

**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL  
LITORAL**

Facultad de Ingeniería en Electricidad y  
Computación

**“SIMULACIÓN DE UN SENSOR DE  
REFRACCIÓN BASADO EN FIBRA ÓPTICA PARA  
MEDIR NIVEL DE GLUCOSA EN LÍQUIDOS”**

**TESINA DE SEMINARIO**

Previa a la obtención del título de:

**INGENIERO EN ELECTRÓNICA Y  
TELECOMUNICACIONES**

Presentado por:

Daniel Fernando Sánchez Del Pino

Darío Leonardo López Zambrano

GUAYAQUIL - ECUADOR

AÑO 2012

espol  
Biblioteca



D-92854

## AGRADECIMIENTO

A Germán Vargas, profesor del seminario, por su invaluable guía en la elaboración de este proyecto y a nuestros compañeros del seminario, por toda su ayuda brindada



## DEDICATORIA

Al Creador, a mis padres, novia,  
hermanos y el resto de seres  
queridos que nos han  
acompañado en nuestras vidas.

**Daniel**

A mis padres, hermano, tía,  
madrina y demás seres queridos  
quienes han sido un gran apoyo  
para lograr cumplimiento de esta  
meta tan anhelada.

**Darío**



## TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN

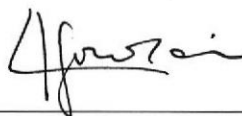


Msc. Germán Vargas

PREFESOR DEL SEMINARIO DE GRADUACIÓN



CIB-ESPOL



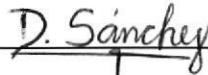
Ing. Carlos Jordán

PROFESOR DELEGADO POR EL DECANO DE LA FACULTAD

## DECLARACIÓN EXPRESA

“La responsabilidad del contenido de esta tesina de Seminario de Graduación, nos corresponde exclusivamente; y el patrimonio intelectual de la misma a la ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL”.

(Reglamento de Graduación de la ESPOL)



---

Daniel Sánchez del Pino



---

Darío Leonardo López Zambrano

## RESUMEN

El presente trabajo muestra el desarrollo a nivel de código de programación de un sensor óptico de desplazamiento, cuya finalidad específica es determinar el índice de refracción de una solución líquida de agua destilada en la cual existe la presencia de niveles de concentración de glucosa en varios porcentajes.

Se inicia con una introducción teórica de los fenómenos ópticos más importantes, como lo es la ley de Snell, ecuaciones de Fresnel, teoría de sensores así como también de los componentes de los sensores centrado nuestra mayor atención en las fibras ópticas plásticas. Seguido a esto analizamos las propiedades ópticas en los líquidos y dedicando además toda una sección a la glucosa.

Complementando a la base teórica de las primeras secciones, se presenta también el desarrollo del modelo matemático representativo del sensor, basándose en el estudio del comportamiento de la luz como rayo, y aplicando técnicas de integración de varias variables que conllevan al modelado matemático del sensor citado, el mismo que en secciones posteriores será implementado usando el software de modelado y simulación MATLAB.

En la sección final se presentan varios experimentos en los cuales se determinan los índices de refracción y niveles de concentración de varias muestras propuestas,

llegando a analizar finalmente las relaciones existentes entre los niveles de concentración de la glucosa, la variación en su índice de refracción, la intensidad de la señal a la salida del sistema entre otros.



## ÍNDICE GENERAL

RESUMEN.....	vi
ÍNDICE GENERAL.....	viii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xiii
ÍNDICE DE TABLAS.....	xv
ABREVIATURAS.....	xvi
INTRODUCCIÓN.....	xviii

### CAPITULO 1



1. LEYES DE LA ÓPTICA Y SENSORES ÓPTICOS.....	1
1.1. Leyes de la Óptica Geométrica.....	2
1.1.1. Ley de Snell.....	2
1.1.2. Ecuaciones de Fresnel.....	4
1.1.2.1. Amplitud de los coeficientes de Reflexión y Transmisión.....	4
1.1.2.2. Fase de los coeficientes de Reflexión y Transmisión .....	7
1.1.2.3. Reflectancia.....	8
1.1.2.4. Transmitancia.....	9



1.2. Sensores Ópticos con POF-PMMA .....	10
1.2.1. Sensores Intrínsecos.....	11
1.2.2. Sensores Extrínsecos,.....	12
1.2.3. Sensores Ópticos de Desplazamiento.....	14
1.2.3.1. Fibra Óptica de Plástico (POF).....	14
1.2.3.2. SI PMMA-POF.....	15
1.2.3.3. Transmisor y Receptor.....	17
1.3. Forma del Pulso de Luz .....	18

## CAPITULO 2

2. MATERIALES ÓPTICOS .....	19
2.1. Clasificación de Materiales Ópticos.....	20
2.1.1. Material Isotrópico y Anisotrópicos.....	20
2.1.2. Material Dispersivo.....	20
2.1.3. Material Homogéneo y No Homogéneo.....	23
2.2. Glucosa .....	24
2.2.1. Generalidades.....	24
2.2.2. Características Ópticas .....	25
2.3. Solubilidad.....	31

## CAPÍTULO 3

3. PLANTEAMIENTO DE LA SIMULACIÓN.....	34
3.1. . Identificación del Problema.....	35
3.2. Descripción del Sistema.....	35
3.3. Parámetros de Entrada y Salida.....	36
3.3.1. Descripción de Parámetros de Entrada.....	36
3.3.2. Descripción de los Parámetros de Salida.....	36
3.4. Esquema de la Simulación.....	37
3.4.1. Modelo Matemático de la Eficiencia de Transferencia de Potencia...37	
3.4.2. Cálculo de la Eficiencia de la Transferencia de Potencia.....41	
3.4.2.1. Selección de Diferenciales.....41	
3.4.2.1.1. La distancia a la que incide cada rayo de luz.....41	
3.4.2.1.2. La separación entre el espejo y las fibras.....43	
3.4.2.1.3. Simetría azimutal de la eficiencia.....44	
3.4.2.2. El ángulo azimutal de incidencia de los rayos.....45	
3.4.2.3. Obtención de los Coeficientes de Fresnel.....48	
3.4.2.4. Reglas de correspondencia de la función de transferencia.....49	
3.4.2.5. Álgebra Matricial.....51	
3.4.2.6. Obtención de la potencia de salida.....54	
3.4.3. Transferencia de Máxima Potencia.....55	
3.5. Diagrama de Flujo del Algoritmo.....	56



3.6. Implementación de la Simulación del Sensor de Desplazamiento.....	60
------------------------------------------------------------------------	----

## CAPÍTULO 4

4. DESARROLLO DEL SISTEMA A SIMULAR.....	64
4.1. Descripción del Sensor Óptico de desplazamiento para medir el índice de refracción de la Glucosa .....	64
4.2. Principales parámetros de la simulación.....	65
4.3. Etapas del Sistema .....	66
4.3.1. Inicialización del Sistema .....	67
4.3.2. Determinación de la Potencia de Salida.....	67
4.3.3. Determinación del Índice de Refracción y Concentración de Glucosa Presente.....	71
4.4. Presupuesto de Pérdida.....	74

## CAPÍTULO 5

5. SIMULACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	78
5.1. Calibración del Sensor con muestras conocidas.....	78
5.2. Determinación de la Función Característica del Sensor.....	83
5.3. Determinación del nivel de glucosa en una muestra desconocida.....	86

5.4. Análisis de Resultados.....88

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

ANEXO 1

ANEXO 2

BIBLIOGRAFÍA

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1	Rayo de luz incidente en frontera de dos medios.....	2
Figura 1.2	Aplicación de la Reflexión Total Interna TIR.....	3
Figura 1.3	Gráficos para el campo eléctrico $E_{\parallel}$ de los coeficientes de Fresnel basado en (2).....	5
Figura 1.4	Gráficos para el campo eléctrico $E_{\perp}$ de los coeficientes de Fresnel basado en (2).....	5
Figura 1.5	Principio de medición de un sensor intrínseco.....	12
Figura 1.6	Principio de medición para un sensor extrínseco.....	13
Figura 1.7	Sistema completo sensor de desplazamiento basado en (5).....	14
Figura 1.8	Atenuación vs Longitud de Onda para POF tomada de (6).....	16
Figura 2.1	Estructura molecular de la glucosa.....	24
Figura 2.2	Modelo 3D de la molécula de glucosa. De rojo, el átomo de carbono, de verde, el átomo de oxígeno, y de azul, el átomo de hidrógeno tomado de (8).....	25
Figura 2.3	Captura de pantalla de resultados de ajuste lineal de curva en CurveExpert Pro de las mediciones, realizadas para el artículo [10], de índice de refracción de la solución de glucosa en agua a diferentes niveles de concentración de glucosa.....	29

Figura 2.4	Captura de pantalla de resultados de ajuste lineal de curva en CurveExpert Pro de las mediciones, realizadas para el libro [9], de índice de refracción de la solución de glucosa en agua a diferentes niveles de concentración de glucosa.....	30
Figura 3.1	Diagrama de bloques del sistema.....	37
Figura 3.2	Vista frontal (derecha) y superior (izquierda) del sistema. $P_o$ cuando se integra $\eta$ solamente en la coordenada $r$ .....	38
Figura 3.3	Indicación del eje azimutal de coordenadas cilíndricas en el corte en $h = 0$ .....	44
Figura 3.4	Triángulo que se forma entre el eje de la fibra de emisión.....	46
Figura 3.5	El triángulo de la figura 3.4 dividido por el segmento PQ en dos triángulos rectángulos.....	47
Figura 3.7	Diagrama de flujo para definición de parámetros de entrada y funciones escalares.....	56
Figura 3.8	Diagrama de flujo de diferenciales, tamaño de vector 'h' y matriz 'r'.....	57
Figura 3.9	Diagrama de flujo para creación de la matriz 'r' y sus límites de integración.....	58
Figura 3.10	Diagrama de flujo para obtener parámetros matriciales $\Theta_c$ , I, $T_o$ .....	59
Figura 3.11	Integración de parámetros para obtener la potencia de salida.....	60

Figura 3.12	Potencia de salida del sensor de desplazamiento simulado en MATLAB.....	62
Figura 4.1	Diagrama de Bloques Sensor.....	65
Figura 4.2	Reproducción de Sección transversal del Transmisor Óptico.....	69
Figura 4.3	Reproducción de Sección transversal del Receptor Óptico.....	70
Figura 4.4	Representación gráfica de transferencia máxima de potencia.....	72
Figura 5.1	Desplazamiento vs Potencia Total Recibida .....	82
Figura 5.2	Gráfica de los resultados del Índice de Refracción Recuperados vs Desplazamiento.....	83
Figura 5.3	Gráfica de los resultados del Índice de Refracción medio VS Desplazamiento.....	85
Figura 5.4:	Error absoluto entre índices de refracción ingresados y medidos.....	86

## ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1.1	Tipos de POF SI PMMA con sus parámetros.....	15
TABLA 2.1	Datos de índices de refracción de una solución de glucosa en agua a diferentes niveles de concentración en (9).....	27
TABLA 2.2	Datos de índices de refracción de una solución de glucosa en agua a diferentes niveles de concentración en el artículo (10).....	28
TABLA 3.1	Regla de correspondencia para los límites de integración de 'r'.....	40
TABLA 3.2	Reglas de correspondencia para el vector 'r'.....	50
TABLA 3.3	Parámetros iniciales para ejecución de la simulación.....	61
TABLA 4.1	Principales Parámetros de la Simulación.....	66
TABLA 5.1	Valores de las Muestras para calibración del Sistema.....	79
TABLA 5.2	Valores de Inicialización del Sistema.....	79
TABLA 5.3	Datos para la verificación de una muestra desconocida "X".....	87
TABLA 5.4	Resultados de la medición realizada.....	88



## ABREVIATURAS

GRIN:	Graded Index Profile
IEC:	International Electrotechnical Commission
LASER:	Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation
LED:	Light Emitting Diode
OTDR:	Optical Time Domain Reflectometer
PMMA:	Polymethyl Methacrylate
PoF:	Plastic Optic Fiber
ZPW:	Zero Peak Wavelength
TIR:	Total Internal Reflection



## INTRODUCCIÓN

La presente investigación, cuya motivación nace de la necesidad de explorar campos de aplicación diferentes a las telecomunicaciones para las Guías de Onda Ópticas y de todas ellas la Fibra Óptica (FO) como objeto principal de estudio, nos lleva al estudio de los sensores ópticos centrándonos en aquellos cuyo componente principal es la FO.

Dado que en el mercado actual cada día se hace más notoria la ausencia de instrumentos de medición más sensitivos, de alta confiabilidad, de bajo costo y resistentes a la mayoría de los fenómenos electromagnéticos de la naturaleza, los sensores ópticos son una herramienta que se muestra como una solución a estos requerimientos. Además tienen un gran campo de acción en aplicaciones como: control de calidad de productos alimenticios, diagnóstico del nivel de glucosa en la sangre y de forma general en industrias de alimentos, médicas, química-farmacéutica, entre otras aplicaciones.

Si bien el proyecto a desarrollar no consiste en la implementación física del sensor como tal, se dará una guía con las pautas, especificaciones técnicas y se presentará la predicción de sus resultados mediante simulación computarizada. La herramienta informática conocida como MATLAB será la plataforma en la cual se realizará la implementación del código que simulará el comportamiento de dicho sensor y su eficacia en la medición del índice de refracción de las muestras líquidas usadas.



En la primera y segunda parte de este trabajo se hace referencia a las leyes de la óptica geométrica que se aplican durante la simulación como la ley de Snell, coeficientes de Fresnel entre otros, además se detallan las características relevantes de las fibras PMMA las cuales serán usadas en la simulación y vamos a dar una introducción acerca de los sensores ópticos. Tratamos también sobre las propiedades ópticas de la glucosa, del agua y de las soluciones acuosas ya que es importante considerar el estudio de la muestra en cualquier futura implementación.

En la tercera y cuarta parte mostramos el esquema de la simulación del sensor de desplazamiento, lo que incluirá el modelo matemático y la estrategia para simularlo. Además mostramos un detalle del sensor de desplazamiento ya aplicado en la medición del nivel de concentración de glucosa.

En la última parte de este trabajo realizamos una serie de simulaciones en la cuales se muestra todo el proceso de cómo se comportaría el sensor para un grupo de muestras conocidas y realizaremos un ejercicio en el cual determinaremos el valor del nivel de concentración de glucosa para una muestra desconocida.



## **CAPÍTULO 1**

### **LEYES DE LA ÓPTICA Y SENSORES ÓPTICOS**

Este capítulo tratará las leyes de la óptica geométrica bajo la cual operará nuestro sensor de índice de refracción, las cuales incluye la ley de Snell, condiciones de frontera en electromagnetismo para obtener reflectancia y transmitancia. También se proporcionará una introducción a los diferentes tipos de sensores con fibra óptica y refractómetros.

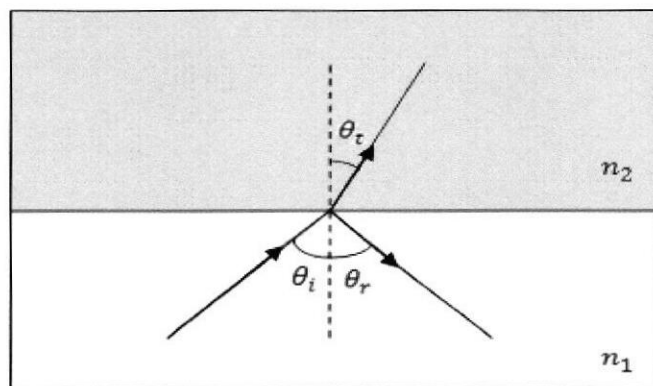
## 1.1. Leyes de la Óptica Geométrica

Las leyes de la óptica geométrica constituyen la base teórica fundamental del funcionamiento de los sensores ópticos que usan como componente principal fibras ópticas de varios tipos, en conjunto la Ley de Snell y los coeficientes de Fresnel ayudan en su modelado matemático.

### 1.1.1. Ley de Snell

La ley de Snell muestra la relación existente entre los ángulos de la onda incidente y transmitida (refractada) con los índices de refracción de los medios [1] de la siguiente manera

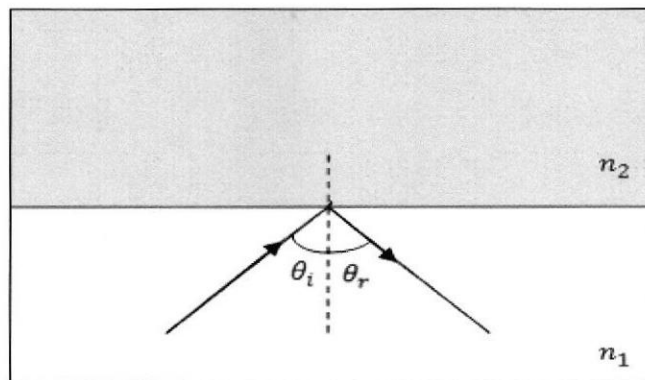
$$n_1 \sin \theta_i = n_2 \sin \theta_t \quad (1.1)$$



**Figura 1.1** Rayo de luz incidente en frontera de dos medios

Realizando un análisis desde el punto de vista de rayos ópticos es importante notar que los ángulos para los rayos incidentes y reflejados son iguales  $\theta_i = \theta_r$ . Cuando  $n_1 > n_2$  el ángulo que forma el rayo refractado con la normal es mayor y cuando este alcanza el valor de  $90^\circ$  el ángulo de incidencia pasa a llamarse ángulo crítico, el cual está dado según la siguiente ecuación [1]:

$$\sin\theta_c = \frac{n_2}{n_1} \quad (1.2)$$



**Figura 1.2** Aplicación de la Reflexión Total Interna (TIR)

El fenómeno antes mencionado es conocido como Reflexión Total Interna y determina el ángulo de corte a partir del cual para valores mayores del ángulo

incidente no va existir un rayo refractado en el medio dos por lo cual toda la energía del rayo incidente será reflejada

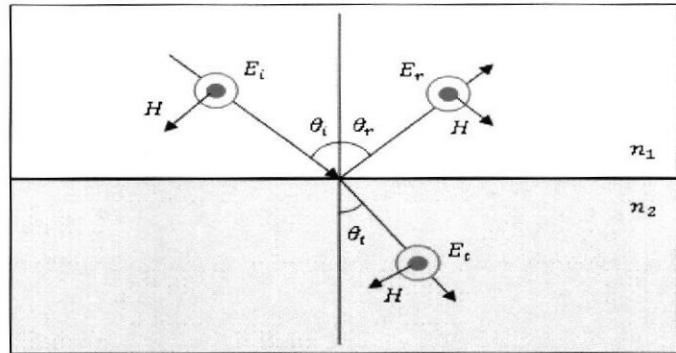
### **1.1.2. Ecuaciones de Fresnel**

Las ecuaciones de Fresnel dan una descripción completa y detallada del comportamiento de la onda, tanto en la onda que se refleja como en la onda que se transmite mediante ecuaciones matemáticas que relacionan las amplitudes y fases de las ondas reflejadas y refractadas (o transmitidas) en función de la amplitud y fase de la onda incidente. Su nombre hace honor al físico francés Augustin-Jean Fresnel[1].

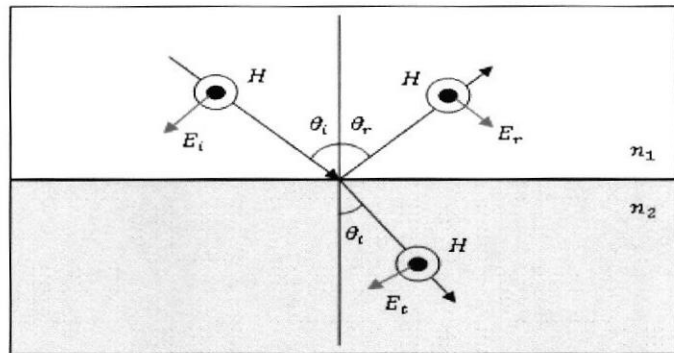
#### **1.1.2.1. Amplitud de los Coeficientes de Reflexión y Transmisión**

Considerando que el vector de onda  $k$  (vector que indica la dirección de propagación de la onda) es siempre perpendicular con los vectores de campo eléctrico  $E$  y magnético  $H$ , al incidir una onda en la frontera entre dos medios con índice de refracción  $n_1$  y  $n_2$  respectivamente, uno de estos campos estará contenido en el plano de incidencia de dicha frontera, para fines prácticos de análisis consideraremos los casos en los cuales el campo eléctrico  $E$  se

encuentra contenido en el plano de incidencia (campo eléctrico paralelo)  $E_{\parallel}$  o es perpendicular a dicho plano  $E_{\perp}$  [1].



**Figura 1.3** Gráficos para el campo eléctrico  $E_{\parallel}$  de los coeficientes de Fresnel



**Figura 1.4** Gráficos para el campo eléctrico  $E_{\perp}$  de los coeficientes de Fresnel

Definiendo las ondas incidente, reflejada y refractada mediante una representación exponencial de las ondas viajeras tenemos.

$$E_i = E_{i0} \exp(j(\omega t - \mathbf{k}_i \cdot \mathbf{r})) \quad (1.3)$$



$$E_r = E_{r0} \exp j(\omega t - \mathbf{k}_r \cdot \mathbf{r}) \quad (1.4)$$

$$E_t = E_{t0} \exp j(\omega t - \mathbf{k}_t \cdot \mathbf{r}) \quad (1.5)$$

Donde  $\mathbf{r}$  es el vector posición,  $\mathbf{k}$  es el vector de onda que describe la dirección de propagación de cada una de las ondas y  $E_{i0}, E_{r0}, E_{t0}$  son las amplitudes de las ondas incidente, reflejada y refractada. Existen dos reglas fundamentales que se consideran en el comportamiento de las ondas electromagnéticas conocidas como las condiciones de frontera la primera considera que el campo eléctrico  $E$  es uniforme en la frontera de ambos medios por lo cual [1]

$$E_{tangencial}(1) = E_{tangencial} \quad (1.6)$$

La segunda condición asume que ambos medios son no magnéticos (permitividad magnética igual al vacío) con lo cual el campo magnético en la superficie entre ambos medios es casi continuo en toda la frontera es decir

$$B_{tangencial}(1) = B_{tangencial} \quad (1.7)$$

Es importante además mencionar que estas condiciones se cumplen únicamente cuando obedecen la ley de Snell. Definiendo  $n = n_2/n_1$  y aplicamos las condiciones de frontera podemos obtener las magnitudes

de las ondas reflejadas y refractadas en función de la magnitud de la onda incidente que para el caso de  $E_{\perp}$  [1] son:

$$r_{\perp} = \frac{E_{ro,\perp}}{E_{io,\perp}} = \frac{\cos \theta_i - [n^2 - \sin^2 \theta_i]^{1/2}}{\cos \theta_i + [n^2 - \sin^2 \theta_i]^{1/2}} \quad (1.8)$$

$$t_{\perp} = \frac{E_{to,\perp}}{E_{io,\perp}} = \frac{2 \cos \theta_i}{\cos \theta_i + [n^2 - \sin^2 \theta_i]^{1/2}} \quad (1.9)$$

En el caso de  $E_{\parallel}$  tenemos las siguientes ecuaciones

$$r_{\parallel} = \frac{E_{ro,\parallel}}{E_{io,\parallel}} = \frac{[n^2 - \sin^2 \theta_i]^{1/2} - n^2 \cos \theta_i}{[n^2 - \sin^2 \theta_i]^{1/2} + n^2 \cos \theta_i} \quad (1.10)$$

$$t_{\parallel} = \frac{E_{to,\parallel}}{E_{io,\parallel}} = \frac{2n \cos \theta_i}{[n^2 - \sin^2 \theta_i]^{1/2} + n^2 \cos \theta_i} \quad (1.11)$$

Además existen dos relaciones entre los coeficientes del campo paralelo y perpendicular la cual se muestra a continuación:

$$r_{\parallel} + nt_{\parallel} = 1r_{\perp} + 1 = t_{\perp} \quad (1.12)$$

### 1.1.2.2. Fase de los Coeficientes de Reflexión y Transmisión

Cuando tenemos el fenómeno conocido TIR ( $\theta_i > \theta_c$ ) la amplitud de los coeficientes de fresnel  $r_{\parallel}$  y  $r_{\perp}$  tiende a ser igual a 1, con lo cual la amplitud de la onda reflejada es igual a la amplitud de la onda incidente, producto de la TIR la onda reflejada sufre cambios de fase

$\phi_{\parallel}$  y  $\phi_{\perp}$  para las componentes  $E_{\parallel}$  y  $E_{\perp}$  respectivamente, diferentes a  $0^{\circ}$  y  $180^{\circ}$ , los cuales dependen de los índices de refracción de los medios y del ángulo incidente  $\theta_i$  según las siguientes ecuaciones[1]

$$\tan\left(\frac{1}{2}\phi_{\perp}\right) = \frac{[\sin^2\theta_i - n^2]^{1/2}}{\cos\theta_i} \quad (1.13)$$

$$\tan\left(\frac{1}{2}\phi_{\parallel} + \frac{1}{2}\pi\right) = \frac{[\sin^2\theta_i - n^2]^{1/2}}{n^2 \cos\theta_i} \quad (1.14)$$

### 1.1.2.3. Reflectancia

Se define a la reflectancia como la medida de la intensidad de la luz reflejada con respecto a la intensidad de la luz incidente y se la muestra según la siguiente ecuación[1]

$$R_{\perp} = \frac{|E_{ro,\perp}|^2}{|E_{io,\perp}|^2} = |r_{\perp}|^2 R_{\parallel} = \frac{|E_{ro,\parallel}|^2}{|E_{io,\parallel}|^2} = |r_{\parallel}|^2 \quad (1.15)$$

Para nuestro caso de estudio consideraremos la incidencia normal de las ondas en la frontera de ambos medios por lo cual la reflectancia para este caso se la define como

$$R = R_{\perp} = R_{\parallel} = \left(\frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2}\right)^2 \quad (1.16)$$



#### 1.1.2.4. Transmitancia

Se define a la transmitancia como la medida de la intensidad de la luz transmitida con respecto a la intensidad de la luz incidente y se la muestra según la siguiente ecuación[1]

$$T_{\perp} = \frac{n_2 |E_{to,\perp}|^2}{n_1 |E_{io,\perp}|^2} = \frac{n_2}{n_1} |t_{\perp}|^2 T_{\parallel} = \frac{|E_{to,\parallel}|^2}{|E_{io,\parallel}|^2} = \frac{n_2}{n_1} |t_{\parallel}|^2 \quad (1.17)$$

Igual que en el caso de la reflectancia considerando la incidencia la definición de transmitancia es

$$T = T_{\perp} = T_{\parallel} = \frac{4n_1 n_2}{(n_1 + n_2)^2} \quad (1.18)$$

Es importante mencionar que la suma de reflectancia con la transmitancia es igual a la unidad

$$R + T = 1 \quad (1.19)$$

La transmitancia hacia un medio más denso y a un ángulo de inclinación se puede expresar mediante la suma de sus componentes paralela y perpendicular, incluyendo un factor de corrección debido a la inclinación del ángulo del haz de luz hacia la frontera[2].

$$V = \text{ArcSen} \left( \text{Sen} \phi * \frac{\eta_o}{\eta_c} \right) \quad (1.20)$$

$$T_o = \frac{1}{2} \frac{\text{Sen}(2\phi)\text{Sen}(2V)}{\text{Sen}^2(\phi+V)\text{Cos}^2(\phi-V)} + \frac{1}{2} \frac{\text{Sen}(2\phi)\text{Sen}(2V)}{\text{Sen}^2(\phi+V)} \quad (1.21)$$

$\eta_2$  es el índice de refracción del medio en el que la luz se refracta, el otro medio tiene un índice de refracción  $\eta_1$ ,  $\phi$  es el ángulo en el que incide el haz de luz.

Tomando como base conceptos como la Reflexión Total Interna (TIR) presentaremos en las siguientes secciones el diseño de un sensor que utiliza materiales ópticos, superficies reflectantes, guías de onda ópticas entre otros, para lograr mediante la interacción entre el medio y las sondas de medición valores precisos de los parámetros objetivos. Por tratarse de luz incidente en superficies reflectantes o guías de ondas es necesario considerar conceptos como la Ley de Snell, Coeficientes de Fresnel, Reflectancia y Transmitancia ya que con ellos se determinará la intensidad de luz que llega hasta el extremo final del sensor. Dichos conceptos serán aplicados en cada uno de los puntos del recorrido que realice la luz dentro del diseño del sensor utilizado según sea el caso.

## **1.2. Sensores Ópticos con POF - PMMA**

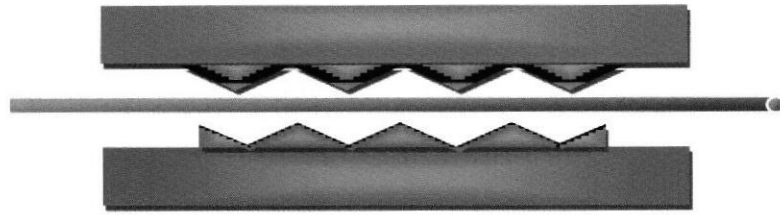
La aplicación de fibras ópticas en campos diferentes a las telecomunicaciones ha llevado en los últimos tiempos a los investigadores a explorar nuevos campos de aplicación, siendo uno de estos la tecnología de sensores y en especial aquellos que utilizan como elemento principal sondas de fibras ópticas plásticas. Ya sea por su bajo costo de producción a gran escala, o su gran flexibilidad en los

campos de medición y procesamiento más simple de datos, éste tipo de sensores se presenta como una alternativa a los clásicos sensores electrónicos con prismas. De forma general en sus diversas aplicaciones las distancias entre los puntos de medición y la electrónica usada se reduce significativamente en relación a otras variedades de sensores, se componen básicamente de un LED o láser emisor, una o dos fibras ópticas plásticas como sondas, conectores en los extremos, tarjetas de adquisición de datos con su respectivo software según el tipo entre otros implementos.

Dependiendo de la finalidad del sensor, disposición de sus componentes y su interacción con un tercer medio diferente a la fibra se dividen en Intrínsecos y los Extrínsecos

### **1.2.1. Sensores Intrínsecos**

Utilizan una fibra óptica plástica la cual reacciona sensitivamente ante una variedad de influencias externas (temperatura, manipulación, etc.), un transmisor (usualmente LED) acopla la luz al interior de su núcleo la cual al ser recibida al otro extremo de la fibra sufre modificaciones en su intensidad producto de la interacción de los agentes externos.

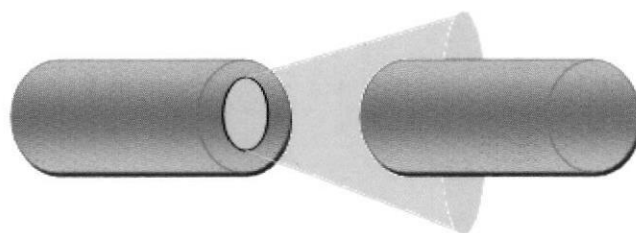


**Figura 1.5** Principio de Operación para un sensor intrínseco

Su velocidad de medición está limitada por las características físicas y ópticas de sus componentes.

### 1.2.2. Sensores Extrínsecos

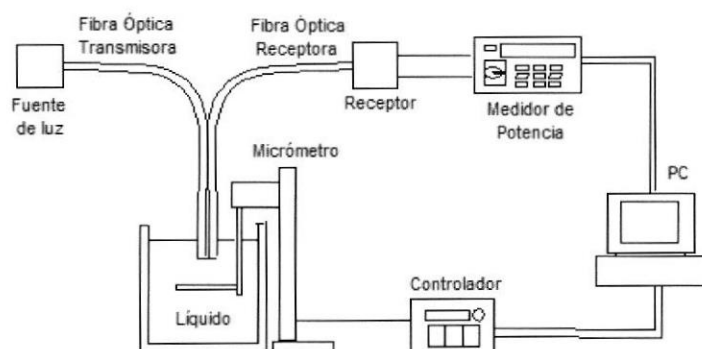
Tienen un principio de funcionamiento estándar en el cual un transmisor (generalmente un LED de bajo coste) acopla luz en el interior del núcleo de la fibra, la misma recorre su longitud y es acoplada a un segundo medio, luego se acopla nuevamente en la misma fibra o en una segunda fibra, la cantidad de luz recibida es alterada por la interacción con el segundo medio siendo este proceso el cual genera la medición correspondiente, un esquema básico del funcionamiento se lo muestra en la figura 1.6.



**Figura 1.6** Principio de operación para un sensor extrínseco.

Éste tipo de sensores usa fibra óptica plástica principalmente debido al fácil acoplamiento de la luz en su núcleo gracias a que su diámetro es grande en relación a la fibra de vidrio, su velocidad de medición es lenta y es limitada únicamente por el ancho de banda del transmisor y receptor. Existen varias aplicaciones para este tipo de sensor entre las cuales tenemos: Sensores de desplazamiento para medir índice de refracción de materiales, sensores de nivel de llenado de líquidos, sensores de distancia, entre otros. En la figura 1.7 se muestra el diagrama de un sensor de Desplazamiento.





**Figura 1.7** Sistema Completo Sensor de Desplazamiento. Reproducción tomada de la referencia [3]

Centraremos nuestro estudio en los sensores extrínsecos y en sus componentes para lo cual analizaremos su componente principal “fibras ópticas plásticas tipos SI PMMA – POF.”

### 1.2.3. Sensores Ópticos de Desplazamiento

#### 1.2.3.1. Fibra Óptica de Plástico (POF)

La Fibra Óptica Plástica es una guía de onda óptica que cumple con todos los principios de una guía de onda cilíndrica, su diseño aplica la ley de Snell para conducir la luz a través de su núcleo el cual consiste de un polímero de alta transparencia rodeado de una cubierta (cladding) delgado con un menor índice de refracción. Dependiendo del tipo de materiales con los cuales esté fabricada, su rango de

operación y atenuación resultante serán diferentes. La diferencia de índices de refracción entre el núcleo y la cubierta define la apertura numérica de la POF y el ancho de banda de la misma.



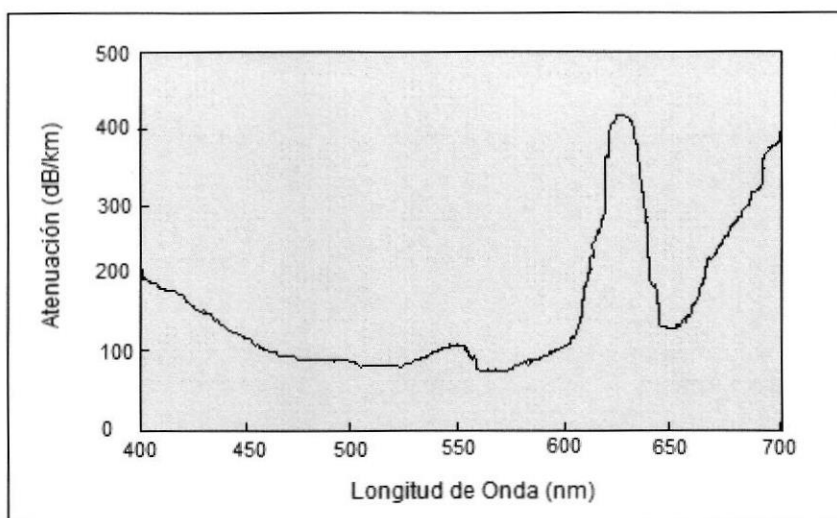
### 1.2.3.2. SI PMMA - POF

Esta variedad de POF es la más utilizada en el diseño de sensores ópticos, su núcleo compuesto por poli-metilmacrilato tiene un índice de refracción igual a 1,492, está rodeado por un revestimiento delgado (10 nm) de un polímero fluorado. Sus especificaciones de fabricación están normadas por el estándar IEC 60793-2-40.

**TABLA 1.1 Tipos de POF SI PMMA con sus parámetros[4]**

Parámetro	Unidad	Clase A4a	Clase A4b	Clase A4c	Clase A4d
Núcleo	[ $\mu\text{m}$ ]	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
Revestimiento	[ $\mu\text{m}$ ]	$1,000 \pm 60$	$750 \pm 45$	$500 \pm 30$	$1,000 \pm 60$
Chaqueta	[mm]	$2.2 \pm 0.1$	$2.2 \pm 0.1$	$1.5 \pm 0.1$	$2.2 \pm 0.1$
No circularidad del núcleo	[%]	$\leq 6$	$\leq 6$	$\leq 6$	$\leq 6$
Perdidas a 650 nm.	[dB/km]	$\leq 400$	$\leq 400$	$\leq 400$	$\leq 400$
Lanzamiento con EMD	[dB/km]	$\leq 300$	$\leq 300$	$\leq 300$	$\leq 180$
Ancho de Banda	[MHz-100m]	$\geq 10$	$\geq 10$	$\geq 10$	$\geq 100$
Perdida por Curvatura	[dB/10 curvas]	$\leq 0.5$	$\leq 0.5$	$\leq 0.5$	$\leq 0.5$
Apertura Numérica	-	$0.5 \pm 0.15$	$0.5 \pm 0.15$	$0.5 \pm 0.15$	$0.3 \pm 0.05$

asándose en las características del núcleo, la fibra PMMA muestra los niveles de atenuación particularmente bajo, de alrededor de 100 dB / km o menos lo cual ocurre en las ventanas de 520 nm (verde), 560 nm (amarillo) y 650 nm (rojo) que pertenecen al espectro visible.



**Figura 1.8** Gráfica Atenuación vs Longitud de Onda. Reproducción tomada de la referencia [4]

La diferencia en el tiempo de tránsito de los diferentes rayos de luz en el núcleo produce un ensanchamiento de los pulsos transmitidos a la salida de la PMMA, con lo cual se limita su tasas de bits posibles en alrededor de 100 Mbit / s para una distancia de 100 m en las PMMA tipo SI, es decir tienen un mejor rendimiento en distancias cortas. Para mejorar su tasa de datos sería necesario utilizar una PMMA de índice

graduado diferente y dependiendo de la aplicación de la PMMA el rango de operación de temperatura se encuentra entre  $+70^{\circ}\text{C}$  a  $+85^{\circ}\text{C}$  como límite máximo. En una longitud de onda de  $632.8\text{ nm}$ , según observamos la figura 1.8, hay un pico de absorción en el que la fibra opera bajo una pérdida de  $400\text{ db/km}$ . De esta forma, en 40 centímetros de longitud se tendría una pérdida de  $0.16\text{ dB}$ .

### **1.2.3.3. Transmisor y Receptor de luz**

Como en todo sistema de medición es muy importante determinar los materiales o dispositivos que contribuyen a la obtención de la señal de prueba la cual una vez generada en el extremo transmisor atravesará el medio de propagación y al final será recibida con todas las alteraciones sufridas debido a la interacción con todos estos medios. En los sensores ópticos de desplazamiento un rol fundamental juegan los transmisores y receptores ópticos los mismo que deben tener una precisión muy alta al momento de realizar el acoplamiento de luz tanto en la transmisión/recepción de luz para evitar pérdidas de intensidad luminosa y alterar cualquier resultado de las mediciones a realizar. Actualmente en el mercado existen una gran variedad de estos dispositivos disponibles para diversas aplicaciones, en el caso de los sensores ópticos de desplazamiento se utilizan para su diseño un encapsulado que tiene el transmisor/ receptor (LED para el caso del

transmisor y fotodetector), una micro-lente y un acoplamiento de precisión para asegurar que la pérdida de luz sea mínima

### 1.3. Forma del Pulso de Luz

En una fibra óptica con un número de modos muy grande propagándose dentro de ella, mayor a 30 la distribución radial de potencia toma la forma de una parábola con su máximo sobre la dirección del modo fundamental [3].

$$I(r, 2h) = \frac{2P_i}{\pi R^2(h)} \left( 1 - \frac{r^2}{R^2(h)} \right) \quad (1.22)$$

Siendo  $R(h)$  la longitud de la hipotenusa del cono a medida que la onda de luz se aleja del extremo de la fibra, en función del alejamiento  $h$  y del alejamiento radial  $r$  respecto al eje de la fibra.





## **CAPÍTULO 2:**

### **MATERIALES ÓPTICOS**

Las propiedades ópticas de los materiales son características que definen la forma en que viaja la luz a través de ellos, dentro del estudio de los sensores ópticos de desplazamiento es importante centrar también la atención en el tipo muestra a verificar, para el efecto nos enfocamos en las características ópticas del agua como solución acuosa y de la glucosa.

## **2.1. Clasificación de Materiales Ópticos**

Esta clasificación de materiales ópticos se elabora de acuerdo a la manera en que la luz se transmite y se propaga a través de ellos. Un material ideal cumple las cualidades de ser isotrópico, no dispersivo y homogéneo, el vacío cumple las tres características.

### **2.1.1. Material Isotrópico y Anisotrópicos**

La microscopía de luz polarizada se usa para diferenciar materiales isotrópicos y anisotrópicos. Los materiales isotrópicos, como gases, líquidos o cristales cúbicos tienen las mismas propiedades ópticas en cualquier dirección, tienen un solo índice de refracción. Por el contrario, los anisotrópicos que incluyen el 90% de las sustancias sólidas, tienen propiedades ópticas que varían con la orientación de la luz incidente con los ejes cristalográficos [5].

### **2.1.2. Material Dispersivo**

En un medio dispersivo la relación entre el vector de polarización eléctrica  $P$  y el de intensidad de campo eléctrico  $E$  es con memoria y no instantánea, es decir el vector  $E$  crea el vector  $P$  induciendo oscilaciones en los electrones de valencia de los átomos del medio, lo que colectivamente produce una

densidad de polarización. El sistema que describe la relación entre E y P es lineal, con una respuesta de impulso de:

$$h(t) = \mathcal{E} \chi(t) \quad (2.1)$$

Donde  $\chi(t)$  es la función de susceptibilidad eléctrica del medio.  $\mathcal{E}_r$  es la permitividad eléctrica relativa del medio y  $\eta = \sqrt{\mathcal{E}_r}$  es el coeficiente de refracción del medio [6]. Esto se refleja en la dependencia del índice de refracción respecto a la longitud de onda de la luz  $\eta(\lambda)$  que se propaga a través de él.

La dispersión se reflejará en los tiempos de tránsito de varios modos. Una mayor dispersión del medio provocará que los modos menos inclinados de la fibra lleguen más rápidamente, en sistemas de comunicación esto repercute en una disminución del ancho de banda.

El ensanchamiento del pulso dada la dispersión de material está dada por la siguiente relación [4]:

$$\Delta t_{mat} = L \Delta \lambda \frac{\lambda}{c} \frac{d^2 \eta(\lambda)}{d\lambda^2} = L \Delta \lambda M(\lambda) \quad (2.2)$$

Donde  $\Delta \lambda$  es el ancho espectral del transmisor,  $\eta(\lambda)$  es la dependencia del índice de refracción respecto a la longitud de onda,  $M(\lambda)$  es la dispersión de



material dada en ps/km-nm. En las fibras de polímero modernas se tiene una dispersión de material en el orden de los ps/km-nm. En un enlace de 0.8 m de fibra óptica de polímero y de 0 a 2 milímetros de solución acuosa, este orden de magnitud se divide para mil, tendríamos entonces una dispersión de material del orden de fs/km-nm. Este orden de magnitud es insignificante teniendo en cuenta que el tiempo de respuesta de un fotodetector se encuentra en el orden de los nanosegundos.

El agua es un líquido dispersivo, pues su índice de refracción varía en función de la longitud de onda del rayo de luz incidente, es homogéneo e isotrópico. En las ecuaciones (2.3) a la (2.5) se muestra la deducción de la función de dispersión del agua, la cual es tomada de [6].

$$D_m = -\frac{\lambda}{c} \frac{d^2 \eta}{d\lambda^2} \quad (2.3)$$

$$\frac{d^2 \eta}{d\lambda^2} = \frac{13.324}{(\lambda - 129.2)^3} [nm^{-2}] \quad (2.4)$$

$$D_m = \frac{13.324\lambda}{c(\lambda - 129.2)^3} \left[ \frac{ns}{nm-km} \right] \quad (2.5)$$

La luz verde posee una menor longitud de onda (525 nm) que la luz amarilla (600 nm), por lo que el índice de refracción sería menor para el color verde [7].

$$\eta(\text{agua}) = 1.31848 + \frac{6.662}{\lambda(nm) - 129.2} \quad (2.6)$$

### 2.1.3. Material Homogéneo y No Homogéneo

En un material homogéneo la permitividad eléctrica, y por ende el índice de refracción, se mantiene constante en cualquier punto espacial del medio. Por lo tanto la función  $\xi(r)$  es constante,  $\xi$  y  $\eta$  son constantes en el espacio. En fibras de gradiente de índice, y en las soluciones acuosas, en sus bordes superior e inferior,  $\eta$  varía respecto al radio de la fibra y a la altura respectivamente.

En cualquier medio, la ecuación de onda está descrita por la siguiente ecuación diferencial [6]:

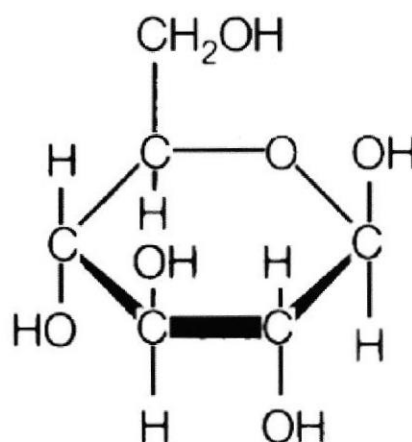
$$\nabla^2 E - \frac{1}{\xi^2(r)} \frac{d^2 E}{dt^2} = 0 \quad (2.7)$$

En un material no homogéneo, el rayo de luz describirá una trayectoria no rectilínea debido a las refracciones que se dan por unidad de longitud. Un cambio abrupto de índice de refracción en el medio no homogéneo puede ocasionar una reflectancia mayor a cero, y por ello una pérdida en la transmitancia, y por ello en la potencia, del rayo propagante.

## 2.2. Glucosa

### 2.2.1. Generalidades

La glucosa pertenece a la familia de los monosacáridos con fórmula molecular  $C_6H_{12}O_6$ , la misma que la fructosa pero con diferente posición relativa de los grupos  $-OH$  y  $O=$ . Es una hexosa, es decir, que contiene 6 átomos de carbono, y es una aldosa, esto es, el grupo carbonilo está en el extremo de la molécula. Es una forma de azúcar que se encuentra libre en las frutas y en la miel.

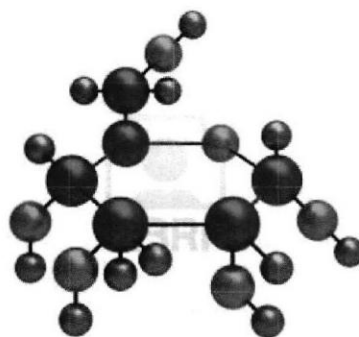


**Figura 2.1:** Estructura molecular de la glucosa

Si bien la D-glucosa es predominante en la naturaleza, en terminología de la industria alimentaria suele denominarse dextrosa a este compuesto. También se le puede encontrar en semillas (contando los cereales) y tubérculos. Todas las frutas naturales tienen cierta cantidad de glucosa (a menudo con fructosa), que puede ser extraída y concentrada para hacer un azúcar alternativo. Pero a nivel industrial, tanto la glucosa líquida (jarabe de glucosa) como la dextrosa

(glucosa en polvo) se obtienen a partir de la hidrólisis enzimática de almidón de cereales (generalmente trigo o maíz).

La glucosa, libre o combinada, es el compuesto orgánico más abundante de la naturaleza. Es la fuente primaria de síntesis de energía de las células, mediante su oxidación catabólica, y es el componente principal de polímeros de importancia estructural como la celulosa y de polímeros de almacenamiento energético como el almidón y el glucógeno [17].



For Comping Use Only. (c) WWW.123RF.COM

**Figura 2.2:** Modelo 3D de la molécula de glucosa. [8]

### 2.2.2. Características Ópticas

En estado sólido, la glucosa es un material anisotrópico, es decir que al incidir un rayo se refractan a través de él más de un rayo, no homogéneo y dispersivo.

Al disolverse con agua, el líquido resultante es isotrópico y homogéneo, pero aun dispersivo [5].

A fin de explicar de forma detallada las características ópticas de la glucosa se comparan dos experimentos. En el experimento realizado por D. R. Lide, Ed. en [9] se demostró con valores normalizados la concentración de varios solutos en agua, entre ellos la D glucosa con la que nosotros trabajamos en nuestro proyecto. En el experimento realizado por M. M. Yunus y A. A. Rahman [10] se expresó la concentración en términos de gramos por 100 ml de agua. En ambas gráficas se observa una tendencia lineal hasta el 12% de concentración. Para comparar los datos en términos de linealidad, trabajamos con las mismas unidades de concentración, para ello convertimos los datos del artículo [10] en % mediante la relación siguiente:

$$\%M = 100\% \frac{\text{masa soluto (g)}}{(1 \text{ g/ml})(100 \text{ ml}) + \text{masa soluto (g)}} \quad (2.8)$$

En [9] se tomaron datos de hasta un 60% de concentración, mientras que en [10] se tomaron datos de hasta un 23% de concentración. En [10] se presenta de manera directa la gráfica de concentración – índice de refracción, de ella extraemos los datos, y junto a los datos tomados de la tabla presentados en [9]:



**Tabla 2.1:** Índices de refracción de una solución de glucosa en agua a diferentes niveles de concentración [9]

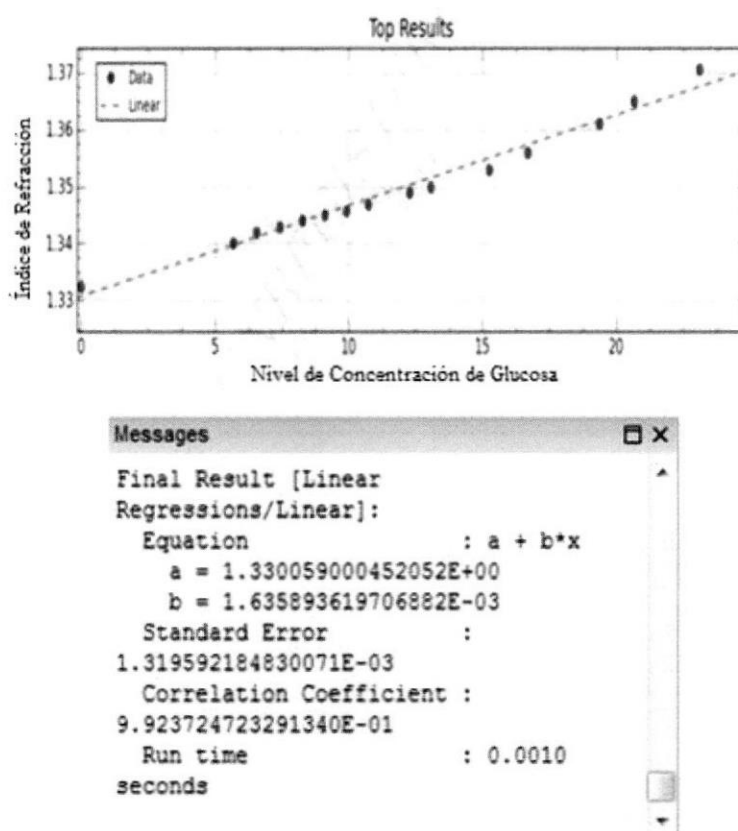
M (%)	$\eta$	M (%)	$\eta$
0	1,3324	26	1,3736
0,5	1,3337	28	1,377
1	1,3344	30	1,3805
2	1,3358	32	1,384
3	1,3358	34	1,3876
4	1,3373	36	1,3912
5	1,3402	38	1,3949
6	1,3417	40	1,3986
7	1,3432	42	1,4024
8	1,3447	44	1,4062
9	1,3462	46	1,4101
10	1,3477	48	1,4141
12	1,3508	50	1,4181
14	1,3539	52	1,4222
16	1,3571	54	1,4263
18	1,3606	56	1,4306
20	1,3635	58	1,4349
22	1,3668	60	1,4349
24	1,3702		

**Tabla 2.2:** Índices de refracción de una solución de glucosa en agua a diferentes niveles de concentración [10]

m (gramos)	M (%)	$\eta$
0	0	1,3324
6	5,6603774	1,34
7	6,5420561	1,342
8	7,4074074	1,343
9	8,2568807	1,344
10	9,0909091	1,345
11	9,9099099	1,3458
12	10,714286	1,3469
14	12,280702	1,349
15	13,043478	1,35
18	15,254237	1,353
20	16,666667	1,356
24	19,354839	1,361
26	20,634921	1,365
30	23,076923	1,3706

De los datos del experimento [10], bosquejamos el gráfico con la ayuda del software CurveExpert Professional 1.3.0, ver figura 2.3, y con los datos generados por este software describimos la ecuación característica del experimento.

<sup>1</sup>Software de ajuste de curva descargo del sitio <http://www.curveexpert.net/download>



**Figura 2.3:** Resultados ajuste de curva lineal para valores de glucosa en varias concentraciones en CurveExpert Pro para [10],

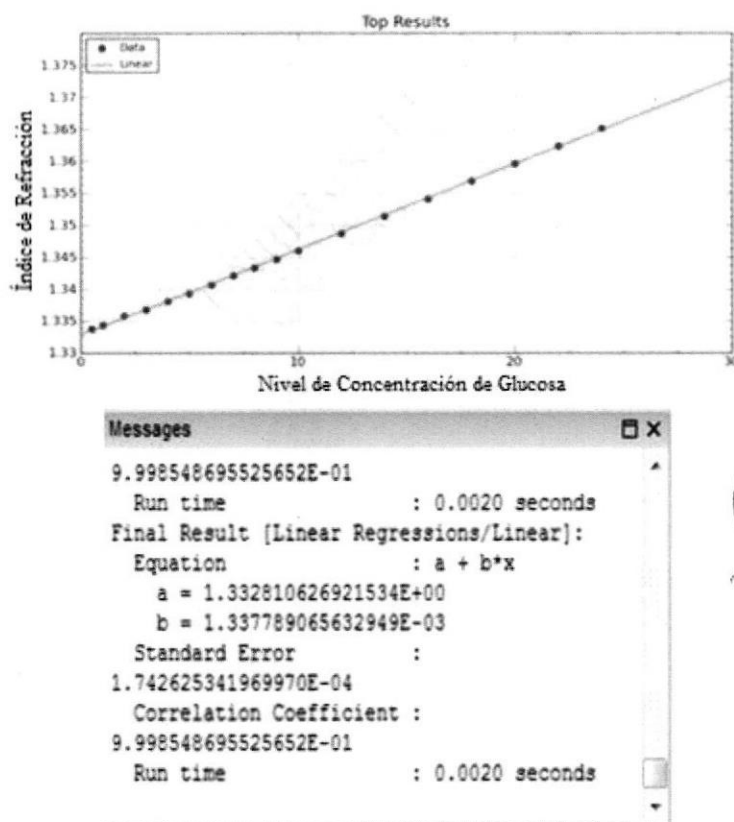
La ecuación derivada de las mediciones en [10] es la siguiente:

$$\eta = 0.1626M + 1.3301; \Delta\eta = 0.0013 \quad (2.9)$$

$$0 \leq M \leq 1$$



De los datos del experimento [9], bosquejamos el gráfico con la ayuda del software CurveExpert Professional 1.3.0, ver figura 2.4, y con los datos generados por este software describimos la ecuación característica del experimento.



**Figura 2.4:** Resultados ajuste de curva lineal para valores de glucosa en varias concentraciones en CurveExpert Pro para [9]

La ecuación derivada de las mediciones de [9] es la siguiente:

$$\eta = 0.1338M + 1.3328; \Delta\eta = 0.00017 \quad (2.10)$$

$$0 \leq M \leq 1$$

En [9] se midió el índice de refracción para concentraciones de hasta el 60%, pero en nuestro proyecto recortamos los últimos datos para realizar la comparación con el otro trabajo [10].

Cabe recalcar que en [9] y en [10] se trabajó a diferentes longitudes de onda, 589 nm y 632,8 nm respectivamente. Y también en [10] se extrajeron los datos de concentración a una precisión menor.

### 2.3. Solubilidad

El agua no es solamente polar, sino también puede formar puentes de hidrógeno. Los puentes de hidrógeno se forman entre elementos altamente electronegativos, como el oxígeno, y bajamente electronegativos, como el hidrógeno [11].

En la molécula de glucosa están presentes carbonos asimétricos que provocan el efecto de desviar el frente de polarización de la luz refractada en el medio [11]. Sin embargo, no nos interesa en este proyecto medir la polarización de la luz, ni dicha polarización afecta a la potencia óptica transmitida a través de la solución

acuosa de glucosa. La sal es un buen catalizador de la mezcla entre el agua y la glucosa [11].

La tendencia al desorden de la materia, entropía, y a las diversas interacciones con las partículas de soluto influyen en la determinación de la solubilidad. Cuanto mayor sean las atracciones entre las moléculas de disolvente y el soluto, mayor será la solubilidad. La polaridad, dada por ejemplo por puentes de hidrógeno externos, también es un factor que afecta la solubilidad. El agua y la glucosa, son ambas moléculas polares. Por el contrario, una molécula no polar puede disolverse sobre un disolvente también no polar. La presión afecta la solubilidad principalmente en los gases, la temperatura afecta la solubilidad principalmente en las sustancias iónicas, ninguno es el caso para la glucosa en condiciones atmosféricas.

La glucosa tiene cinco grupos OH en un esqueleto de seis carbonos, y esto hace a la molécula muy soluble en agua. 83 gramos de glucosa se disuelven en 100 ml de agua a 17.5°C [11] :

$$\% \text{ en masa de glucosa} = \frac{\text{masa de glucosa}}{\text{masa de disolución}} 100\% \quad (2.11)$$

Algunas sustancias no solubles o con menor nivel de solubilidad en el agua, por principio de Arquímedes [12], tienden a formar interfaces paralelas a la superficie del agua, sobre el agua si la densidad de la sustancia en cuestión es



menor a la densidad del agua ( $1 \text{ g/cm}^3$ ), o bajo el agua si la densidad de la sustancia en cuestión es mayor a la densidad del agua. Este fenómeno ocurre con ciertas impurezas que puede tener en la vida real la solución glucosa – agua. Por ello, colocar el refractómetro en la superficie o en el fondo de la solución, puede afectar el resultado de la medición del índice de refracción porque estamos haciendo a la luz incidir sobre las interfaces de impurezas.

## **CAPÍTULO 3**

### **PLANTEAMIENTO DE LA SIMULACIÓN**

En este capítulo daremos una explicación sobre la estructura del sensor de desplazamiento, la estrategia que emplearemos para simularlo paso a paso, la descripción de cada uno de los parámetros que intervienen en él, el modelo matemático de la función de transferencia de potencia desde una fibra hacia la otra y una implementación de la simulación sólo en esta etapa, trabajando con aire como medio de transmisión.

### 3.1. Identificación del Problema

El sistema que vamos a simular durante este proyecto fue desarrollado experimentalmente en [3] y sus resultados expuestos, para hallar el índice de refracción de una solución acuosa desconocida. En este proyecto vamos a simular dicho sistema, con el fin de que a partir del índice de refracción obtenido conocer la concentración de glucosa de la solución medida. Sin embargo, en este capítulo solamente nos enfocaremos en el sensor de desplazamiento y su función de transferencia de potencia para obtener la altura en la cual ocurre la máxima recepción de luz.

### 3.2. Descripción del Sistema



CIB-ESPOL

El sistema consta de dos fibras PMMA, enlazadas en un recipiente que contiene el líquido a medir, y cortadas con un preciso cortador con cuchilla de diamante (splicer) a la misma altura ambas y de forma transversal. Las fibras tienen una longitud de 40 cm, lo suficientemente largas para disipar los modos de radiación, lo suficientemente corta para que su atenuación, de 40 dB/km a 400 dB/km, [6] no afecte al sistema. Las fibras son separadas entre sí una distancia  $S$ . Debajo de las fibras se coloca un espejo, de forma paralela al corte transversal, a una distancia  $h$ , su objetivo es reflejar la luz de una fibra hacia la otra fibra. En la fibra transmisora se coloca la fuente de luz con su respectivo adaptador, en la

receptora, se coloca el fotodetector. En la figura 1.7 puede visualizarse el sistema completo con sus componentes ensamblados.

### **3.3. Parámetros de Entrada y Salida**

#### **3.3.1. Descripción de Parámetros de Entrada**

En la simulación el bloque de eficiencia describirá la transferencia de potencia entre una fibra y la otra y su salida será el vector  $P_o$ , esto es la potencia de salida a diferentes alturas del espejo. En una eventual implementación del sistema, lo cual no es objetivo del presente trabajo, todo lo que se encuentre posterior a este bloque formará parte del sistema de adquisición de datos, en un ordenador. Los parámetros de la entrada del bloque de eficiencia serán provistas por la fuente de luz, potencia de entrada y longitud de onda  $\lambda_o$ , el líquido a medir, luego de hallar el índice de refracción de la luz que se propaga en función de la longitud de onda  $\lambda_o$  de dicha luz y el nivel de concentración de glucosa  $M$ , las fibras ópticas, el índice de refracción del núcleo  $\eta_{co}$  y de la cubierta  $\eta_{cl}$  y el radio del núcleo  $a$ , y el refractómetro, la separación axial entre las fibras  $S$  y la reflectancia del espejo  $R_m$ .

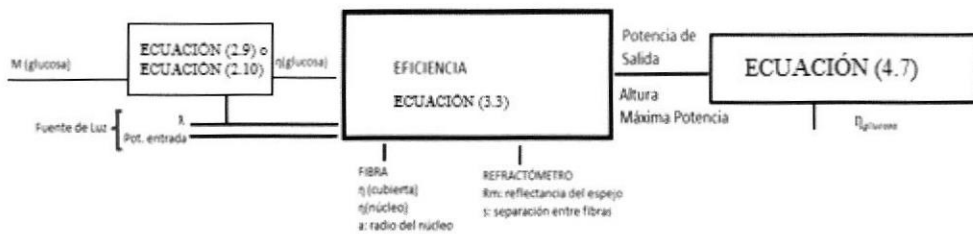
#### **3.3.2. Descripción de los Parámetros de Salida**

Se va a medir la potencia a cada altura del espejo, sin embargo el objetivo final es obtener el nivel de concentración de glucosa en el agua, y que este

valor coincida con aquel nivel de concentración que fue ingresado como entrada al sistema.

### 3.4. Esquema de la Simulación

La simulación la realizamos de acuerdo al diagrama de bloques siguiente



**Figura 3.1:** Diagrama de bloques del sistema

#### 3.4.1. Modelo Matemático de la Eficiencia de Transferencia de Potencia

La eficiencia de la transmisión de potencia en el espacio existente entre las fibras de emisión y recepción, en general, puede describirse mediante la siguiente relación general:

$$\eta = \frac{P(2h, \eta_0)}{P_i} \quad (3.1)$$

Esta potencia resulta de sumar la potencia irradiada sobre cada unidad de área de la sección transversal del núcleo de la fibra receptora. Sobre cada unidad de área incide la luz a un ángulo incidente distinto, lo cual implica la presencia de una transmitancia por cada unidad de área que varía respecto al ángulo de

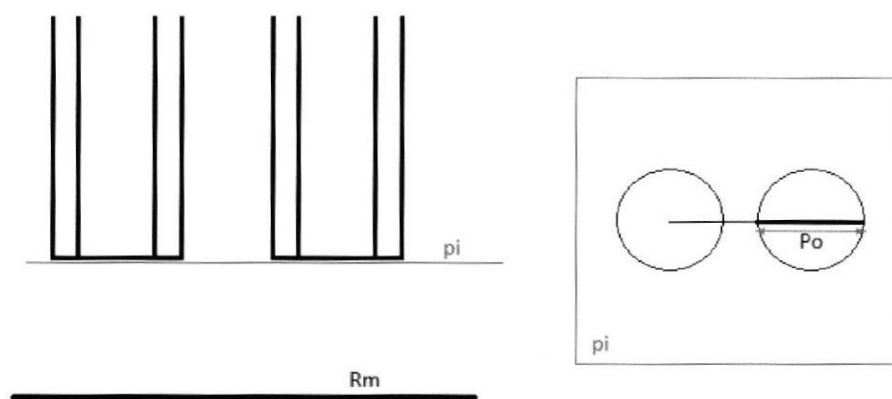


incidencia  $T_o(r, 2h, \eta_o)$ . La transmitancia de la fibra emisora  $T_o$  va a depender solamente de los índices de refracción del líquido y del núcleo de la fibra.

$$dP = R_m T_i(\eta_o) T_o(r, 2h, \eta_o) I(r, 2h) dA \quad (3.2)$$

$R_m$  es la reflectancia del espejo. En un sistema de coordenadas esféricas, el diferencial del área en el plano  $\pi$  trazado a la altura del corte transversal de las fibras  $dA$  equivale a  $r dr d\phi$ . Al despreciar las escasas pérdidas que se dan dentro de las fibras,  $P_i$  será la potencia que emite la fuente de luz y  $P_o$  será la fuente que recibe el fotodetector óptico. Integrando sobre  $r$  solamente tendremos una dimensión del plano  $\pi$ , la potencia a través del eje de simetría del sistema en el plano  $\pi$ . Para cubrir todo el núcleo de la fibra de recepción tendremos entonces que integrar también sobre el eje azimutal  $\phi$ .

$$P_o(2d, \eta_o) = 2P_i \int_{R_1}^{R_2} \int_0^{\phi_c} R_m T_i(\eta_o) T_o(r, 2h, \eta_o) I(r, 2h) r dr d\phi \quad (3.3)$$



**Figura 3.2:** Vista frontal (derecha) y superior (izquierda) del sistema.  $P_o$  cuando se integra  $\eta$  solamente en la coordenada  $r$ .

Para  $I(r, 2h)$ , la luz saliente de la fibra tiene una distribución parabólica en función de  $r$ , a medida que se aleja del eje de la fibra.  $I(r, 2h)$  está descrito por la ecuación (1.20), en el cálculo de la eficiencia se excluye el término  $P_i$  de la ecuación (1.20).

Si  $R$  es el radio del cono de luz a una distancia  $2h$ ,

$$R = a + 2h \tan \theta_{NA} \quad (3.4)$$

Donde  $\theta_{NA}$  es el ángulo crítico de la fibra óptica.

$$\theta_{NA} = \text{Sen}^{-1} \frac{\eta_{\text{núcleo}}}{\eta_{\text{cubierta}}} \quad (3.5)$$

La transmitancia  $T_o$  se produce debido al paso del haz de luz desde el líquido hacia el núcleo de la fibra de recepción. Se obtiene resolviendo la ecuación (1.21) siendo el medio incidente el líquido, cuyo índice de refracción es  $\eta_o$ , el medio transmitido el núcleo de la PMMA de polímero de recepción, cuyo índice de refracción es  $\eta_{co}$ , y el ángulo de incidencia  $\emptyset$  forma parte de un triángulo rectángulo compuesto por los catetos  $r$  y  $2h$  (dos veces la separación entre el espejo y las fibras ópticas), por lo que

$$\emptyset = \text{ArcTan}\left(\frac{r}{2h}\right) \quad (3.6)$$

En cuanto a los límites de la integral sobre  $r$ , si  $s-a < R < s+a$ , entonces  $R1 = s - a$  y  $R2 = R$ , en esta situación el haz de luz cubre parcialmente el corte transversal del núcleo de la fibra de recepción; en caso de ser  $r$  superior a  $s+a$ ,

$R1 = s - a$  y  $R2 = s + a$ , en esta situación el haz de luz cubre totalmente el corte transversal del núcleo de la fibra de recepción; cuando  $r < s - a$  el haz de luz no incide sobre el corte transversal del núcleo de la fibra de recepción y por lo tanto  $R1=R2=0$ , para lo cual el resultado de la integración es cero.

**Tabla 3.1:** Regla de correspondencia para los límites de integración de  $r$

R	R1	R2
'Menor a' $s - a$	0	0
'Entre' $s - a$ 'y' $s + a$	$s - a$	R
'Mayor a' $s + a$	$s - a$	$s + a$

De esta forma tenemos toda la expresión en función de las características de la fibra (índice de refracción del núcleo ' $\eta_{co}$ ', apertura numérica de la fibra ' $NA$ ', radio de la fibra ' $a$ '), el índice de refracción ' $\eta_o$ ' del líquido desconocido, la distancia ' $h$ ' a la que se encuentra separado el espejo de las fibras, y la separación ' $s$ ' entre el eje central de cada fibra. Si consideramos el efecto de la dispersión del líquido, en caso de ser ésta alta en la longitud de onda en la que se está operando, la dependencia de ' $\eta_o$ ' respecto a ' $\lambda$ ' la vamos a considerar y entonces consideraremos a la potencia transferida como dependiente de ' $\lambda$ '.

### 3.4.2. Cálculo de la Eficiencia de la Transferencia de Potencia

La eficiencia de la transferencia de potencia se define como la razón de cociente de la potencia que sale de la fibra de emisión que incidirá sobre el corte transversal de la fibra de recepción. En la ecuación (3.3) que describe la eficiencia encontramos una doble integral, que integran una función sobre las variables ' $r$ ' y ' $\emptyset$ '. La eficiencia será diferente a diferentes alturas del espejo, por lo que en Matlab la describimos como un vector cuyas coordenadas constituyen la eficiencia calculada a diferentes alturas del espejo y la dimensión de este vector está dada por ' $dim_h$ '.

#### 3.4.2.1. Selección de Diferenciales

La función de transferencia dependerá de dos parámetros variables, la altura ' $h$ ' del espejo que se desplaza y la distancia ' $r$ ' entre el eje de la fibra de emisión y cualquier punto del círculo irradiado por el cono de luz en el plano comprendido por los cortes transversales de ambas fibras ópticas.

##### 3.4.2.1.1. La distancia a la que incide cada rayo de luz

La distancia ' $r$ ' a la que la fibra de recepción transmitirá potencia al resto del sistema; es aquella que se halla, en el interior del cono de

luz, hacia un punto perteneciente al corte transversal de la fibra de recepción. Los rayos de luz que salen de la fibra de emisión a diferentes ángulos respecto al eje de simetría de dicha fibra (ver figura 1.6), los cuales rebotan en el espejo e inciden a una distancia ' $r$ ' del eje de simetría en el plano (ver figura 3.2) que contiene al corte transversal de las fibras. En la simulación, ' $r$ ' es un vector cuya dimensión está determinada por el diferencial ' $dr$ ', que a su vez determina el grado de nitidez de la simulación, y por las distancias extremas  $R1$  y  $R2$  respecto al eje de la fibra de emisión a las cuales es irradiada la fibra de recepción.

$$\dim_r = \frac{(s+a)-(s-a)}{dr} + 1 \quad (3.7)$$

Los límites de la altura del espejo lo podemos configurar según la aplicación del sensor de desplazamiento. En el caso de [3], en donde el sensor se lo aplicó para medir índices de refracción, se ha medido el índice de refracción del aire y de otras dos soluciones acuosas y se ha observado un máximo en la función de transferencia que oscila entre 3 y 6 mm de altura, razón por la cual se trabajó con una altura máxima de 14 mm. Un sistema mecánico ligado a un motor de paso puede mover el espejo a una velocidad constante y sin rotarlo.

El diferencial de distancia ' $dr$ ' es un valor constante, teóricamente infinitesimal, para efectos prácticos de la simulación, un valor muy pequeño respecto a los demás parámetros, pero lo suficientemente grande para que la dimensión de cada vector ' $r$ ', ' $dim_r$ ', no sea demasiado grande y no haga lenta (mayor a diez segundos) la ejecución de la simulación. Por ser ' $dr$ ' un valor constante, y por integrar aplicando la suma de Riemann, va a ser considerado un escalar.

#### **3.4.2.1.2. La separación entre el espejo y las fibras**

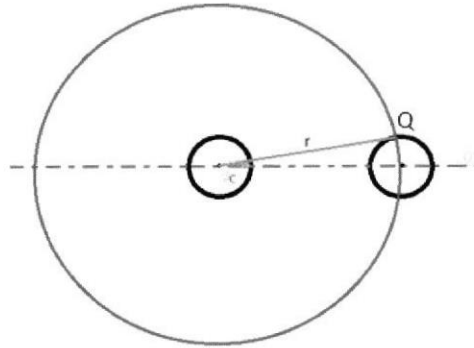
El ojo humano puede diferenciar objetos cuya distancia data desde los 0,1 milímetros, el tamaño del píxel de una pantalla de computadora de cuarta generación es también de 0.1 milímetros, el gráfico de una función de dos dimensiones en Matlab aparece sobre una ventana de aproximadamente 10 centímetros de longitud. Por ello es prudente que la diferencia entre un punto y el siguiente equivalga a menos de un píxel, en Matlab, es por ello, prudente trabajar con al menos 100 muestras entre el valor inicial y el valor final a la hora de graficar una función continua y no lineal, como la función de transferencia de potencia en un sensor de desplazamiento. ' $h_f$ ' va a dar la separación máxima del espejo

respecto al corte de las fibras, ' $dh$ ' va a ser la separación entre una muestra de una separación ' $h$ ' y la siguiente y ' $dim_h$ ' será la cantidad de alturas ' $h$ ' a la que se va a medir la potencia en la fibra de recepción.

$$dim_h = \frac{h_f - dh}{dh} + 1 \quad (3.8)$$

### 3.4.2.1.3. Simetría azimutal de la eficiencia

La función de irradiancia,  $I(r, 2h)$  tiene una simetría cilíndrica, esto significa que a una misma altura  $h$  y a un mismo radio  $r$ ,  $I$  tiene el mismo valor para cualquier ángulo azimutal  $\phi$ . Entonces,  $I$  no depende de  $\phi$ , y aprovechando también la paridad de la función coseno, podemos realizar la integración en el eje azimutal, entre el eje de simetría a  $\phi = 0^\circ$  y la dirección angular del punto de intersección entre la interface de la fibra de recepción y el cono de luz propagado a través del líquido  $\phi = \phi_c$ , y luego multiplicarla por 2.



**Figura 3.3:** Indicación del eje azimutal de coordenadas cilíndricas en el corte en  $h = 0$ . De rojo, el cono de luz que se refleja desde el espejo, de negro el núcleo de las fibras ópticas.

### 3.4.2.2. El ángulo azimutal de incidencia de los rayos

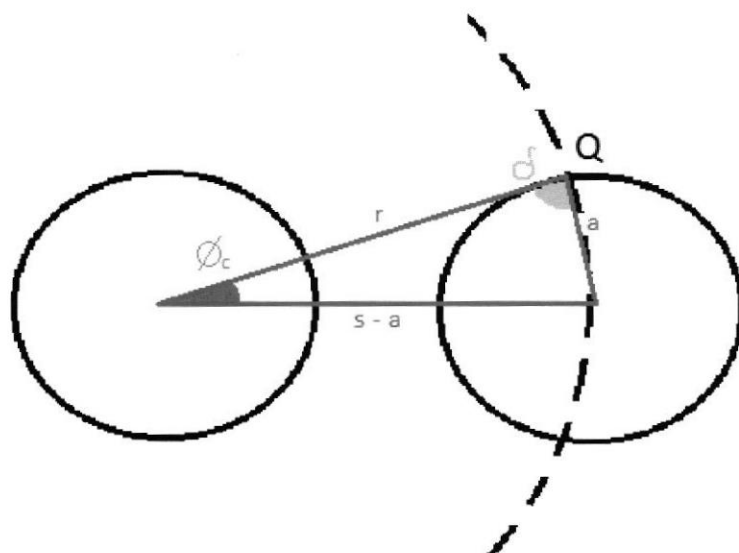
Podemos apreciar en la ecuación (3.3) de la función general de transferencia de potencia que ningún parámetro interior de las integrales depende de  $\phi$ , por lo cual la integral sobre el eje azimutal equivale a la anti derivada de 1 evaluada en  $\phi_c$ , cuyo resultado es  $\phi_c$ , la cual es una función de la distancia ' $r$ ', de la separación ' $s$ ' entre las fibras y el radio ' $a$ ' del núcleo de las fibras. La ecuación (3.3) se rescribe de la siguiente manera:

$$P_o(2d, \eta_o) = 2 \int_{R1}^{R2} R_m T_i(\eta_o) T_o(r, 2h, \eta_o) I(r, 2h) \phi_c r dr d\phi \quad (3.9)$$

Entre el eje de la fibra de emisión, el punto Q (ver figura 3.3) de intersección entre el cono de luz y la fibra de recepción, y el punto más



alejado del núcleo de la fibra de recepción que cruza el eje de simetría, se forma un triángulo, como se ilustra a continuación,



**Figura 3.4:** Triángulo que se forma entre el eje de la fibra de emisión, el punto Q de intersección entre el cono de luz y la fibra de recepción, y el punto más alejado del núcleo de la fibra de recepción que cruza el eje de simetría.

Aplicamos la ley del coseno en el triángulo rojo de la figura 3.4 para hallar el ángulo  $\delta$  del vértice Q

$$(s - a)^2 = a^2 + r^2 - 2ar\cos\delta \quad (3.10)$$

$$s^2 - 2as = r^2 - 2ar\cos\delta \quad (3.11)$$

$$\cos\delta = \frac{r^2 + 2as - s^2}{2ar} \quad (3.12)$$

Haciendo uso de la ley del seno, hallamos el ángulo azimutal  $\phi_c$ .

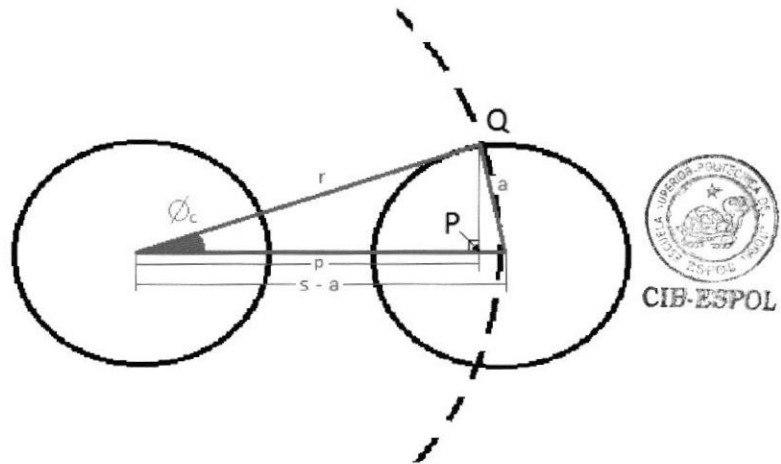
$$\frac{s-a}{\text{Cos}\delta} = \frac{a}{\text{Cos}\phi_c} \quad (3.13)$$

$$\frac{s-a}{\frac{r^2+2as-s^2}{2ar}} = \frac{a}{\text{Cos}\phi_c} \quad (3.14)$$

$$\text{Cos}\phi_c = \frac{a}{s-a} \frac{r^2+2as-s^2}{2ar} \quad (3.15)$$

$$\text{Cos}\phi_c = \frac{r^2+2ar-s^2}{2r(s-a)} \quad (3.16)$$

También se puede encontrar  $\phi_c$  separando el mismo triángulo desde su base en dos triángulos rectángulos mediante un segmento que parte del punto Q y corta la base en el punto P formando un ángulo recto. El lado 'p' es el segmento entre el eje de la fibra de emisión y el punto de corte P, tal como lo muestra la figura 3.5 a continuación.



**Figura 3.5:** El triángulo de la figura 3.4 dividido por el segmento PQ en dos triángulos rectángulos.

$$\overline{PQ} = \sqrt{r^2 - p^2} = \sqrt{a^2 - ((s - a) - p)^2} \quad (3.17)$$

Elevando al cuadrado ambas expresiones tenemos,

$$r^2 - p^2 = a^2 - (s - a)^2 + 2p(s - a) - p^2 \quad (3.18)$$

$$r^2 - a^2 + s^2 - 2as + a^2 = 2p(s - a) \quad (3.19)$$

$$p = \frac{r^2 + s^2 - 2as}{2(s - a)} \quad (3.20)$$

$$\cos \phi_c = \frac{p}{r} = \frac{r^2 + s^2 - 2as}{2r(s - a)} \quad (3.21)$$

$$\phi_c = \text{ArcCos} \left( \frac{r^2 + s^2 - 2as}{2r(s - a)} \right) \quad (3.22)$$

### 3.4.2.3. Obtención de los Coeficientes de Fresnel

La reflectancia ' $R_m$ ' del espejo es un parámetro constante, sólo depende del material y la homogeneidad del espejo. La transmitancia de la fibra de emisión depende del índice de refracción del núcleo y del medio de transmisión, los cuales son parámetros constantes que dependen del material y la homogeneidad del núcleo y del medio de transmisión respectivamente. Al ser la reflectancia del espejo ' $R_m$ ' y la

transmitancia de la fibra de emisión ' $T_i$ ' independientes de ' $r$ ' y ' $h$ ' son considerados escalares durante la integración.

La irradiancia  $I(r, 2h)$  descrita por la ecuación (1.22) y la transmitancia de la fibra de recepción  $T_o(r, 2h)$  descrita por la ecuación (1.21) dependen tanto de la variable ' $r$ ' como de la variable ' $h$ ', por esta razón en la simulación del sensor estos parámetros son definidos como matrices, cuyas dimensiones están determinadas por el tamaño del vector ' $r$ ' y el tamaño del vector ' $h$ '. A cada coordenada del vector ' $r$ ' le corresponde una columna de las matrices  $I$  y  $T_o$ , y a cada coordenada del vector ' $h$ ' le corresponde una fila de las matrices  $I$  y  $T_o$ .  $U$  y  $V$  son matrices, dependientes de ' $r$ ' y ' $h$ ' a la vez, intermedias para el cálculo de  $T_o$ .

#### 3.4.2.4. Reglas de correspondencia de la función de transferencia

El vector ' $r$ ', en Matlab, cambia su valor a medida que cambia el valor de  $h$ . La función de transferencia de potencia tendrá tres comportamientos distintos según el tamaño del radio del cono de luz  $R$ . El cono de luz no cubre ninguna porción de la fibra de recepción cuando el espejo se encuentra muy cercano a las fibras, entonces todas las componentes del vector ' $r$ ' son iguales a cero. Cuando el corte transversal de la fibra de recepción está parcialmente irradiada, el

límite superior de ' $r$ ' es  $R$ , éste último valor hace de ' $r$ ' en este escenario dependiente de la altura  $h$ , tampoco todas las coordenadas de ' $r$ ' se alcanzan a cubrir con un valor de distancia por lo que las coordenadas que faltan rellenar toman el valor de cero. Cuando el corte transversal de la fibra de recepción está totalmente irradiada, el límite superior de ' $r$ ' es ' $s - a$ ' y deja de variar respecto a la altura ' $h$ ' del espejo.

**Tabla 3.2: Reglas de correspondencia para el vector  $r$ .**

L.Inf	L-Sup	COORDENADAS DE $r$							
		1°	2°	3°	...	...	...	...	Ult.
0	$s - a$	(0	0	0	...	...	...	...	0)
$s - a$	$s + a$	(R1	R1+dr	R1+2dr	...	R-dr	R	0	0)
$s + a$	infinito	(R1	R1+dr	R1+2dr	...	...	...	...	R2)

Los cálculos de la eficiencia están ordenadas en el vector '*eficiencia*' desde la altura ' $h$ ' inferior en su primera coordenada hasta la altura superior de medición en su última coordenada. Para observar el cambio de los valores de las coordenadas de  $r$  en la matriz  $C$ , el producto de todos los parámetros dependientes de ' $r$ ', podemos escribir los valores de  $R$  a los cuales los límites de integración de ' $r$ ' cambian en términos de  $h$  basándonos en la tabla (3.1) y en la ecuación (3.4).

El límite inferior se expresa en función de ' $h$ ' de la siguiente manera:

$$a + 2h \tan \theta_{NA} < s - a \quad (3.23)$$

$$h < \frac{(\frac{s}{2}) - a}{\tan \theta_{NA}} \quad (3.24)$$

El límite intermedio se expresa en función de 'h' de la siguiente manera

$$s - a < a + 2h \tan \theta_{NA} < s + a \quad (3.25)$$

$$\frac{(\frac{s}{2}) - a}{\tan \theta_{NA}} < h < \frac{(\frac{s}{2})}{\tan \theta_{NA}} \quad (3.26)$$

El límite inferior se expresa en función de 'h' de la siguiente manera

$$a + 2h \tan \theta_{NA} > s + a \quad (3.27)$$

$$h > \frac{(\frac{s}{2})}{\tan \theta_{NA}} \quad (3.28)$$

La fila de la matriz  $C$  a la que se dan estos cambios de reglas de correspondencia estará dada por el cociente de la división entre 'h' y 'dh'.

### 3.4.2.5. Álgebra Matricial

Cada uno de los vectores fila resultantes de evaluar la irradiancia  $I$  y la transmitancia de la fibra de recepción  $To$  a cada distancia de incidencia  $r$ , son agrupados en las respectivas matrices  $I$  y  $To$  desde arriba hacia



abajo siendo cada vector fila la evaluación de las funciones de  $I$  y  $T_0$  con cada valor de ' $h$ '.

Las funciones  $I$  y  $T_0$ , ver ecuaciones (1.22) y (1.21), son no lineales respecto a ' $r$ ' y ' $h$ ', por esta razón escribimos cada una de sus celdas empleando dos lazos 'for' anidados. Sin embargo, existe el operador '.'\*' que realiza la multiplicación entre cada una de los elementos de dos matrices de igual orden. La aproximación de  $I$  dada en la ecuación (1.22) es una función parabólica de ' $h$ ' abierta hacia el eje negativo de  $I$ , esto significa que su resultado será más negativo para los valores de ' $h$ ' más alejados de las fibras. Sin embargo, no tiene ningún sentido físico una irradiancia negativa, por lo que todo valor menor a cero lo reemplazamos por ceros. A  $r = 0$ , esto es, en el eje de simetría de la fibra de emisión, la irradiancia  $I(0,2h)$  es una función inversa de la altura del espejo.

$$I(0,2h) = \frac{2P_i}{\pi R^2(h)} \left(1 - \frac{0^2}{R^2(h)}\right) = \frac{2P_i}{\pi R^2(h)} \quad (3.29)$$

$$I(0,2h) = \frac{2P_i}{\pi(a+2h \tan(\theta_{NA}))^2} \quad (3.30)$$

La matriz  $A$  será el resultado de la operación '.'\*' entre  $I$  y  $T_0$ . El valor del ángulo azimutal  $\theta_c$  es calculado con un factor de corrección de

' $rp$ ',  $rp = r - a$ , con el objetivo de trabajar solamente con ángulos positivos.

$$A_{\dim(h)*\dim(r)} = I_{\dim(h)*\dim(r)} * T_{0\dim(h)*\dim(r)} \quad (3.31)$$

Cada valor de la matriz  $A$  es multiplicado por el valor  $\emptyset_c$  al cual cada distancia ' $r$ ' (columna de la matriz) se intercepte con el borde del núcleo de la fibra de recepción, esta operación se realiza con el operador ' $*$ ' y su resultado es la matriz  $B$ .

$$B_{\dim(h)*\dim(r)} = A_{\dim(h)*\dim(r)} * \emptyset_{c\dim(h)*\dim(r)} \quad (3.32)$$

Hemos visto anteriormente que el diferencial de área, por operar en coordenadas cilíndricas, se reemplaza por el factor ' $r*dr*d\emptyset$ ', en donde ' $dr$ ' es un escalar y  $\emptyset_c$  es el resultado de integrar sobre la coordenada  $\emptyset$ . Además de  $I(r, 2h)$ ,  $T_o(r, 2h)$  y  $\emptyset_c$  la otra matriz que existe en la ecuación (3.3) es  $r$ .

$$C_{\dim(h)*\dim(r)} = B_{\dim(h)*\dim(r)} * r_{\dim(h)*\dim(r)} \quad (3.33)$$

El resto de factores de la ecuación (3.3) son escalares, pero antes de multiplicarlos a la matriz  $C$ , sumamos todas las columnas de dicha matriz y obtenemos un vector columna, basándonos en la suma de Riemann, descrita a continuación;

$$\int_a^b f(x) dx = \sum_{i=a}^b f(x_i + idx) dx = dx(\sum_{i=a}^b f(x_i + idx)) \quad (3.34)$$



Matricialmente, podemos obtener una suma de todas las columnas de una matriz multiplicando dicha matriz por un vector columna de unos cuya dimensión es la cantidad de columnas de la matriz. De esta forma definimos;

$$D_{\dim(h)*1} = C_{\dim(h)*\dim(r)} * \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix}_{1*\dim(r)} \quad (3.35)$$

La eficiencia, a cada altura 'h' del espejo, se obtiene multiplicando la matriz  $D$  a los factores de la ecuación (3.3) que faltan por operar, los cuales son todos escalares; la reflectancia del espejo ' $R_m$ ', la transmitancia de la fibra de emisión  $T_i$ , y el diferencial de la integral ' $dr$ '. Sin embargo, la función plot() de Matlab grafica en dos coordenadas configuradas como vectores fila, y  $D$  es un vector columna, por ello hay que transponerlo;

$$eficiencia_{\dim(h)} = R_m * T_i * dr(D_{\dim(h)})^T \quad (3.36)$$

#### 3.4.2.6. Obtención de la potencia de salida

La potencia de entrada  $P_i$  es un factor que solamente depende de las características de la fuente óptica y la calidad del acoplamiento entre dicha fuente óptica y la fibra óptica, por lo que para la función de transferencia del sensor de desplazamiento, es un escalar, que puede



multiplicarse por la ganancia (eficiencia) obtenida y conocerse así la potencia de salida del sensor de desplazamiento;

$$P_{0_{\dim(h)}} = P_i * \text{eficiencia}_{\dim(h)} \quad (3.37)$$

Finalmente, tenemos la salida del bloque de 'función de transferencia',

$$P_{0_{\dim(h)*1}}.$$

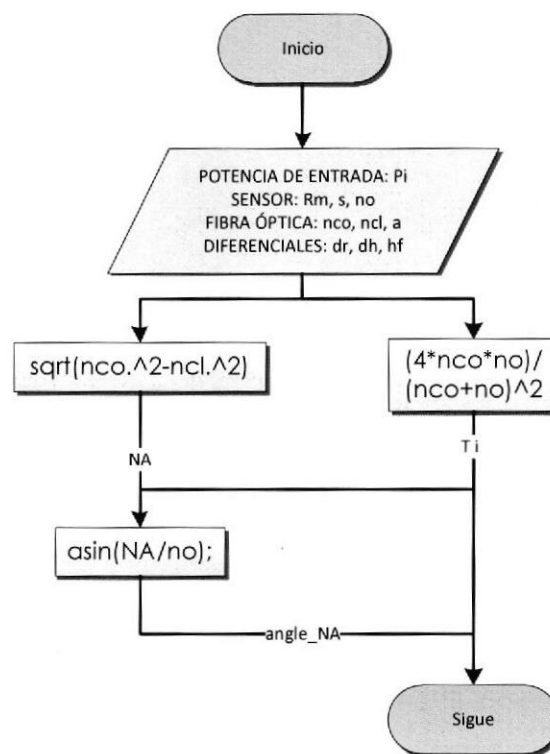
### 3.4.3. Transferencia de Máxima Potencia

La transferencia de potencia máxima se da a una altura del espejo en la cual la fibra receptora captura la mayor cantidad de luz transmitida hacia el refractómetro. Dicha transferencia máxima de potencia se da a una altura en la cual el rayo de luz más saliente de la fibra de emisión incide a un ángulo menor o igual al ángulo crítico de la fibra receptora sobre el punto más saliente de la fibra receptora.

En el bloque posterior al de eficiencia, el bloque de altura máxima, mediante un algoritmo de búsqueda, se retornará el índice de la coordenada del vector  $P_0$  que contenga el máximo valor y se le multiplicará por el valor de la resolución de la altura. Obteniéndose la altura a la cual se da la máxima transferencia de potencia.

### 3.5. Diagrama de Flujo del Algoritmo

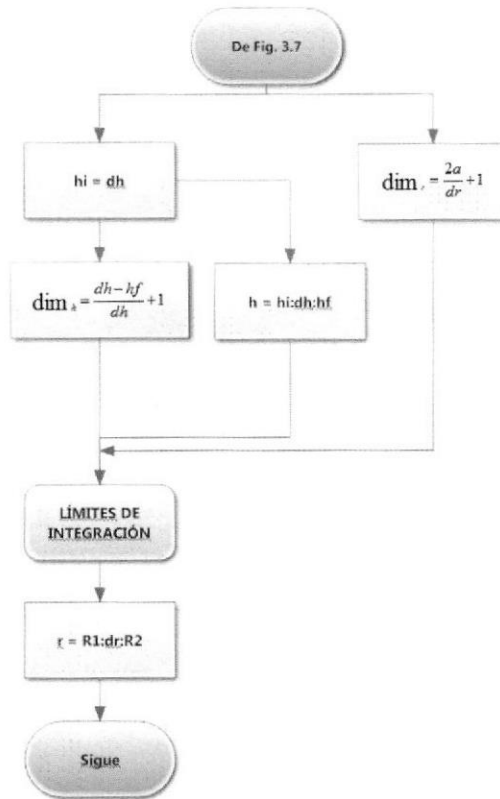
Empezamos definiendo los parámetros de entrada relacionados a las fibras ópticas, al sensor de desplazamiento y la potencia de entrada. Los diferenciales también los definimos, pero como parámetros internos del bloque que van a incidir en la resolución y la velocidad de la simulación.



**Figura 3.7:** Diagrama de flujo para definición de parámetros de entrada y funciones escalares.

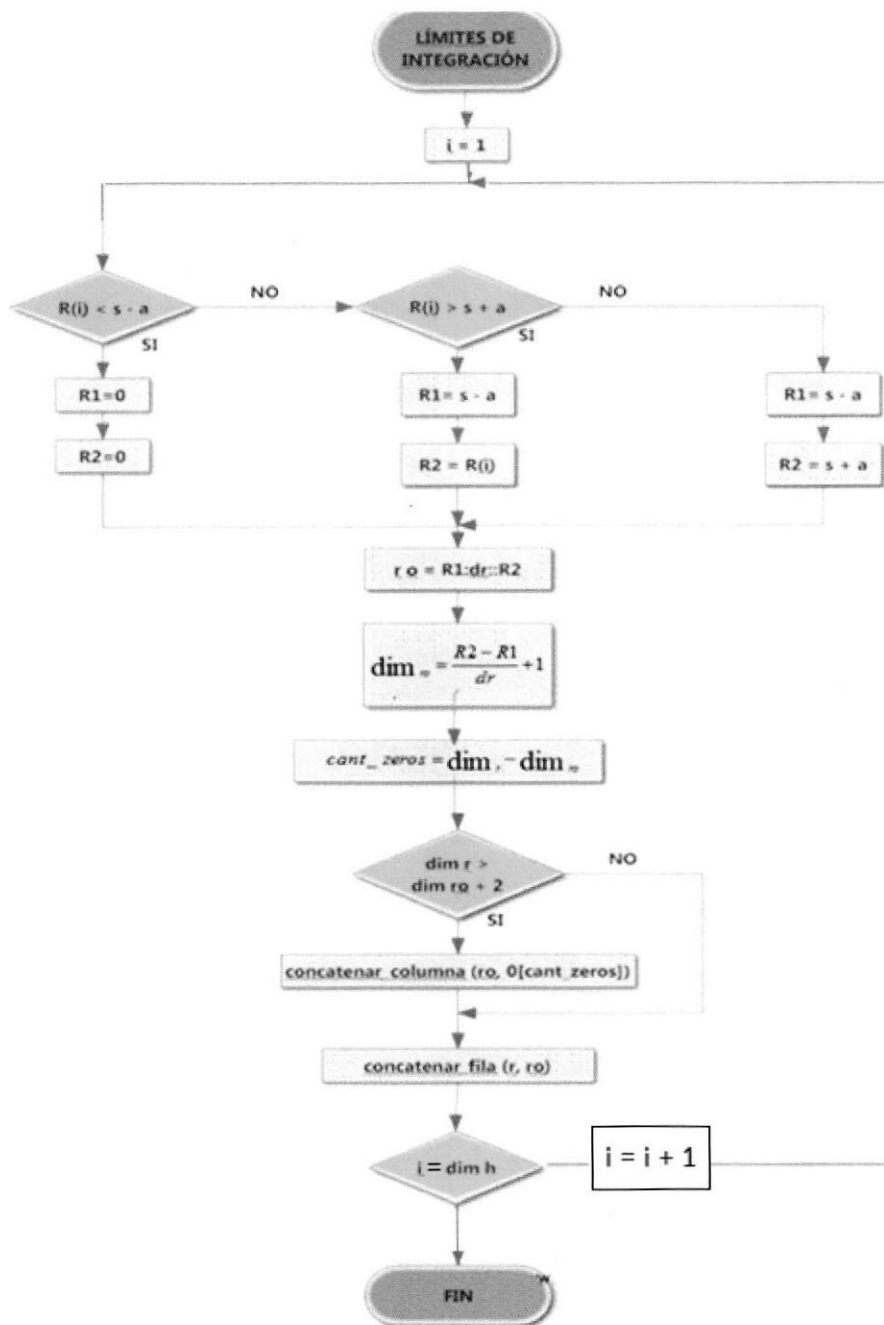
Luego definimos los vectores '*r*' y '*h*' que nos van a definir las muestras de altura que vamos a tomar para ejecutar la función de transferencia de potencia y

el grado de exactitud de la integración respecto a 'r'. Unos vectores 'r' y 'h' demasiado grandes pueden tornar demasiado lenta la simulación.

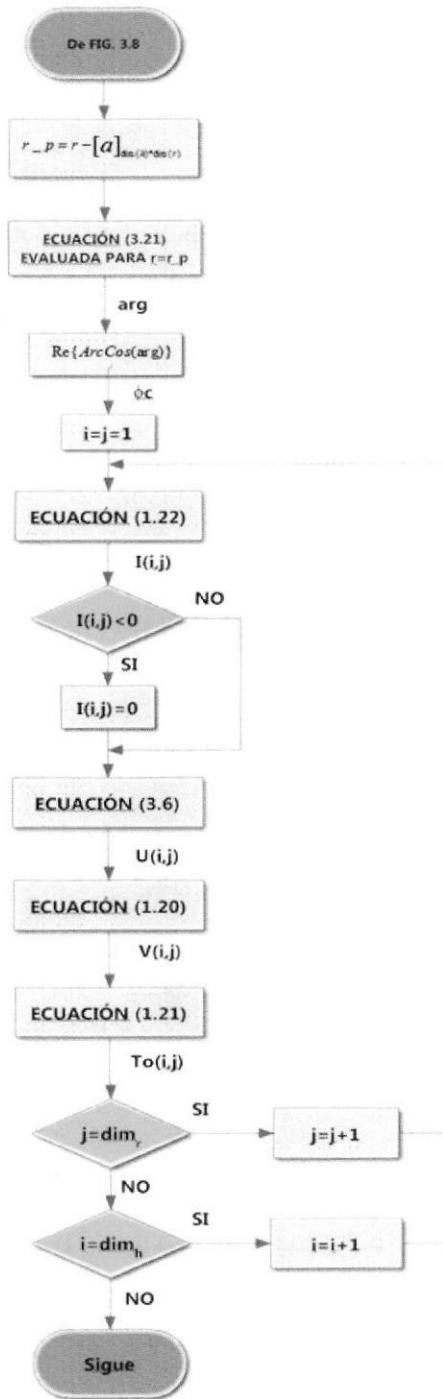


**Figura 3.8:** Diagrama de flujo de diferenciales, tamaño de vector 'h' y matriz 'r'

A continuación, mostramos el diagrama de flujo para definir el límite de integración de 'r' para los tres casos, dentro del plano en el que se halla el corte transversal de las fibras ópticas, cuando el radio del cono de luz es menor a la separación mínima de la fibra  $s - a$ , cuando el radio del cono de luz se intercepta con el núcleo de la fibra de recepción, y cuando la base del cono de luz contiene a la fibra de recepción.

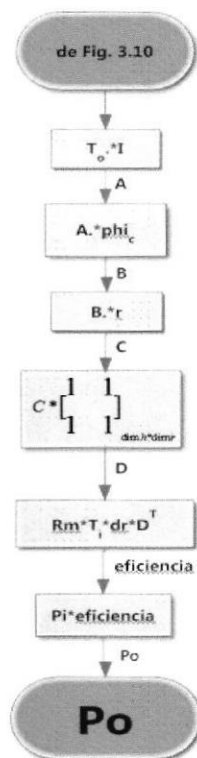


**Figura 3.9:** Diagrama de flujo para creación de la matriz 'r' y sus límites de integración



**Figura 3.10:** Diagrama de flujo para obtener parámetros matriciales  $O_c$ ,  $I$ ,  $T_o$

Con los parámetros ya obtenidos, ejecutamos el álgebra matricial detallada en la sección 3.4.2.5 para integrarlos y así obtener la potencia de salida en forma vectorial.



**Figura 3.11:** Integración de parámetros para obtener la potencia de salida

### 3.4. Implementación de la Simulación del Sensor de Desplazamiento

En base al diagrama de flujo detallado en la sección 3.5 editamos el algoritmo mostrado en el Anexo 1 en código Matlab, con los parámetros iniciales que se muestran a continuación en la tabla 3.3, trabajamos con fibras ópticas PMMA de

polímero con  $NA = 0.47$  [4]. En la fuente bibliográfica se mencionan en índice de refracción del núcleo  $\eta_{co}$  y de la cubierta  $\eta_{cl}$  de la fibra, que son 1.495 y 1.419 respectivamente. La apertura numérica  $NA$  es un coeficiente cuadrático que se lo halla por medio de la siguiente relación:

$$NA = \sqrt{\eta_{co}^2 - \eta_{cl}^2} \quad (3.38)$$

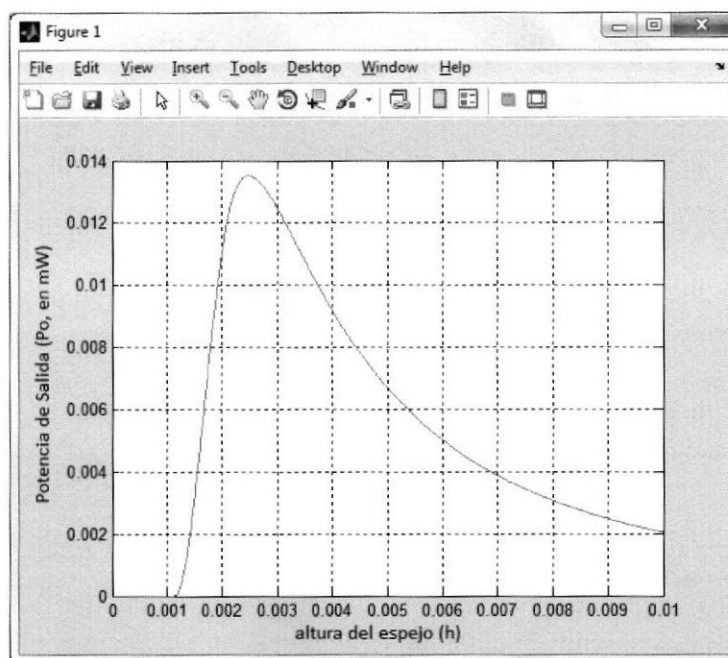
**TABLA 3.3:** Parámetros iniciales para ejecución de la simulación

Parámetro	Valor	Unidad
Pi	0.99	mW
Rm	0.90	N/A
s	2.2	mm
a	0.5	mm
no	1	N/A
nco	1.495	N/A
NA	0.47	N/A
dr	1,00E-06	N/A
dh	1,00E-05	N/A
hf	10	mm

El resultado esperado es una función continua que relacione Potencia de Salida vs Desplazamiento. El valor máximo de potencia es proporcional al desplazamiento en el cual el rayo más alejado de la fibra de recepción ( $r = -a$ ), con una inclinación igual al ángulo crítico en la fibra, incide sobre el punto de la fibra de recepción más alejado de la fibra de emisión ( $r = s+a$ ). Otro resultado esperado es observar un cambio de concavidad antes del pico de potencia, en la altura a la que  $R = s+a$ , así como también el inicio de la función en la altura a la que  $R = s-a$ . En la figura a continuación se muestra la potencia de salida,



cuando se ejecuta las simulación del sensor de desplazamiento sobre el aire ( $\eta_o = 1$ ).



**Figura 3.12:** Potencia de salida del sensor de desplazamiento simulado en MATLAB.

Como podemos observar en la figura 3.12, hemos obtenido el pico de potencia, los cambios de concavidad y el inicio de función que esperábamos ver. Observamos además que la intensidad del decrecimiento de la función después del pico de potencia es menor, esto se debe a que si bien por todo el corte transversal de la fibra de recepción inciden rayos estos deben desplazarse una cantidad cada vez mayor en el aire para llegar a la fibra, además se debe a que a partir de ese punto menos modos de propagación incidirán sobre la fibra de

recepción, ver figura 3.6. En la ventana de comandos observamos que la altura del pico máximo de potencia es a 2.48 mm, y el tiempo de espera de la simulación fue de 5.28 segundos.

## **CAPÍTULO 4**

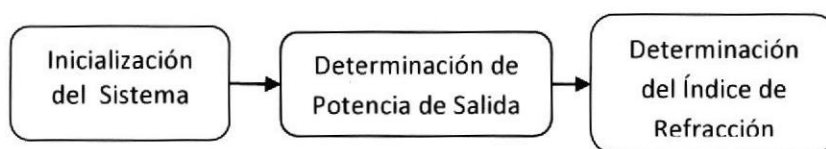
### **DESARROLLO DEL SISTEMA A SIMULAR**

#### **4.1. Descripción del Sensor Óptico de desplazamiento para medir el índice de refracción de la Glucosa**

El sistema a simular corresponde al sensor de desplazamiento cuyo objetivo es determinar el índice refracción y nivel de concentración de la glucosa en la muestra, el diagrama esquemático del mismo comprende principalmente tres etapas, como son:

- Inicialización del Sistema.
- Determinación de la Potencia de Salida.
- Determinación del Índice de Refracción y Nivel de Concentración de Glucosa Presente.

En la figura 4.1 se muestra cada uno de ellos en secuencia de ejecución.



**Figura 4.1:** Diagrama de Bloques Sensor

#### **4.2. Principales parámetros de la simulación**

Es importante mencionar que el sensor a simular toma como principio fundamental el funcionamiento de los sensores extrínsecos y las propiedades del índice de refracción de luz al traspasar varios medios, para controlar las características del sistema se definen los parámetros físicos de los materiales a utilizar de forma conjunta con sus propiedades ópticas como son: las dimensiones de la fibra a utilizar, apertura numérica de la FO, los índices de refracción del núcleo de la fibra, así como también de la muestra, la separación entre las fibras la reflectancia del espejo, la potencia inicial generada por el transmisor y los desplazamientos entre el espejo y las sondas, los mismo que representan los parámetros de entrada del sistema.

**TABLA 4.1 Principales Parámetros de la Simulación**

Parámetro	Abreviatura	Unidad de Medida
Reflectancia del Espejo	$R_m$	N/A
Potencia Inicial	$P_i$	[mW]
Potencia Óptica Total Recibida	$P_o$	[mW]
Altura Final	$h_f$	[mm]
Altura Inicial	$h_i$	[mm]
Radio del Núcleo de la FO	$a$	[mm]
Apertura Numérica FO	$NA$	N/A
Separación entre las FO	$s$	[mm]
Índice de Refracción Muestra	$n_o$	N/A
Índice de Refracción Núcleo FO	$n_{co}$	N/A

Además de los antes mencionados existen también parámetros de salidas como el caso de la potencia de salida  $P_o$ . Varios de éstos parámetros como  $h_f, s, n_o$  son parámetros variables los mismos que serán ajustados dependiendo de la naturaleza de cada uno de los experimentos realizados, en el caso de  $R_m, a, n_c, n_{co}, P_i, s, NA$ , se considerarán parámetros fijos.

#### 4.3. Etapas del Sistema

La simulación consta de tres secciones en su código de implementación, las cuales tienen tareas específicas de definición de las propiedades, así como también de control en los resultados. A continuación se presenta el detalle de cada una de ellos.



#### 4.3.1. Inicialización del Sistema

En esta etapa se caracteriza el tipo de sensor a utilizar en cada uno de los experimentos, si bien es cierto todo el estudio está basado en simulaciones del funcionamiento de los sensores extrínsecos, es necesario definir las características de los materiales que en la realidad componen al sensor, aquí se definen los valores de parámetros conocidos como son: La reflectancia del espejo, la potencia inicial generada por el transmisor, las dimensiones de la fibra a utilizar, los índices de refracción del núcleo, así como también de la muestra, la separación entre las fibras, apertura numérica de la FO y los desplazamientos entre el espejo y las sondas, con sus respectivos valores.

#### 4.3.2. Determinación de la Potencia de Salida

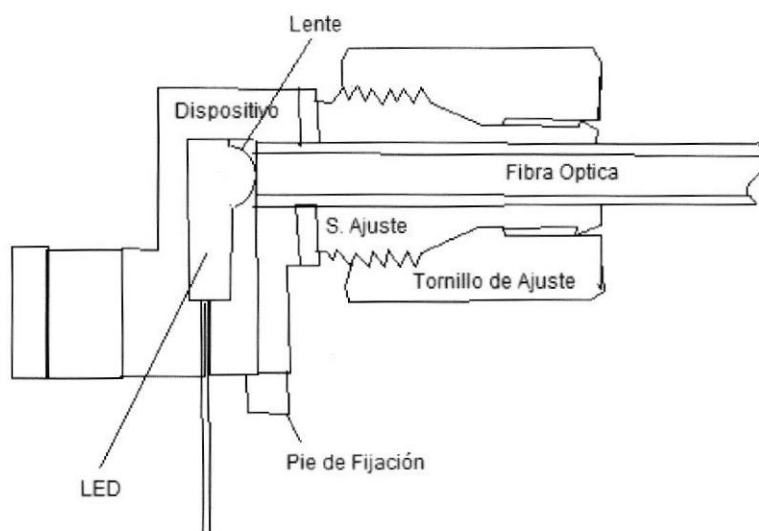
Este bloque corresponde a la función refractómetro implementada en código de Matlab, la misma que se basa en el modelado matemático del refractómetro descrito en la sección 3.2. Constituye una base fundamental en la determinación del índice de refracción de las muestras.

Su regla de correspondencia es la siguiente expresada en código de Matlab:

```
function [ Po ] = refractometro( Rm,Pi,hi,hf,no,a,s,NA,nco )
```

Recibe como nombre “refractómetro” y tiene sus parámetros de entrada son  $R_m, P_i, h_i, h_f, n_o, a, s, NA, n_{co}$ , los cuales fueron descritos en la sección 4.3.1 y presenta como parámetro de salida la Potencia óptica total recibida  $P_o$ .

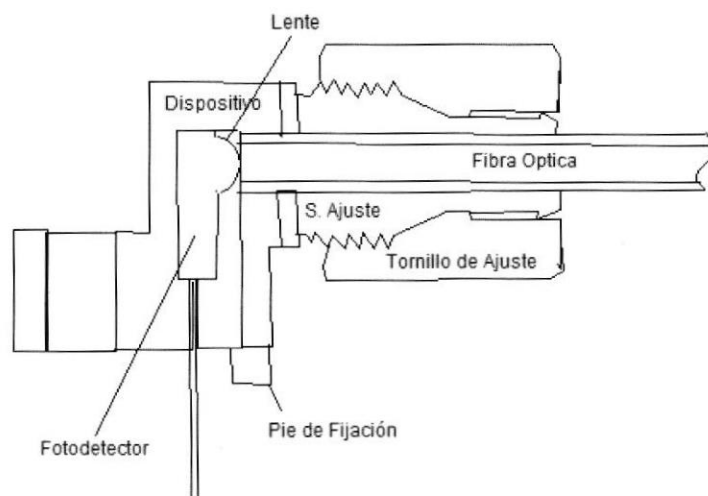
Su funcionamiento es esencialmente la implementación en código del refractómetro descrito en la sección 3.2 y ajustados a los experimentos realizados con el refractómetro usado en [13]. El cual consiste de un encapsulado (IF-E99 de Industrial Fiber Optics Inc. [14]) transmisor compuesto por un diodo LED con pico de operación en la longitud de onda de 650 nm (luz roja dentro del espectro visible), un micro lente y un tornillo de ajuste plástica de precisión que garantizan un máximo acoplamiento óptico con las fibras ópticas SI-PMMA y comportamiento lineal.



**Figura 4.2** Sección transversal del Transmisor Óptico, Reproducción tomada de la referencia[14]

La sonda usada es una fibra óptica plástica de la familia SI PMMA clase A4a (ver tabla 1.1), la cual es usada como sensor extrínseco mediante dos fibras una del lado transmisor y la otra del receptor. El receptor consiste de un encapsulado (IF-D98 de Industrial Fiber Optics Inc. [15]) compuesto de un fotodiodo con sensibilidad espectral en la banda de 400 – 1050 nm y que es compatible con el transmisor IF-E99 [14], un micro lente y tornillo de ajustes de iguales características que en el transmisor.





**Figura 4.3** Sección transversal del Receptor Óptico. Reproducción tomada de la referencia [15]

Todo el sistema se encuentra montado sobre un micrómetro de precisión atado a una tabla de fijación para evitar movimientos o vibraciones producidas por manipulación durante las mediciones, la conversión de luz a voltaje se la realiza en un multímetro digital con puertos de salida digital para posteriormente ser conectado a una estación de procesamiento de datos. La muestra es colocada en un recipiente que contiene a las sondas y al líquido muestra, además en el fondo se coloca un espejo con una reflectancia del 99% totalmente liso y libre de impurezas a fin de evitar pérdidas de luz por transmisión hacia el interior del espejo.

### 4.3.3. Determinación del Índice de Refracción y Concentración de Glucosa

#### Presente

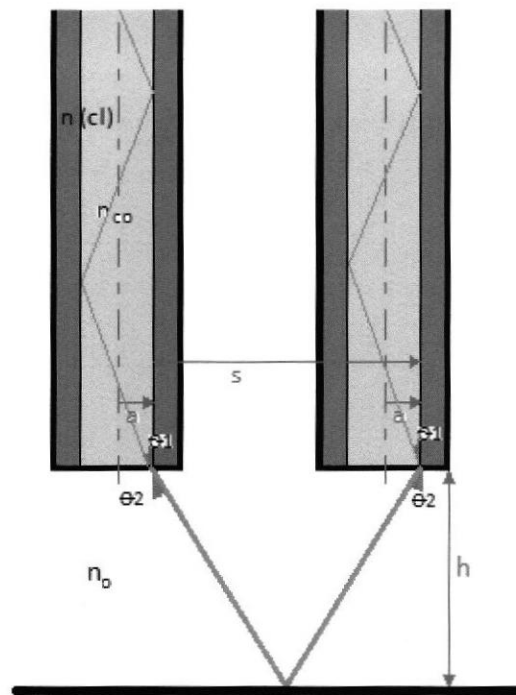
En esta etapa se realizan los cálculos del índice de refracción y del nivel de concentración de glucosa presente en la muestra, para esto se implementa la función "n\_glucosa" cuyo fin es determinar el valor del índice de refracción de la muestra y el desplazamiento en el cual sucede este valor, con estos resultados se obtienen las gráficas del comportamiento entre la potencia óptica total recibida y el desplazamiento.

La regla de correspondencia de "n\_glucosa" se detalla a continuación en código de Matlab, para ver su implementación remitirse al Anexo 1:

```
function [ n_muestra,h_max ] = n_glucosa( Po,h,NA,s,a )
```

Esta función tiene como parámetros de entrada  $P_o$ ,  $h$ ,  $NA$ ,  $s$ ,  $a$  y presenta en la salida  $n_{muestra}$  y  $h_{max}$ . Por la teoría sabemos que existe un punto máximo hasta el cual llega el valor de potencia, con el vector  $P_o$  recibido (potencia total recibida en el extremo de salida del sistema) se utiliza la combinación de las funciones `max()` y `find()` de las librerías de Matlab para determinar la ubicación y su correspondiente valor para la máxima Potencia que existe en el vector  $P_o$ , una vez determinado utilizamos el valor que arroja la función `find()` para ubicar el desplazamiento que corresponde a este valor de  $P_o$  máximo.

Teniendo la altura de máxima transferencia de potencia, se puede encontrar realizando una relación de triángulos y aplicando la ley de Snell el coeficiente de refracción del líquido para el cual ésta relación se cumple. En la figura 4.4 se muestra la altura del espejo a la cual se da la máxima transferencia de potencia y el movimiento de un rayo de luz a través del sistema.



**Figura 4.4** Representación gráfica de transferencia máxima de potencia

$$\eta_o \text{Sen} \theta_2 = \eta_{co} \text{Sen} \theta_1 \quad (4.1)$$

$$\text{Tan} \theta_2 = \frac{s+a/2}{h} \quad (4.2)$$

$$\text{Sen} \theta_2 = \frac{s+a/2}{\sqrt{\frac{(s+a)^2}{4} + h^2}} = \frac{\eta_{co}}{\eta_o} \text{Sen} \theta_1 \quad (4.3)$$

$\theta_c \rightarrow$  Ángulo crítico de luz confinada entre el núcleo y la cubierta

$$\eta_{co} \text{Sen}\theta_1 = NA \quad (4.4)$$

$$\frac{s+a/2}{\sqrt{\frac{(s+a)^2}{4} + h^2}} = \frac{NA}{\eta_o} \quad (4.5)$$

$$\eta_o = \frac{2NA}{s+a} \sqrt{\frac{(s+a)^2}{4} + h^2} \quad (4.6)$$

$$\eta_o = NA \sqrt{\left(h * \frac{2}{s+a}\right)^2 + 1} \quad (4.7)$$

La ecuación (3.44) tiene la forma  $y = A\sqrt{B^2x^2 + 1}$ , la cual es una hipérbola abierta hacia el eje de las ordenadas. Para valores de  $h$  grandes podremos despreciar el 1 del radical y así obtener la asíntota de la hipérbola;

$$\eta_o = NA * \left(\frac{2}{s+a}\right) * h \quad (4.8)$$

Haciendo uso de las ecuaciones (2.9) y (2.10), respectivamente [2], hallamos el nivel de concentración de glucosa del líquido desconocido a partir de su índice de refracción recientemente hallado. Este valor  $M$  es la solución final de la simulación y debe coincidir con el valor  $M$  asignado al inicio del diagrama de bloques.

Finalmente el índice de refracción de la muestra cuyo cálculo teórico se lo realiza con la ecuación (4.7) es implementado en código mediante la siguiente sentencia

```
n_muestra=NA*sqrt(((h_max/1000)/((s+a)/2))^2+1)+0.024;
```

Para el caso del desplazamiento  $h_{max}$  se lo implemente con la siguiente sentencia



$$h_{\max} = 1000 * h(i_{\max});$$

El factor de 1000 es de escala, para obtener la altura, originalmente trabajada en metros, en milímetros. En la sentencia para extraer el índice de refracción, el factor de corrección de 0.024 es añadido debido a la diferencia existente entre la aproximación lineal de la ecuación hiperbólica (4.7) y la asíntota de la hipérbola descrita.

#### 4.4. Presupuesto de Pérdida

Tras observar la figura 3.12 inferimos que la máxima transferencia de potencia se da entre los 14.5 y 15 uW. La potencia transferida tiene un valor medio de entre 5 y 10 uW. Comparando con la potencia de entrada, de 0.99 mW;

$$\eta = \frac{P_o}{P_i} = \frac{14.5 \cdot 10^{-6}}{0.99 \cdot 10^{-3}} = 0,0146 \quad (4.9)$$

Eficiencia máxima que se aproxima al 1.5%;

$$\eta_{dB} = 10 \text{Log} \frac{0,0146}{1} = -18,34 \text{ dB} \quad (4.10)$$

$$P_o = P_i - 18,34 \text{ dB} \quad (4.11)$$

La eficiencia media se aproximaría al 0.5%;

$$\eta_{dB} = 10 \text{Log} \frac{0,00505}{1} = -22,97 \text{ dB} \quad (4.12)$$

$$P_o = P_i - 22,97 \text{ dB} \quad (4.13)$$

Las pérdidas por acoplamiento y propagación en la fibra se las han estimado, como valor típico, en 0,01 mW, en términos de dB, serían:

$$L_{Emisión} = 10 \text{Log} \frac{0,99 \cdot 10^{-3}}{10^{-3}} = -0,04 \text{ dB} \quad (4.14)$$

Si trabajáramos con el valor mínimo de acople señalado en la hoja de datos del fotodiodo IF.E99, que es 0,875 mW [14], tendríamos pérdidas de:

$$L_{Emisión} = 10 \text{Log} \frac{0,875 \cdot 10^{-3}}{10^{-3}} = -0,58 \text{ dB} \quad (4.15)$$

Las pérdidas por acoplamiento en el detector y propagación en la fibra se las han estimado, como valor típico, en 0,01 mW, en términos de dB, serían:

$$\text{Típico: } L_{Recepción} = 10 \text{Log} \frac{0,99 \cdot 10^{-3}}{10^{-3}} = -0,04 \text{ dB} \quad (4.16)$$

$$\text{Típico: } L_{Totales} = L_{Emisión} - L_{Recepción} = -0,08 \text{ dB} \quad (4.17)$$

$$\text{Típico: } P_o = P_{emisión} - L_{Totales} - L_{Refractómetro} = -17,42 \text{ dB} \quad (4.18)$$

$$\text{Máximo: } L_{Recepción} = 10 \text{Log} \frac{0,875 \cdot 10^{-3}}{10^{-3}} = -0,58 \text{ dB} \quad (4.19)$$

$$\text{Máximo: } L_{Totales} = L_{emisión} - L_{Recepción} = -1,16 \text{ dB} \quad (4.20)$$

$$\text{Mínimo: } P_o = P_{emisión} - L_{Totales} - L_{Refractómetro} = -18,50 \text{ dB} \quad (4.21)$$

Se consideró la potencia transferida en el refractómetro en la altura punto de transferencia máxima de potencia. Considerando unos 3 dB como margen de seguridad, esto es el margen de variaciones inesperadas para efectos del cálculo, tenemos un presupuesto de pérdida típico de 20,42dB y máximo de 21,50dB.

Se calculará la potencia media del sensor de desplazamiento, con el aire como medio, con el objetivo de determinar si la potencia de salida del sistema supera el umbral de sensibilidad del sistema detector, de -50 dB [15]. Extrayendo el vector  $P_o$ , con la línea de comandos en la parte final del Anexo 1 se ha calculado la potencia media entre todos los valores mayores a cero, empleando el agua destilada como medio.

Se ha obtenido el valor de potencia media de 5,83 uW. Haciendo los cálculos anteriores con este valor de potencia media se obtiene una pérdida en el refractómetro de 22,34 dB, y una pérdida total típica de -22,42dB y máxima de -23,50 dB. Considerando unos 3 dB como margen de seguridad tenemos un presupuesto de pérdida típico de 25,42dB y máximo de 28,50dB. Considerando que la sensibilidad de un sistema detector se encuentra alrededor de los -50dB, no vamos a tener inconvenientes de detección debido que la señal recibida sería lo suficientemente grande. El fotodetector de

referencia para la simulación tiene una potencia de saturación de 40 mW [15], que equivalen a 16 dB.





## CAPÍTULO 5

### SIMULACIONES Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

En este capítulo se muestra el desarrollo de las diversas simulaciones, por fines de análisis de resultado se realiza la implementación de las tres secciones 5.1, 5.2 y 5.3 en un solo archivo cuyo código se puede verificar en el Anexo 1.

#### **5.1. Calibración del Sensor con muestras conocidas**

La presente simulación corresponde al proceso de calibración del sistema, para lo cual tomamos como una base de datos estándar los valores del experimento realizado en [9] y que se muestran en la tabla 2.2, considerando el valor del Índice de Refracción asociado a las muestras correspondientes a los siguientes valores de concentración de glucosa 0%, 5%, 10%, 15%, 20%, 25% lo cual se muestra en la TABLA 5.1.

**TABLA 5.1 Valores de las Muestras para calibración del Sistema**

Índice de Refracción	Concentración de Glucosa
1.332	0%
1.3402	5%
1.3477	10%
1.3571	15%
1.3635	20%
1.3736	25%

El objetivo de esta sección será obtener los valores de índices de refracción en función de los desplazamientos máximos para los cuales ocurre la mayor recepción de luz, dichos valores serán utilizados para un posterior análisis.

La simulación arranca con la etapa de Inicialización del Sistema, en la cual se ingresan los valores de la TABLA 5.2, el rango de desplazamientos a evaluar será desde una distancia inicial igual a 0.01 mm entre la superficie reflectante y las sondas hasta 10 mm con pasos de 10  $\mu$ m, en la siguiente tabla se muestra los valores de las variables a declarar.

**TABLA 5.2 Valores de Inicialización del Sistema**

Parámetro	Valor	Unidad de Medida
Reflectancia del Espejo	0.9	N/A
Potencia Inicial	0.99	[mW]
Altura Final	10	[mm]
Radio del Núcleo de la FO	0.5	[mm]
Separación entre las FO	2.2	[mm]
Apertura Numérica de la FO	0.47	N/A
Índice de Refracción Núcleo FO	1.495	N/A

Se declara en código cada uno de los parámetros listados de la siguiente forma

```
Rm= 0.9;
Pi= 0.99;
a= 0.0005;
s= 0.0022;
hi = 0.000005;
hf = 0.010000;
nco=1.495;
NA= 0.47;
dh= hi;
h= hi:dh:hf;
Ind_Refra= [ 1.332 1.3402 1.3477 1.3571 1.3635 1.3736 ];
c_muestras=[ 0 5 10 15 20 25 ];
```

En el caso de los índices de refracción de concentraciones de las muestras se definen los vectores 'Ind\_Refra' y 'c\_muestras' respectivamente, en las demás variables se define directamente su valor. Se han tomado, en base al experimento [9], seis mediciones de índice de refracción a seis concentraciones de glucosa, Si se trabaja con un emisor cuya longitud de onda es de 632.8 nm, se tomarían las mediciones de índice de refracción a su respectiva concentraciones de glucosa del experimento [10].

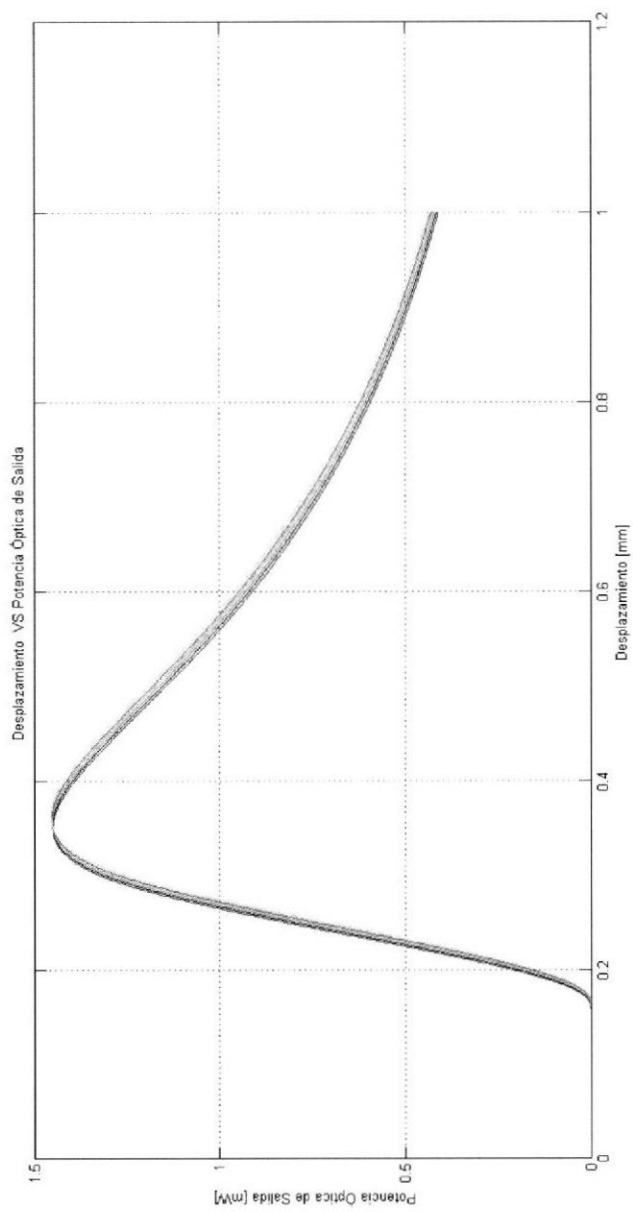
A continuación procedemos a calcular el valor del índice de refracción asociado a la muestra pero valorado en nuestro sistema así como también del desplazamiento en el que ocurre, para lo cual se definen las variables nuevas para índice de refracción y concentración que serán igualadas a los valores de cada

muestra extraídos de los vectores 'Ind\_Refra' y 'c\_muestras'. El proceso es repetido seis veces ya que son seis muestras las consideradas en la calibración del sistema.

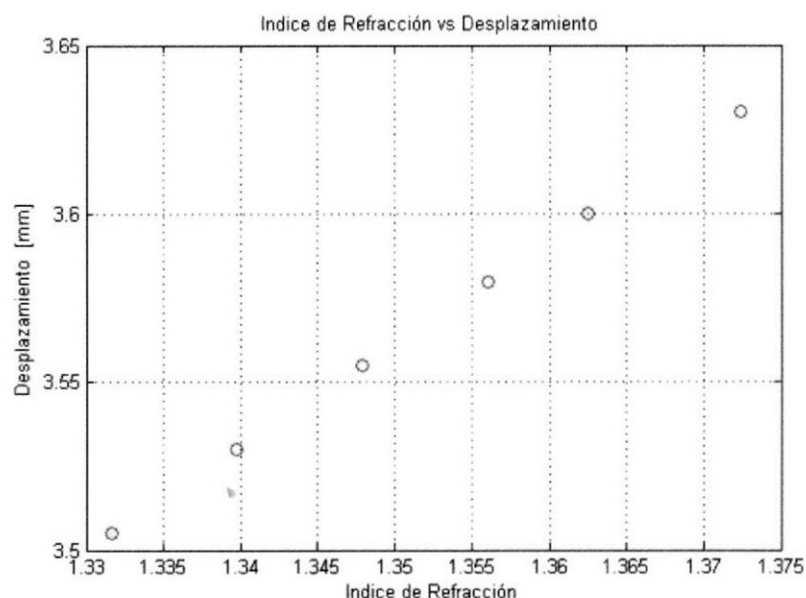
En un siguiente paso se define la variable en la cual se guarda el valor calculado por la función "refractómetro", después se realiza el llamando de las funciones "n\_glucosa" para calcular el valor del desplazamiento en el cual ocurre la potencia máxima y el valor del índice de refracción. El código siguiente muestra por ejemplo la declaración del código para la evaluación de la primera muestra.

```
no= Ind_Refra(1);  
co=c_muestras(1);  
  
P_final=refractometro(Rm,Pi,hi,hf,no,a,s,NA,nco);  
[n_recup,h_max]= n_glucosa (P_final,h,NA,s,a);
```

Finalmente se muestran las gráficas de la Potencia Óptica de Salida vs el Desplazamiento y la de los Índices de Refracción Medidos vs Desplazamiento.



**Figura 5.1** Desplazamiento vs Potencia Total Recibida



**Figura 5.2** Gráfica de los resultados del Índice de Refracción Recuperados vs Desplazamiento

Para ver la implementación en Código de la caracterización del sistema verificar el Anexo 1.

## 5.2. Determinación de la Función Característica del Sensor

Para determinar la función característica del sensor tomamos los resultados del índice de refracción medido en la sección 5.1 definidos en el vector 'Ind\_Refra\_Recup' y sus respectivos valores de concentración asociados en el vector 'c\_muestras'.

El objetivo es realizarla regresión lineal de los datos para obtener una función de la forma  $y = ax + b$  la misma que caracterizará al sensor, partiendo de la Figura

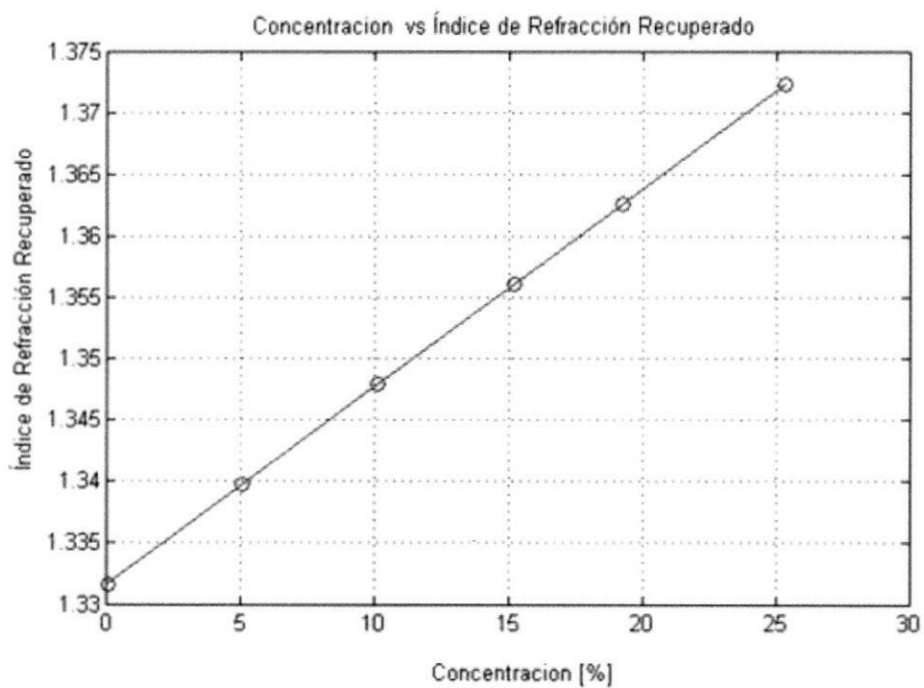
5.2 en la cual se grafican los puntos resultantes de la calibración del sistema, procedemos a realizar el proceso de regresión lineal. MATLAB mediante la función 'polyfit' la cual nos permite obtener los valores de los coeficientes "a" y "b" de la función resultante, entonces realizamos la siguiente declaración en código

```
med_sensor= polyfit(Ind_Refra_Recup,c_muestras,1);
```

Con lo cual se determinan los valores coeficientes 'a' y 'b', además es importante verificar la correlación existe entre el conjunto de datos para determinar el tipo de comportamiento que estos tienen entre sí, a continuación mostramos la declaración en código que nos permitirá determinar el coeficiente de correlación entre ellos

```
correlacion=corrcoef( Ind_Refra_Recup,c_muestras);  
C_correlacion=correlacion(1,2);
```

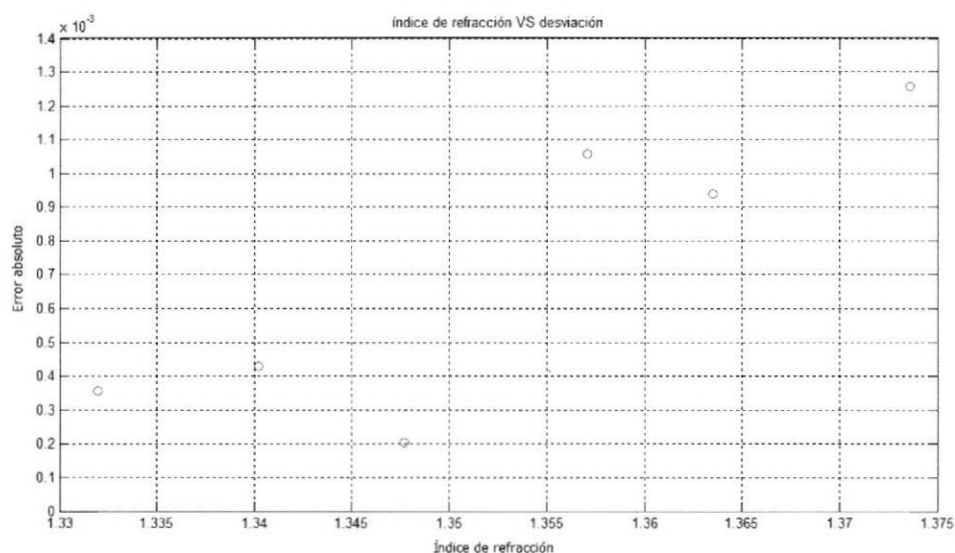
En la variable 'C\_correlacion' se encuentra el valor del coeficiente de correlación asociado al conjunto de datos, el valor del mismo es mostrado en pantalla. Como resultado se observa que el coeficiente de correlación es igual a 0.9996 con lo cual podemos decir que el comportamiento de los datos es lineal positivo y procedemos a mostrar la gráfica correspondiente resultado que caracteriza el comportamiento del sensor



**Figura 5.3** Gráfica de los resultados del Índice de Refracción medio vs Desplazamiento

Para ver la implementación en Código de la caracterización del sistema verificar el Anexo I.





**Figura 5.4:** Error absoluto entre índices de refracción ingresados y medidos.

Promediando los valores de error absoluto se obtiene  $6.67 \times 10^{-4}$ .

### 5.3. Determinación del nivel de concentración de glucosa en una muestra desconocida X.

En esta sección se muestra un ejercicio sencillo para la determinación del nivel de glucosa de una muestra desconocida "X" de la cual únicamente conocemos el valor del índice de refracción, consideramos al índice de refracción como el único dato conocido ya que en la realidad es el parámetro óptico que caracteriza a la muestra líquida.

**TABLA 5.3 Datos para la verificación de una muestra desconocida “X”**

Datos	
Muestra	Índice de Refracción
Agua destilada con Glucosa disuelta	1.3447

En la TABLA 5.3 se encuentran como dato una muestra de agua con un determinado nivel de glucosa diluido, de la sección 5.2 conocemos la función característica del sensor entonces mediante unas sencillas líneas de código procedemos a calcular el valor de la concentración de la muestra.

```

nx=input('Ingrese una muestra con índice de refracción entre
1.332 a 1.5:');
Px_final= refractometro(Rm,Pi,hi,hf,nx,a,s,NA,nco);
[nx_recup,h5_max]= n_glucosa (Px_final,h,NA,s,a);
fprintf('El índice de refracción medido de la muestra
desconocida es %f\n',nx_recup);
nx= abs( med_sensor(1)*nx_recup+med_sensor(2) );
fprintf('La concentración de glucosa de la muestra desconocida
es %f\n',nx);

```

Se solicita al usuario que mediante teclado ingrese el valor del índice de refracción de la muestra, seguido a esto se calcula la máxima potencia en la salida del sensor con la función ‘refractómetro’, conocido el valor de la potencia usamos la función ‘n\_glucosa’ para determinar el valor del índice de refracción determinado por nuestro sensor el cual es cercano al ingresado, Finalmente usando los valores del vector ‘med\_sensor’ se declara la función del sensor y se muestra por pantalla el nivel de concentración de glucosa y el índice de refracción medido, estos resultados se muestran en la siguiente tabla:

**TABLA 5.4 Resultados de la medición realizada**

Resultado	
Nivel de Concentración de Glucosa	Índice de Refracción Medido en sensor
8.09	1.3445

Estos resultados al verificarlos con la TABLA 2.1 determinan que la muestra corresponde a un nivel de concentración de glucosa del 8%.

#### 5.4. Análisis de Resultados

La figura 5.1 muestra una colección de gráficas de la función de transferencia de potencia a través del sensor de desplazamiento para niveles de concentración de glucosa de 0 a 25 por ciento según los datos medidos en [9]. En una escala de milímetros de altura contra microwatios se puede apreciar la función de transferencia en toda su forma; su inicio, sus puntos de inflexión y su máximo, en esta escala no son muy distinguibles las gráficas de las funciones por lo que se recomienda al usuario utilizar la lupa de la barra de herramientas para hacer un acercamiento. El desplazamiento máximo del espejo se lo cambiaría en caso de que en esta gráfica no se visualice alguno de los máximos de potencia.

En el fotodetector tenemos corrientes en el orden de los microamperios, para el caso del IFD91 que utilizamos como referencia, tenemos una responsividad de  $\mathcal{R} = 0.4 \text{ A/W}$ . Para el pico de potencia obtenido en el refractómetro cuando la

sustancia medida es el agua, 14.5  $\mu\text{W}$ , la corriente que se obtiene es de  $I_{ph} = 5.8 \mu\text{A}$ .

$$I_{ph} = \mathcal{R}P_o \quad (4.22)$$

Para que entre señal a 23 mV, que es la sensibilidad mínima de un sistema típico de adquisición de datos [16], debe seleccionarse entonces una resistencia de carga  $R_L$  no menor a 4 k $\Omega$ .

La figura 5.2 muestra las curvas con los valores del desplazamiento en los cuales ocurre la máxima transferencia de potencia relacionados con cada uno de los valores de índice de refracción de las diferentes muestras medidas, ya que en el primer gráfico estos máximos no son claramente visibles. Aunque hemos visto en la sección 4.4 que la relación entre desplazamiento e índice de refracción es hiperbólica, también es cierto que en secciones alejadas al centro de la hipérbola,  $n = 0$ , puede hacerse una aproximación lineal de la función. La figura 5.2 da a notar que para cada 5 centésimas de variación del índice de refracción, la altura de máxima transferencia de potencia varía aproximadamente unos 0,15 milímetros, y cada punto está separado aproximadamente unos 0.2 milímetros cada uno.

Por Nyquist, el refractómetro y el motor de paso para mover el espejo deberían estar configurados para poder detectar potencia transferida, como máximo, cada 0,1 milímetros de desplazamiento del espejo, para diferenciar en 5 puntos

porcentuales el nivel de concentración. Y por lo tanto, como máximo, cada 0,02 milímetros de desplazamiento del espejo, para diferenciar en 1 punto porcentual el nivel de concentración.

En la figura 5.3 se observa el gráfico de la función para recuperar el índice de refracción de la muestra a partir de la altura máxima. Esperábamos observar una relación hiperbólica, pero el rango de valores de índice de refracción fue lo suficientemente pequeño para observar una recta como función, así verificamos que una aproximación lineal de la función hiperbólica es adecuada para este rango de valores, la exactitud la observaremos en el último gráfico. No se detecta a la escala del gráfico variaciones entre los índices de refracción originales y aquellos que son medidos por el refractómetro.

Por último la figura 5.4 trata de la desviación entre el índice de refracción medido por el instrumento y el índice de refracción real de la muestra que se está midiendo. Se obtienen desviaciones cercanas a  $10^{-3}$ , esto significa que habrá generalmente una desviación de una milésima entre el índice de refracción de una muestra y aquel que el refractómetro mide. Físicamente, el error puede ser producido por la precisión del micrómetro utilizado para separar las fibras a una distancia adecuada 's'. La tendencia decreciente del margen de error puede ser explicada por la función hiperbólica que relaciona la altura de máxima

transferencia de potencia 'h\_max' y el índice de refracción recuperado. Matemáticamente, la resta entre dos hipérbolas concéntricas, con asíntotas de pendiente diferente, da como resultado otra hipérbola. En nuestro caso se restó la función hiperbólica que relacionaba el índice de refracción real con la altura, y aquella que relacionaba el índice de refracción medido con la altura.

$$y = A\sqrt{B_1x + 1} - A\sqrt{B_2x + 1} \quad (5.1)$$

La ecuación de arriba es un prototipo de la función de error que relaciona la altura de máxima transferencia de potencia 'h\_max' y el índice de refracción recuperado.

En la aplicación para medir el nivel de concentración de glucosa de una muestra desconocida; se verifica tanto la calidad de medición del índice de refracción, en el cual según se ha observado en la figura 5.3 habría un máximo de una milésima de diferencia, como la función que se obtiene para relacionar los niveles de concentración de glucosa con su respectivo índice de refracción. Con esta función se obtiene el nivel de concentración medido para la muestra.

## **CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

A partir de nuestra experiencia y los resultados obtenidos al efectuar la simulación, podemos extraer las conclusiones siguientes:

1. La lentitud de la ejecución del algoritmo es un aspecto llamativo de la simulación, es debido a la cantidad de operaciones que hay que realizar para hallar la transferencia de potencia en cada punto, a cada altura en cada nivel de concentración. Sin embargo observamos, en la ventana de comandos de MATLAB que 5 de los 6 segundos que toma cada medición, como comparamos en la simulación del sensor de desplazamiento en el capítulo 3 y la simulación de la medición de la concentración de glucosa con este sensor en el capítulo 5. Esto

implica que, en una eventual implementación, el tiempo de la adquisición de datos, que será digital, se acortará considerablemente por medición.

2. En una implementación real, el ancho de banda equivaldría al período de tiempo en el que el sistema informático de adquisición de datos toma las muestras de potencia.
  
3. Obtenemos, en la gráfica de altura máxima contra índice de refracción, un ajuste lineal con un ligero margen de error y parecido al que se obtuvo en el experimento de [9]. Esto implica que se cumplió el objetivo de recuperar el índice de refracción del líquido en la finalización del proceso.
  
4. El nivel de precisión de los resultados confirma la aproximación utilizada por [3] para la intensidad de luz en el refractómetro. Sin embargo, nuestra simulación no ha cumplido el objetivo planteado en el trabajo de [3] de medir índices de refracción con cinco decimales de precisión, debido a los errores absolutos de índice de refracción, del orden de  $10^{-4}$ , hallados en la gráfica de la figura (5.4).





5. El tiempo de simulación es variable, se ha observado en las repeticiones de la simulación del sistema que éste se mantiene entre los 5,4 y 5,8 segundos, cuando simula el sensor de desplazamiento.

En base a nuestra experiencia ejecutando la simulación, y los resultados obtenidos en ella, realizamos las recomendaciones siguientes:

1. Para efectuar una lectura cada 0,02 milímetros de desplazamiento del espejo, es necesario compensar el ancho de banda del sistema con la velocidad de desplazamiento del espejo.
2. Dados los presupuestos de pérdida obtenidos en la sección 4.4, el rango de potencias utilizable para la fuente de luz se ubica entre los 10  $\mu\text{W}$  y 7,94 W. Se recomienda seleccionar fuentes que sobrepasen el doble del valor mínimo y que no rebasen la mitad del valor máximo, esto es entre 20  $\mu\text{W}$  y 4 W.
3. La potencia emitida por el LED IF.E99 que seleccionamos como referencia para la simulación desciende linealmente a partir de 25°C 1 dB cada 15°C de temperatura que se incrementa en el ambiente según su hoja de datos [14], por lo que al trabajar con el circuito de emisión a temperaturas mayores puede obtenerse potencias más pequeñas de las que se esperaba.

# ANEXO 1

## Código Fuente de la Simulación principal

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Simulación Proyecto: En el presente archivo se realizan las
% simulaciones de la calibración del sensor, se establecen las
% relaciones entre los índice de refracción resultantes de las
% mediciones del sensor, la determinación de la función
% característica del sensor y se finaliza con un ejercicio en el
% cual se determina el nivel de concentración de glucosa de una
% muestra dada.
% El mismo se inicia con los valores de los parámetros constitutivos
% de los materiales del sensor, utiliza las funciones refractómetro%
% y n_glucosa para el fin mencionado, como resultado muestra las
% gráficas Desplazamiento vs P_salida, Desplazamiento vs Índice de
% Refracción y la mas importante que define a nuestro proyecto
% Concentración Glucosa vs Índice de Refracción.
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Autores:
% Daniel Sánchez
% ESPOL
% Email: dfsanche@fiec.espol.edu.ec
%
% Darío López
% ESPOL
% Email: llopez@fiec.espol.edu.ec
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%
% Etapa de inicialización del Sistema
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
clc;
clear all;
close all;
format long;
% Reflectancia de la Superficie usada en Sensor.
Rm = 0.9;
% Potencia de entrada (mW).
Pi = 0.99;
% Separación entre fibras y espejo inferior (m).
A = 0.0005;
S = 0.0022;
% Desplazamiento Inicial y Final.
hi = 0.000005;
hf = 0.010000;
% Índice de refracción del núcleo de la fibra.
nco=1.495;
% Apertura numérica de la fibra.
NA = 0.47;
% Vector desplazamiento h.
dh = hi;
h = hi:dh:hf;
```

```

% Índices de Refracción de las muestras usadas para calibración de
sensor.
Ind_Refra = [ 1.332 1.3402 1.3477 1.3571 1.3635 1.3736 ];
% Concentraciones de las muestras usadas para calibración de
sensor.
c_muestras =[ 0 5 10 15 20 25 ];
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Etapas de Determinación de la Potencia de Salida, del Índice de %
% Refracción y de la Concentración de la Glucosa %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

subplot(2,2,1)
% Valor de Índice de Refracción y concentración muestra
% base con glucosa al 0%
no = Ind_Refra(1);
co = c_muestras(1);
% Determinación de la Potencia de Salida
P_final =refractometro(Rm,Pi,hi,hf,no,a,s,NA,nco);
% Determinación del Índice de Refracción y Desplazamiento máximo
[n_recup,h_max] = n_glucosa (P_final,h,NA,s,a);
% Gráfico Desplazamiento vs Potencia de Salida para glucosa al 0%
plot(h/1000,P_final/100,'r');
hold on

% Valor de Índice de Refracción y concentración muestra
% base con glucosa al 5%
n1 = Ind_Refra(2);
c1 = c_muestras(2);
% Determinación de la Potencia de Salida
P1_final = refractometro(Rm,Pi,hi,hf,n1,a,s,NA,nco);
% Determinación del Índice de Refracción y Desplazamiento máximo
[n1_recup,h1_max] = n_glucosa (P1_final,h,NA,s,a);
% Gráfico Desplazamiento vs Potencia de Salida para glucosa al 5%
% Valor de Índice de Refracción y concentración muestra
% base con glucosa al 10%
n2 = Ind_Refra(3);
c2 = c_muestras(3);
% Determinación de la Potencia de Salida
P2_final = refractometro(Rm,Pi,hi,hf,n2,a,s,NA,nco);
% Determinación del Índice de Refracción y Desplazamiento máximo
[n2_recup,h2_max] = n_glucosa (P2_final,h,NA,s,a);
% Gráfico Desplazamiento vs Potencia de Salida para glucosa al 10%
plot(h/1000,P2_final/100,'g');
hold on

% Valor de Índice de Refracción y concentración muestra
% base con glucosa al 15%
n3 = Ind_Refra(4);
c3 = c_muestras(4);
% Determinación de la Potencia de Salida
P3_final = refractometro(Rm,Pi,hi,hf,n3,a,s,NA,nco);
% Determinación del Índice de Refracción y Desplazamiento máximo

```

```

[n3_recup,h3_max] = n_glucosa (P3_final,h,NA,s,a);
% Gráfico Desplazamiento vs Potencia de Salida para glucosa al 15%
plot(h/1000,P3_final/100,'c');
hold on

% Valor de Índice de Refracción y concentración muestra
% base con glucosa al 20%
n4 = Ind_Refra(5);
c4 = c_muestras(5);
% Determinación de la Potencia de Salida
P4_final = refractometro(Rm,Pi,hi,hf,n4,a,s,NA,nco);
% Determinación del Índice de Refracción y Desplazamiento máximo
[n4_recup,h4_max] = n_glucosa (P4_final,h,NA,s,a);
% Gráfico Desplazamiento vs Potencia de Salida para glucosa al 20%
plot(h/1000,P4_final/100,'m');
hold on

% Valor de Índice de Refracción y concentración muestra
% base con glucosa al 25%
n5 = Ind_Refra(6);
c5 = c_muestras(6);
% Determinación de la Potencia de Salida
P5_final = refractometro(Rm,Pi,hi,hf,n5,a,s,NA,nco);
% Determinación del Índice de Refracción y Desplazamiento máximo
[n5_recup,h5_max] = n_glucosa (P5_final,h,NA,s,a);
% Gráfico Desplazamiento vs Potencia de Salida para glucosa al 25%
plot(h/1000,P5_final/100,'y'),grid on;

title('Desplazamiento (mm) VS Potencia Transmitida (uW)')

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Calibración del Sensor de nivel de glucosa - Resultados %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
subplot(2,2,2)
% Desplazamiento resultantes en los cuales ocurre la máxima
recepción
% de luz.
Alturas = [ h_max h1_max h2_max h3_max h4_max h5_max ];
% Índices de refracción medidos por el sensor
Ind_Refra_Recup = [n_recup n1_recup n2_recup n3_recup n4_recup
n5_recup];
% Gráfico Índices de Refracción medidos vs Desplazamientos
plot(Ind_Refra_Recup,alturas,'Or'), grid on;
title('Índice de Refracción VS Desplazamiento (mm)')

```

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Función característica del sensor de nivel de glucosa
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

```



CIB-ESPOL

```

med_sensor = polyfit(Ind_Refra_Recup,c_muestras,1);
correlacion = corrcoef( Ind_Refra_Recup,c_muestras);
C_correlacion = correlacion(1,2);
fprintf('El coeficiente de correlacion de los datos es
%f\n',C_correlacion);
subplot(2,2,3)
% Regresión Lineal de los puntos del Gráfico Índices de
Refracción medidos vs Desplazamientos
for i=1:1:5+1
% Cálculos de los porcentajes de concentración de la muestra
censada basados en la función característica del sensor
p_concentracion(i) = abs(med_sensor(1)*Ind_Refra_Recup(i) +
med_sensor(2));
end
% Gráfico Índices de Refracción medidos vs Porcentaje de
Concentración
% Gráfica característica del Sensor.
plot(p_concentracion,Ind_Refra_Recup,'O-'), grid on;
title('Índice de Refracción Recuperado [mm] VS Concentracion [%]')

subplot(2,2,4)
error = Ind_Refra_Recup - Ind_Refra;
plot(Ind_Refra,error), grid on;
title('índice de refracción VS desviación')

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Determinación del nivel de glucosa de muestra desconocida %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Ingreso por teclado del valor del índice de refracción de la
muestra desconocida.
nx = input('Ingrese una muestra con índice de refracción entre 1.332
a 1.5:');
% Aplicación de la curva característica del sensor para
determinar nivel de concentración de glucosa de la muestra.
Px_final = refractometro(Rm,Pi,hi,hf,nx,a,s,NA,nco);
[nx_recup,h5_max] = n_glucosa (Px_final,h,NA,s,a);
fprintf('El índice de refracción medido de la muestra desconocida es
%f\n',nx_recup);
nx = abs(med_sensor(1)*nx_recup+med_sensor(2));
fprintf('La concentración de glucosa de la muestra desconocida es
%f\n',nx);

```

## Códigos Fuentes de Funciones

### Función Refractómetro

```
function [ Po ] = refractometro( Rm,Pi,hi,hf,no,a,s,NA,nco )
```

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%  
% refractómetro Realiza el cálculo de la potencia que se obtiene  
% en el extremo de salida del transmisor, utiliza parámetros  
% característicos de la fibra y del emisor para realizarlos  
% cálculos.  
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%  
% Sintaxis  
% [ Po ] = refractometro( Rm,Pi,hi,hf,no,a,s,NA,nco )  
%  
% Entradas  
% Rm: Reflectancia de la Superficie usada en Sensor.  
% Pi: Potencia de entrada (mW).  
% hi: Desplazamiento Inicial.  
% hf: Desplazamiento Final.  
% nco: Índice de refracción del núcleo de la fibra.  
% a: Radio del núcleo de la fibra.  
% s: Separación entre fibras y espejo inferior (m).  
% NA: Apertura numérica de la fibra.  
%  
% Salidas  
% Po: Potencia total a la salida del refractómetro.  
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%  
% Autores:  
% Daniel Sánchez  
% ESPOL  
% Email: dfsanche@fiec.espol.edu.ec  
%  
% Darío López  
% ESPOL  
% Email: llopez@fiec.espol.edu.ec  
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%  
% Declaración de Variables Locales  
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%  
tic;  
format long;  
%Diferenciales de uso en integración  
dr = 0.00001;  
dh = hi;  
%Dimensión de las matrices (r: columnas, h: filas)  
dim_h = (hf-dh)/dh+1;  
dim_r = (2*a)/dr+1;  
%Definición de Vector h  
h = hi:dh:hf;
```

```

%Cálculo del Angulo de Aceptación Máxima
angle_NA = asin(NA/no);
%Cálculo Transmitancia en corte transversal de la fibra de emisión
Ti = (4*nc0*no)/(nc0+no)^2;
%Radio del cono de luz saliente
R = a+2*h*tan(angle_NA);

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%                               Código Principal de la función                               %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%Definición de Límites de integración para 'r'
fori=1:1:dim_h
if(R(i) <= s-a)
    R1=0;
    R2=0;
elseif (and(R(i)>s-a,R(i)<s+a))
    R1=s-a;
    R2=R(i);
else
    R1=s-a;
    R2=s+a;
end
ro = R1:dr:R2;
[m_ro,dim_ro] = size(ro);
cant_zeros = dim_r-dim_ro;
if (dim_r>dim_ro+2)
ro = [ro zeros(1,cant_zeros)];
end
if (i==1)
    r=ro;
else
    [m_ro,dim_ro]=size(ro);
if (dim_ro<dim_r)
cant_zeros_2 = dim_r-dim_ro;
ro= [ro zeros(1,cant_zeros_2)];
end
    r = [r;ro];
end
end
% Calculo del Ángulo azimutal máximo
r_p = r-a*ones(dim_h,dim_r);
arg = (r_p.^2+(s.^2-2*a*s)*ones(dim_h,dim_r))./(2*(s-a)*r_p);
phic = real(acos(arg));
%To: Transmitancia sobre fibra receptora [2]
%I: Intensidad de luz dada su distribución parabólica
For i = 1:1:dim_h
for j = 1:1:dim_r
    I(i,j) = 2*(1-(r(i,j)^2/(R(i)^2)))/(pi*R(i)^2);
if (I(i,j)<0)
I(i,j) = 0;
end
end

```

```

U(i,j) = atan(r(i,j)/(2*h(i)));
V(i,j) = asin( sin(U(i,j))*(no/nco));
To(i,j)= 0.5*(1+(cos(U(i,j)-V(i,j))).^-2);
if(V(i,j)>0)
    To(i,j)=
    ((sin(2*U(i,j)).*sin(2*V(i,j)))./(sin(U(i,j)+V(i,j))).^2).*To(i,j);
end
if (phic(i,j)>(pi/2))
phic(i,j)=0;
end
end
end
%INTEGRACIÓN DE TRAYECTORIAS DE RAYOS DE LUZ
%PARA HALLAR LA EFICIENCIA
B = A.*phic;
C = B.*r;
efficiencia = Rm*Ti*D'*dr;

toc;
end

```



## Función n\_glucosa

```
function [ n_muestra,h_max ] = n_glucosa( Po,h,NA,s,a )
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%
%                               n_glucosa                               %
%
% n_glucosa Determina el valor de altura máxima en el cual ocurre %
% la máxima recepción de potencia, así como también realiza el %
% cálculo del índice de refracción de la muestra ingresada.
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Sintaxis
% [ n_muestra,h_max ] = n_glucosa( Po,h,NA,s,a )
%
% Entradas
% Po: Potencia de Salida del refractómetro
% h: Desplazamiento máximo Po
% NA: Apertura numérica de las fibras
% a: Radio del núcleo de las fibras
% s: Separación entre los ejes de las fibras
%
% Salidas
% n_muestra: Índice de Refracción de la muestra
% h_max: Desplazamiento Máximo en el cual ocurre Pmax
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Autores:
% Daniel Sánchez
% ESPOL
% Email: dfsanche@fiec.espol.edu.ec
%
% Darío López
% ESPOL
% Email: llopez@fiec.espol.edu.ec
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%                               Código Principal                               %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
format long;
% Calculo del índice para del valor máximo de potencia.
i_hmax = find(Po==max(Po));
% Determinación de los valores de altura y potencia máxima.
h_max = 1000*h(i_hmax);
% Calculo del índice de refracción.
n_muestra = NA*sqrt(((h_max/1000)/((s+a)/2))^2+1)+0.024;

end
```

## Función P\_media

```
function[P_media] = P_Media(Po,dim_h)
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%                               P_Media                               %
%
% P_Media realiza el cálculo del valor promedio de potencia entre %
% todos los valores máximos resultado de cada una de las mediciones%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Sintaxis
% [P_media] = P_Media(Po,dim_h)
%
% Entradas
% Po: Potencia máxima de la medición
% dim_h: Dimensión del Vector de alturas
%
% Salidas
% P_media: Potencia promedio
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Autores:
% Daniel Sánchez
% ESPOL
% Email: dfsanche@fiec.espol.edu.ec
%
% Darío López
% ESPOL
% Email: llopez@fiec.espol.edu.ec
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%                               Código Principal                       %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

j = 0;
for i=1:1:dim_h
if (Po(i)>0)
    j=j+1;
PPo(j) = Po(j);
end
end
P_media = mean(PPo);
```



CIB-ESPOL

## ANEXO 2

### Licencia BSD

Copyright 2012, Daniel Sanchez - Dario López. All rights reserved.

Redistribution and use in source and binary forms, with or without modification, are permitted provided that the following conditions are met:

1. Redistributions of source code must retain the above copyright notice, this list of conditions and the following disclaimer.
2. Redistributions in binary form must reproduce the above copyright notice, this list of conditions and the following disclaimer in the documentation and/or other materials provided with the distribution.

THIS SOFTWARE IS PROVIDED BY Daniel Sanchez - Dario López "AS IS" AND ANY EXPRESS OR IMPLIED WARRANTIES, INCLUDING, BUT NOT LIMITED TO, THE IMPLIED WARRANTIES OF MERCHANTABILITY AND FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE ARE DISCLAIMED. IN NO EVENT SHALL Daniel Sanchez - Dario López OR CONTRIBUTORS BE LIABLE FOR ANY DIRECT, INDIRECT, INCIDENTAL, SPECIAL, EXEMPLARY, OR CONSEQUENTIAL DAMAGES (INCLUDING, BUT NOT LIMITED TO, PROCUREMENT OF SUBSTITUTE GOODS OR SERVICES; LOSS OF USE, DATA, OR PROFITS; OR BUSINESS INTERRUPTION) HOWEVER CAUSED AND ON ANY THEORY OF LIABILITY, WHETHER IN CONTRACT, STRICT LIABILITY, OR TORT (INCLUDING NEGLIGENCE OR OTHERWISE) ARISING IN ANY WAY OUT OF THE USE OF THIS SOFTWARE, EVEN IF ADVISED OF THE POSSIBILITY OF SUCH DAMAGE.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] S. O. Kasap, *Optoelectronics and photonics: principles and practices*. Prentice Hall, 2001.
- [2] M. Born y E. Wolf, *Principles of Optics: Electromagnetic Theory of Propagation, Interference and Diffraction of Light*, 6.<sup>a</sup> ed. Cambridge University Press, 1997.
- [3] A. Suhadolnik, A. Babnik, y J. Možina, «Optical fiber reflection refractometer», *Sensors and Actuators B: Chemical*, vol. 29, n.º. 1-3, pp. 428-432, oct. 1995.
- [4] O. Ziemann, J. Krauser, P. E. Zamzow, y W. Daum, *POF Handbook: Optical Short Range Transmission Systems*, 2nd ed. Springer, 2008.
- [5] «Unimedios - UN Periódico». [Disponible en línea en]: <http://historico.unperiodico.unal.edu.co/Ediciones/82/09.htm>. Consultado: 07-feb-2012.
- [6] B. E. A. Saleh y M. C. Teich, *Fundamentals of Photonics*, 1st ed. John Wiley & Sons, 1991.
- [7] A. N. Bashkatov, E. A. Genina, V. I. Kochubey, y V. V. Tuchin, «Estimation of wavelength dependence of refractive index of collagen fibers of scleral tissue», *Proceedings of SPIE*, vol. 4162, n.º. 1, pp. 265-268, nov. 2000.
- [8] B. Marinic, «Molécula de glucosa, procesamiento de 3D, aislado en blanco», *123RF Stock Photos*. nov. 2009

- [9] D. R. Lide, Ed., *CRC Handbook of Chemistry and Physics, 88th Edition*, 88.<sup>a</sup> ed. CRC Press, 2007.
- [10] W. M. bin M. Yunus y A. bin A. Rahman, «Refractive index of solutions at high concentrations», *Appl. Opt.*, vol. 27, n<sup>o</sup>. 16, pp. 3341-3343, 1988.
- [11] T. L. Brown, H. E. L. Jr, B. E. Bursten, y J. R. Burdge, *Química: la ciencia central*. Pearson Educación, 2004.
- [12] D.C. Giancoli. *Física para Universitarios*. Prentice Hall. 3ra edición, May 2009.
- [13] S. Binu, V. P. Mahadevan Pillai, V. Pradeepkumar, B. B. Padhy, C. S. Joseph, y N. Chandrasekaran, «Fibre optic glucose sensor», *Materials Science and Engineering: C*, vol. 29, n<sup>o</sup>. 1, pp. 183-186, ene. 2009.
- [14] Industrial Fiber Optics, INC, *155 Mbps Plastic Fiber Optic Red LED IF-E99*, <http://i-fiberoptics.com/pdf/IF-E99datasheet.pdf>, Dic 2006 .
- [15] Industrial Fiber Optics, INC, *Plastic Fiber Optic Photodiode IF-D91*, <http://i-fiberoptics.com/pdf/IFD91.pdf>, May 2009, .
- [16] National Instruments, INC, E Series Multifunction DAQNI-6036E, <http://www.ni.com/pdf/products/us/2mhw245-246e.pdf>, 2006.. .
- [17] Enciclopedia virtual Wikipedia:  
Glucosa."<http://en.wikipedia.org/wiki/Glucose>". Consultado: Mar, 2012.

