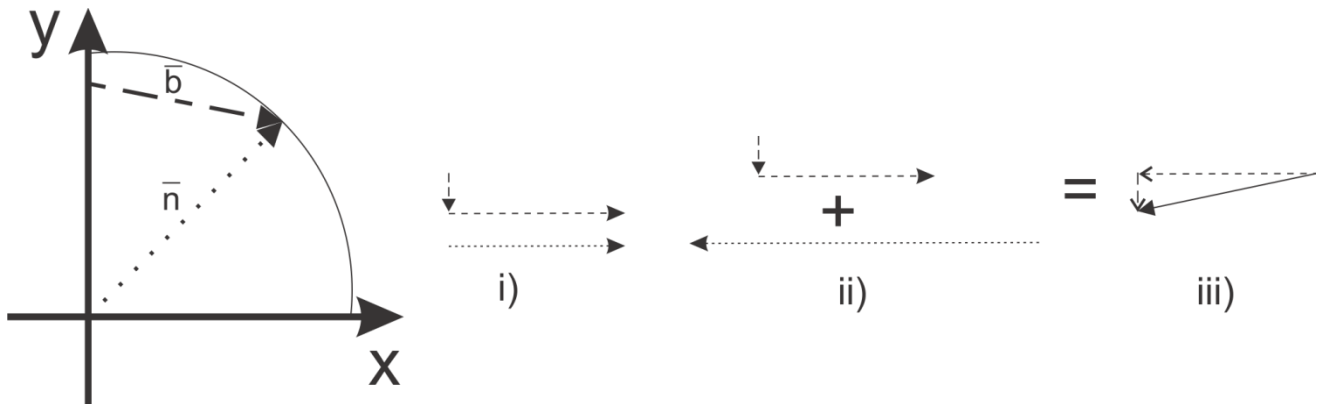


Figura 3-7 Método para la obtención del rayo reflejado

De esta forma se evitan cálculos analíticos que pueden llegar a perjudicar la velocidad en la que se ejecuta el programa.

### 3.1.8 Comprobación de entrada del rayo a la fibra óptica

Para que se pueda verificar si el rayo entra en la fibra óptica se deben de cumplir básicamente dos condiciones:

- a) Que el rayo intersekte la fibra receptora
- b) Que el ángulo de incidencia sea menor al ángulo crítico

La comprobación de estas dos condiciones se realizó mediante el siguiente método.

Primero, se debe de saber si el haz de luz intersekte el plano en el que se encuentra la fibra óptica. La ecuación del plano de la fibra óptica receptora en forma vectorial puede ser expresada de la siguiente forma:

$$(\mathbf{p} - \mathbf{p}_0) \cdot \mathbf{n} = 0 \quad 3.21$$

En donde  $\mathbf{n}$  es el vector normal al plano y  $\mathbf{p}_0$  es un punto en el plano y  $\mathbf{p}$  es la ecuación de la recta del haz. La ecuación vectorial de una recta es:

$$\mathbf{p} = d\mathbf{l} + \mathbf{l}_0 \quad 3.22$$

En donde  $\mathbf{l}$  es el vector de dirección de la línea y  $\mathbf{l}_0$  es un punto de la línea. Substituyendo la ecuación 3.22 en la ecuación del plano (3.21) se obtiene:

$$(\mathbf{d}\mathbf{l} + \mathbf{l}_0 - \mathbf{p}_0) \cdot \mathbf{n} = 0 \quad \mathbf{3.23}$$

Distribuyendo  $\mathbf{n}$  se obtiene:

$$\mathbf{d}\mathbf{l} \cdot \mathbf{n} + (\mathbf{l}_0 - \mathbf{p}_0) \cdot \mathbf{n} = 0$$

Resolviendo para  $d$  se obtiene:

$$\mathbf{d} = \frac{(\mathbf{p}_0 - \mathbf{l}_0) \cdot \mathbf{n}}{\mathbf{l} \cdot \mathbf{n}} \quad \mathbf{3.24}$$

El valor de  $d$  es la cantidad numérica que tiene que tomar  $d$  para intersectar el plano de la fibra óptica. Con el valor de  $d$ , se sustituye en la ecuación de la recta que describe la trayectoria del haz y se encuentra el punto en el que la recta intersecta con el plano de la fibra óptica receptora. Que la recta haya intersecado con el plano de la fibra óptica, no implica que el haz haya intersecado en algún punto dentro de la fibra óptica. Para saber esto, se calcula la distancia entre el punto de intersección del haz y el centro de la fibra. Como se vio anteriormente, la distancia del centro de una circunferencia a algún punto de ésta es siempre igual al radio, por lo que si la distancia entre el punto de intersección (de la recta que describe al haz y el plano de la fibra óptica) y el radio es menor al radio de la fibra óptica implica que el rayo intersectó dentro de la fibra óptica y pudo haber entrado a la fibra.

Para finalmente comprobar que el rayo entró en la fibra, se calcula el ángulo de entrada, de una forma análoga a como se hizo para determinar si el rayo se reflejaba o refractaba en la superficie dieléctrica.

Se calcula el ángulo entre el vector de dirección de la recta y el vector normal al plano de la fibra óptica, y si es menor al ángulo crítico de entrada, entonces el rayo entró a la fibra y se almacena la potencia de entrada en un arreglo.

### 3.2.1 Algoritmo

Se diseñó un algoritmo que realizara las operaciones matemáticas mencionadas anteriormente. Los pasos mostrados a continuación son los que se realizan en el programa de Matlab.

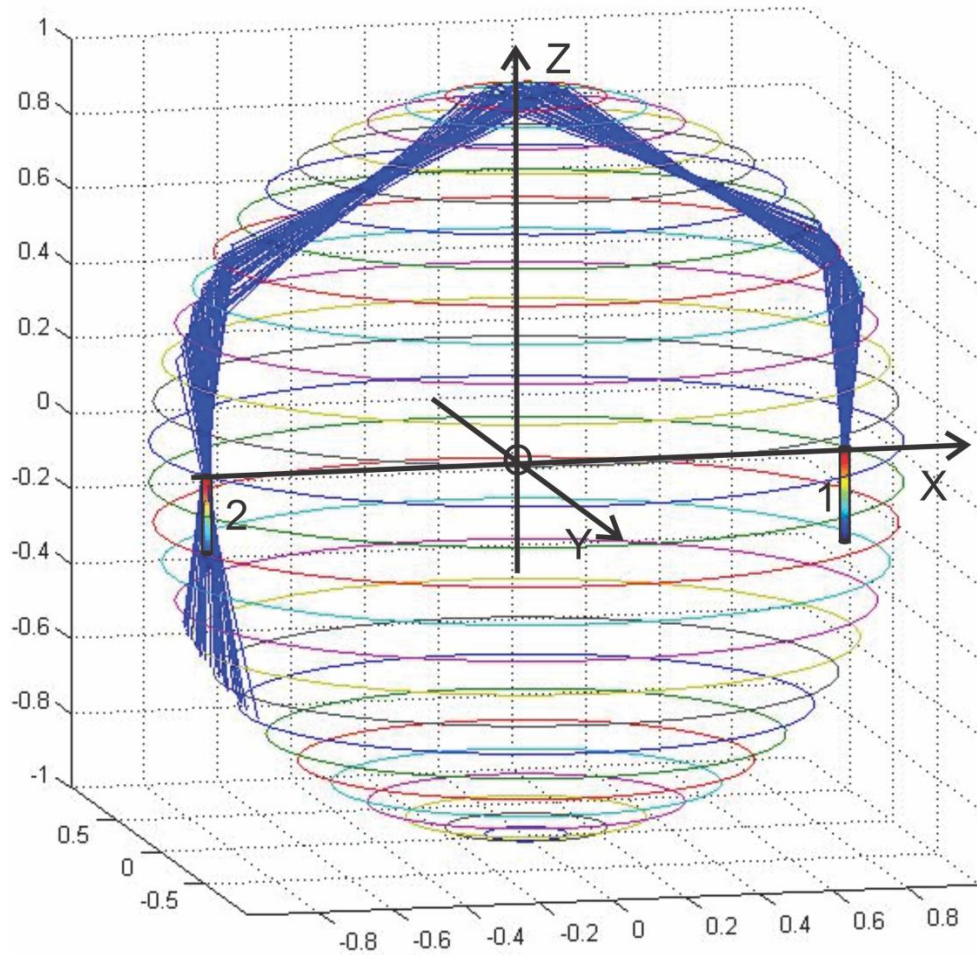
## Algoritmo y programa

- 1.- Primero se inicializa la interfaz gráfica en la que se introducen los datos a modelar
- 2.- Comienza la ejecución del programa
- 3.- Se grafican la esfera en la que se planea trabajar y las fibras ópticas.
- 4.- Se inicia el ciclo del intervalo de índices de refracción en el que se planea trabajar.
- 5.- Se generan las coordenadas aleatorias del punto y su dirección.
- 7.- Se encuentran las coordenadas en las que el haz choca con la esfera.
- 8.- Se encuentra la dirección del haz reflejado y su potencia
- 9.- Se calcula si el haz entra a la fibra receptora.
  - 9.1 Si entra, se almacena el valor de la potencia con la que entra.
  - 9.2 Si no entra, sigue rebotando hasta  $n$  rebotes.
- 10.- Se grafican los haces.
- 11.- Se grafican los resultados de la transmisión.

Es importante resaltar que el algoritmo funciona únicamente con superficies de tipo esféricas. En la mayoría de los casos analizados son semi-esferas, pero esto no es excluyente de segmentos de esferas. En muchas de las simulaciones realizadas se grafican segmentos de esfera y se puede observar que la representación gráfica no es estrictamente hablando una semi-esfera, sino un segmento de esfera.

Cuando se corre el programa, se obtienen 3 gráficas. La primera es una reproducción de la simulación en 3 dimensiones. Contiene los elementos básicos de la simulación: Las fibras ópticas, el tamaño de éstas, su posición respecto a la esfera, los rayos (marcados en color azul) con sus reflexiones, y la esfera con su respectivo radio.

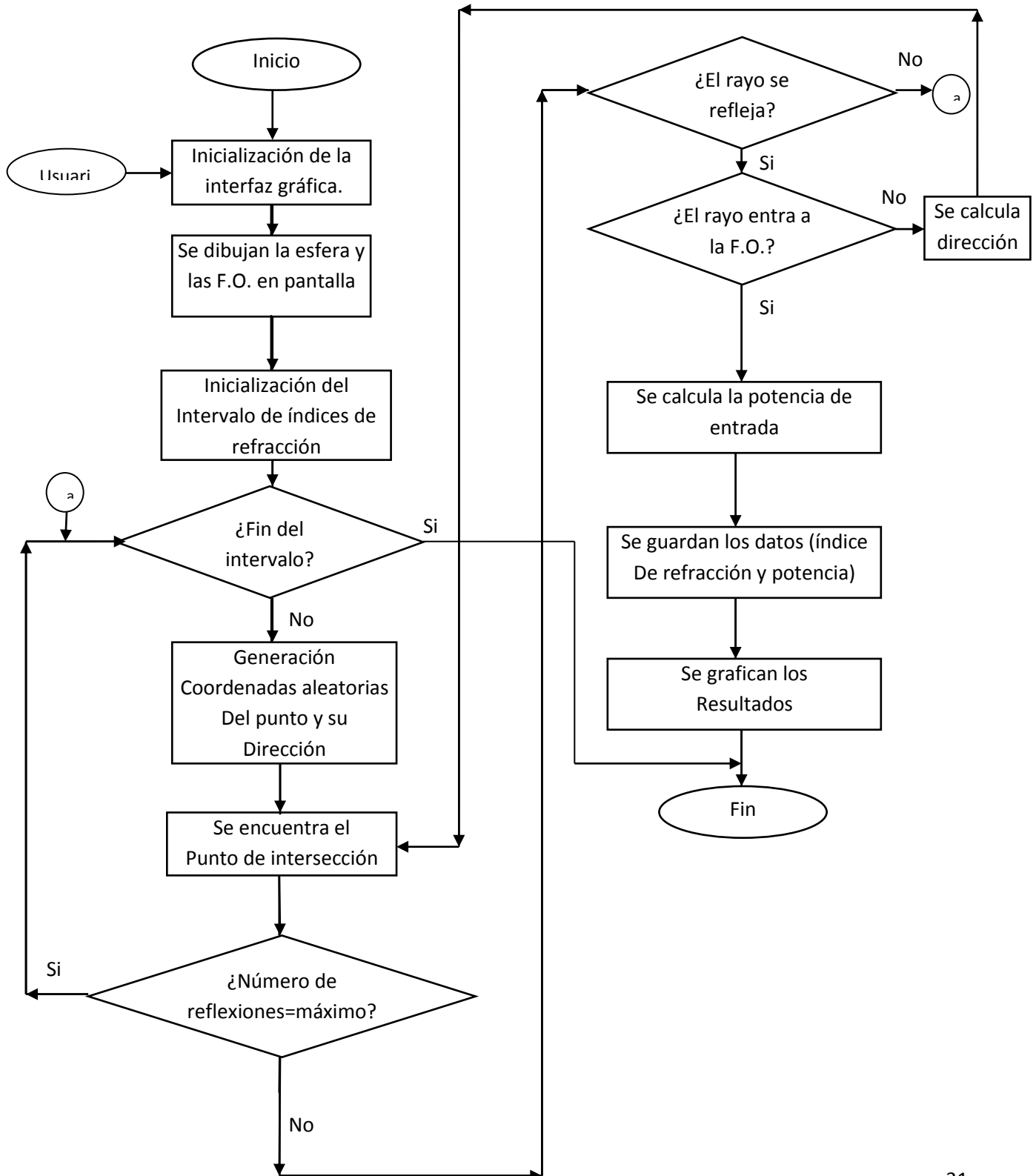
En la *Figura 3-8* se puede observar una figura representativa de la descripción dada anteriormente.



**Figura 3-8** Simulación en Matlab: fibra óptica transmisora (1) y fibra óptica receptora (2)

En la figura 3-8, se puede observar del lado derecho la fibra emisora (1) y del lado izquierdo la receptora (2). Se observa que los rayos “traspasan” la fibra receptora. Sin embargo esto es meramente una ilustración. El algoritmo calcula si el haz ha interceptado la fibra óptica receptora y si éste tiene un ángulo de incidencia menor al permitido físicamente.

El algoritmo implementado, puede observarse más claramente en la *figura 3-9*:



U. **Figura 3-9** Algoritmo implementado: Diagrama de flujo de cálculo de las características de transmisión óptica del sensor refractométrico.

Es importante resaltar que cada vez que el usuario ejecuta el programa, dentro de la interfaz gráfica se pueden seleccionar los parámetros individuales de las fibras ópticas, entre los que resaltan el radio y la apertura numérica de estas. Por lo que no se requiere realizar simulaciones con parámetros simétricos de las fibras ópticas.

### 3.2.2 Número de rayos

El programa itera el cálculo de la trayectoria del rayo un determinado número de veces por índice de refracción. Esto se realiza de la siguiente forma: se lleva a cabo el cómputo de la trayectoria del haz para el primer índice de refracción externo, que en el caso de esta tesis siempre es 1, es decir el aire. En esta iteración se analizan las reflexiones y refracciones que pudiera llegar a sufrir el rayo y se verifica su entrada a la fibra óptica, si esta se llegara a dar.

Posteriormente se lleva a cabo el cómputo de la trayectoria del siguiente haz, que chocará con la superficie dieléctrica que está en contacto con un nuevo índice de refracción, mayor al anterior. La pregunta es ¿cuánto más grande será ese nuevo índice de refracción externo?

La respuesta depende del usuario que selecciona el intervalo y los cambios entre un intervalo y otro. El usuario a su vez, determina el número de rayos por índice de refracción. Esto significa que por cada índice de refracción simulado, se puede seleccionar el número de rayos que se simularán para cada índice de refracción. Inicialmente el programa contempla un rayo por índice de refracción, sin embargo, el usuario puede incrementar el número de rayos por índice de refracción de la forma que mejor le parezca. El número de rayos seleccionado debe de ser idealmente un número grande, debido a que en las simulaciones se consideraron rayos multimodo.

## 3.3 Interfaz gráfica

La interfaz gráfica es aquella que le permite al usuario realizar las modificaciones de interés antes de iniciar la simulación sin tener que modificar el código fuente del programa, minimizando así la posibilidad de errores colaterales no deseados. En esta sección se ofrece una explicación de la interfaz que un usuario encontrará al usar el programa. Se puede observar una representación de dicha interfaz en la *figura 3-10*.

Los primeros campos a llenar por el usuario serán las dimensiones de la fibra óptica, o su radio. El primer campo de la interfaz gráfica es “radio F.O. Tx” que es una abreviación para radio de la fibra óptica transmisora. Una situación análoga ocurre con el radio de la fibra óptica receptora.

Posteriormente se invita al usuario a indicar el “índice de refracción interno” que es el índice de refracción del material dieléctrico, en muchos casos utilizados en los ejemplos de esta tesis: el vidrio.



## Algoritmo y programa

El siguiente campo es la “distancia respecto a los ejes de las F.O.”, que se refiere a la distancia que existe, sobre el eje  $x$  entre las fibras y el origen del sistema. La apertura numérica de las fibras ópticas también es requerida.

Los ángulos de rotación deben de ser colocados en radianes, se pueden poner expresiones como “ $\pi/4$ ” para indicar un ángulo de  $45^\circ$ , sin embargo no se debe de perder de vista las unidades en las que se deben de colocar.

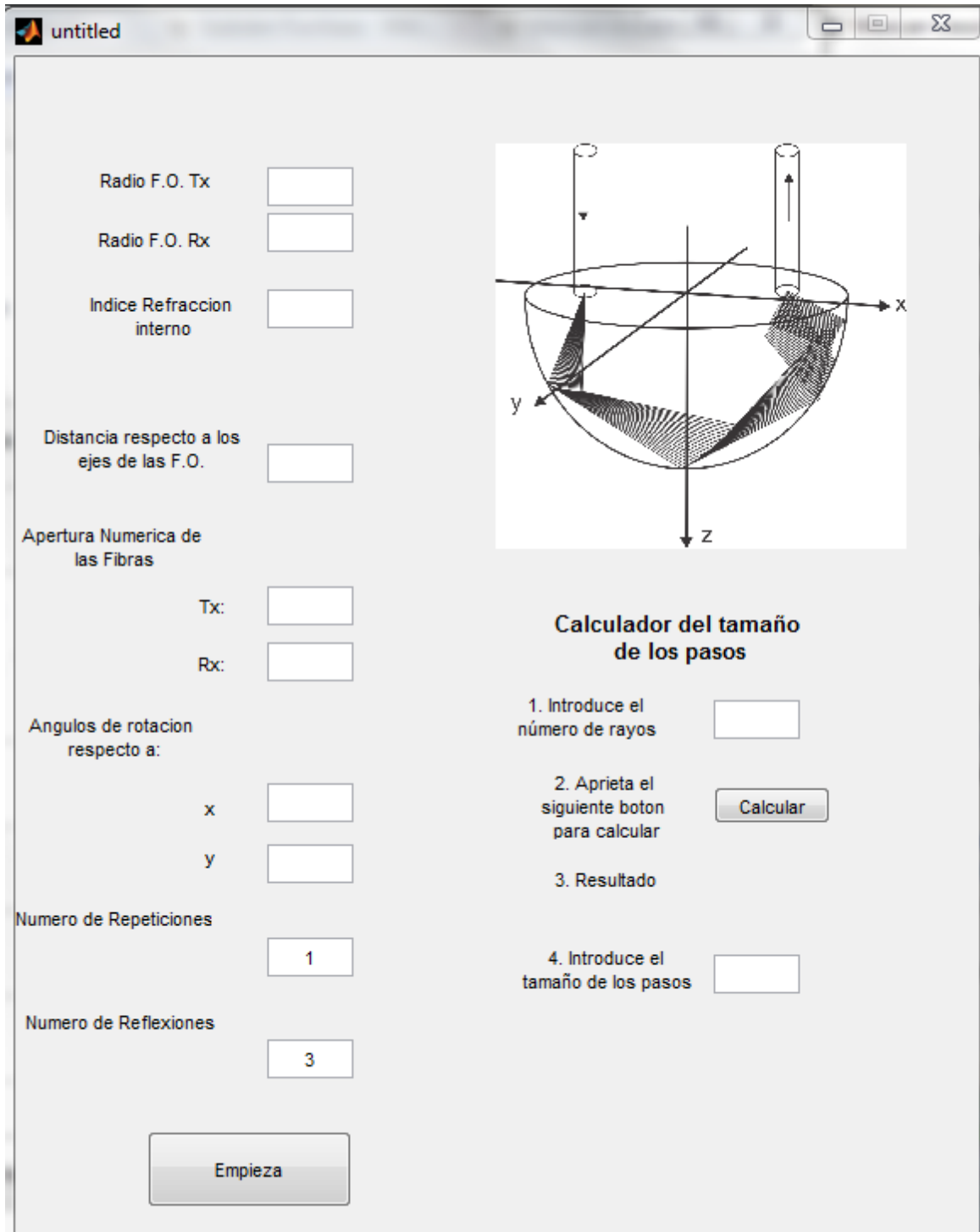


Figura 3-10 Interfaz gráfica del programa

El calculador del número de pasos no es nada más que la selección del intervalo de cambio entre un índice de refracción externo y otro. El campo: "4. Introduce el número de pasos" no

## Algoritmo y programa

puede quedar en blanco, de lo contrario el programa no funcionará. Este campo se refiere al intervalo que habrá entre un índice de refracción simulado y otro.

El número de repeticiones se refiere al número de rayos por cada índice de refracción el usuario le quiere dar al programa. Si el usuario decide dar dos rayos, por ejemplo, se realizarán los cálculos de reflexión y refracción dos veces para cada índice de refracción muestreado.

El no llenar alguno de los campos, puede producir un error en el programa, y el usuario no llegará a ver resultados.

## 3.4 Bibliografía

- 3.4.1. V.A. Svirid, "Sensores refractométricos en Fibra Óptica", Tesis Doctoral, Facultad de Ingeniería, UNAM, México, D.F., Mayo 2001.
- 3.4.2. K.S. Khotiaintsev, "Desarrollo de una aplicación de simulación numérica de sensores refractométricos en Fibras Ópticas", Tesis de Licenciatura, Facultad de Ciencias de la Computación, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Puebla, México. 2005.
- 3.4.3. "Line-Plane Intersection", Marzo del 2010 [Online]. Disponible en: [http://en.wikipedia.org/wiki/Line-plane\\_intersection](http://en.wikipedia.org/wiki/Line-plane_intersection).

# Capítulo 4 Resultados

## 4.1 Introducción

Como se ha visto en los capítulos anteriores, el objetivo en general de este modelado matemático radica en la oportunidad de poder modificar la respuesta del sensor. Si se tiene un sensor en el que no pueda existir una modificación de segmento de esfera de las fibras ópticas respecto alguno de los ejes, se reducen los grados de libertad para poder modificar la respuesta obtenida. Estos grados de libertad son mayoritariamente: la distancia entre las fibras, el diámetro de las fibras, la apertura numérica y el índice de refracción del medio dieléctrico. Sin embargo, en este caso (añadiendo los segmentos de esfera) se aumentan los grados de libertad al poder girar tanto la fibra óptica transmisora como la receptora. Las posibilidades de modelado y de incremento en la resolución de los resultados se multiplican. Ahora, se puede escoger entre un intervalo, infinito de ángulos de rotación y al mismo tiempo realizar combinaciones con los diferentes grados de libertad antes mencionados para poder así obtener una respuesta diferente.

¿Qué se debe de entender por una respuesta “diferente”? Como se verá en los siguientes ejemplos de modelados, cuando no existen segmentos de esfera, la transmisión relativa obtenida se encuentra en un rango perfectamente identificable, que generalmente reside entre un índice de refracción de 1.25 hasta 1.35. Esto permite identificar materiales, principalmente líquidos que poseen un índice de refracción ubicado en estos intervalos. Sin embargo, para poder expandir las posibilidades de medición del sensor refractrométrico, es necesario medir índices de refracción de algunos gases, que generalmente poseen un índice de refracción entre 1 y 1.1. Queda claro que un modelo tradicional, sin segmentos de esfera, no tiene la capacidad para poder medir estos índices de refracción, es por eso que se decidió elaborar un nuevo modelo que considerara los segmentos de esfera y examinar los posibles resultados.

## 4.2 Definición de variables

Usando el modelo matemático presentado en el capítulo anterior y el algoritmo también descrito anteriormente, se simularon diversos sensores con características diferentes entre sí. Se presentan aquí los resultados.

Se deben de definir algunas variables normalizadas usadas en el cálculo de los resultados siguientes.

i) La distancia relativa al centro definida por  $\Delta = \frac{x}{r}$

## Resultados

En donde  $x$  es la distancia del centro de la esfera al centro de la fibra y  $r$  es el radio de la fibra.

ii) Diámetro relativo del núcleo de la fibra óptica.  $d = \frac{d_{F.O.}}{r}$

iii) Apertura numérica:  $NA$  (Correspondiente al valor en el aire)

iv) Índice de refracción del elemento dieléctrico:  $ne$

v) Ángulo del segmento de semiesfera respecto al eje  $x$ :  $\theta_x$

vi) Ángulo del segmento de semiesfera respecto al eje  $y$ :  $\theta_y$

vii) Distancia respecto al eje  $z$ :  $z$

viii) Distancia respecto al eje  $y$ :  $y$

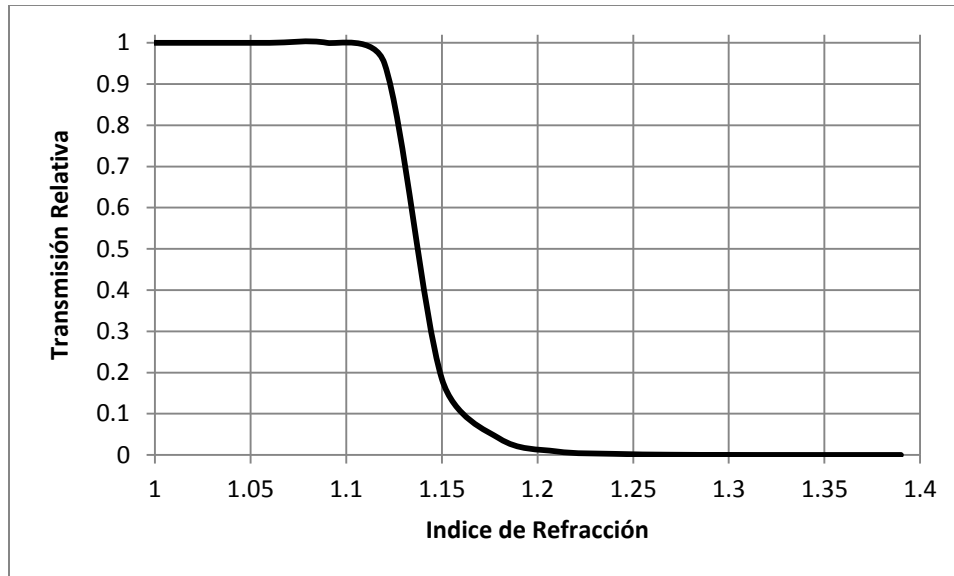
ix) Número de rayos por índice de refracción externo:  $npi$

Las variables  $y$ ,  $z$  se podrá observar que tienen un valor de 0 en las primeras 16 figuras para ambos parámetros, esto implica que las fibras ópticas, tanto transmisoras como receptoras, solamente han sido trasladadas respecto al eje  $x$ . Esto, queda mejor ilustrado en la figura 3-1 en la que ambos parámetros ( $x,y$ ) tienen un valor de 0. Cuando la posición de las fibras ópticas tiene un valor de  $z$  diferente a 0, implica que han sido trasladadas también respecto a este eje, situación que queda mejor ilustrada en la Figura 4-20. Si por ejemplo, se usa una " $\Lambda=0$ " y un valor de  $z$  diferente de 0 (con un valor de  $y=0$ ), esto significa que la fibra tanto transmisora como receptora están superpuestas una con otra.

## 4.3 Resultados

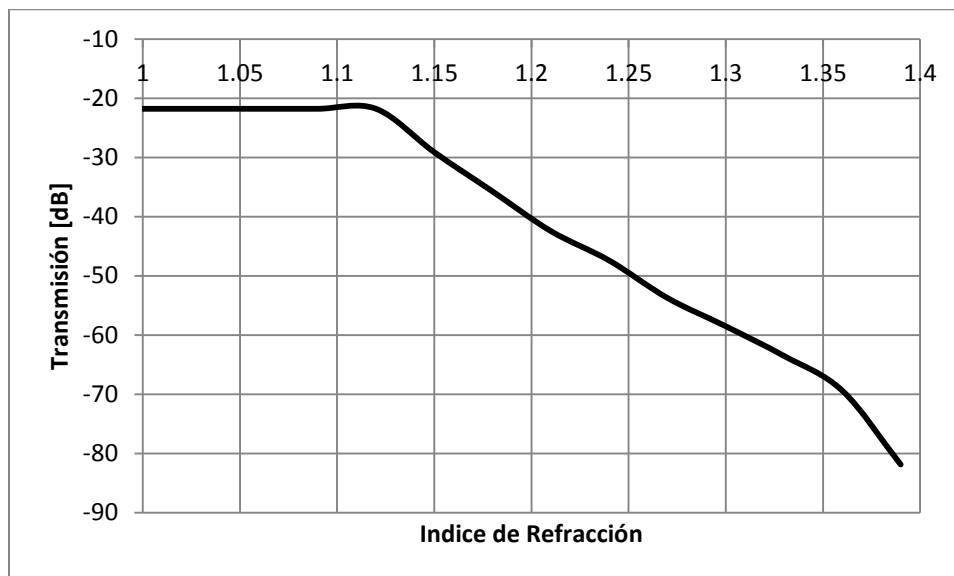
En la siguientes dos figuras (*Figura 4-1* y *Figura 4-2*), se observan los resultados de una simulación hecha en el programa, para los siguientes parámetros:  $y=0$ ,  $z=0$ ,  $d=.02$ ,  $NA=0.2$ ,  $ne=1.55$ ,  $\theta_x=0$ ,  $\theta_y=0$ ,  $\Lambda=.707$ .

## Resultados



**Figura 4-1** Transmisión relativa para los siguientes parámetros:  $y=0$ ,  $z=0$ ,  $d=.02$ ,  $NA=0.2$ ,  $ne=1.55$ ,  $\theta_x=0$ ,  $\theta_y=0$ ,  $\lambda=.707$ ,  $npi=1$

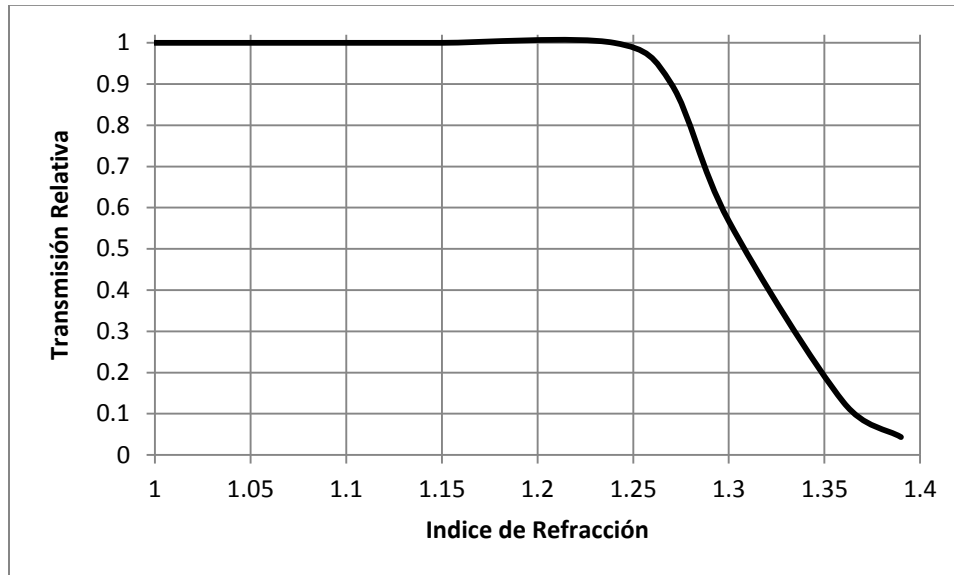
En la *Figura 4-2* se puede observar la transmisión para los parámetros mencionados anteriormente con la transmisión expresada en [dB].



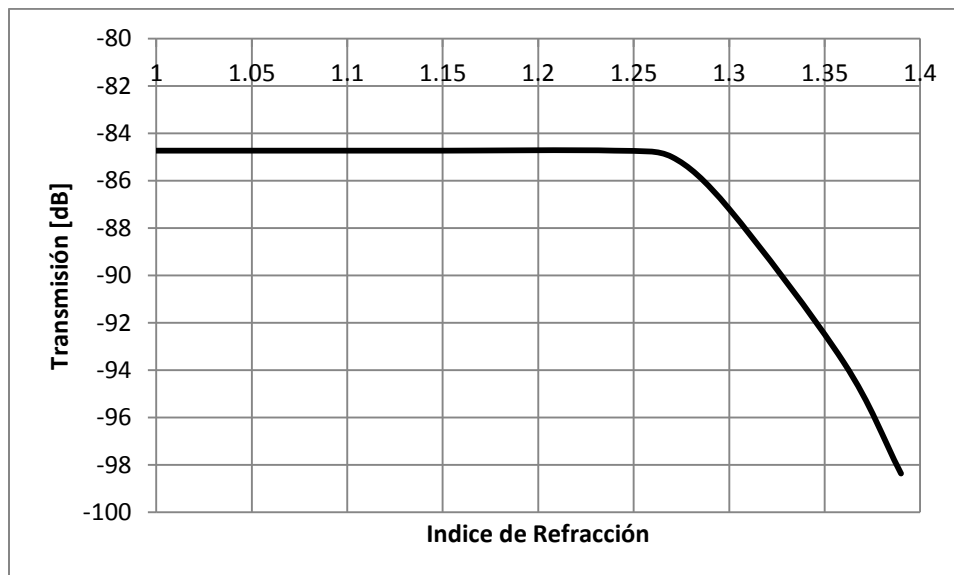
**Figura 4-2** Transmisión en dB para los siguientes parámetros:  $y=0$ ,  $z=0$ ,  $d=.02$ ,  $NA=0.2$ ,  $ne=1.55$ ,  $\theta_x=0$ ,  $\theta_y=0$ ,  $\lambda=.707$ ,  $npi=1$

## Resultados

En la Figura 4-1 se puede observar una transmisión relativa igual a la unidad hasta un índice de refracción externo de 1.12, después de este, la transmisión empieza a decaer hasta ser prácticamente cero.



**Figura 4-3** Transmisión relativa para los siguientes parámetros:  $y=0$ ,  $z=0$ ,  $d=.02$ ,  $NA=0.2$ ,  $ne=1.55$ ,  $\theta_x=0$ ,  $\theta_y=0$ ,  $\lambda=.866$ ,  $npi=1$

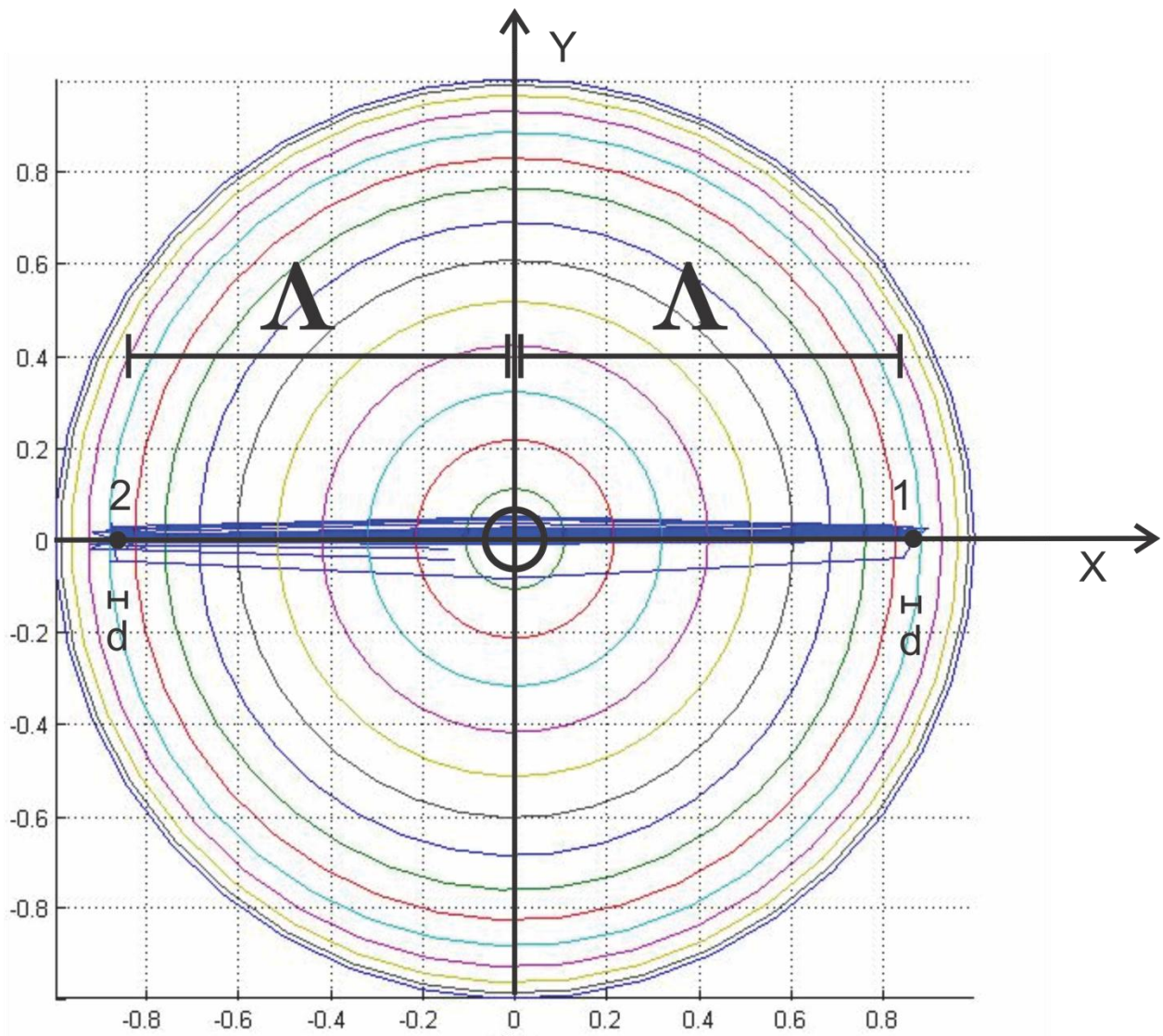


**Figura 4-4** Transmisión en dB relativa para los siguientes parámetros:  $y=0$ ,  $z=0$ ,  $d=.02$ ,  $NA=0.2$ ,  $ne=1.55$ ,  $\theta_x=0$ ,  $\theta_y=0$ ,  $\lambda=.866$ ,  $npi=1$

En las figuras 4-3 y 4-4 la mayor diferencia con las figuras 4-1 y 4-2 radica en la distancia de las fibras ópticas respecto al centro de la esfera. Ésta fue incrementada en 0.159 unidades y se

## Resultados

puede observar un traslado hacia la derecha del escalón que se da. Se puede observar que el incremento en la distancia entre las fibras ópticas tiene un efecto sustancial en la función de transmisión.



**Figura 4-5** Proyección sobre el plano  $xy$ . (1) fibra óptica transmisora, (2) fibra óptica receptora,  $\Lambda=0.866$ ,  $d=0.02$



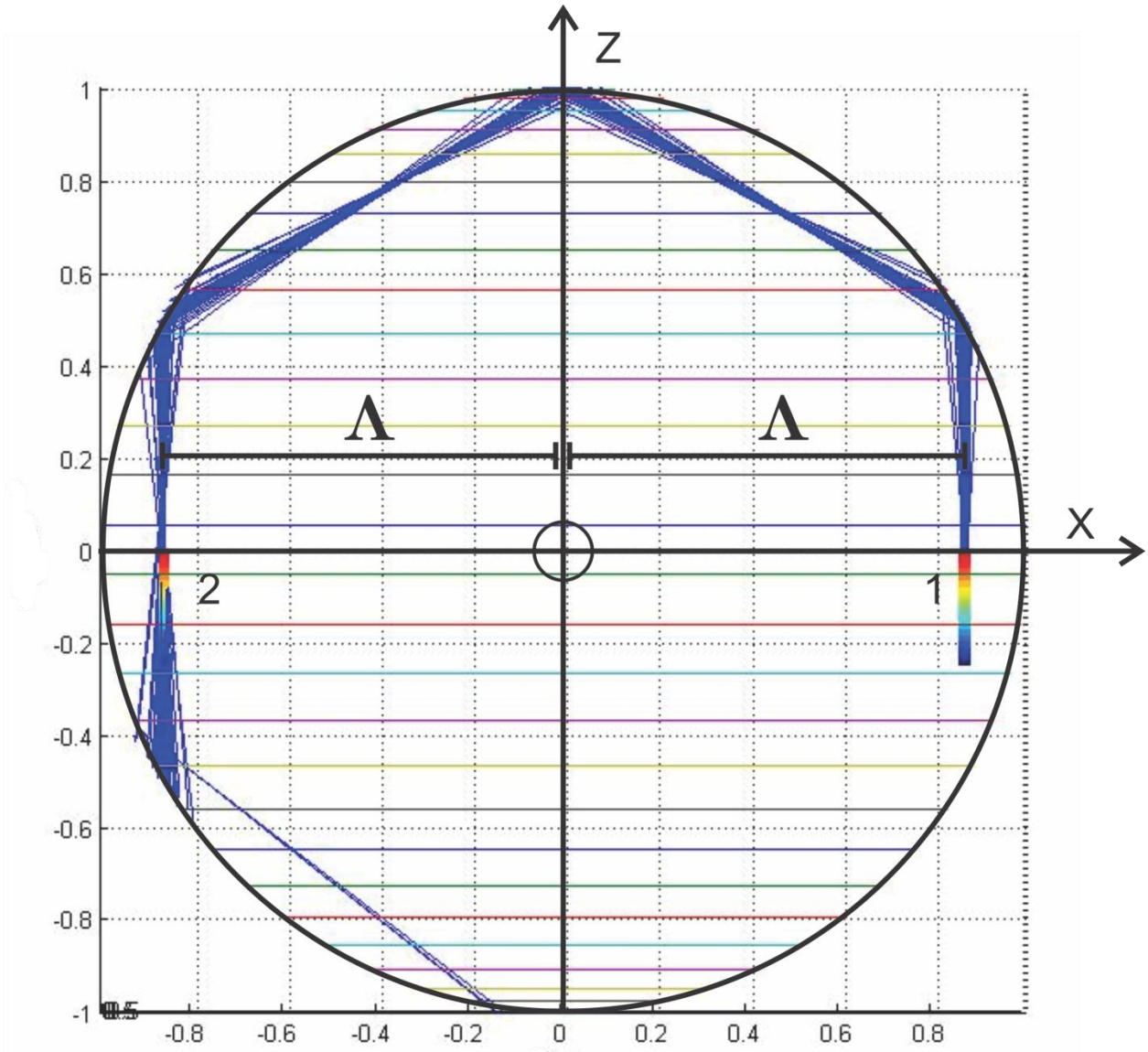


Figura 4-6 Proyección sobre el plano xz. (1) fibra óptica transmisora, (2) fibra óptica receptora,  $\Lambda=0.866$ .

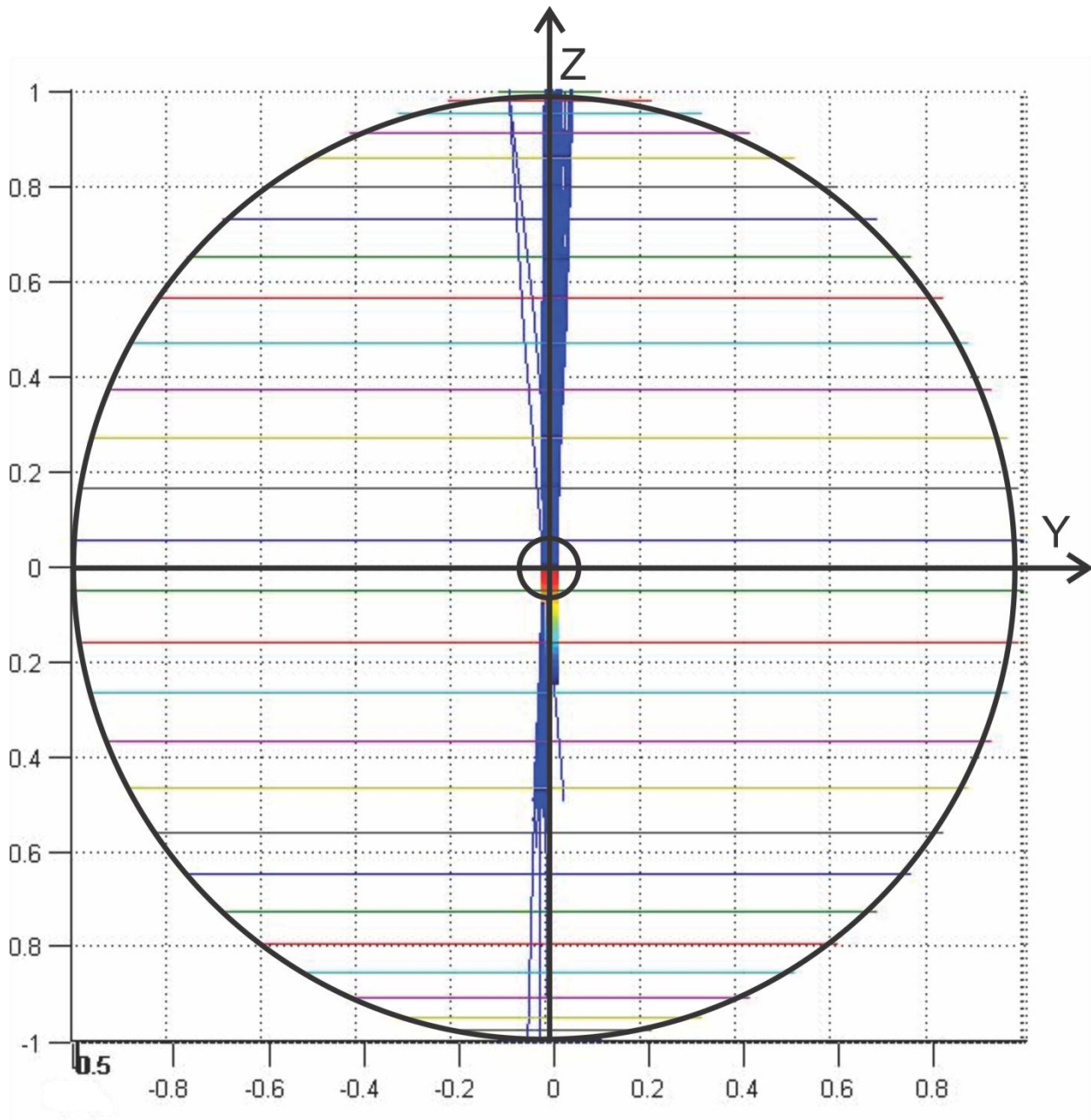
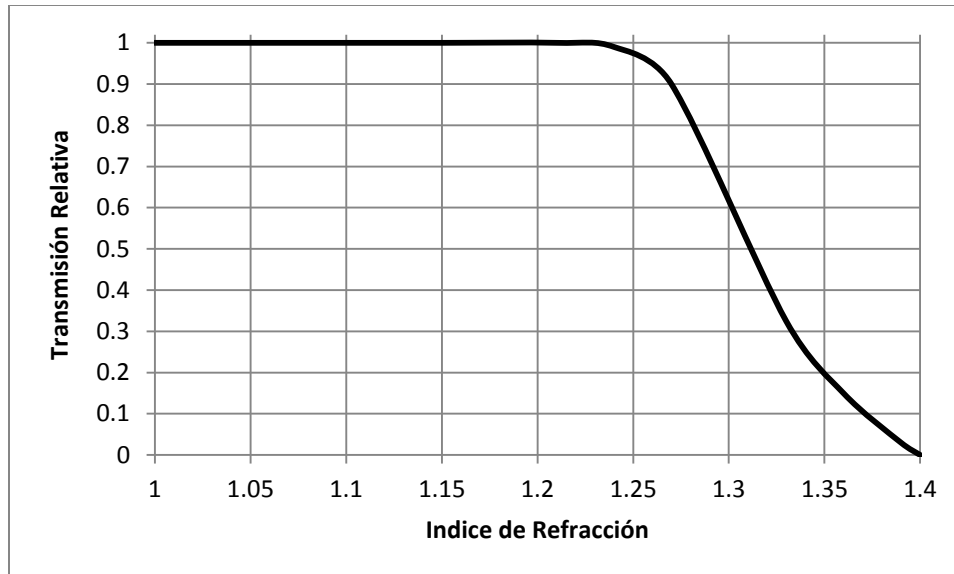
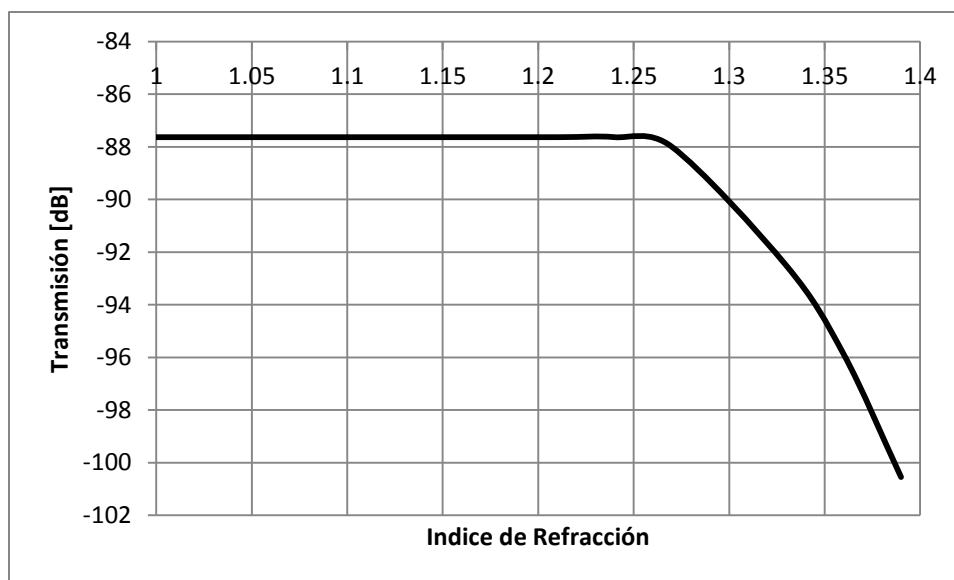


Figura 4-7 Proyección sobre el plano yz.

## Resultados



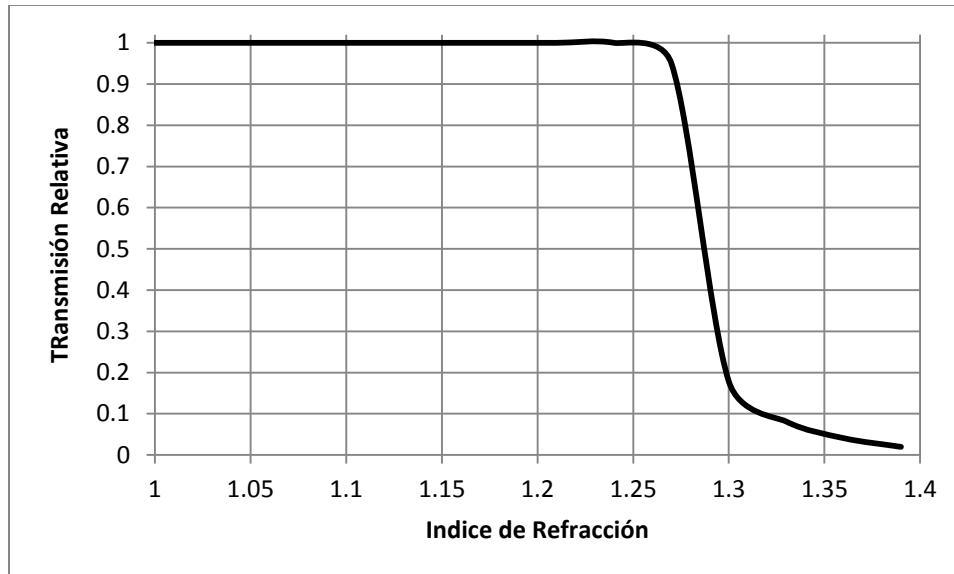
**Figura 4-8** Transmisión relativa para los siguientes parámetros:  $y=0, z=0, \Lambda=0.866, d=0.02, NA=0.2, \theta_x=0, \theta_y=0, ne=1.53, npi=1$



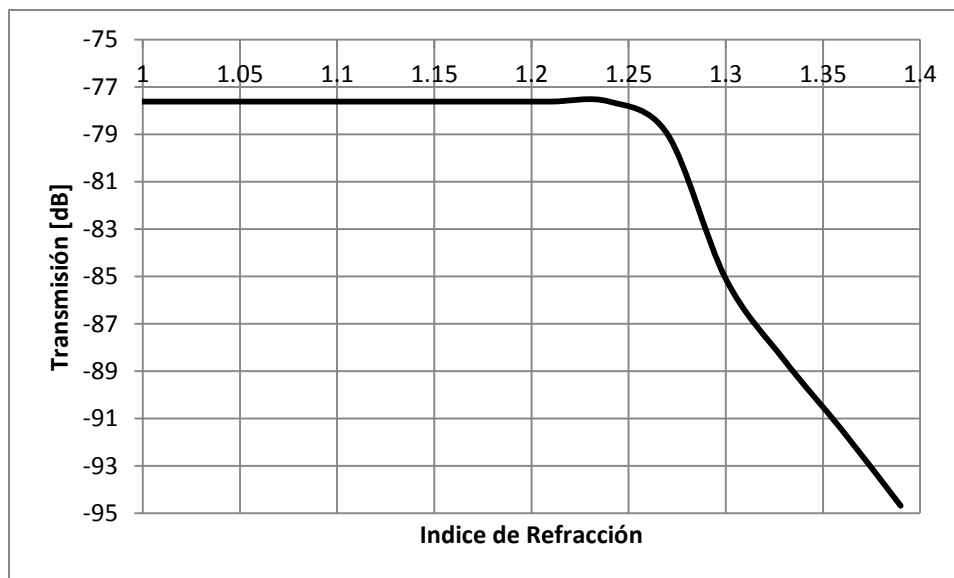
**Figura 4-9** Transmisión en dB para los siguientes parámetros:  $y=0, z=0, \Lambda=0.866, d=0.02, NA=0.2, \theta_x=0, \theta_y=0, ne=1.53, npi=1$

En las figuras 4-8 y 4-9 se puede observar un cambio respecto a las figuras 4-3 y 4-4 en el índice de refracción del medio dieléctrico. En este caso fue de 1.53, mientras que en el anterior fue de 1.55. No existe una traslación significativa de la función de transmisión relativa, aun cuando se haya modificado el valor del dieléctrico.

## Resultados

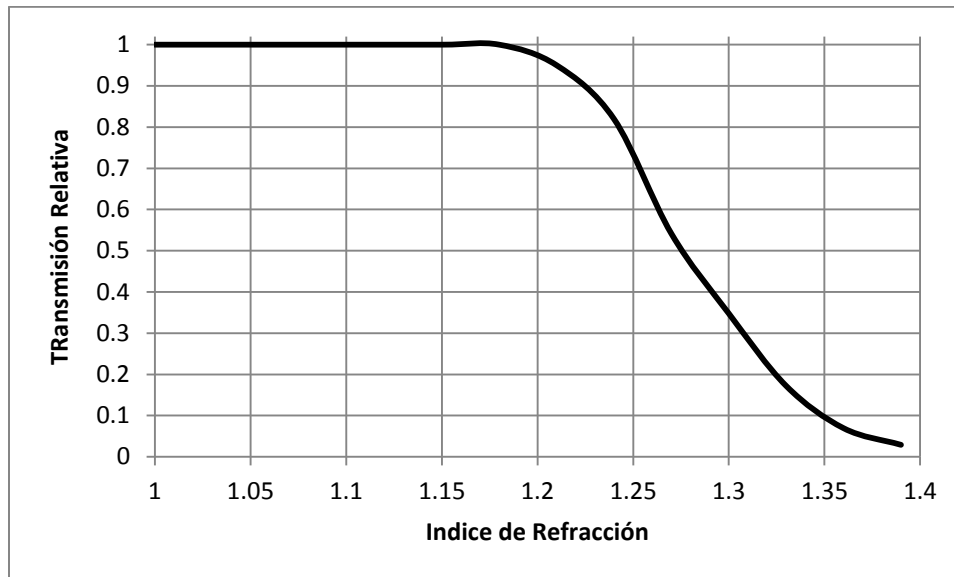


**Figura 4-10** Transmisión relativa para los siguientes parámetros:  $y=0$ ,  $z=0$ ,  $\Lambda=0.866$   $d=0.02$ ,  $NA=0.2$ ,  $\theta_x=0$ ,  $\theta_y=0$ ,  $ne=1.57$ ,  $npi=1$

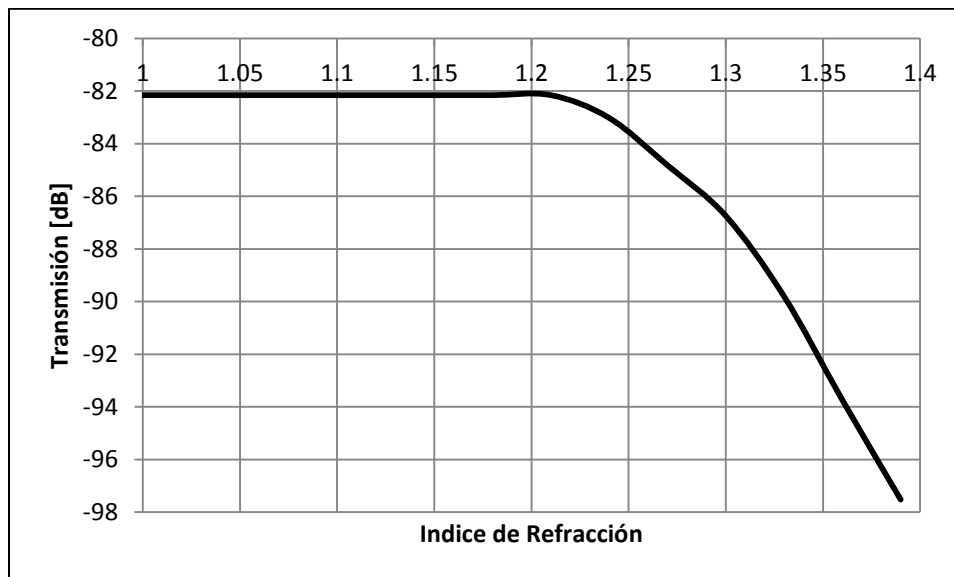


**Figura 4-11** Transmisión en dB para los siguientes parámetros:  $y=0$ ,  $z=0$ ,  $\Lambda=0.866$   $d=0.02$ ,  $NA=0.2$ ,  $\theta_x=0$ ,  $\theta_y=0$ ,  $ne=1.57$ ,  $npi=1$

En las figuras 4-10 y 4-11 se modificó de nuevo el índice de refracción del dieléctrico, usando un valor de 1.57. Se puede observar que respecto a las figuras 4-5 y 4-6 el momento en el que se da el escalón se trasladó hacia la derecha. Se nota también que el efecto no es tan significativo como cuando se alejan las fibras ópticas.

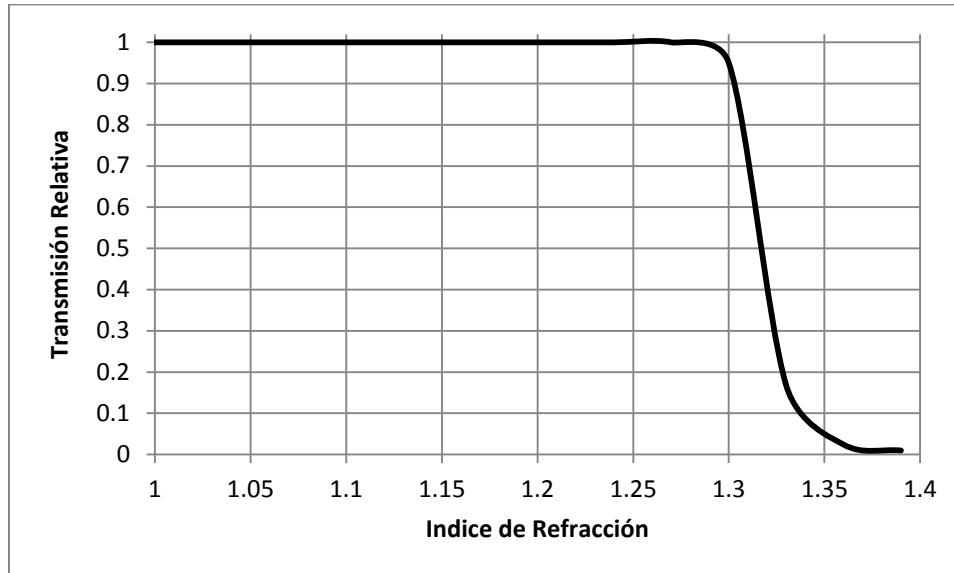


**Figura 4-12** Transmisión relativa para los siguientes parámetros:  $y=0, z=0, \Lambda=0.866, ne=1.55, NA=0.2, \theta_x=0, \theta_y=0, d=0.01, npi=1$

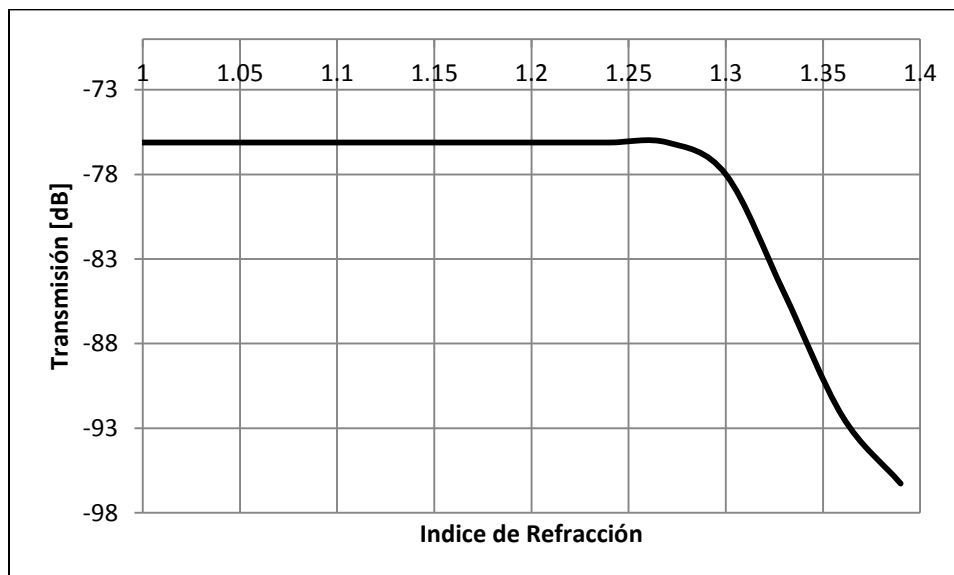


**Figura 4-13** Transmisión en dB para los siguientes parámetros:  $y=0, z=0, \Lambda=0.866, ne=1.55, NA=0.2, \theta_x=0, \theta_y=0, d=0.01, npi=1$

En las figuras 4-12 y 4-13, se puede observar un cambio respecto a las figuras 4-3 y 4-4 en el diámetro de la fibra óptica. En este caso se redujo a la mitad. Se puede observar que la transición hacia una transmisión “cero” se da en este caso en 1.2, mientras que en el caso mencionado anteriormente ocurre en 1.25, es decir, cuando se disminuye el diámetro de la fibra óptica, ocurre una traslación hacia la izquierda.

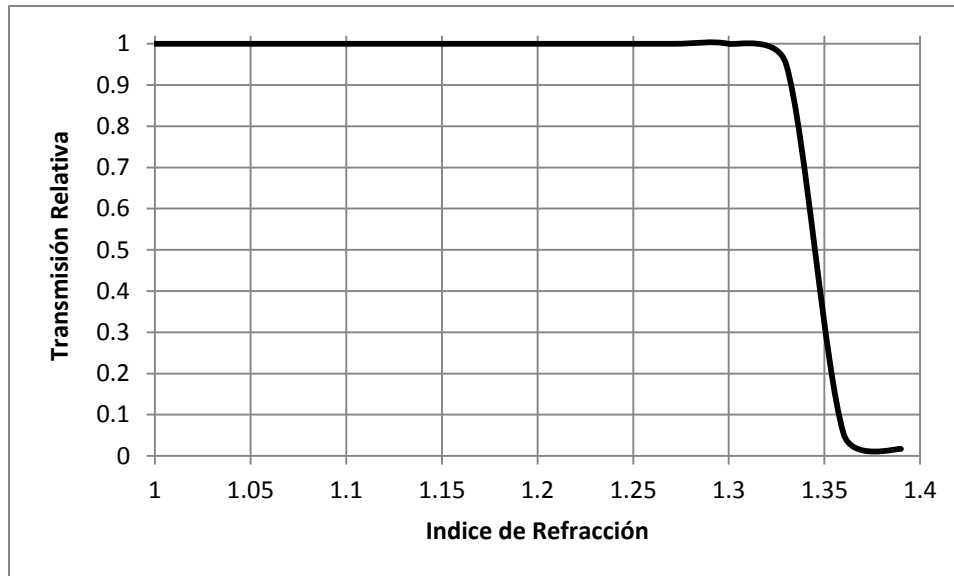


**Figura 4-14** Transmisión relativa para los siguientes parámetros:  $y=0$ ,  $z=0$ ,  $\Lambda=0.866$ ,  $ne=1.55$ ,  $NA=0.2$ ,  $\theta_x=0$ ,  $\theta_y=0$ ,  $d=0.05$ ,  $n_{pi}=1$

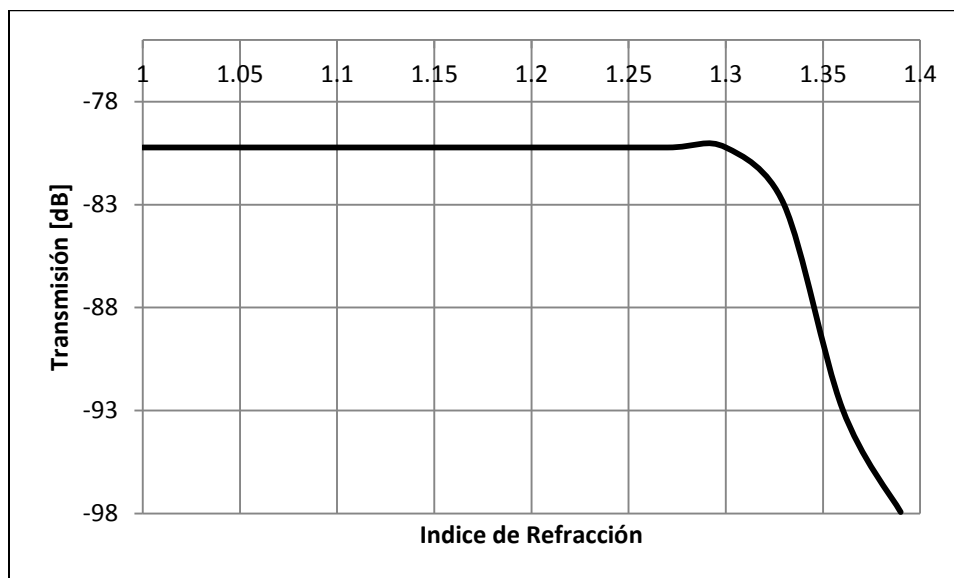


**Figura 4-15** Transmisión en dB para los siguientes parámetros:  $y=0$ ,  $z=0$ ,  $\Lambda=0.866$ ,  $ne=1.55$ ,  $NA=0.2$ ,  $\theta_x=0$ ,  $\theta_y=0$ ,  $d=0.05$ ,  $n_{pi}=1$

En el caso de las Figuras 4-14 y 4-15, el diámetro de la fibra óptica se incrementó 5 veces respecto a las simulaciones de las figuras 4-9 y 4-10. Se observa que como resultado, el momento en el que se da la transición entre transmisión total y nula, sufre una traslación a la derecha, es decir, se incrementa.



**Figura 4-16** Transmisión relativa para los siguientes parámetros:  $y=0, z=0, \Lambda=0.866, n=1.55, \theta_x=0, \theta_y=0, d=0.02, NA=0.1, n_{pi}=1$

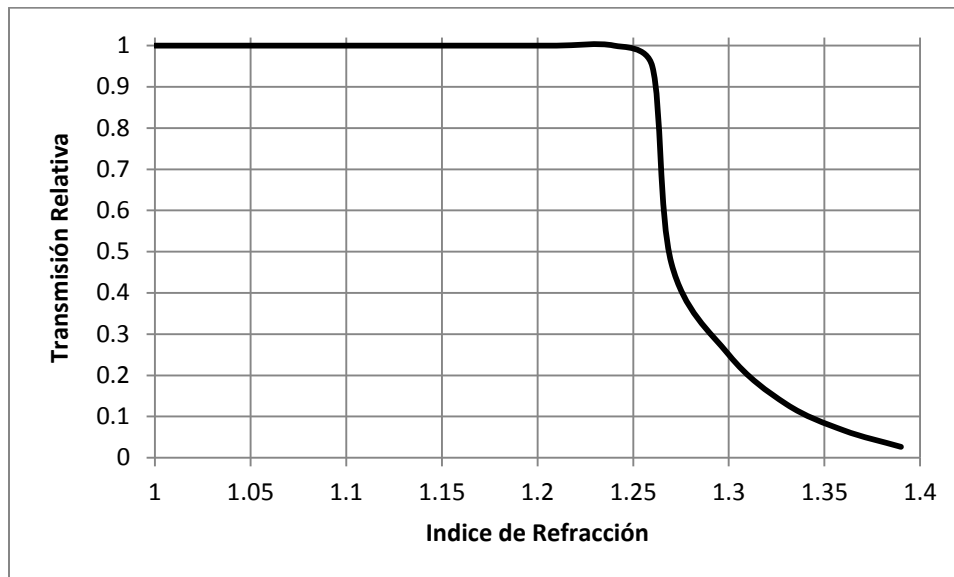


**Figura 4-17** Transmisión en dB para los siguientes parámetros:  $y=0, z=0, \Lambda=0.866, n=1.55, \theta_x=0, \theta_y=0, d=0.02, NA=0.1, n_{pi}=1$

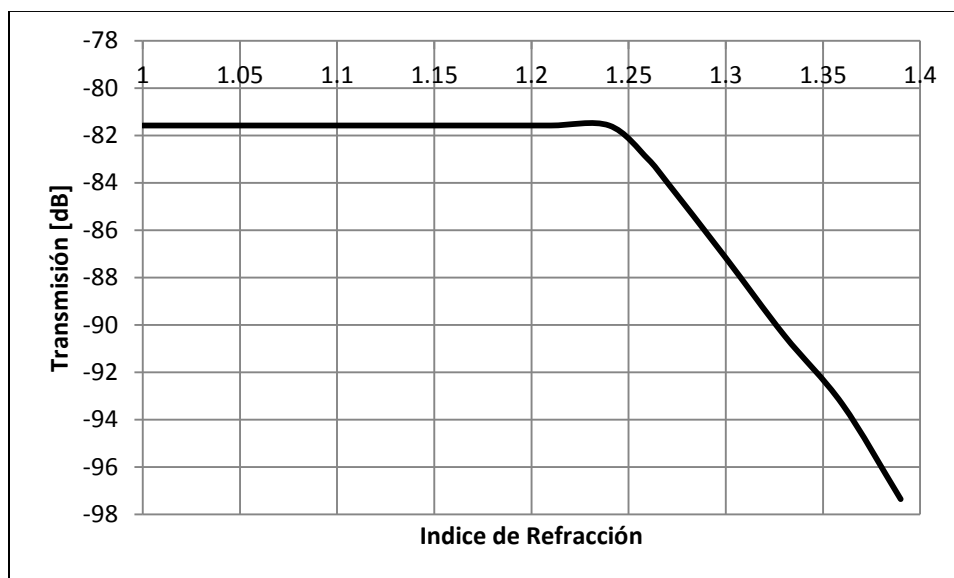
En las figuras 4-16 y 4-17 se observa un cambio fundamental respecto a las figuras 4-3 y 4-4: la apertura numérica de las fibras. En estas dos últimas figuras el valor de esta variable es la mitad

## Resultados

de las primeras. Una clara diferencia es la ubicación del escalón, que al reducir la apertura numérica se trasladó hacia la izquierda.



**Figura 4-18** Transmisión relativa para los siguientes parámetros:  $y=0$ ,  $z=0$ ,  $\Lambda=0.866$ ,  $ne=1.55$ ,  $\theta_x=0$ ,  $\theta_y=0$ ,  $d=0.02$ ,  $NA=0.4$ ,  $npi=1$



**Figura 4-19** Transmisión en dB para los siguientes parámetros:  $y=0$ ,  $z=0$ ,  $\Lambda=0.866$ ,  $ne=1.55$ ,  $\theta_x=0$ ,  $\theta_y=0$ ,  $d=0.02$ ,  $NA=0.4$ ,  $npi=1$



## Resultados

En las figuras 4-18 y 4-19 se puede observar que la apertura numérica se incrementó 4 veces respecto a las figuras 4-16 y 4-17. Atendiendo la línea de pensamiento observado en las dos figuras anteriores, se puede ver, que al incrementar la apertura numérica, el escalón sufre una traslación hacia la derecha.

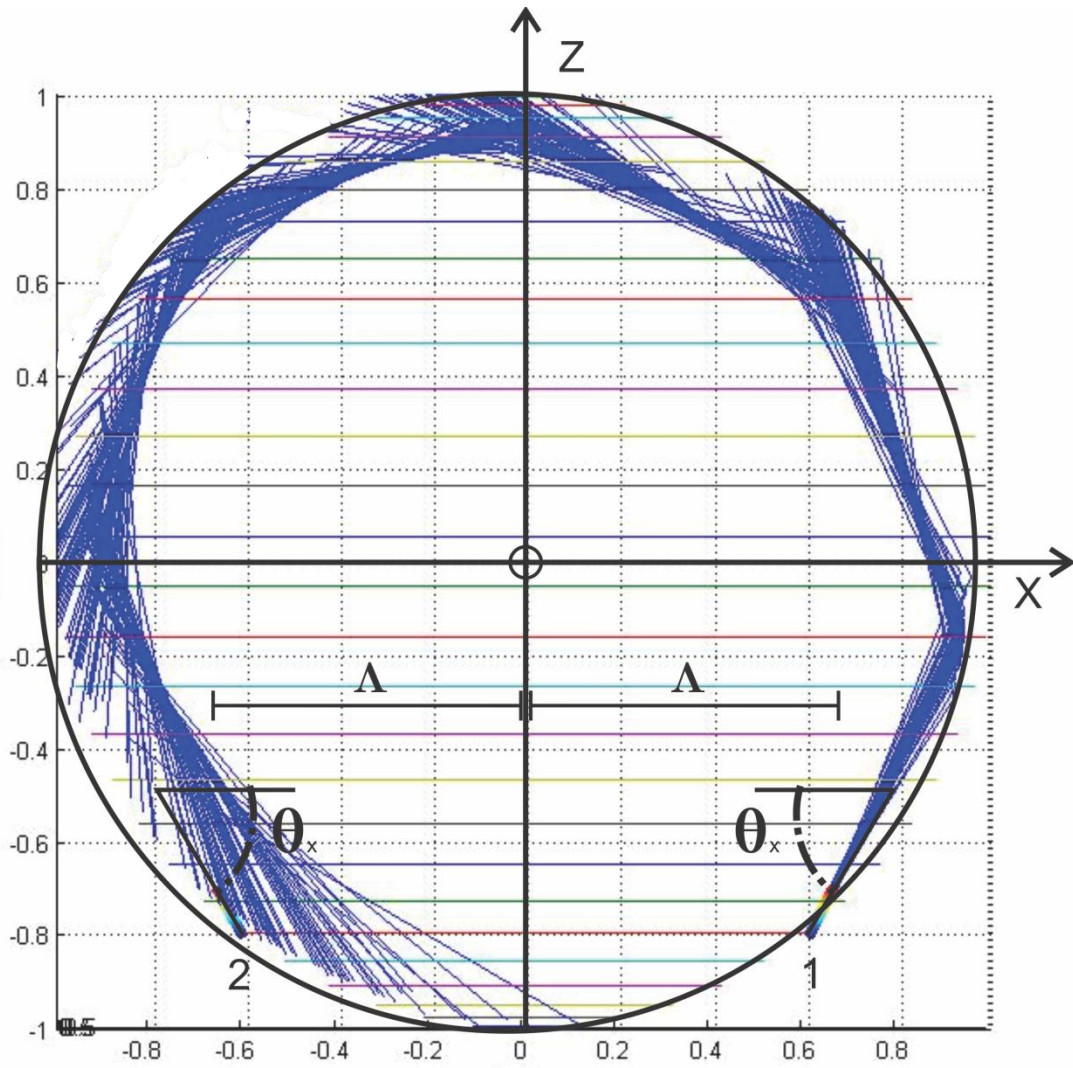
Como se ha mencionado repetidamente en este trabajo, el objetivo de la tesis es realizar un modelado de configuraciones que no eran posibles en intentos previos. Particularmente el hecho de poder simular segmentos de fibra óptica. En los siguientes ejemplos se toma un enfoque diferente al que se había tomado anteriormente. Se introducen dos mayores variantes a los parámetros físicos utilizados anteriormente: la altura de las fibras ópticas y su inclinación.

En todos los ejemplos anteriores las fibras ópticas se encontraban a una altura cero respecto al origen de la esfera. En los siguientes resultados se observará que la altura empieza a variar.

En segundo lugar se hará una rotación de las fibras ópticas, tanto transmisora como receptora, respecto a los ejes  $x$  y  $y$ . Con esto, se podrán verificar nuevas posibilidades y dimensiones en el estudio de este tipo de sensores.

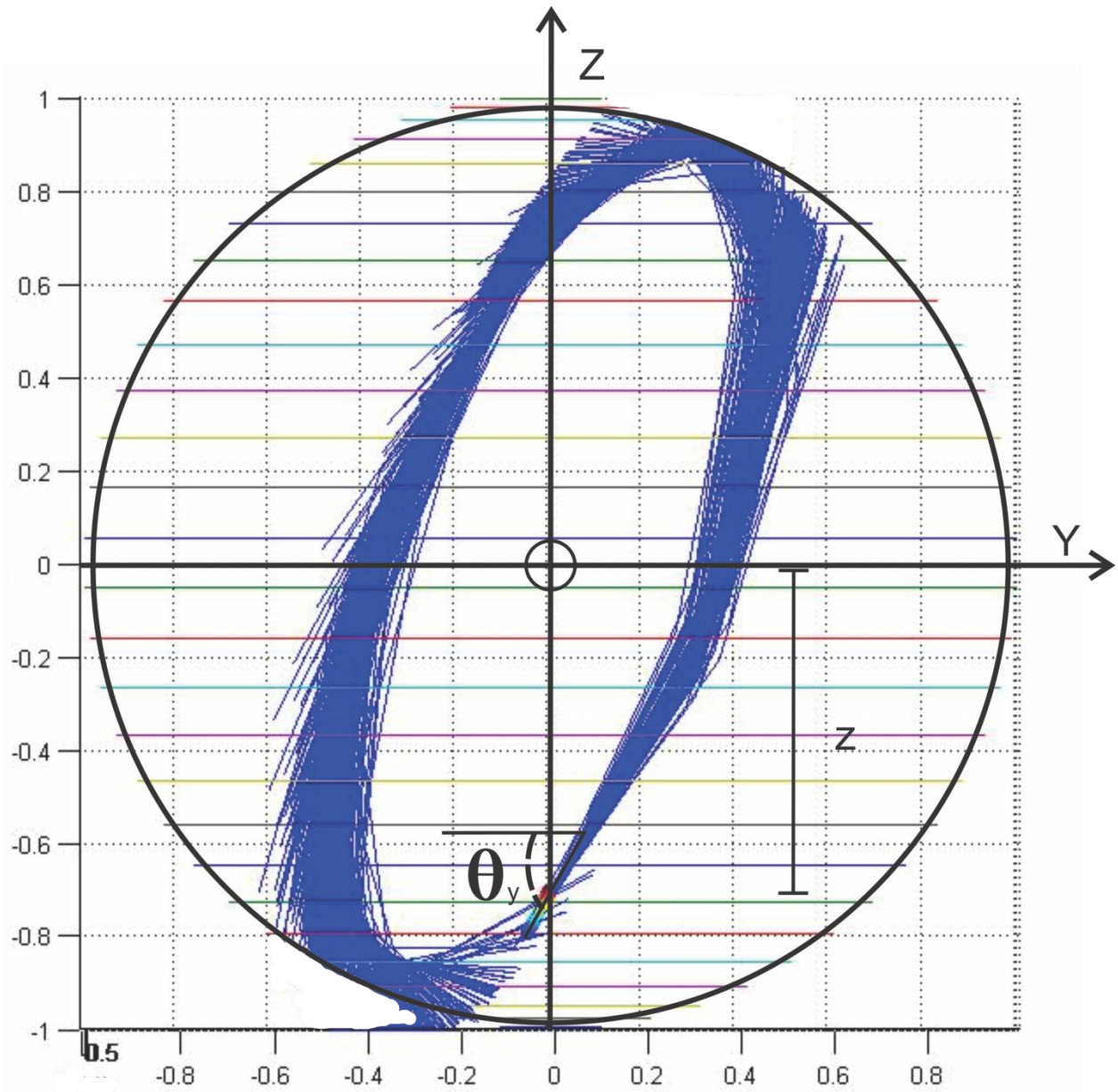
Para poder visualizar lo anterior, se pueden observar las proyecciones sobre los planos  $xz, yz$  y  $xy$  en las figuras 4-20, 4-21, 4-22.

Resultados



**Figura 4-20** Proyección sobre el plano xz. (1) fibra óptica transmisora, (2) fibra óptica receptora,  $\Lambda=0.66$ ,  $\theta_x = -\frac{\pi}{6.75}$

Resultados



**Figura 4-21** Proyección sobre el plano yz. (1) fibra óptica transmisora, (2) fibra óptica receptora,  $\Lambda=0.66$ ,  $\theta_y = -\frac{\pi}{6.75}$ ,  $z=-0.7$

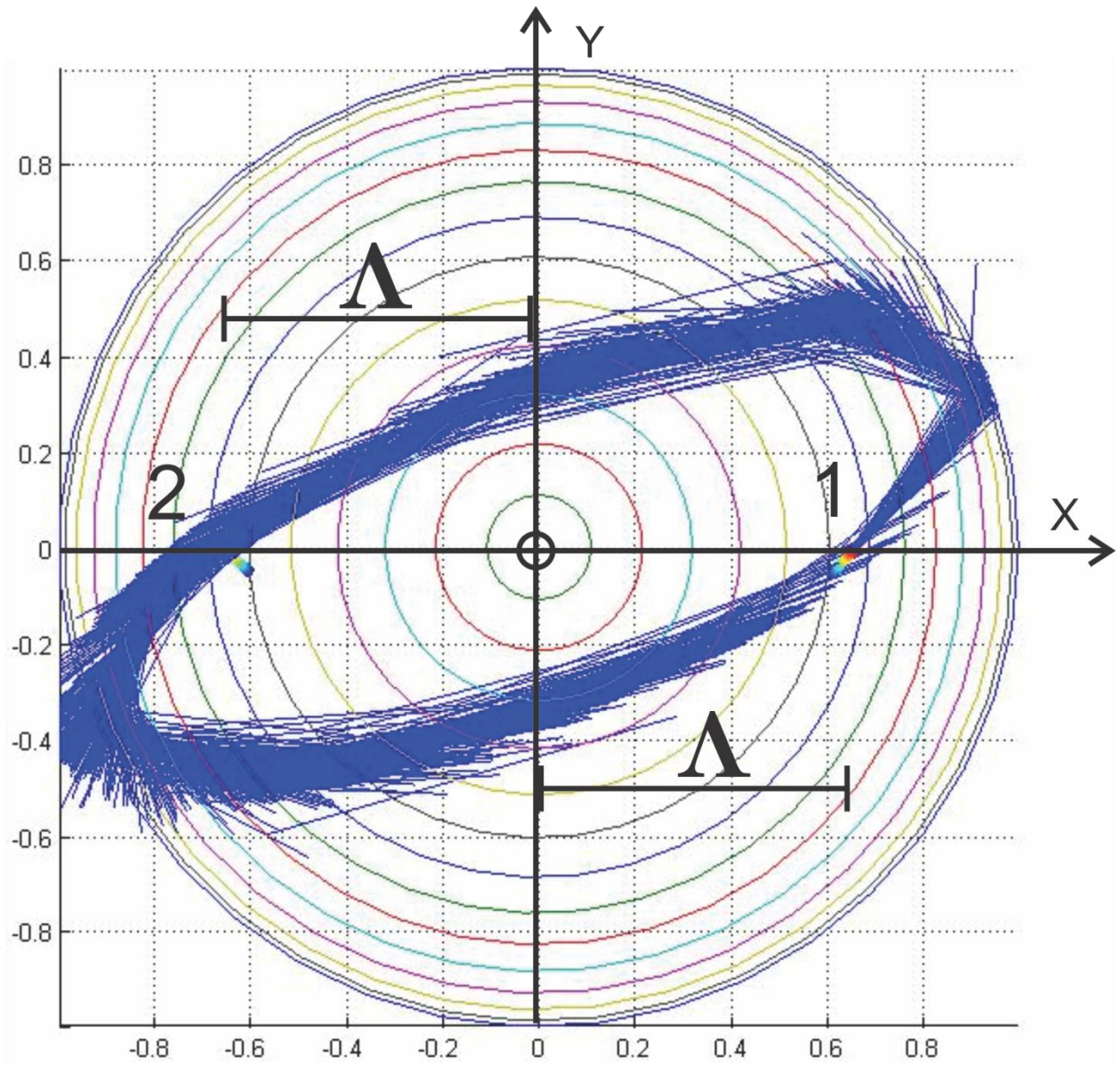
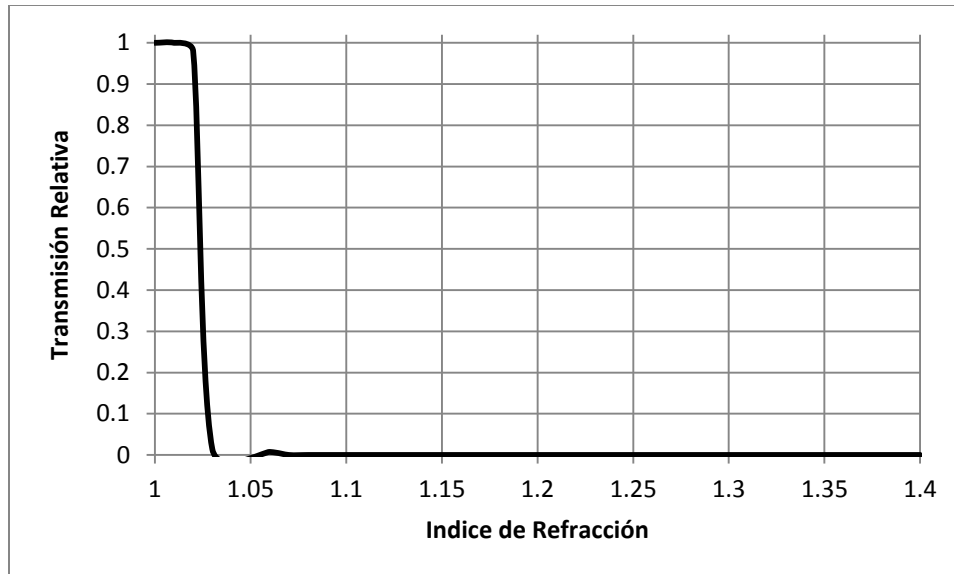
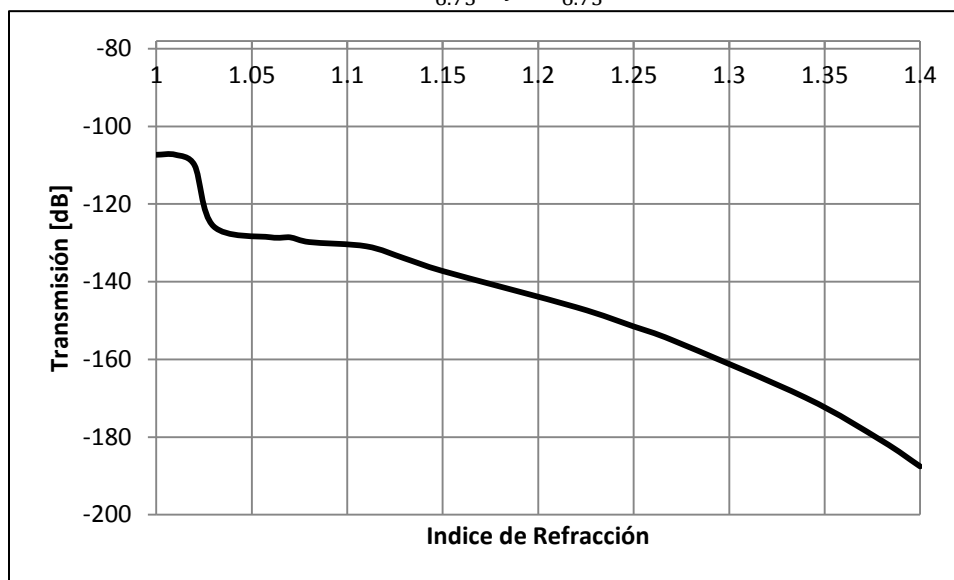


Figura 4-22 Proyección sobre el plano yz. (1) fibra óptica transmisora, (2) fibra óptica receptora,  $\Lambda=0.66$ .



**Figura 4-23** Transmisión relativa para los siguientes parámetros:  $y=0, z=-0.7, \Lambda=0.66, ne=1.55, d=0.02,$

$$NA=0.2, \theta_x=-\frac{\pi}{6.75}, \theta_y=-\frac{\pi}{6.75}, npi=10$$



**Figura 4-24** Transmisión en dB para los siguientes parámetros:  $y=0, z=-0.7, \Lambda=0.66, ne=1.55, d=0.02,$

$$NA=0.2, \theta_x=-\frac{\pi}{6.75}, \theta_y=-\frac{\pi}{6.75}, npi=10$$

La simulación anterior puede ser vista gráficamente en las *figuras 4-20, 4-21 y 4-22* en donde se puede observar la fibra óptica transmisora (1), la fibra óptica receptora (2) y los ejes coordenados  $x, y$  o  $z$ , dependiendo de la figura. Es de resaltar la posición de las fibras ópticas respecto al eje  $z$  en la *figura 4-21* en donde se puede observar que las fibras se encuentran a una distancia de  $-0.7$  unidades del origen. Además se les dio una inclinación de  $-26.6^\circ$  respecto a los ejes  $x$  y  $y$ , misma que puede ser observada en las *figuras 4-20 y 4-21*. Los resultados son altamente contrastantes con lo que se había observado anteriormente. En estos nuevos resultados se observa un escalón en un índice de refracción de 1.03.

## Resultados

Estos resultados son resaltables debido a que como se vio de la *figura 4-1* a la *figura 4-19* cuando se modifican parámetros de las fibras ópticas como: la apertura numérica, el diámetro de la fibra, la distancia entre ellas o el índice de refracción del dieléctrico se puede trasladar hacia la izquierda o derecha el punto en el que se da el escalón, sin embargo esta traslación no tiene magnitudes considerables si las comparamos con la que se ve en las *figuras 4-23* y *4-24*. Se puede ver que el cambio es proporcionalmente mucho mayor que con cualquier otra modificación.

Esto plantea nuevas posibilidades, ya que ahora no se está sujeto a los parámetros que podían ser modificados hasta antes de la aparición de este trabajo: apertura numérica, el diámetro de la fibra, la distancia entre ellas o el índice de refracción. A la lista se agregan: la altura respecto al centro de la esfera y el ángulo de rotación de las fibras ópticas.

De esta forma se logra también incrementar el número de reflexiones internas que sufren los rayos dentro del elemento dieléctrico.

# Capítulo 5 Conclusiones

## 5.1 Logros obtenidos

Se desarrolló un modelo matemático que permite modelar segmentos de esferas. Este nuevo modelo consiste de un programa hecho en Matlab con una interfaz gráfica que tiene como ventaja un uso fácil y maleabilidad del código.

Mediante la plataforma gráfica de Matlab, se puede tener una gráfica en 3 dimensiones de la esfera, las fibras ópticas y la trayectoria de los rayos. De esta forma se pueden identificar inmediatamente posibles mejoras en el diseño del sistema. Se pueden así proponer diferentes posiciones de las fibras ópticas, en el eje  $x$ ,  $y$  o  $z$ .

Se pudieron simular diversas configuraciones de segmentos de esfera y se pudo observar que los sensores refractométricos de este tipo, pueden servir para poder detectar sustancias, en particular gases, que posean índices de refracción más pequeños a los líquidos.

En los trabajos anteriores, debido a las restricciones del modelo, sólo se podían detectar, mayoritariamente sustancias líquidas.

Entre las potenciales aplicaciones podemos destacar la detección de gases que pueden llegar a poner en riesgo la vida humana en actividades de alto riesgo como la minería.

## 5.2 Discusión

La resolución de las gráficas es un punto importante a considerar en el desarrollo futuro de este proyecto. Esta se puede incrementar sustancialmente, sin embargo requiere de un mayor poder de cómputo.

## Conclusiones

En los ejemplos mostrados en esta tesis se trabajó exclusivamente con fibras ópticas circulares. Sin embargo se puede extender el algoritmo a fibras ópticas rectangulares. Se tendría que agregar solamente una línea. Primero se tendría que determinar aleatoriamente la posición en el eje  $x$  del rayo, y posteriormente aleatoriamente en el eje  $y$ . Las restricciones se impondrían de tal forma que la posición en los dos ejes se encuentre dentro del rectángulo. Las ecuaciones quedarían de la siguiente forma:

$$\begin{aligned}x_i &= ax_1 \\y_i &= bx_2 \\z_i &= z_{fibra}\end{aligned}\tag{5.1}$$

En donde  $x_1$  y  $x_2$  son dos números aleatorios entre -1 y 1, y  $a$ ,  $b$  son los lados del rectángulo. Se pueden encontrar las coordenadas sin necesidad de generar dos números aleatorios, pero eso quedaría a discreción del programador y los grados de aleatoriedad que le quiera dar al programa.

Para verificar si el rayo entra o no a la fibra óptica receptora, se tendría primero que seguir el procedimiento de intersección buscado anteriormente, y después añadir dos condiciones *if* para verificar que el rayo está dentro de los límites permitidos del rectángulo que describe a la fibra óptica receptora. El procesamiento del ángulo de intersección sería igual que en la presente tesis.

Este modelo se puede usar para segmentos de esfera de cualquier dimensión. Como se ha mencionado anteriormente, este modelo se realiza en una esfera. Inicialmente las fibras ópticas están posicionadas a una altura de  $z=0$ , por lo que al hacer la simulación, esta es idéntica a la de una semiesfera.

Sin embargo para poder modelar segmentos de esfera sólo se necesita definir la posición inicial de las fibras en el eje  $z$  y su inclinación para poder modelar segmentos de esfera diferentes a la semi esfera de 180 grados.

Además, con modificaciones menores al programa se pueden simular posiciones asimétricas de las fibras ópticas, esto es: que las fibras no estén a una distancia simétrica respecto al eje  $x$ . Además se puede colocar las fibras ópticas en diferentes puntos del eje  $y$  o  $z$ . De esta forma se pueden simular muchas más combinaciones que puede ofrecer resultados interesantes.

Si se llegaran a necesitar simular diferentes elementos dieléctricos, con formas de superficies diferentes a las esféricas se debería solamente modificar la ecuación cartesiana de la esfera y sustituirla por la ecuación que describa la nueva superficie. Es de resaltar que sólo se pueden usar ecuaciones de superficies que sean continuas y derivables en todos los puntos, así mismo la función debe de ser continuamente diferenciable. Esto implica que se puede usar el



## Conclusiones

programa para: conos, paraboloides, elipsoides u otra superficie descrita por una ecuación cartesiana. Esto significa también que si se decidiera intentar usar el presente programa para un prisma, no se podría hacer, ya que la derivada en algunos puntos no es continuamente diferenciable.

Se puede extender el presente algoritmo para un paraboloide haciendo las siguientes modificaciones. Para poder encontrar el punto de intersección entre el paraboloide y el haz, se encuentra el plano en el que está el haz. Este plano está formado por el propio haz de luz y el punto focal del paraboloide. Después se encuentra la intersección de este plano con el paraboloide. La intersección formará una parábola en dos dimensiones. De esta forma se reduce un problema de 3 dimensiones a uno de dos dimensiones. Encontrada la parábola que es la intersección del plano en el que se encuentra el haz y el paraboloide, se encuentra la intersección entre la recta y la parábola. Posteriormente se encuentra el ángulo de incidencia. Para esto se debe de calcular el vector normal a la superficie. La siguiente ecuación permite encontrar el vector normal a cualquier superficie:

$$\mathbf{n} = \frac{\nabla f}{\|\nabla f\|} = \frac{(f_x', f_y', f_z')}{\sqrt{f_x'^2 + f_y'^2 + f_z'^2}} \quad 5.2$$

En donde  $f$  es la función que describe la superficie, que en este caso un paraboloide. El procedimiento posterior es el mismo que se realizó en esta tesis.

Mencionar que para las fibras ópticas cuadradas solo se requeriría definir los puntos de salida e imponer restricciones en función del tamaño y posición de la fibra óptica.

Entre el conocimiento positivo que esta tesis ha generado, podemos decir que ha corroborado resultados obtenidos anteriormente y sabiendo esto, se puede garantizar que los resultados obtenidos para las simulaciones que no habían sido realizadas antes de esta tesis, son válidos y confiables.

Una de las preguntas fundamentales de este algoritmo es ¿cuántos rayos por índice de refracción puede simular? Se realizaron simulaciones exitosas hasta 1000 rayos por índice de refracción. Se intentaron simulaciones para 1000 rayos por índice de refracción a pasos de .01. Sin embargo estos intentos no fueron exitosos.

Una de las soluciones es usar computación en nube. La computación en nube, permite resolver un paradigma que se presenta al realizar este tipo de simulaciones. Resulta altamente costoso mantener equipos de computación altamente potentes para realizar simulaciones ocasionalmente (por ocasionalmente entiéndase que no se realiza un uso intensivo de los

## Conclusiones

recursos). Es más caro mantener equipo especializado para realizar cálculos sólo cuando se necesitan. Es por eso que se utilizan recursos que se encuentran en la nube.

En muchas disciplinas, incluidas esta, las demandas para una computación masiva de información puede incrementarse durante breves periodos de tiempo. Con la computación en la nube se pueden adquirir sistemas computacionales casi instantáneamente, con un solo clic los usuarios pueden obtener cientos de recursos adicionales para sus aplicaciones.

MATLAB provee una herramienta de computación paralela, que se emplea para proveer a los usuarios con el lenguaje y las herramientas para programar aplicaciones de MATLAB en paralelo, así como mecanismos para mandar aplicaciones para su ejecución.

En algunas de las configuraciones, se puede enviar el trabajo a un cluster para que lo realice y posteriormente regresar a recibir los resultados de la simulación. Los resultados son enviados tan pronto acabe la simulación.

Esta solución permitiría realizar la computación de información que equipos comunes no pueden realizar.

## *Apéndice A Índices de refracción*

<b>Material</b>	<b>Índice de refracción</b>	<b>Referencia*</b>
Vacio	1	3
Aire a CNPT	1.000277	2
<b>Gases a 0 °C y 1 atm</b>		<b>Referencia*</b>
Aire	1.000293	3
Helio	1.0000360	3
Hidrógeno	1.0001400	3
Dióxido de carbono	1.0004490	3
Agua	1.0002610	3
Oxígeno	1.0002760	3
Argón	1.0002810	3
Nitrógeno	1.0002970	3
Clorina	1.0007680	3
<b>Líquidos a 20 °C</b>		<b>Referencia*</b>
Benzeno	1.501	3
Disulfuro de carbono	1.628	3
Tetracloruro de Carbono	1.460	3
Etanol	1.360	3
Agua	1.33335	3
Sulfuro	1.960	3
<b>Sólidos a temperatura ambiente</b>		<b>Referencia*</b>
Anatasa	2,496	3
Diamante	2,417	
Ámbar	1.546	3
Silica fusionada	1,458	3
Cloridio de Sodio	1.544	3

Otros materiales		Referencia
Cubo de hielo	1.309	3
Acetona	1.36	3
Glicerina	1.473	3
Bromina	1.661	3
Teflón	1.35	3
Vidrio acrílico	1.489	3
Criolita	1,338	2
Sal de roca	1,516	2
Zafiro	1.76	3
Fosfuro de Galio	3.5	2
Arsenuro de Galio	3,927	2
Metanol	1.329	3
Silicio	4.01	2
Bronce	1.18	3
Cobre	1.1	3
Nitrógeno (líquido)	1.2053	3
Oxígeno (líquido)	1.221	3

## Bibliografía

1. "Refractive Index". Abril 2011 [Online]. Disponible en: <http://macro.lsu.edu/howto/solvents/Refractive%20Index.htm>
2. "Lista de índices refractivos". Abril del 2011 [Online]. Disponible en: [http://www.worldlingo.com/ma/enwiki/es/List\\_of\\_refractive\\_indices](http://www.worldlingo.com/ma/enwiki/es/List_of_refractive_indices)
3. "Refraction –Snell's Law". Abril del 2011 [Online]. Disponible en: <http://interactagram.com/physics/optics/refraction/>

## *Apéndice B Listado del Programa*

```

function varargout = untitled(varargin)
gui_Singleton = 1;
gui_State = struct('gui_Name',       mfilename, ...
                  'gui_Singleton',  gui_Singleton, ...
                  'gui_OpeningFcn', @untitled_OpeningFcn, ...
                  'gui_OutputFcn',  @untitled_OutputFcn, ...
                  'gui_LayoutFcn',  [], ...
                  'gui_Callback',   []);
if nargin && ischar(varargin{1})
    gui_State.gui_Callback = str2func(varargin{1});
end

if nargin
    [varargout{1:nargout}] = gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
else
    gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
end

function untitled_OpeningFcn(hObject, eventdata, handles, varargin)
handles.output = hObject;

guidata(hObject, handles);

function varargout = untitled_OutputFcn(hObject, eventdata, handles)
varargout{1} = handles.output;

function edit1_Callback(hObject, eventdata, handles)

function edit1_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUiControlBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function edit2_Callback(hObject, eventdata, handles)

function edit2_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUiControlBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

```

```

function answer_Callback(hObject, eventdata, handles)

function answer_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)

if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUiControlBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function edit4_Callback(hObject, eventdata, handles)

function edit4_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)

if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUiControlBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function edit8_Callback(hObject, eventdata, handles)

function edit8_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)

if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUiControlBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function edit9_Callback(hObject, eventdata, handles)

function edit9_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)

if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUiControlBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function axes1_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)

axes(hObject)
imshow('FIG2_1.GIF')

function edit10_Callback(hObject, eventdata, handles)

```

```
function edit10_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)

if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUiControlBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end
```

```
function edit11_Callback(hObject, eventdata, handles)
```

```
function edit11_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
```

```
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUiControlBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end
```

```
function edit12_Callback(hObject, eventdata, handles)
```

```
function edit12_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUiControlBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end
```

```
function edit13_Callback(hObject, eventdata, handles)
```

```
function edit13_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
```

```
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUiControlBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end
```

```
function edit14_Callback(hObject, eventdata, handles)
```

```
function edit14_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
```

```
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUiControlBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end
```

```

function edit15_Callback(hObject, eventdata, handles)

function edit15_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)

if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUiControlBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function edit16_Callback(hObject, eventdata, handles)

function edit16_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)

if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUiControlBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function pushbutton1_Callback(hObject, eventdata, handles)

function edit17_Callback(hObject, eventdata, handles)

function edit17_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)

if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUiControlBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function edit4_KeyPressFcn(hObject, eventdata, handles)

function edit17_KeyPressFcn(hObject, eventdata, handles)

function edit18_Callback(hObject18, eventdata, handles)

function edit18_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)

if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUiControlBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function pushbutton2_Callback(hObject, eventdata, handles)

rfibra=str2num(get(handles.edit1,'string'));           %radio de la
fibra optica emisora
radiorx=str2num(get(handles.edit2,'string'));         %radio de la
fibra receptora

```



```

distancia=str2num(get(handles.edit18,'string')); %distancia
del centro al centro de la fibra
offsetztx=0; %offset fibra tx
NA=str2num(get(handles.NA,'string')); %apertura numerica
ne=str2num(get(handles.ne,'string')); %indice de
refraccion del vidrio
pasos=str2num(get(handles.pasos,'string'));
n1=1;
NARx=str2num(get(handles.NA,'string')); %apertura numérica de
la fibra receptora
angulorotacion=str2num(get(handles.tetax,'string'));
angulorotaciony=-str2num(get(handles.tetay,'string'));
numeroderayos=str2num(get(handles.numerayos,'string'));
numerodereflexiones=str2num(get(handles.numreflexiones,'string'));
matriztx=[1 0 0;0 cos(angulorotacion) -sin(angulorotacion);0
sin(angulorotacion) cos(angulorotacion)]; %alrededor de x
matrizty=[cos(angulorotaciony) 0 sin(angulorotaciony); 0 1 0; -
sin(angulorotaciony) 0 cos(angulorotaciony)];
matrizt=matrizty*matriztx;
matrizrxx=[1 0 0;0 cos(angulorotacion) -sin(angulorotacion);0
sin(angulorotacion) cos(angulorotacion)];
matrizrxy=[cos(-angulorotaciony) 0 sin(-angulorotaciony); 0 1 0; -sin(-
angulorotaciony) 0 cos(-angulorotaciony)];
matriztrx=matrizrxx*matrizrxy;
% matriztrx=eye(3);
%parametros para la grafica final
% indice=zeros(1,1000);
% Pr=zeros(1,1000);
%indice de refraccion medio externo
%global n1 rfibra radiorx ne distancia offsetx NA
% z1 offsety offsetz radio numeroderayos
%para la fibra optica receptora, las distancias desde cada eje a la fibra
offsetx=-distancia;
offsety=0;
offsetz=0;
radio=1; %radio de la esfera
%r=radio;
POTREFLEJADA=0;%potencia inicial del rayo
POTINICIAL=10;
r=radio;
phi=linspace(0,pi,30);
theta=linspace(0,2*pi,40);
[phi,theta]=meshgrid(phi,theta);
inicializador=0; %para inicializar los arreglos de potencia etc, se
inicializa en 1 cuando estamso variando distancia
x=r*sin(phi).*cos(theta);
y=r*sin(phi).*sin(theta);
z=r*cos(phi);
figure(2)

plot3(x,y,z)
axis equal
hold on

%ploteo de la fibra transmisora

```

```

tfibra=linspace(0,2*pi,40);
zfibratx=linspace(-radio/4,0,20);
[tfibra,zfibratx]=meshgrid(tfibra,zfibratx);
xtx=(rfibra*cos(tfibra)*matrizt(1,1)+(rfibra*sin(tfibra))*matrizt(1,2)+zfibratx*matrizt(1,3))+distancia;
ytx=rfibra*cos(tfibra)*matrizt(2,1)+(rfibra*sin(tfibra))*matrizt(2,2)+zfibratx*matrizt(2,3);
ztx=(rfibra*cos(tfibra)*matrizt(3,1)+(rfibra*sin(tfibra))*matrizt(3,2)+zfibratx*matrizt(3,3));
mesh(xtx,ytx,ztx)
%ploteo de la fibra receptora
zfibrarx=linspace(-radio/4,0+offsetz,20);
[tfibrarx,zfibrarx]=meshgrid(tfibrarx,zfibrarx);
xrx=(radiatorx*cos(tfibrarx)*matriztrx(1,1)+radiatorx*sin(tfibrarx)*matriztrx(1,2)+zfibrarx*matriztrx(1,3))+offsetx;
yrx=(radiatorx*cos(tfibrarx)*matriztrx(2,1)+(radiatorx*sin(tfibrarx)*matriztrx(2,2)+zfibrarx*matriztrx(2,3))+offsety;
zrx=(radiatorx*cos(tfibrarx)*matriztrx(3,1)+(radiatorx*sin(tfibrarx)*matriztrx(3,2)+zfibrarx*matriztrx(3,3));
mesh(xrx,yrx,zrx)
xlabel('eje x')
xlabel('eje y')
zlabel('eje z')

for ni=n1:pasos:n1+.4
for m=1:1:numero de rayos %numero de rayos
offsetx=-distancia;
a=[0 0 0];
b=[0 0 0];
aleatorio=rand(1,4); %generacion de numeros aleatorios
posicion=sqrt(aleatorio(1))*rfibra; %distancia del centro de la
fibra al punto aleatorio
angulophi=2*pi*aleatorio(2); %angulo del punto
%procedimiento para determinar el angulo theta de salida

thetahaz=asin(NA/ne)*aleatorio(3);
psi=2*pi*aleatorio(4); %angulo con el que sale el haz de la
fibra
%coordenadas del punto antes de ser rotado
xlalpha=posicion*cos(angulophi);
ylalpha=posicion*sin(angulophi);
zlalpha=offsetztx;
%rotacion del punto
[X]=matrizt*[xlalpha ylalpha zlalpha]';
x1=X(1)+distancia;
y1=X(2);
z1=X(3);
%direccion del haz
Xlalpha=cos(pi/2-thetahaz)*cos(psi); %los inverti lso senos y cosenos
porque creo que como lo hizo konstantin esta mal
Ylalpha=cos(pi/2-thetahaz)*sin(psi);
Zlalpha=sin(pi/2-thetahaz);
%rotacion de la direccion
[Y]=matrizt*[Xlalpha Ylalpha Zlalpha]';
X1=Y(1);
Y1=Y(2);

```

```

Z1=Y(3);
syms t
POTREFLEJADA=POTINICIAL; %aqui inicializamos la potencia del primer rayo

i=0; %inicializacion del contador
a=[x1 y1 z1]; %coordenadas del punto inicial
b=[X1 Y1 Z1]; %direccion del haz
intersecto=0; %parametro para ver si intersecto
fuera=0; %parametro para determinar si el angulo de incidencia
esta dentro del cono de aceptacion
variable=0;
while variable<1
    %se inicializan los valores de lo que se pretende encontrar
    punto=0;
    nuevo=0;
    %se encuentran las soluciones a la ecuacion cuadratica
    [T]=solve('t^2*(b(1)^2+b(2)^2+b(3)^2)+2*t*(b(1)*a(1)+b(2)*a(2)+a(3)*b(3))+(a(
1)^2+a(2)^2+a(3)^2)=radio^2' );
    %[T]=solve('t^2*(b(1)^2+b(2)^2+b(3)^2)+(a(1)^2+a(2)^2+a(3)^2)=radio^2' );
    t1=eval(T(1));
    t2=eval(T(2));
    %se determina la ubicacion del punto

    if t1>0
        punto=a+b.*t1;
    else
        punto=a+b.*t2;
    end

    grid on
    %plot3(normal(:,1),normal(:,2),normal(:,3))

    i=i+1;
    if i==numerodereflexiones+1
        variable=1;
        llegomaximo=1;
    else
        %angulo de incidencia y ver si esta dentro de angulo critico
        aincidencia=pi/2-acos(dot(b,punto)/(norm(punto)*norm(b)));
        acritico=asin(ni/ne);
        if aincidencia>acritico
            variable=1;
            refracto=1;
            %LADIST=distancia;
        else
            %
            a
            %
            b
            %
            punto
            %
            norm(punto)
            %si el angulo no refracto, se reflejo, se calculan las coordenadas del haz
            reflejado
            vectornormalunitario=punto/radio;
            productopunto=dot(vectornormalunitario,b);
            nuevo=b-2*productopunto*vectornormalunitario;

```

```

haz=[a;punto];
normal=[punto;0 0 0];
hazr=[punto;nuevo+punto];
plot3(haz(:,1),haz(:,2),haz(:,3))
% if i==3
plot3(hazr(:,1),hazr(:,2),hazr(:,3))
% end
%calculo de la potencia de rebote
RTM=((ni/ne)^2*cos(aincidencia)-sqrt((ni/ne)^2-
sin(aincidencia)^2))/(ni/ne)^2*cos(aincidencia)+sqrt((ni/ne)^2-
sin(aincidencia)^2))^2; %en este caso ne es equivalente a n1, pq asi
se definio la variable del indice de refraccion del vidrio
RTE=((cos(aincidencia)-sqrt((ni/ne)^2-sin(aincidencia)^2))/(cos(aincidencia)-
sqrt((ni/ne)^2-sin(aincidencia)^2)))^2;
R=(RTM*RTE)/2;
POTREFLEJADA=POTREFLEJADA*R;
%determinacion de las ecuaciones parametricas del haz
% t3=0:0.001:2*radio; %parametro de crecimiento
% z5=zeros(1,100);
% z5=hazr(1,3)+t3.*(hazr(2,3)-hazr(1,3));
% tamaño=size(z5);
%ver si intersecciona con la fibra
vectornormalinicial=[0 0 1];
vectornormalrotado=matriztrx*vectornormalinicial';
%ecuacion del plano y recta
syms s20 t20 u20
vectora=[0 0 0]; vectorb=[0 0 0]; vectorhazr=[0 0 0]; vectornormal=[0 0 0];
centroinicial=[offsetx 0 0];
centrorotadorx=matriztrx*centroinicial';

puncocualquiera=[offsetx-radiorx/2 0 offsetz];
puncocualquierarot=matriztrx*puncocualquiera';
vectorcualquiera=centroinicial-puncocualquiera;
vectorcualquierarot=matriztrx*vectorcualquiera';

vectornormal=[0 0 1]; %lo cambie porque si no no daba nada
vectornormalrot=matriztrx*vectornormal';
vectornormalrot=[vectornormalrot(1) vectornormalrot(2) vectornormalrot(3)];
% vectora=[Puntoarotado(1)-centrorotadorx(1) Puntoarotado(2)-
centrorotadorx(2) Puntoarotado(3)-centrorotadorx(3)];
% vectorb=[Puntobrotado(1)-centrorotadorx(1) Puntobrotado(2)-
centrorotadorx(2) Puntobrotado(3)-centrorotadorx(3)];
vectorhazr=nuevo;
rectavectorial=punto+t20*vectorhazr;
productopunto2=(rectavectorial(1)-
vectorcualquierarot(1))*vectornormalrot(1)+(rectavectorial(2)-
vectorcualquierarot(2))*vectornormalrot(2)+(rectavectorial(3)-
vectorcualquierarot(3))*vectornormalrot(3);
t21=eval(solve(productopunto2));
t25=dot((puncocualquierarot'-
punto),vectornormalrot)/dot(vectornormalrot,vectorhazr);
%Eclplano=centrorotadorx+s20*vectora+t20*vectorb;
%Ecrecta=hazr(1,:)+u20*vectorhazr;
%se hacen las matrices para determinar el punto de interseccion

```

```

puntodechoque=[punto(1)+t25*vectorhazr(1) punto(2)+t25*vectorhazr(2)
punto(3)+t25*vectorhazr(3)];
distanciaalcentro=puntodechoque-centrorotadorx';
magnitud=norm(distanciaalcentro);
if magnitud<radiorx

angulodeentrada=acos(dot(vectornormalrot',vectorhazr)/(norm(vectornormalrot)*
norm(vectorhazr)));
    conoentrada=asin(NARx/ne);
    if angulodeentrada<conoentrada || angulodeentrada>pi-
angulodeentrada
        variable=1;
        inicializador=inicializador+1;
        if ni==1
            TRaire(inicializador)=POTREFLEJADA;
        end
        plot3(hazr(:,1),hazr(:,2),hazr(:,3))
        Pr(inicializador)=POTREFLEJADA;
        if inicializador>1 %empezamos a tratar de hacer smoother la grafica
        if Pr(inicializador)<Pr(inicializador-1)
            indice(inicializador)=ni;
            TR(inicializador)=Pr(inicializador)/POTINICIAL;
            tr(inicializador)=10*log10(TR(inicializador));
        else
            Pr(inicializador)=Pr(inicializador-1);
            indice(inicializador)=ni;
            TR(inicializador)=Pr(inicializador)/POTINICIAL;
            tr(inicializador)=10*log10(TR(inicializador));
        end
        else
            indice(inicializador)=ni;
            TR(inicializador)=Pr(inicializador)/POTINICIAL;
            tr(inicializador)=10*log10(TR(inicializador));
        end
        end
    end
end
a=punto;
b=nuevo;
end
end

%antes de que empiece el nuevo ciclo, hay que empezar con el haz cero con
%el nuevo

hold on
grid on

end

```

```

hold off
figure(3)
TR2=TR./(max(TR));
axes('LineWidth',5,'AmbientLightColor','white','FontSize',25)
hold on
plot(indice,TR2,'Color','black','LineWidth',8)
xlabel('indice de refraccion')
ylabel('Transmision relativa')
grid on
hold off
figure(4)
axes('LineWidth',5,'AmbientLightColor','white','FontSize',25)
hold on
plot(indice,TR,'Color','black','LineWidth',8)
xlabel('indice de refraccion')
ylabel('Transmision relativa')
grid on
hold off

```

```
function ne_Callback(hObject, eventdata, handles)
```

```
function ne_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
```

```
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUiControlBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

```

```
function NA_Callback(hObject, eventdata, handles)
```

```
function NA_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
```

```
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUiControlBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

```

```
function NARx_Callback(hObject, eventdata, handles)
```

```
function NARx_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
```

```
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUiControlBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

```

```

function numrayos_Callback(hObject, eventdata, handles)

function numrayos_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)

if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUiControlBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function Calcular_Callback(hObject, eventdata, handles)

numeroderayos=str2num(get(handles.numrayos,'string'));
intervalosugerido=0.5/numeroderayos;
intervalosugerido2=num2str(intervalosugerido);
set(handles.resultado,'string',intervalosugerido2)

function pasos_Callback(hObject, eventdata, handles)

function pasos_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)

if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUiControlBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function figura_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)

axes(hObject)
imshow('FIG2.gif')

function tetax_Callback(hObject, eventdata, handles)

function tetax_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)

if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUiControlBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function tetay_Callback(hObject, eventdata, handles)

function tetay_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)

```

```
if ispc && isequal(get(hObject, 'BackgroundColor'),  
get(0, 'defaultUicontrolBackgroundColor'))  
    set(hObject, 'BackgroundColor', 'white');  
end
```

```
function numerayos_Callback(hObject, eventdata, handles)
```

```
function numerayos_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)  
if ispc && isequal(get(hObject, 'BackgroundColor'),  
get(0, 'defaultUicontrolBackgroundColor'))  
    set(hObject, 'BackgroundColor', 'white');  
end
```

```
function numreflexiones_Callback(hObject, eventdata, handles)
```

```
function numreflexiones_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)  
if ispc && isequal(get(hObject, 'BackgroundColor'),  
get(0, 'defaultUicontrolBackgroundColor'))  
    set(hObject, 'BackgroundColor', 'white');  
end
```