



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO**

FACULTAD DE INGENIERÍA

**AUTOMATIZACIÓN DE UN REFRACTÓMETRO
ESPECTROSCÓPICO POR REFLEXIÓN INTERNA**

T E S I S

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
INGENIERO EN TELECOMUNICACIONES**

P R E S E N T A:

MAURICIO GONZÁLEZ GONZÁLEZ



**DIRECTORA DE TESIS:
DRA. CELIA A. SÁNCHEZ PÉREZ**

Ciudad Universitaria

2014

Dedicado a:

Mis Padres,

Su paciencia, apoyo, esfuerzos y sacrificios me permitieron estar aquí el día de hoy, nunca podré pagarles todo lo que han hecho por mí. Todo es gracias a ustedes.

Mis Tíos Norma, Bernardo y Carlos,

Porque siempre me han apoyado a lo largo de este camino. Su confianza, ejemplo y cariño han formado lo que soy ahora.

Para mis hermanos,

Porque sé que siempre han estado y estarán conmigo en las buenas y en las malas

Para Karla,

Porque siempre me has motivado a seguir adelante sin importar las adversidades, gracias por tener fe y confianza en mí, tu amor y cariño me han motivado a dar lo mejor de mí.

Para Mi abuelito y Renesín,

En su memoria. Porque donde quiera que se encuentren sé que me cuidan y me guían en mi camino.

Para la familia Mercado,

Porque me han hecho un miembro más de la familia, su apoyo y motivación me han ayudado a seguir adelante.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Nacional Autónoma de México. A la Facultad de Ingeniería, por la formación profesional que me brindó.

A mi directora de tesis, la Dra. Celia Sánchez Pérez por su orientación y apoyo en todos los aspectos.

Al Centro de Ciencias Aplicadas y Desarrollo Tecnológico, especialmente al Grupo de Sensores Ópticos y Eléctricos, por el apoyo brindado durante la realización del presente trabajo.

A mis sinodales, por su tiempo y dedicación en la revisión de este trabajo.

Al Doctor Carlos García, por el tiempo y la ayuda que me brindo.

A Nathalie, Erick y Marco porque en todos estos años su amistad ha sido un apoyo incondicional para mi formación profesional y personal, los quiero.

A la Dirección General de Asuntos del Personal de Académico (DGAPA), de la UNAM, por el apoyo brindado a través del Programa de Apoyo a Proyectos de Investigación e Innovación Tecnológica (PAPIIT), en el proyecto IT100612.

A todas aquellas personas quienes, directa o indirectamente, tuvieron alguna contribución para que esto sea posible.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE FIGURAS	vii
PREFACIO	x
CAPÍTULO 1. ANTECEDENTES	
1.1. Introducción	1
1.2. Definición de los métodos ópticos de análisis.....	1
1.3. Refracción	2
1.4. Índice de refracción.....	3
1.5. Ley de Snell.....	3
1.6. Reflexión interna total.....	4
1.7. Curvas de reflectancia.....	5
1.8. Refractómetros	6
1.8.1 Refractómetro de <i>Pulfrich</i>	6
1.8.2 Refractómetro de <i>Abbe</i>	7
1.8.3. Refractómetro de <i>Hilger-Chance</i>	8
CAPÍTULO 2. REFRACTÓMETRO ESPECTROSCÓPICO POR REFLEXIÓN INTERNA	
2.1. Principio de medición del índice de refracción a partir de $R(\theta_i)$	10
2.1.2. Haz reflejado en configuración de reflexión interna	13
2.2. Montaje experimental.....	15
2.3. Análisis y procesamiento de los datos obtenidos	19
2.4. Problemas de medición mediante esta implementación y propuesta de soluciones.....	26
CAPÍTULO 3. DESARROLLO E IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA AUTOMATIZADO	
3.1. Montaje para la automatización	28
3.2. Hardware y software del sistema.	29
3.2.1 Sistema de control de posicionamiento y desplazamiento	29
Platina micrométrica lineal.....	30
Controlador de precisión compacto de etapa motorizada.....	30
3.2.2 Espectrómetro	31

3.2.3 Programa de procesamiento de archivos	32
3.3 Metodología de la automatización	32
3.2.1 Interfaz gráfica	32
3.2.2. Sub-módulos del sistema.....	39
Sub-módulo del espectrómetro.....	39
Sub-módulo de posición y desplazamiento.....	40
Sub-módulo de procesamiento de datos.....	41
CAPÍTULO 4. RESULTADOS EXPERIMENTALES	
4.1. Inicialización del sistema automatizado.....	44
4.2. Operación del sistema	46
4.3. Procesamiento de datos y cálculo del índice de refracción	48
CONCLUSIONES	55
TRABAJO A FUTURO	55
BIBLIOGRAFÍA.....	56
APENDICES	
Apéndice A. Elementos que conforman el sistema del refractómetro espectroscópico por reflexión interna	57
A.1. Subsistema mecánico.....	57
A.2. Subsistema óptico.....	58
Apéndice B. Corrección del incremento del ángulo de salida a incremento del ángulo interno.....	61
Apéndice C. Código de programación del sistema	65

ÍNDICE DE FIGURAS

CAPÍTULO 1. ANTECEDENTES

Figura 1.1. Refracción de un haz de luz.....	2
Figura 1.2. Reflexión total interna.....	4
Figura 1.3. Curva de reflectancia, R, del agua tridestilada en función del ángulo de incidencia θ_1	5
Figura 1.4. Esquema del principio de funcionamiento de un refractómetro de Pulfrich....	6
Figura 1.5. Esquema del funcionamiento de un refractómetro de Abbe	7
Figura 1.6. Esquema del funcionamiento de un refractómetro Hilger-Chance.....	9

CAPÍTULO 2. REFRACTÓMETRO ESPECTROSCÓPICO POR REFLEXIÓN INTERNA

Figura 2.1. Representación gráfica de la trayectoria del rayo de luz en la interfaz vidrio-muestra	10
Figura 2.2. Representación gráfica del haz de luz reflejado a la salida del sistema	11
Figura 2.3. Gráfica de las curvas de reflectancia para diferentes valores de índice de refracción n_2	14
Figura 2.4. Gráfica de las derivadas de las curvas de reflectancia con respecto al ángulo de incidencia, para diferentes valores de índice de refracción	15
Figura 2.5. Montaje experimental del refractómetro propuesto,.....	16
Figura 2.6. (a) Rayos incidentes paralelos al eje óptico de una lente bi-convexa, (b) Rayos incidentes que forman un ángulo respecto al eje de la lente, (c) Conversión de ángulo a posición mediante el lente bi-convexo en el plano focal.....	17
Figura 2.7. Espectro de transmisión de la referencia (aire).....	19
Figura 2.8. Espectro de transmisión del agua tridestilada en la zona de reflexión parcial...20	
Figura 2.9. Espectro de transmisión del agua tridestilada en la zona de reflexión total.....20	
Figura 2.10 Curvas de reflectancia posicional para cada longitud de onda del agua tridestila.....	22
Figura 2.11. Derivada de las curvas de reflectancia posicional para cada longitud de onda.....	22

Figura 2.12. Zona útil de la derivada de las curvas de reflectancia posicional para cada longitud de onda.....	23
Figura 2.13. Curva de reflectancia de la longitud de onda de calibración 650 [nm] con respecto al ángulo de incidencia.....	24
Figura 2.14. Curva de índice de refracción del agua tridestilada para cada longitud de onda.....	25

CAPÍTULO 3. DESARROLLO E IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA AUTOMATIZADO

Figura 3.1. Montaje experimental del refractómetro automatizado	29
Figura 3.2. Platina micrométrica lineal motorizada	30
Figura 3.3. Controlador de precisión compacto de etapa motorizada	31
Figura 3.4. Interfaz gráfica de usuario para la configuración de los parámetros	33
Figura 3.5. Interfaz gráfica del usuario, configuración de los parámetros (platina lineal micrométrica).....	34
Figura 3.6. Interfaz gráfica de usuario, espectrómetro y platina	36
Figura 3.7. Interfaz gráfica de usuario, procesamiento de datos	36
Figura 3.8. Interfaz gráfica de usuario, cálculo del índice de refracción	37
Figura 3.9. Diagrama de bloques del módulo principal.	38
Figura 3.10. Diagrama de bloques del sub-modulo del espectrómetro	40
Figura 3.11. Diagrama de bloques del sub-modulo del sistema de control de posición y desplazamiento	42
Figura 3.12. Diagrama de bloques del sub-modulo del procesamiento de datos	43

CAPÍTULO 4. RESULTADOS EXPERIMENTALES

Figura 4.1. Interfaz gráfica (PARAMETROS), parámetros iniciales establecidos	46
Figura 4.2. Interfaz gráfica para la configuración de conexión de la platina lineal micrométrica.....	47
Figura 4.3. Interfaz gráfica (ESPECTRO Y PLATINA), parámetros de desplazamiento establecidos.....	48
Figura 4.4. Interfaz gráfica (PROCESAMIENTO DE DATOS), datos obtenidos de la medición	49

Figura 4.5. Interfaz gráfica (PROCESAMIENTO DE DATOS) curvas de reflectancia.....	49
Figura 4.6. Interfaz gráfica (PROCESAMIENTO DE DATOS) derivada de las curvas de reflectancia	50
Figura 4.7. Interfaz gráfica (PROCESAMIENTO DE DATOS) zona útil	50
Figura 4.8. Interfaz gráfica (PROCESAMIENTO DE DATOS) curva de reflectancia con escala angular.....	51
Figura 4.9. Interfaz gráfica (CÁLCULO DEL ÍNDICE DE REFRACCIÓN).....	51
Figura 4.10. Interfaz gráfica (CALCULO DEL INDICE DE REFRACCION) índice de refracción.....	52

PREFACIO

El presente trabajo fue desarrollado en el Grupo de Sensores Ópticos y Electrónicos (GSOE) del Centro de Ciencias Aplicadas y Desarrollo Tecnológico (CCADET) de la UNAM, bajo la dirección de la Dra. Celia A. Sánchez Pérez. En este, se propone la automatización de un refractómetro espectroscópico por reflexión interna.

Los refractómetros son instrumentos de medición ópticos que miden el índice de refracción, el cual es una propiedad física de los materiales. Estos aparatos son usados en industrias como la farmacéutica, químicas, vinílicas, etc., ya que el índice de refracción es una propiedad óptica que se puede relacionar con la concentración de las sustancias disueltas entre otras aplicaciones. Estos instrumentos de medición cuentan generalmente con una fuente de luz, un sistema prismático que incluye un contenedor donde se deposita la muestra que se va a medir; así mismo tienen un detector para medir la intensidad del haz de luz y a partir de esta medición inferir un cambio en la refracción debida al medio a caracterizar. Los refractómetros son comercializados como instrumentos de medición compactos que operan a una longitud de onda determinada o un rango muy limitado de longitudes de onda. Así la caracterización de la dispersión de índice de refracción; es decir su dependencia con la longitud de onda, debe hacerse a múltiples valores de longitudes de onda con el objetivo de determinar una curva de dispersión, por lo que se necesitaría formar un arreglo con varias fuentes de luz a diferentes longitudes de onda cada una, esto volvería el sistema muy costoso. Otra forma de hacer mediciones de la dispersión del índice de refracción es utilizando una fuente de luz policromática con un monocromador que hace el filtrado de las longitudes de onda; éstos sistemas son de alto costo y de respuesta lenta.

En este trabajo de tesis se analiza y estudia el proceso para mejorar y automatizar un refractómetro espectroscópico por reflexión interna, el cual obtiene curvas de dispersión del índice de refracción, que fue desarrollado en el GSOE. Este sistema incorpora una fuente de luz blanca por lo que el análisis espectral no requiere de varias fuentes o un monocromador, lo que lo hace más simple con respecto a otros sistemas propuestos. Se plantea automatizar

este sistema, para disminuir errores experimentales y lograr una mayor exactitud en las mediciones con una mayor repetibilidad y en un intervalo mucho menor de tiempo.

Para desarrollar este trabajo fue necesario conocer los principales conceptos básicos en los que el refractómetro basa su funcionamiento, así como los elementos ópticos y mecánicos que lo conforman. Así mismo, se espera obtener una mejora al sistema y una optimización, que permita potenciar su uso.

El trabajo se divide en cuatro capítulos. Inicialmente, se introducen los antecedentes del sistema para dar continuidad a este proyecto. En el segundo capítulo, se hablará de los principios de medición del índice de refracción del sistema, se mostrará el montaje experimental del refractómetro y se describirán los problemas al trabajar con él, proponiendo posibles soluciones a estos. En el capítulo tres se mostrará el montaje del sistema con las mejoras propuestas y se hablará de la metodología utilizada en el desarrollo de la interfaz gráfica para su automatización. Finalmente, en el capítulo cuatro, se describe cómo operar el sistema a partir de la inicialización de la interfaz gráfica y las pruebas realizadas. Se inicia con el establecimiento de los parámetros de los diferentes elementos que lo conforman mientras que el usuario sólo tiene que ejecutar el programa, esperar unos minutos y observar los datos desplegados. El escrito concluye con el análisis de los resultados obtenidos a lo largo de este trabajo y las oportunidades de mejora para el montaje y pruebas.

CAPÍTULO 1.

ANTECEDENTES

En este capítulo se expondrán algunos de los conceptos básicos en los cuales está sustentada la implementación del refractómetro espectroscópico por reflexión interna con el objetivo de comprender su principio de funcionamiento, y así poder realizar una interfaz gráfica con la cual se controlará dicho dispositivo.

1.1. Introducción

Con el gran avance tecnológico en la actualidad, se necesita mejorar los dispositivos de medición eléctricos, mecánicos, ópticos, etc., que ya existen, o crear nuevas técnicas de medición que mejoren el rendimiento y optimicen su funcionamiento para realizar mejores y un mayor número de mediciones en un menor intervalo de tiempo.

A continuación se describirán los principales conceptos básicos, los cuales ayudarán a comprender el funcionamiento del refractómetro espectroscópico por reflexión interna, para que posteriormente se pueda proponer su automatización.

1.2. Definición de los métodos ópticos de análisis

Se definen como métodos ópticos de análisis aquellas técnicas que miden la radiación electromagnética que emana de la materia o que interacciona con ella [1]. Se incluyen por lo tanto los campos del espectro electromagnético desde los rayos *gamma* hasta las ondas de radio. También se estudian todas las formas de obtención de radiación electromagnética, así como su interacción con la materia, incluyendo la emisión, la absorción, la dispersión, la refracción, la reflexión, las interferencias, la difracción y la polarización.

Los métodos ópticos de análisis se pueden dividir en dos tipos fundamentales, los espectroscópicos y los no espectroscópicos.

Los métodos espectroscópicos se basan en la medida de la intensidad como función de la longitud de onda de la energía radiante. Por otro lado, los métodos no espectroscópicos se basan en una interacción entre la radiación electromagnética y la materia que tiene como resultado un cambio en la dirección o en las propiedades físicas de la radiación electromagnética en mecanismos específicos de reflexión, dispersión refractiva, interferencias, difracción y polarización.

1.3. Refracción

La refracción puede definirse como el cambio de dirección de la radiación al pasar de un material a otro y puede atribuirse a las diferencias de velocidad de propagación en los dos medios [2]. Siempre que la radiación pasa de un material dieléctrico a otro ésta es parcialmente reflejada y parcialmente refractada (o transmitida), como se muestra en la figura 1.1.

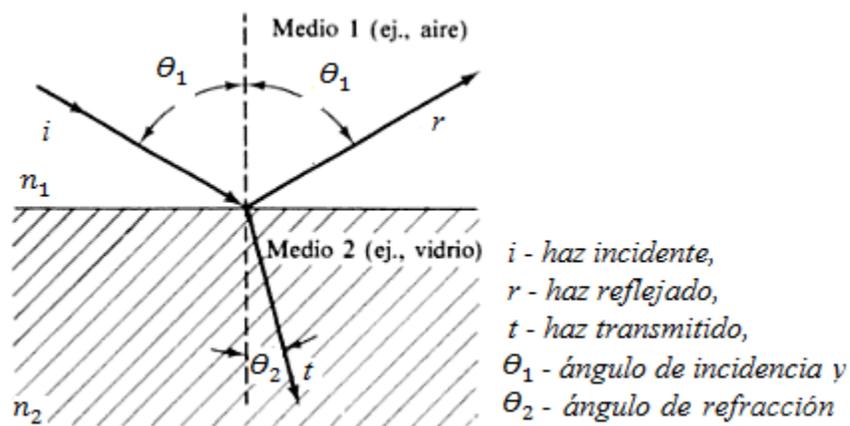


Figura 1.1. Refracción de un haz de luz.

1.4. Índice de refracción

La velocidad de la luz v en un medio transparente, como el aire, el agua o el vidrio, es menor que la velocidad de la luz en el vacío, c . Un medio transparente se caracteriza por su índice de refracción, n , que se define como el cociente entre la velocidad de la luz en el vacío, ($c = 3 \times 10^8 \left[\frac{m}{s} \right]$), y su velocidad en el medio, v :

$$n = \frac{c}{v} \quad (1.1)$$

Para el agua, $n = 1.33$, mientras que para el vidrio, n varía de 1.50 a 1.66 según el tipo de vidrio [3]. El diamante posee un índice de refracción muy elevado, aproximadamente igual a 2.4. El índice de refracción del aire es aproximadamente 1.0003, de modo que, para la mayor parte de los casos a estudiar, podemos suponer que la velocidad de la luz en el aire es la misma que en el vacío.

1.5. Ley de Snell

Como ya se mencionó anteriormente, el ángulo de refracción de un haz de luz cuando incide en la frontera entre dos medios (figura 1.1), depende de la rapidez de la luz en los dos medios y del ángulo de incidencia. Hacia el año de 1621, Willebrord Snell (1591-1626) determinó experimentalmente una relación analítica entre θ_1 y θ_2 que se le conoce como Ley de Snell [4] y se escribe como se muestra en la ecuación 1.2.

$$n_1 \text{sen} \theta_1 = n_2 \text{sen} \theta_2 \quad (1.2)$$

Donde:

θ_1 es el ángulo de incidencia con respecto a la normal,

θ_2 es el ángulo de refracción con respecto a la normal y

n_1 y n_2 son los respectivos índices de refracción de los medios.

La ley de Snell es la ley de refracción básica. A partir de la ley de Snell es claro que $n_2 > n_1$, entonces $\theta_2 < \theta_1$. Es decir, si la luz entra en un medio donde n es más grande (y su

rapidez menor), entonces el rayo se dobla hacia la normal. Y si $n_2 < n_1$, entonces $\theta_2 > \theta_1$, así que el rayo se dobla alejándose de la normal.

1.6. Reflexión interna total

La reflexión interna total [5], puede ocurrir cuando la luz se propaga de un medio con un determinado índice de refracción hacia otro con un índice de refracción más bajo, cuando esto ocurre, los rayos de luz que llegan a la frontera que se encuentra entre los dos medios, son refractados y se separan de la normal debido a que $n_1 > n_2$. Para un valor particular del ángulo de incidencia $\theta_1 = \theta_c$, llamado ángulo crítico, la luz refractada se propaga paralela a la frontera de los dos medios, de modo que $\theta_2 = 90^\circ$, como sucede con un rayo A en la figura 1.2; es decir, el ángulo crítico es el ángulo mínimo de incidencia en un medio, en el cual la luz se refleja totalmente. Para ángulos de incidencia mayores que θ_c , ningún rayo se refracta y el rayo incidente es completamente reflejado en la frontera. Este rayo es reflejado en la frontera como si incidiese sobre una superficie reflectora perfecta. Naturalmente, dicho rayo cumple la ley de la reflexión, esto es, que el ángulo de incidencia es igual al ángulo de reflexión.

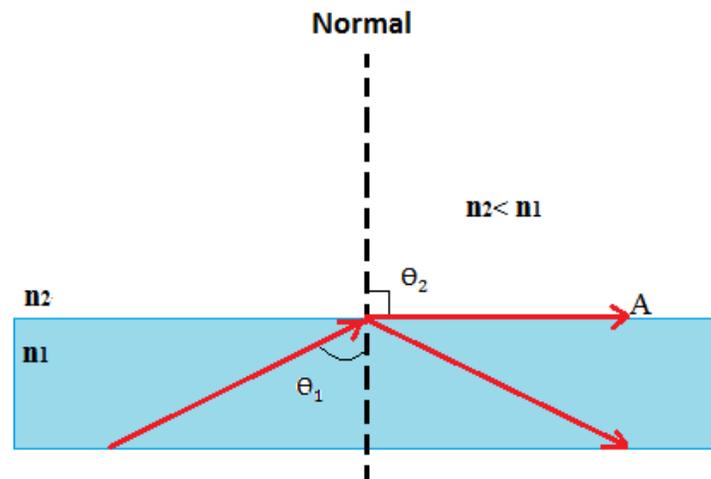


Figura 1.2. Reflexión total interna.

Podemos utilizar la ley de Snell para encontrar el ángulo crítico. Cuando $\theta_1 = \theta_c$ y $\theta_2 = 90^\circ$ y de la ley de Snell se obtiene:

$$n_1 \sin \theta_c = n_2 \sin 90^\circ = n_2$$

$$\sin \theta_c = \frac{n_2}{n_1} \text{ (para } n_1 > n_2 \text{)} \quad (1.3)$$

Esta ecuación solo puede ser utilizada cuando cumple con la condición $n_1 > n_2$, ya que la reflexión interna total ocurre solamente cuando la luz incide de un medio de mayor índice de refracción a un medio de índice de refracción menor.

El ángulo crítico para la reflexión interna total es pequeño cuando n_1 es considerablemente mayor que n_2 .

1.7. Curvas de reflectancia

La reflectancia (R) es la relación que existe entre las intensidades de los rayos reflejado (I_r) e incidente (I_i) [6]. Se calcula como se muestra en la relación 1.4.

$$R = \frac{I_r}{I_i} \quad (1.4)$$

La gráfica de esta razón en función del ángulo de incidencia se conoce como curva de reflectancia angular, un ejemplo se muestra en la figura 1.3.

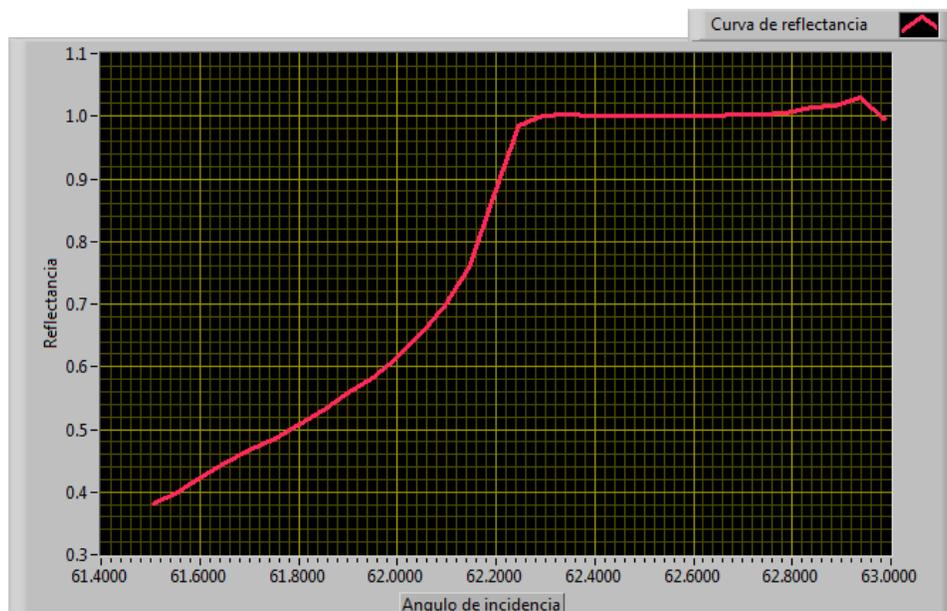


Figura 1.3. Curva de reflectancia, R, del agua tridestilada en función del ángulo de incidencia θ_i .

1.8. Refractómetros

Un refractómetro es un aparato destinado a medir el índice de refracción de un medio típicamente transparente, líquido o sólido [7]. La gran mayoría de los refractómetros funcionan midiendo el ángulo límite entre los vidrios, uno de índice de refracción conocido y otro de índice de refracción desconocido, que se desea medir.

Los tres refractómetros más conocidos son el de *Pulfrich*, el de *Abbe* y el de *Hilger-Chance*. Tanto el de *Abbe* como el de *Pulfrich*, pueden medir los índices de refracción de líquidos o de sólidos, pero el de *Pulfrich* es más utilizado para sólidos. El refractómetro de *Hilger-Chance* se usa de manera exclusiva para sólidos.

1.8.1 Refractómetro de *Pulfrich*

El refractómetro de *Pulfrich* funciona cuando una fuente de luz monocromática convergente ilumina la zona de contacto entre un prisma de índice conocido, n_0 , y la muestra de índice n , [7], como se muestra en la figura 1.4. No se necesita que la cara plana de la muestra sea perfectamente plana, tampoco que esté bien pulida. Se necesita solamente que la muestra se una al prisma por medio de un aceite con índice de refracción intermedio entre el de la muestra y el del prisma.

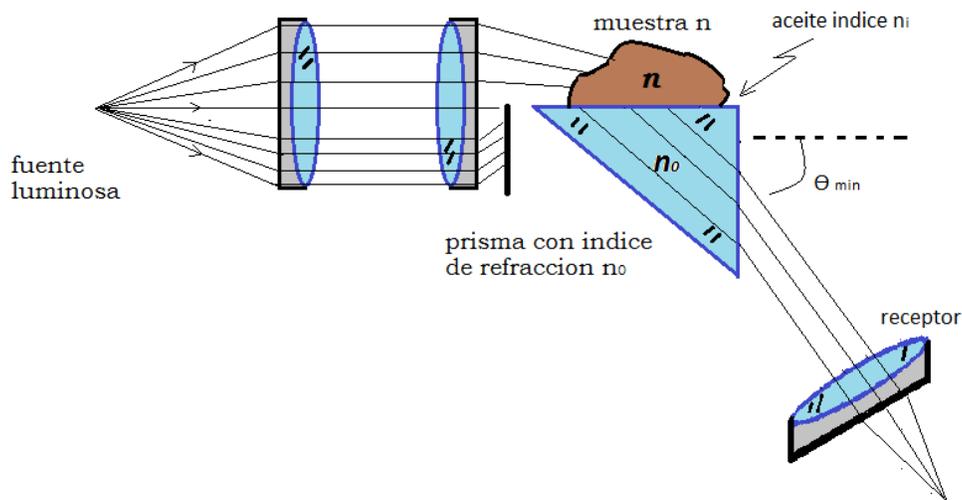


Figura 1.4 Esquema del principio de funcionamiento de un refractómetro de *Pulfrich* [7].

El índice n_0 es mayor que el índice n , así que la luz se refracta hacia el prisma, dirigiéndose a un receptor. Debido al ángulo crítico, la luz tendrá un ángulo de salida θ_{min} . En el receptor se observa una frontera bien definida entre la luz y la sombra, la cual permite medir el ángulo de salida θ_{min} . A partir de esto, se puede definir el índice de refracción n usando la fórmula 1.5.

$$n = (n_0^2 - \sin^2 \theta_{min})^{\frac{1}{2}} \quad (1.5)$$

1.8.2 Refractómetro de Abbe

Este refractómetro basa su funcionamiento en el ángulo crítico [7,8]. Como su nombre lo indica este dispositivo fue diseñado por E. Abbe en 1906 con el fin de medir el índice de refracción de líquidos. El diseño de este instrumento consta de dos prismas compensadores de forma $30^\circ - 90^\circ - 60^\circ$. El prisma que se encuentra del lado de la fuente tiene la función de iluminar la muestra al mismo tiempo que le proporciona soporte mecánico. El segundo prisma es la referencia con respecto a la cual se mide el ángulo crítico como se muestra en la figura 1.5.

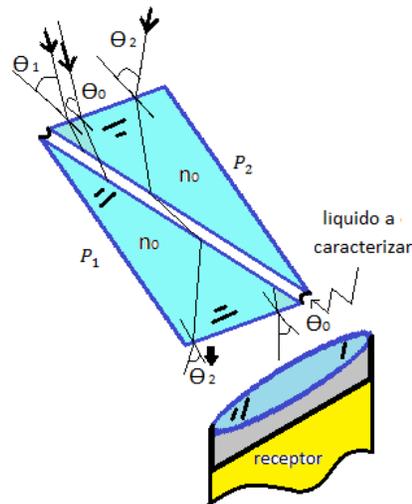


Figura 1.5 Esquema del funcionamiento de un refractómetro de Abbe [7].

El líquido que se desea caracterizar se coloca en el espacio que se forma entre los dos prismas. Cuando se desea medir el índice de refracción de un sólido, éste sustituye el prisma iluminador.

Los prismas compensadores son prismas dispersores variables sin desviación. Se usan, como su nombre lo indica, para compensar la dispersión cromática del elemento cuyo índice se desea medir, y se puede usar luz blanca para iluminar el instrumento. El líquido que se desea caracterizar, debe de tener un índice de refracción menor al de los prismas. La luz reflejada por un espejo penetra en el prisma de difusión por su parte inferior. Los prismas P_1 y P_2 están articulados por su parte inferior, de modo que se pueda introducir de una a tres gotas de muestra entre ellos; además, son parcialmente huecos para permitir el paso del líquido. Por el centro de los prismas pasa un eje que permite mover el prisma de refracción P_2 de modo que se pueda medir a la salida el ángulo θ_0 , que es el ángulo con el que emerge del prisma el rayo de luz.

1.8.3. Refractómetro de *Hilger-Chance*

Este refractómetro mide de forma directa el ángulo de refracción en lugar de medir al ángulo crítico, como el de *Pulfrich* y el de *Abbe* [7,9]. Este es sumamente preciso y fue diseñado con el propósito de medir índices de refracción de vidrio óptico. La muestra que se desea caracterizar tiene que estar en contacto con dos caras aproximadamente planas y semipulidas. La adherencia a los prismas del refractómetro se efectúa con un aceite de índice de refracción cercano al de la muestra. Se ilumina con una fuente de luz R , se colima el haz y se hace incidir en el medio de índice n_o , al pasar por éste, incidirá en el segundo medio con índice n y el haz de luz se deflactará, saliendo del medio con índice n_o con un ángulo θ , con respecto al eje óptico, para posteriormente tomar las mediciones con un receptor como se muestra en la figura 1.6.

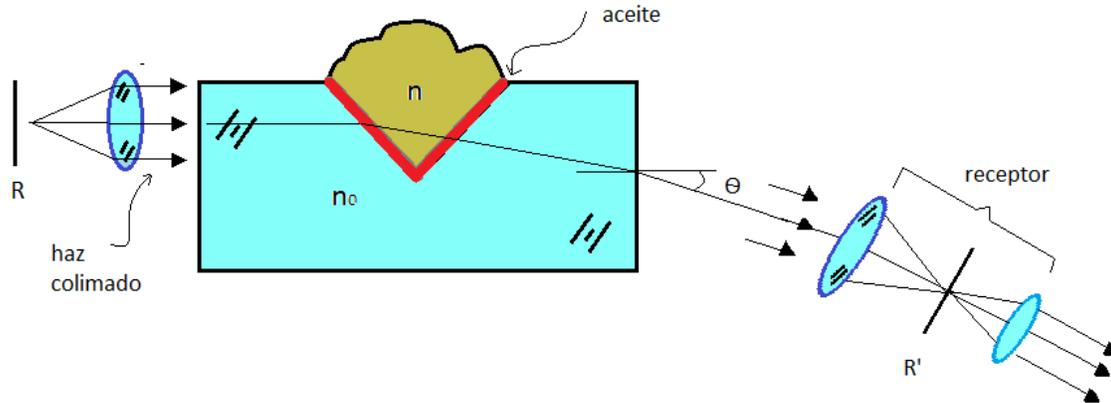


Figura 1.6. Esquema del funcionamiento de un refractómetro Hilger-Chance [7].

Finalmente, se calcula el índice de refracción con la expresión 1.6.

$$n = \left[n_0^2 - \sin^2 \theta (n_0^2 - \sin^2 \theta)^{\frac{1}{2}} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (1.6)$$

Donde:

n_0 es el índice de refracción de los prismas del refractómetro.

Es decir, este dispositivo calcula la refracción producida por un prisma de ángulo recto del propio material, midiendo el ángulo θ a la salida de este.

No existen muchos métodos desarrollados de refractómetros espectroscópicos de medición continua, los que hay utilizan principalmente los tres principios refractométricos con varias fuentes a diferentes longitudes de onda o una fuente policromática con un monocromador. Es por esto que, en esta tesis, se trabaja con el sistema espectroscópico desarrollado en el Grupo de Sensores Ópticos y Eléctricos (GSOE) del Centro de Ciencias Aplicadas y Desarrollo Tecnológico (CCADET). En el dispositivo mencionado, es posible hacer una medición continua en longitud de onda sin necesidad de cambiar la fuente o incorporar un monocromador. Este desarrollo se describe en el Capítulo 2.

CAPÍTULO 2.

REFRACTÓMETRO ESPECTROSCÓPICO POR REFLEXIÓN INTERNA

En este capítulo se explicará el principio de medición en el cual está basado el refractómetro espectroscópico por reflexión interna, así como una descripción de la implementación física del sistema, y como es que se obtienen y procesan los datos para la obtención del índice de refracción de una sustancia la cual se desea caracterizar, con el objetivo de realizar mejoras al sistema para poder optimizarlo y finalmente realizar su automatización.

2.1. Principio de medición del índice de refracción a partir de $R(\theta_i)$

El refractómetro espectroscópico por reflexión interna (RRI), propuesto para realizar su automatización en esta tesis, basa su principio de medición en la medición del ángulo crítico de una interfaz plana entre dos medios lineales, isotrópicos, no magnéticos y homogéneos haciendo incidir un haz de luz. Se sabe que el índice de refracción del medio de incidencia debe de ser más alto que el del medio externo, para poder tener una reflexión interna [figura2.1].

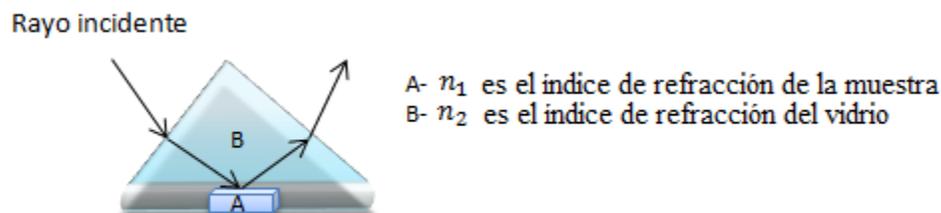


Figura 2.1. Representación gráfica de la trayectoria del rayo de luz en la interfaz vidrio-muestra.

Las mediciones se realizan como se describe a continuación:

1. Se hace incidir un haz de luz en la frontera de un prisma en contacto con el medio a caracterizar.
2. Teniendo como muestra el aire, se miden los espectros de reflexión haciendo un barrido horizontal en posición (x) del haz de luz, iniciando de uno de sus extremos, haciendo esto en pasos de 50 [μm], a lo largo del ancho del haz y almacenando los datos de cada posición.
3. Posteriormente, se coloca la sustancia que se desea caracterizar y el haz incidente que atraviesa la muestra sufre una desviación al pasar por ella. Debido a esta desviación, se pueden distinguir dos regiones para la luz que sale del prisma: la primer región corresponde a la reflexión parcial y la segunda a la reflexión total como se ejemplifica en la figura 2.2; donde θ_i es el ángulo de incidencia y θ_c es el ángulo crítico. En la figura, se observa la zona oscura correspondiente a la reflexión parcial y la zona blanca correspondiente a la reflexión total.

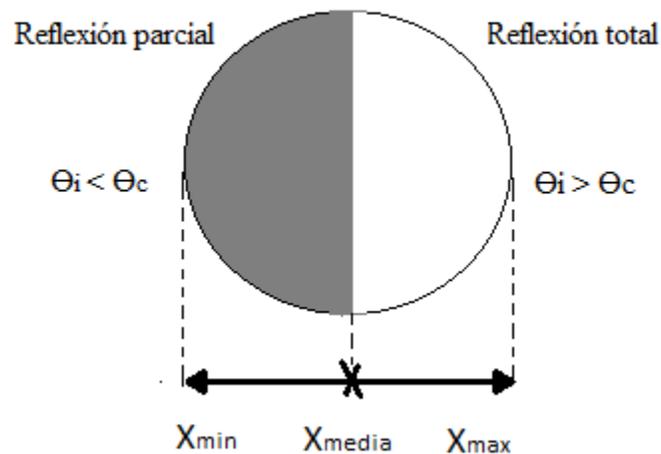


Figura 2.2. Representación gráfica del haz de luz reflejado a la salida del sistema.

4. Nuevamente, se toman los espectros de reflexión realizando un barrido horizontal en posición (x) del haz de luz, desplazándose la misma distancia que en la medición anterior, es decir en pasos de 50 [μm].

A medida que el ángulo de incidencia θ_i aumenta, también lo hará el de refracción θ_t , que llegará a ser $\theta_i = 90^\circ$ (onda transmitida propagándose paralelamente a la

superficie) y es en ese momento, cuando se pasa de la zona oscura a la completamente iluminada, teóricamente es un valor de $\theta_i = \theta_c$ tal que:

$$\sin 90^\circ = \frac{n_1}{n_2} \sin \theta_c \rightarrow \sin \theta_c = \frac{n_2}{n_1} \quad (2.1)$$

En donde n_1 corresponde al índice de refracción del prisma de vidrio colocado dentro del sistema y n_2 es el índice de refracción del elemento a sustancia a caracterizar, en una primera instancia aire.

Al ángulo θ_c se le denomina ángulo de reflexión total o ángulo crítico ya que si, $\theta_i > \theta_c$, $\sin \theta_t > 1$ y ningún ángulo real satisface esta condición. Cuando el ángulo de incidencia sobrepasa al ángulo crítico no hay onda transmitida y por tanto se produce una reflexión total.

5. Ya que tenemos los espectros de reflexión tanto del aire como de la sustancia a caracterizar, calculamos la reflectancia a partir de estos espectros mediante la siguiente relación 2.2.

$$R = \frac{I_{s\lambda}}{I_{r\lambda}} \quad (2.2)$$

Donde:

$I_{s\lambda}$ es la intensidad de la sustancia a caracterizar a cada longitud de onda e

$I_{r\lambda}$ es la intensidad incidente tomada como la referencia a cada longitud de onda.

Experimentalmente no hay un valor bien definido del ángulo crítico, sino una zona crítica y se puede asignar el ángulo crítico al punto de inflexión de la curva de reflectancia angular $R(\theta_i)$ [12].

Del valor del ángulo crítico (2.1) se puede obtener el índice de refracción de uno de los medios que definen la interfase, sabiendo el valor del índice de refracción del otro medio a una cierta longitud de onda.

$$n_2 = n_1 \sin \theta_c \quad (2.3)$$

Si se pudiera medir la transmisión en un rango amplio de longitudes de onda, se obtendrían las curvas de reflectancia en ese mismo rango espectral y de ahí determinar el valor del índice de refracción del medio a caracterizar como una función de la longitud de onda; es decir la dispersión del índice de refracción.

2.1.2. Haz reflejado en configuración de reflexión interna

Para calcular el índice de refracción del medio a caracterizar se asume que el medio de incidencia cuenta con un índice de refracción más alto que el del medio externo, para obtener así una reflexión interna [13]. En este caso la reflexión de una onda plana polarizada TE (transversal eléctrica) R^{TE} o TM (transversal magnética) R^{TM} en la interfaz está dada por las siguientes ecuaciones 2.4 y 2.5.

$$R^{TE} = \left| \frac{n_1 \cos \theta_i - n_2 \sqrt{1 - \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2 \sin^2 \theta_i}}{n_1 \cos \theta_i + n_2 \sqrt{1 - \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2 \sin^2 \theta_i}} \right|^2 \quad (2.4)$$

$$R^{TM} = \left| \frac{n_2 \cos \theta_i - n_1 \sqrt{1 - \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2 \sin^2 \theta_i}}{n_2 \cos \theta_i + n_1 \sqrt{1 - \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2 \sin^2 \theta_i}} \right|^2 \quad (2.5)$$

Cuando se tiene luz no polarizada, la reflectancia está dada por el promedio de las ecuaciones R^{TE} y R^{TM} .

$$R_p(\theta_i) = \frac{1}{2} R^{TE} + \frac{1}{2} R^{TM} \quad (2.6)$$

A partir de las ecuaciones (2.4) y (2.5) y conociendo el valor del índice de refracción del medio uno, n_1 , es decir, el valor del índice de refracción del prisma que se establece con un valor de $n_1 = 1.51$ (ver apéndice A), para posteriormente asignar tres valores para el índice de refracción del segundo medio $n_2 = 1.2, 1.33$ y 1.4 . Esta asignación de valores se realiza con el objetivo de encontrar las curvas de la reflectancia R_p , para valores de ángulo de incidencia θ_i entre 40° y 75° .

Posteriormente calculamos las curvas de reflectancia a partir de la ecuación (2.6) y se observa la variación que existe entre ellas, a partir de variar el índice de refracción del segundo medio n_2 , como se muestra en la figura 2.3.

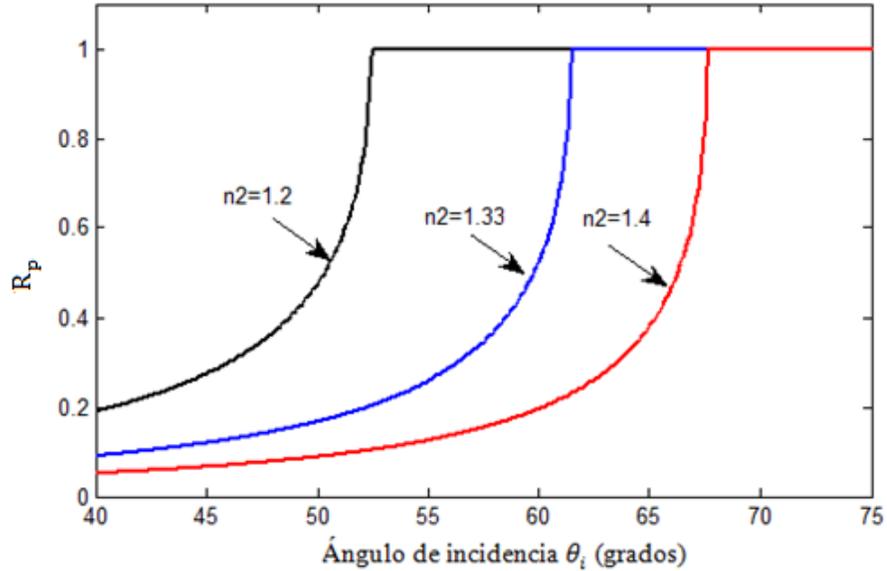


Figura 2.3 Gráfica de las curvas de reflectancia para diferentes valores de índice de refracción n_2 .

Para encontrar el punto de inflexión de la curva se deriva la reflectancia con respecto al ángulo de incidencia $dR(\theta_i)/d\theta_i$, y se toma el valor máximo de la derivada, al cual, se le asigna el valor del ángulo de incidencia θ_c , como se muestra en la figura 2.4.

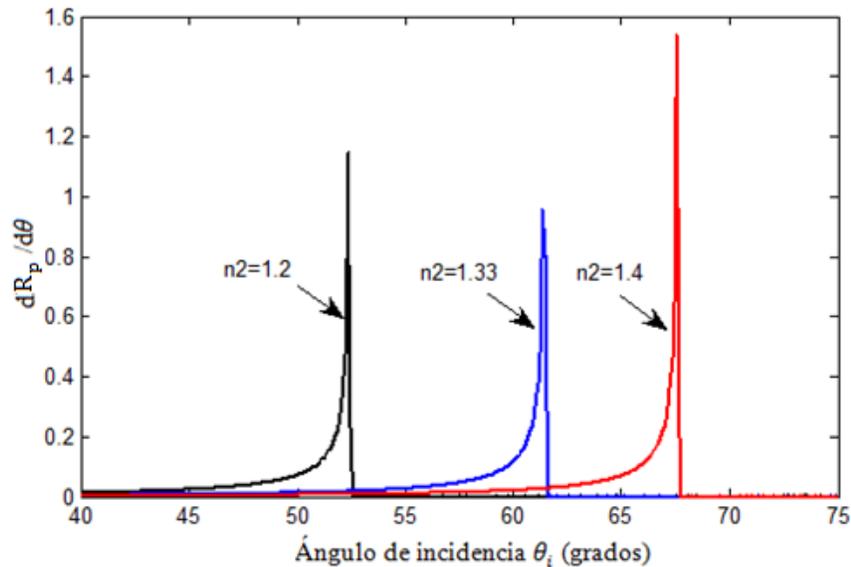


Figura 2.4 Gráfica de las derivadas de las curvas de reflectancia con respecto al ángulo de incidencia, para diferentes valores de índice de refracción.

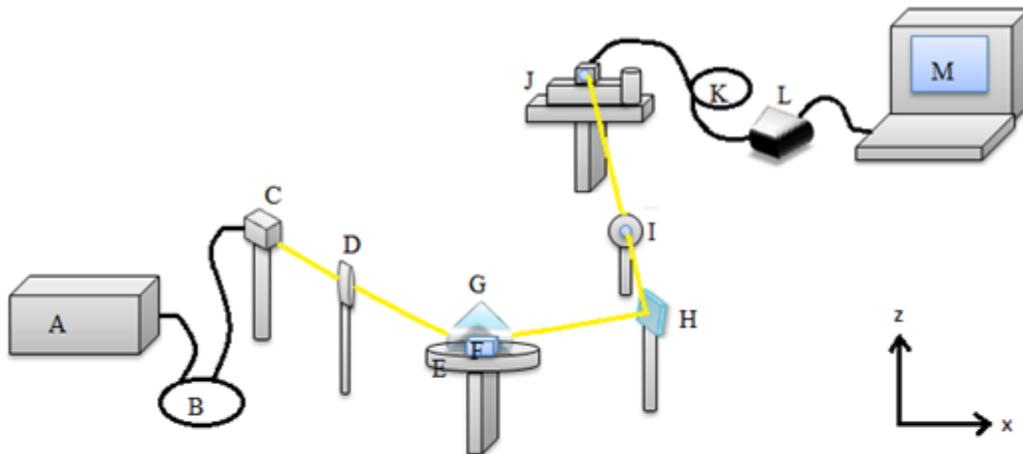
2.2. Montaje experimental

El sistema experimental que conforma físicamente el refractómetro espectroscópico por reflexión interna, está integrado por un subsistema mecánico y un subsistema óptico los cuales se detallan en el apéndice A. En esta sección hablaremos de cómo se encuentra implementado físicamente el sistema y que es lo que ocurre dentro del refractómetro.

El funcionamiento del RRI figura 2.4 utiliza un haz de luz generado por una fuente de luz halógeno-tungsteno que se propaga en el sistema. Esta fuente óptica tiene a su salida acoplada una fibra óptica de 600 [μm] de diámetro, mientras que el otro extremo de la fibra se encuentra conectada a un colimador con la función de limitar la divergencia angular.

Cuando el haz de luz sale del colimador pasa por un iris diafragma que regula el ancho del haz. El haz de luz incide en un prisma triangular de vidrio BK7 que se encuentra montado en un goniómetro para el ajuste angular, dicho prisma contiene en su base un contenedor para depositar la muestra a caracterizar. El haz de luz se refleja en la interfase al llegar a la zona del contenedor, al salir del prisma incide sobre un espejo (el cual sólo tiene

la función de reducir el tamaño del sistema y una de sus cualidades es que tiene pérdidas mínimas), después de ser reflejado por el espejo, atraviesa una lente bi-convexa, como se ejemplifica en la figura 2.5, esta lente tiene que realizar el cambio de ángulo a posición en el plano focal y al mismo tiempo, concentrar la luz en un área menor para poder medir la potencia reflejada como función del ángulo de incidencia.



- | | |
|---------------------------------------|---------------------------------------|
| A-fuente de luz, | H-espejo de precisión, |
| B-fibra óptica de 600 μm , | I- lente plano-convexa, |
| C-colimador, | J-platina lineal, |
| D- iris diafragma, | K-fibra óptica de 100 μm , |
| E-goniómetro circular, | L espectrómetro y |
| F-muestra, | M-computadora para almacenamiento |
| G-prisma triangular de vidrio BK7, | y procesamiento de datos. |

Figura 2.5. Montaje experimental del refractómetro propuesto.

Una vez que se tiene el haz de luz a la salida del sistema, se establece una relación entre el desplazamiento horizontal de la fibra óptica receptora o recolectora que se encuentra montada en la platina de desplazamiento lineal, con el ángulo de viaje de la luz [14].

Primero, se establece un valor de referencia sobre la escala, esto se hace al localizar la zona sobre la fibra óptica receptora del ángulo crítico, para agua tridestilada (a la

longitud de onda de calibración λ_c este ángulo es $\theta_c = 61.55$). Para este caso se observa un borde definido del haz de luz como el de la figura 2.1 sobre la fibra óptica receptora.

Una vez localizada la referencia y conociendo la distancia del plano focal (D_f) de la lente, se puede determinar la relación entre un desplazamiento en el plano focal y un cambio en el ángulo del viaje de la luz antes de que entre en la fibra receptora, como se muestra en la figura 2.6.

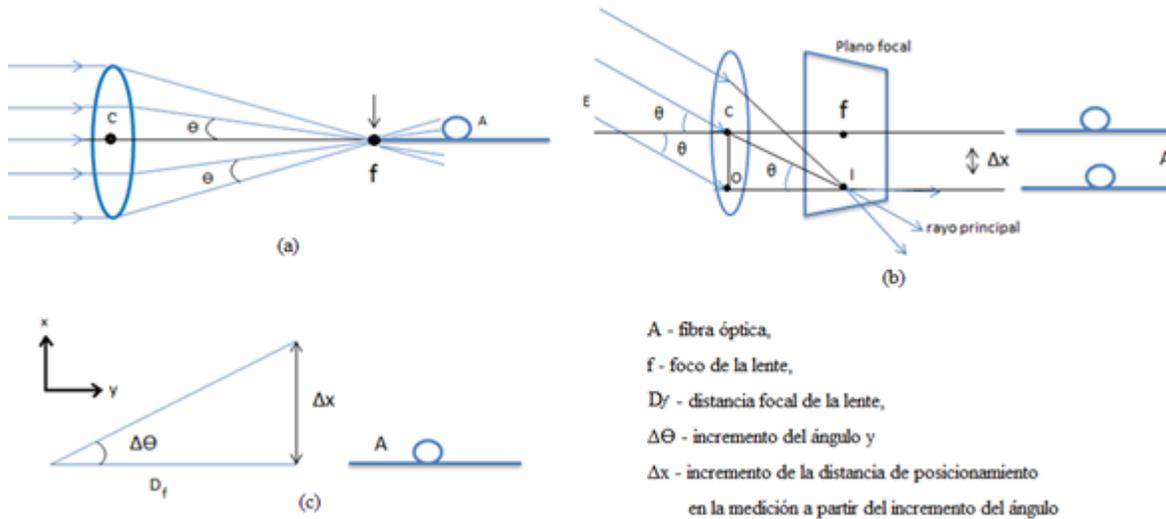


Figura 2.6(a) Rayos incidentes paralelos al eje óptico de una lente bi-convexa,
(b) Rayos incidentes que forman un ángulo respecto al eje de la lente,
(c) Conversión de ángulo a posición mediante el lente bi-convexo en el plano focal.

La relación entre un desplazamiento lineal del haz en el plano focal y un cambio en el ángulo en la trayectoria del haz de luz está dada por la siguiente relación 2.7.

$$\Delta\theta = \tan^{-1} \frac{\Delta x}{D_f} \quad (2.7)$$

Un rayo dado sigue el mismo camino a través de un sistema óptico, sin importar la dirección de su movimiento a través del sistema. Este principio de reversibilidad es importante para el análisis de los sistemas ópticos. En la figura 2.6 (a) se observa cómo es que los rayos paralelos al eje óptico que inciden en la lente convergen en el foco f , pero como la luz diverge en todas direcciones algunos rayos incidirán en la lente formando un

ángulo θ con el eje óptico por su trayectoria figura 2.6 (b) [15]. De todos los rayos incidentes, uno, llamado rayo principal, pasa por el centro de la lente sin desviarse y llega al punto I . Otro rayo, EO , pasa por el foco, f , de la lente. Si el ángulo θ con el que incide es pequeño, todos los otros rayos incidentes paralelos a EO se cortan también en el punto I . Los triángulos FCO e IOC de la figura 2.6 (b) son triángulos rectángulos que tienen un lado común OC y el mismo ángulo θ en f e I . Por la tanto, estos triángulos son congruentes, de modo que la distancia OI es igual a la distancia focal f de la lente. Esto quiere decir que I y F están en un plano, llamado plano focal, que es perpendicular al eje óptico en f . Lo que permite que se pueda realizar el barrido del haz de luz sobre el plano focal y verlo de forma geométrica como se muestra en la figura 2.6 (c), que al desplazarnos un Δx sobre la distancia focal se puede observar como geoméricamente, podemos obtener el incremento de ángulo para cada desplazamiento como se indica en la ecuación 2.3.

Este cambio de ángulo a un posición permite realizar un barrido horizontal del haz de luz reflejado en distancia, mediante una fibra óptica multimodal de 100 [μm] de diámetro, cuyo extremo se encuentra montado en una platina micrométrica lineal motorizada la cual es controlada con el software que contiene de fábrica, mientras que la salida de la fibra se encuentra conectada a un espectrómetro que registra la luz incidente para cada longitud de onda.

Ahora que se ha descrito el montaje experimental y el funcionamiento de este, explicaremos como es se realiza una medición completa para posteriormente calcular el índice de refracción.

Se realiza una primera medición para determinar el valor del ruido base (*offset*) a cada longitud de onda, esto mediante el almacenamiento de los datos del espectro obtenido con la fuente de luz apagada por el sistema. Se hace incidir el haz en el ángulo crítico de la interface vidrio-agua. Enseguida, se coloca agua tridestilada en el contenedor, este líquido permite observar a la salida del sistema el haz reflejado, llegando a marcarse de manera clara las dos zonas que lo forman, para realizar el correcto alineamiento de los elementos y garantizar mediciones precisas. Se realiza un barrido completo del haz reflejado, desde el inicio de la zona de reflexión parcial hasta el final de la zona de reflexión total, en

intervalos de distancia definido como Δx , haciendo así el barrido total en p número de mediciones.

Posteriormente, se retira el agua y se deja el contenedor vacío para poder realizar la medición del aire que servirá de referencia ya tiene un índice de refracción conocido ($n_{\text{aire}} \approx 1$) [16] tomando el mismo valor de Δx y el mismo número de mediciones usados para la medición del agua tridestilada.

Finalmente, los datos obtenidos a partir de los espectros para cada una de las posiciones dentro del haz reflejado, son procesados para calcular el índice de refracción como se detalla más adelante.

2.3. Análisis y procesamiento de los datos obtenidos

El elemento que realiza la obtención de los datos dentro del sistema es el espectrómetro, este dispositivo, mediante su software, crea un archivo con extensión “*Master.Sample*”, dentro del cual se almacenan dos parámetros, las longitudes de onda en las que fue descompuesta la luz blanca y la intensidad; es decir, almacena los datos de las curvas de los espectros de transmisión. En la figura 2.7 se observa el espectro de transmisión incidente, este espectro se obtiene midiendo con el contenedor vacío, esto es, se realiza una medición tomando al aire como medio en el contenedor.

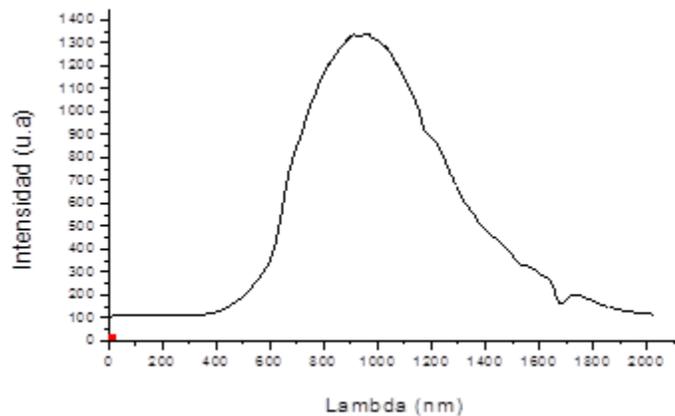


Figura 2.7 Espectro de transmisión de la referencia (aire).

En la figura 2.8 se observa el espectro de transmisión del agua tridestilada en una zona dentro del área de reflexión parcial.

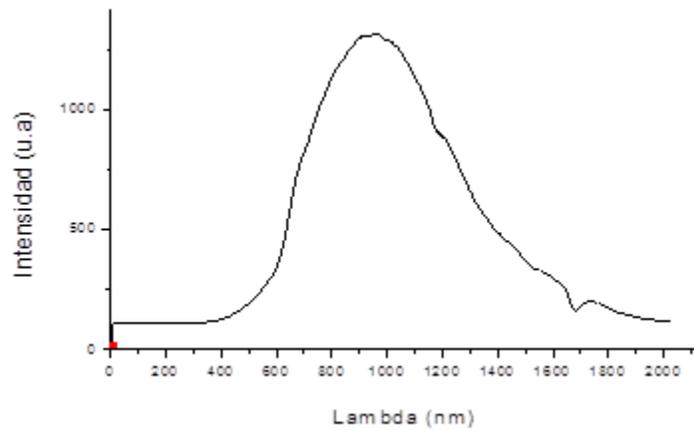


Figura 2.8 Espectro de transmisión del agua tridestilada en la zona de reflexión parcial.

En la figura 2.9 se observa el espectro de transmisión del agua tridestilada en una zona dentro del área de reflexión total.

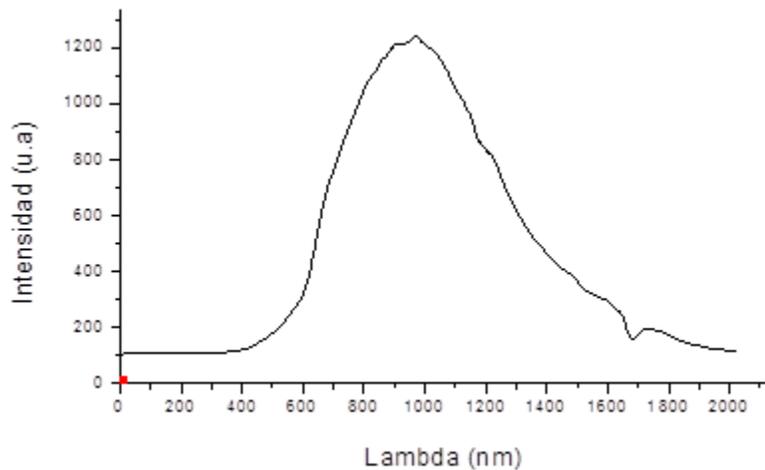


Figura 2.9 Espectro de transmisión del agua tridestilada en la zona de reflexión total.

Se toma un número p de archivos, dependiendo del número de mediciones que se necesiten para barrer el haz de luz. Cada medición corresponde a una posición en el barrido del haz de luz incidente en la fibra receptora. Se almacena un archivo para cada posición de cada una de los medios a caracterizar así como de la referencia y un solo archivo para el ruido del sistema, para fines de este trabajo se tomó al aire como referencia y al agua

tridestilada como medio a caracterizar. El análisis y procesamiento de los datos se llevan a cabo mediante un algoritmo realizado en el software de procesamiento numérico *Matlab*.

Teniendo los p archivos de los espectros de transmisión del agua tridestilada, así como los del aire y del ruido del sistema, se calculó la reflectancia normalizándolos mediante la siguiente ecuación:

$$R = \frac{I_{s\lambda n} - I_{d\lambda n}}{I_{r\lambda n} - I_{d\lambda n}}, \quad (2.8)$$

donde:

$I_{s\lambda n}$ es la intensidad de la sustancia a caracterizar a cada longitud de onda,

$I_{r\lambda n}$ es la intensidad de la referencia a cada longitud de onda, e

$I_{d\lambda n}$ es la intensidad del ruido interno del sistema a cada longitud de onda.

El cálculo de las curvas de reflectancia se realiza con la relación de R respecto a la posición de medición, dando como resultado la curva que se muestra en la figura 2.10.

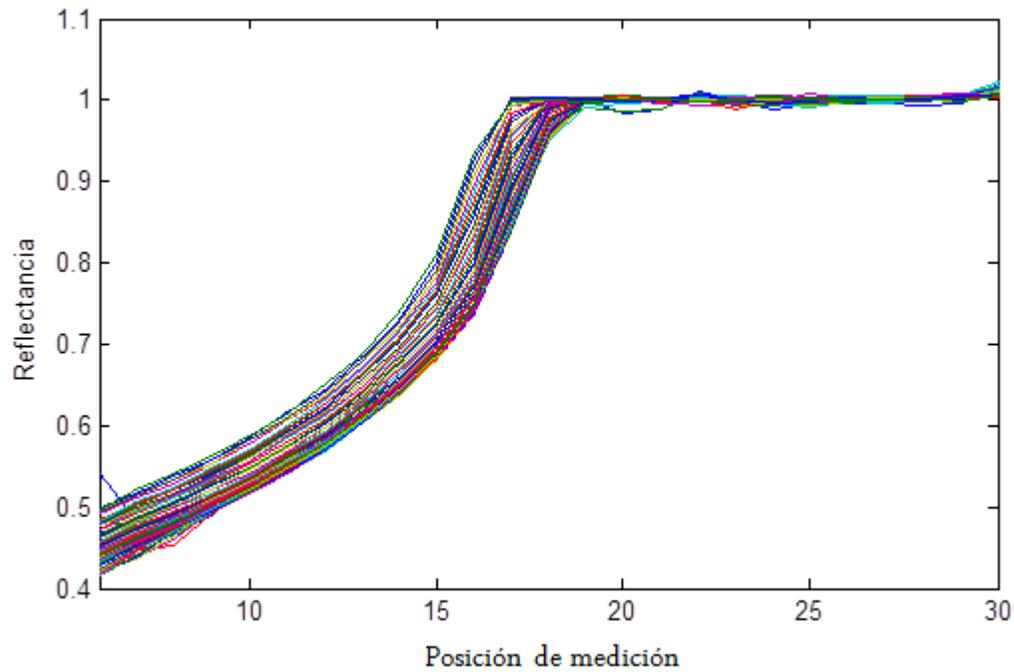


Figura 2.10 Curvas de reflectancia posicional para cada longitud de onda del agua tridestilada.

Posteriormente, se derivan las curvas de reflectancia respecto a la posición, para encontrar el valor máximo de cada longitud de onda y con ello, encontrar el punto de inflexión de cada curva, como se muestra en la figura 2.11.

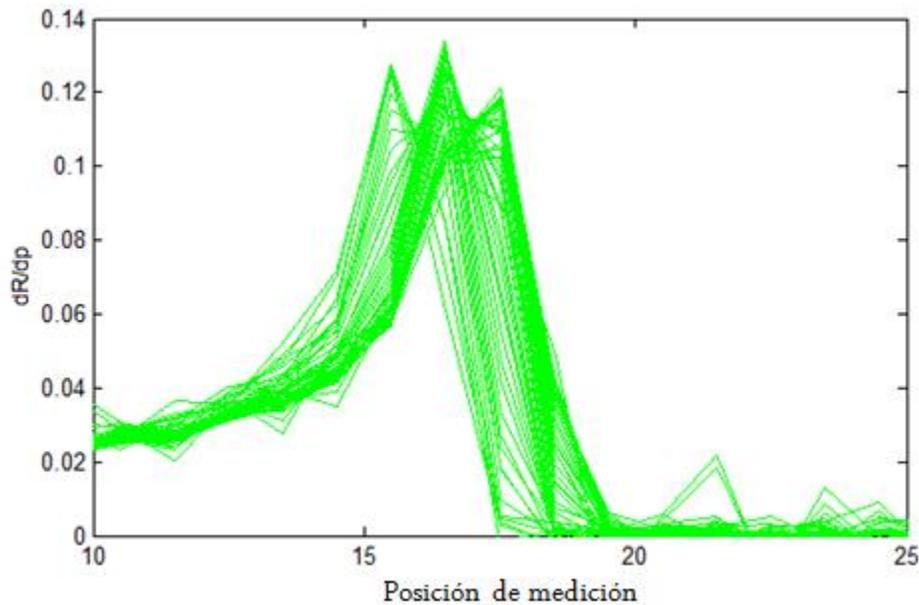


Figura 2.11. Derivada de las curvas de reflectancia posicional para cada longitud de onda.

Teniendo la gráfica de la derivada de las curvas de reflectancia posicional, ahora limitamos la zona de trabajo eliminando los extremos ruidosos. A esta zona la llamamos zona útil, que es un rango angular alrededor del ángulo crítico, como se muestra en la figura 2.12.

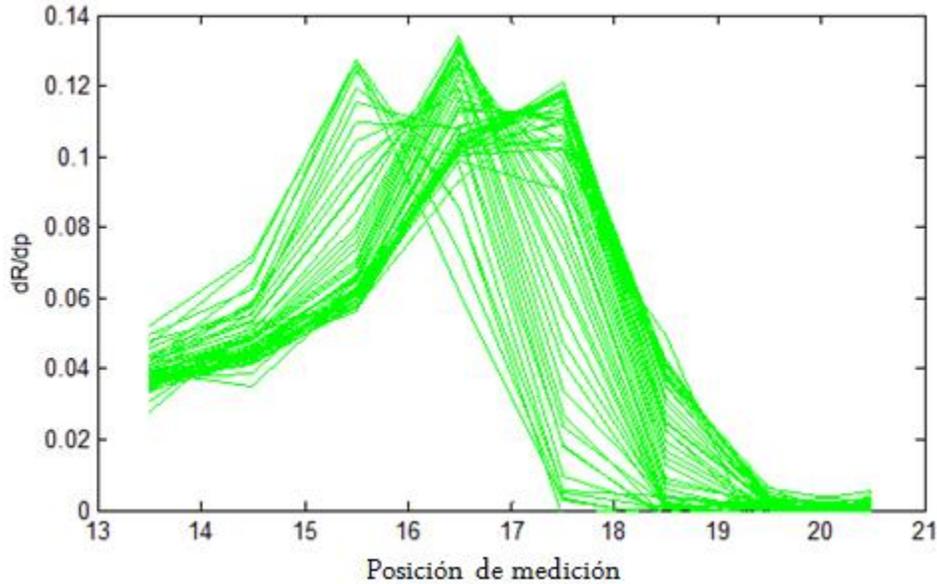


Figura 2.12. Zona útil de la derivada de las curvas de reflectancia posicional para cada longitud de onda.

Se asigna la escala angular a partir de una longitud de onda de calibración λ_c , de la literatura tomamos el valor del índice de refracción a la longitud de onda de 650 [nm] para el agua tridestilada, entonces calculamos el ángulo crítico sabiendo los índices de refracción del prisma (vidrio BK7), el cual también es tomado de la literatura a la misma λ_c mediante la ecuación 2.1.

A partir del cálculo anterior se realiza la conversión de la escala posicional a una escala angular por medio del punto de inflexión de la curva de reflectancia a 650 [nm], tomando el valor máximo de dR/dp y asignando a esta posición el valor de θ_c . Luego la escala se formará a partir de $\theta_c \pm \Delta\theta_{int}$; en donde $\Delta\theta_{int}$ es una variación en ángulo, el cual se toma como incremento o decremento dependiendo de la posición en la que fue asignado el ángulo crítico, como se muestra en la figura 2.13.

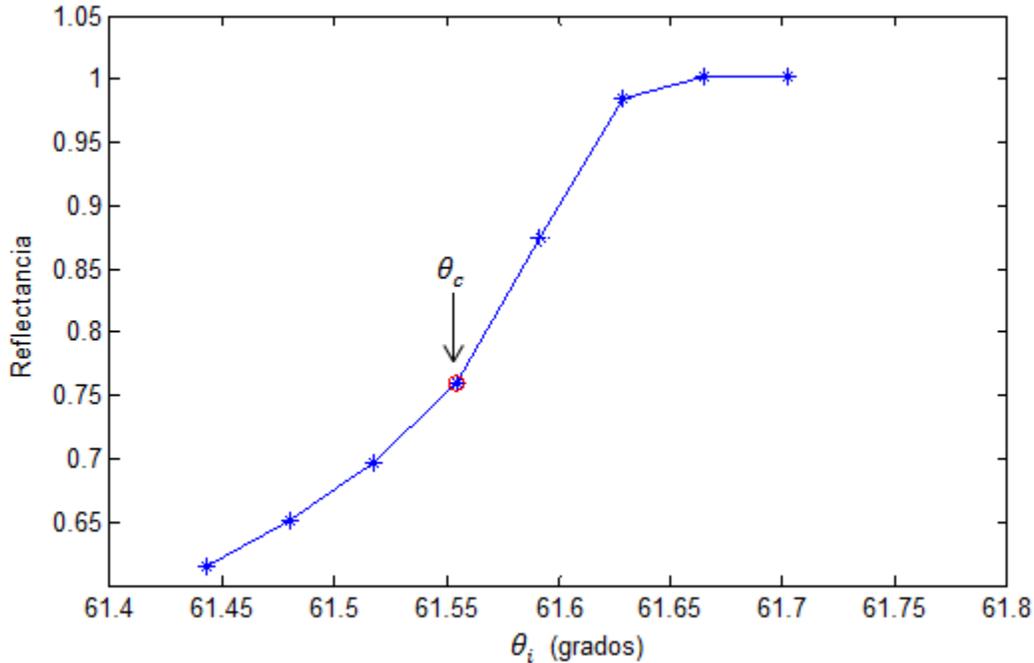


Figura 2.13. Curva de reflectancia de la longitud de onda de calibración 650 [nm] con respecto al ángulo de incidencia.

En un principio, se mide un $\Delta\theta_{out}$ por lo que es necesario realizar la corrección de un incremento de ángulo a la salida, por el incremento de ángulo interno dentro del prisma es decir, de un $\Delta\theta_{out}$ a un $\Delta\theta_{int}$, dicha conversión se detalla en el apéndice B.

Ahora que se ha asignado la escala angular para la longitud de onda de calibración, se encontró el ángulo crítico para cada una de las longitudes de onda a partir de su punto de inflexión en las curvas de reflectancia como función del ángulo de incidencia θ_{int} . Utilizando este valor, es posible hallar el índice de refracción del medio a caracterizar a cada longitud de onda a partir de la siguiente ecuación:

$$n_{2,\lambda_n} = n_{1,\lambda_n} \sin \theta_{c\lambda_n} \quad (2.9)$$

El índice de refracción del agua tridestilada a cada longitud de onda queda como se muestra en la figura 2.14 que, como en el caso anterior, se tomó del máximo de la derivada posicional de la reflectancia (figura 2.9). El punto negro en la figura, es la zona de

intersección en donde las curvas deben de coincidir ya que este es el valor de $\lambda_c = 650 \text{ [nm]}$ utilizado para la calibración.

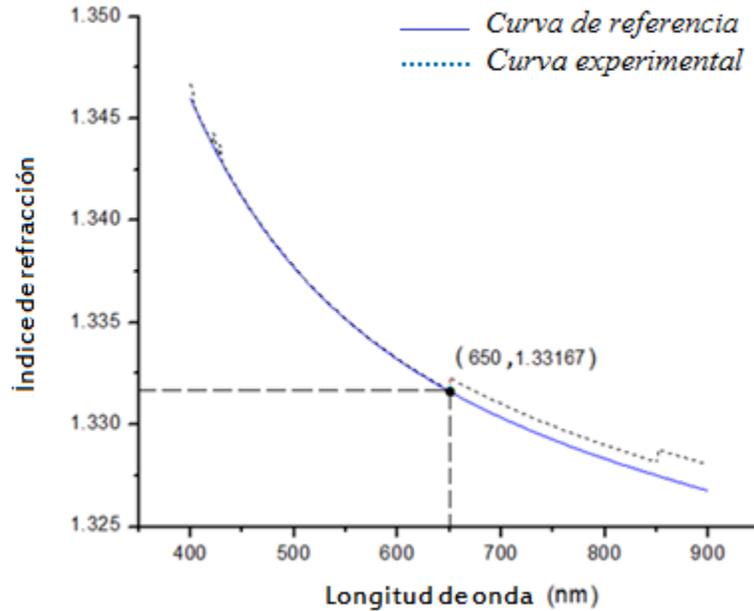


Figura 2.14. Curva de índice de refracción del agua tridestilada para cada longitud de onda.

En la figura 2.14 se observan la curva de dispersión del índice de refracción del agua tridestilada, la curva de referencia se genera a partir de valores de tomados de la literatura [16,17] y la curva experimental. En la gráfica se observa una dispersión del índice de refracción normal, dado que el agua es un material transparente. Los cambios de nivel que se observan en la curva experimental son producidos debido a la resolución del desplazamiento entre cada posición, es decir, que mientras más mediciones se realicen la curva se suavizará ya que se tendrán más puntos de medición para graficar.

2.4. Problemas de medición mediante esta implementación y propuesta de soluciones

Mediante esta implementación del sistema, se presentan algunos problemas para la medición de las muestras de las sustancias que se desean caracterizar, a continuación se mencionan cuales son.

- Problemas de repetibilidad. Al contar con una platina de desplazamiento lineal micrométrico manual, donde se encuentra montado el conector de la fibra óptica que recolecta la luz a lo largo del haz de luz, existen pequeñas variaciones en el desplazamiento ya que la posición de la platina se controla con un tornillo micrométrico de resolución de 10 [μm], que puede variar según la vista y el cansancio del operador después de varias mediciones consecutivas.
- Duración prolongada en las mediciones. Para la caracterización de una sustancia es necesario realizar entre 30 y 35 mediciones aproximadamente, usando como medio de referencia el aire. Estas mediciones se realizan en un tiempo de entre 15 y 20 minutos y posteriormente, es necesario hacer el mismo procedimiento para la sustancia que se está caracterizando. Por ello, el tiempo estimado para la obtención de los datos es de entre 30 y 40 minutos. Adicionalmente, se debe considerar el tiempo necesario para el procesamiento de la información obtenida.
- Complejidad en la adquisición de datos. El uso de diferentes interfaces en el proceso para caracterizar una sustancia (la del espectrómetro para la toma de mediciones y la del algoritmo de programación para procesar los datos obtenidos) complica el manejo del sistema.

Para mejorar la precisión y exactitud de las mediciones y garantizar que siempre sea la misma distancia de desplazamiento entre puntos, se incorporará al sistema una platina de desplazamiento lineal micrométrico motorizada, que cuente con una resolución mayor a la que se tenía con el movimiento manual. Al introducir la platina de desplazamiento lineal micrométrico motorizada no solo se busca tener una mejor precisión, al mismo tiempo se mejorará el tiempo de las mediciones al realizar los desplazamientos con mayor rapidez ya que serían de forma automática.

Para optimizar el uso del sistema, es necesaria la automatización del mismo. Para ello se propone contar con una sola interfaz gráfica desde la cual el operador realizará una medición completa, así como el procesamiento de los datos obtenidos de ésta. El proceso de automatización desarrollado en el presente trabajo se describirá de manera detallada en el siguiente capítulo.

CAPÍTULO 3.

DESARROLLO E IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA AUTOMATIZADO

En este capítulo se explicará el proceso de automatización de los elementos dentro del sistema que cuentan con un software para su funcionamiento, así como la incorporación del procesamiento de los datos para el cálculo del índice de refracción descrito en el Capítulo 2. Se hace una descripción de la nueva platina que se incorporó al sistema, así como de la metodología seguida para la integración de los dispositivos y su programación mediante LabVIEW al igual que el procesamiento de los datos.

3.1. Montaje para la automatización

La función principal del sistema automatizado es calcular el índice de refracción de diversos medios en estado líquido por medio del análisis espectral de la luz blanca descompuesta en sus diferentes longitudes de onda a la salida del refractómetro espectroscópico por reflexión interna.

El montaje experimental para la automatización quedará de la misma forma como el que se ha detallado en el Capítulo 2, solo que ahora se sustituye la platina micrométrica lineal manual, por una motorizada, quedando como se muestra en la figura 3.1.

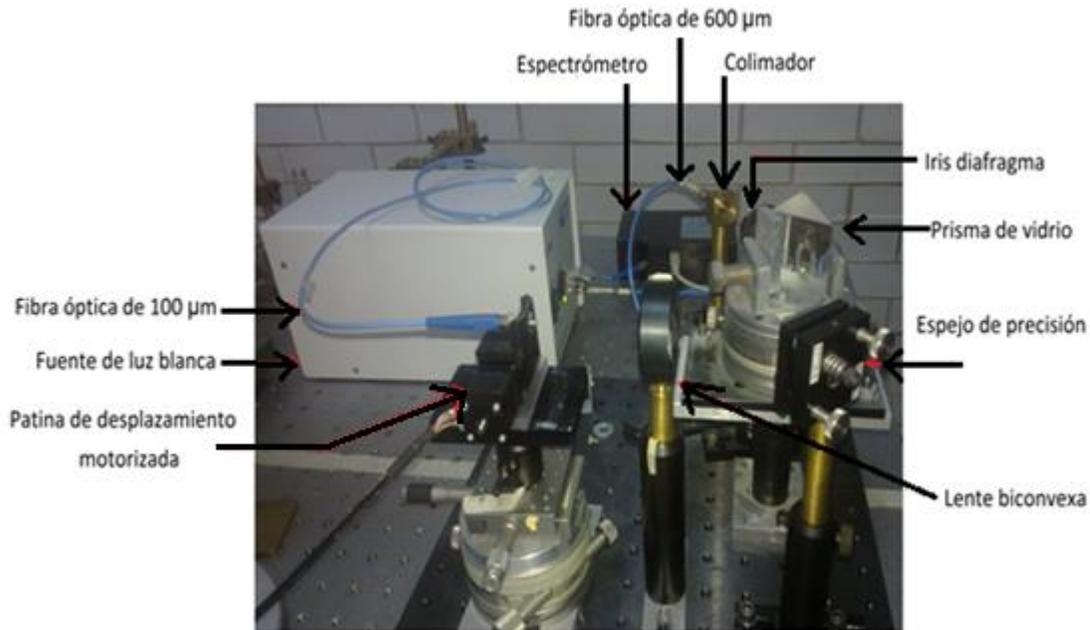


Figura 3.1. Montaje experimental del refractómetro automatizado.

3.2. Hardware y software del sistema.

Ahora que se ha mostrado el montaje experimental con el cual se va a trabajar, describiremos de forma técnica los elementos del sistema que se van a automatizar para conocer sus especificaciones más relevantes, así como el *software* que se encarga de procesar los datos obtenidos para calcular el índice de refracción de las sustancias a caracterizar. De este modo, todos los dispositivos mencionados podrán ser integrados en el proceso de automatización que se propone en esta tesis.

3.2.1 Sistema de control de posicionamiento y desplazamiento

El sistema de control de posicionamiento y desplazamiento de la platina motorizada está conformado por dos elementos: un controlador de precisión compacto de etapa motorizada, con la función de manipular la velocidad de motor de corriente directa DC, así como el desplazamiento de éstos; y una platina micrométrica de desplazamiento lineal, en ella se montará la fibra óptica con la cual se tomarán las mediciones. Estos dos elementos pertenecen al fabricante *Edmund Optics*.

Platina micrométrica lineal

La platina micrométrica, como se muestra en la figura 3.2, por su factor de forma se puede utilizar para trabajar en aplicaciones muy sensibles al desplazamiento, mientras que al mismo tiempo cuenta con una capacidad de carga alta comparada a su pequeño tamaño.



Figura 3.2. Platina micrométrica lineal motorizada.

Las especificaciones técnicas más relevantes de la platina micrométrica lineal motorizada son las siguientes:

- Modelo: HPCMS 10 [mm]
- Dimensiones [mm]: 70.2 x 22 x 20.6
- Velocidad [mm/s]: 5
- Resolución [μm]: 0.1, 0.05 típico
- Capacidad de carga [Kg]: < 1
- Corriente [mA]: 240
- Peso [Kg]: 0.08

Controlador de precisión compacto de etapa motorizada

La distancia que recorre la platina o el lugar en el que se posiciona, así como la velocidad del desplazamiento, son factores controlados por el Controlador de Precisión Compacto de Etapa Motorizada (CPCEM), figura 3.3, mediante el *software Polluxterm*, proporcionado por el fabricante.



Figura 3.3. Controlador de precisión compacto de etapa motorizada.

Las especificaciones técnicas más relevantes del CPCEM son las siguientes:

- Modelo: *SMC-Pollux*
- Soporte de conexión: RS-232, RS-232 vía *USB*, *Ethernet*
- Sistemas operativos soportados: *Linux* i386 para 32 y 64 bits, *Windows* desde el 98 hasta el 7 y *Apple*.

3.2.2 Espectrómetro

El espectrómetro tiene como principales funciones el análisis espectral de la reflectancia, la visualización de los datos y su adquisición. El que se utilizó dentro del sistema y el que se integrará a la automatización es de la compañía de *Ocean Optics*. Las especificaciones técnicas más relevantes de este dispositivo son las siguientes:

- Modelo: HR2000
- Sistemas operativos soportados: *Windows 98/ME/2000/XP*, *Mac OS X* y *Linux*.
- Detector: *Sony ILX511* con arreglo lineal *CCD*.
- Rango del detector: 200-1100 [nm].
- Conector de fibra óptica: SMA 905.
- Tiempo de integración: De 3 [ms] a 65 [s].

3.2.3 Programa de procesamiento de archivos

Para el procesamiento de los datos se tomó como base el algoritmo ya usado para dicho fin, migrándolo al programa *LabVIEW*, además de agregar el control de la platina y la sincronización con la toma de espectros ópticos del espectrómetro. También, se incorporó la etapa de despliegue de datos para el monitoreo de la prueba.

3.3 Metodología de la automatización

El control del sistema de desplazamiento (platina micrométrica lineal motorizada) y el uso y manejo del espectrómetro (visualización de los espectros, manejo y almacenamiento de los datos generados por el sistema), así como la incorporación del procesamiento matemático de los datos generados por el refractómetro espectroscópico por reflexión interna, es realizada a través de la plataforma de programación *LabVIEW* (apéndice B). Esta aplicación se desarrolló a partir de los controladores de la platina y el espectrómetro, el procesamiento de datos se realizó partiendo del algoritmo que ya se tenía en *Matlab* para el cálculo del índice de refracción y su dispersión en un rango del espectro visible.

3.2.1 Interfaz gráfica

La interfaz gráfica de usuario está establecida gráficamente en un panel de control, ésta presenta varios segmentos que tienen funciones específicas para el uso del sistema y los cuales forman el módulo principal. El módulo principal está conformado a su vez por cuatro sub-módulos, el del espectrómetro, el del sistema de control de posición y desplazamiento y el sub-módulo del procesamiento de datos.

A continuación se describen los segmentos del módulo principal a partir del nombre que les fue asignado y posteriormente, en la figura 3.9, se muestra el diagrama de bloques que representa el flujo de datos como se implementó en el sistema.

La interfaz gráfica del módulo principal se implementó como una carpeta, ésta contiene diferentes pestañas en las cuales se realizan funciones específicas. Estas funciones se describen a continuación.

Configuración de los parámetros. En este primer segmento, se pide al usuario establecer los parámetros iniciales para la configuración del espectrómetro, también se requiere escribir la dirección raíz de almacenamiento dentro de la computadora donde se guardarán los datos del ruido de fondo, la referencia y los de la muestra a caracterizar, así como los nombres de los archivos. Finalmente se pide al usuario escribir de la misma manera, la dirección raíz de almacenamiento dentro de la computadora donde se encuentran almacenados los datos que el usuario necesite procesar, así como los nombres con los que fueron almacenados, y los diferentes parámetros necesarios para su procesamiento, como es el índice de refracción del medio conocido (para nuestro caso aire), así como el del prisma con el que se está trabajando, (para nuestro trabajo vidrio BK7), la distancia focal de la lente bi-convexa, los pasos con la que fue medida la distancia, la longitud de onda de calibración y el intervalo de longitudes de onda a la que se desea trabajar. Este proceso se muestra en la figura 3.4

The screenshot shows a software interface with a dark header bar containing five tabs: 'PARÁMETROS', 'ESPECTROMETRO Y PLATINA', 'PROCESAMIENTO DE DATOS', 'CALCULO DEL INDICE DE REFRACCION', and 'Direcciones de los archivos'. The 'PARÁMETROS' tab is active. The interface is organized into three main sections:

- Parámetros de almacenamiento de datos:** Includes a text field for 'Dirección de la carpeta de almacenamiento de datos', and two text fields for 'Nombre de la muestra' and 'Nombre del ruido (dark)'.
- Parámetros de inicialización de espectrómetro:** Includes a dropdown for 'VISA resource name 2', a checkbox for 'Enable Strobe (Disabled)' (currently disabled), a numeric field for 'Integration Time (8000µs)' set to 6000, a dropdown for 'Trigger Type (Normal)' set to Normal, and a numeric field for 'Hardware Trigger Delay (s)' set to 0.
- Parámetros iniciales para el procesamiento de los datos:** Includes a numeric field for 'Número de archivos' set to 0, a text field for 'Dirección de la carpeta raíz de almacenamiento', and three text fields for 'Nombre del ruido', 'Nombre del archivo de la muestra', and 'Nombre del archivo referencia'. Below these are several numeric fields: 'límite inicial lambda (nm)' (0), 'límite final lambda (nm)' (0), 'n BK-7' (0), 'Paseo de medición (micrómetros)' (0), 'Límite crítica' (0), 'n H2O' (0), 'Distancia focal (cm)' (0), and 'Angulo prisma' (0).

Figura 3.4. Interfaz gráfica de usuario para la configuración de los parámetros.

Al ejecutarse el programa aparecerá una pequeña ventana como se muestra en la figura 3.5, esta ventana corresponde al controlador de precisión compacto de la etapa motorizada y en ella se establecerán los parámetros iniciales de la platina, el tipo de conexión (para este caso seleccionaremos VISA), así como el puerto del CPU en donde se encuentra conectado dicho dispositivo (COM1) y la tasa de transmisión de los datos. También cuenta con la opción de simulación, en ella no se tendrá comunicación con la platina pero permitirá la ejecución de los demás componentes de la interfaz gráfica.

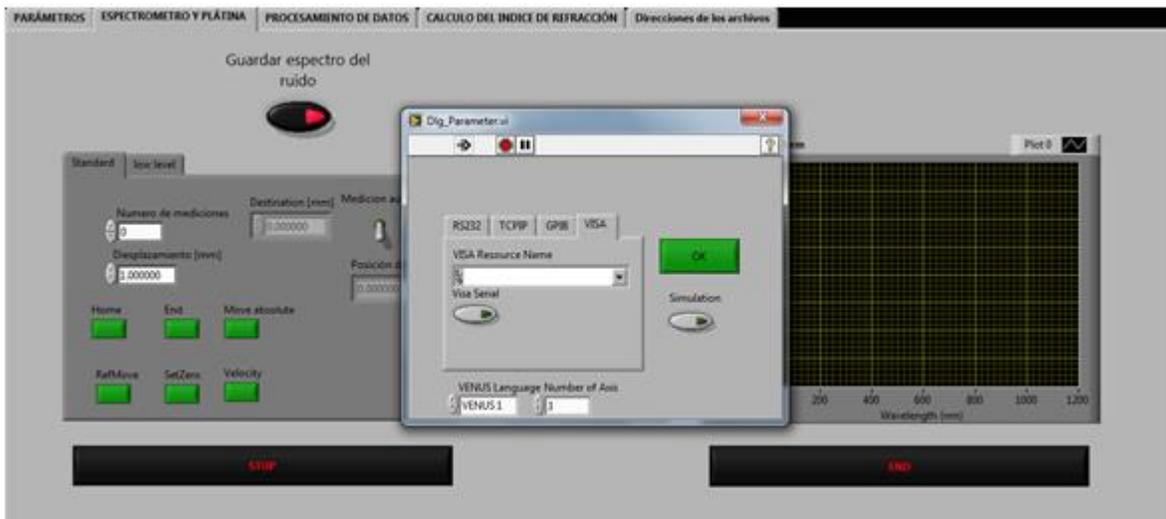


Figura 3.5. Interfaz gráfica del usuario, configuración de los parámetros (platina lineal micrométrica).

Espectrómetro y platina. En esta sección de la interfaz gráfica, se muestra el *display* de la señal en tiempo real que está tomando el espectrómetro, junto con un botón, cuya función es el almacenamiento del ruido (*dark*), y un interruptor (medición automática) con ciertos parámetros que se necesitan establecer antes de su ejecución, es decir, antes de realizar un barrido completo del haz de luz y almacenar estos datos para posteriormente procesarlos. Los parámetros que se tienen que establecer son: el número de mediciones que realizará el sistema y la longitud que recorrerá la platina en cada medición establecida en milímetros. Cuenta también con los controles e indicadores de la platina lineal micrométrica motorizada descritos a continuación:

- Botón *Home* (Ho), posiciona a la platina en el extremo cercano al motor.
- Botón *End* (Ed), posiciona a la platina en el extremo más alejado del motor.
- Indicador de posición (InPo), nos dice a qué distancia se encuentra la platina del *Home*
- Botón velocidad (Vel), controla la velocidad del motor para el desplazamiento de la platina.
- Controlador Destino (CD) y botón *MovAbs* (MA), indica una posición específica en milímetros dentro del rango del recorrido de la platina y el botón ejecuta dicha indicación, posicionado a la platina en dicha ubicación.
- Botón cero (Cr), pone en cero el indicador de posición sin importar a qué distancia se encuentre del *Home* y a esa posición la establece como punto de origen.
- Indicador en forma de *ledMoving*, este aparecerá encendido cada vez que la platina se encuentre en movimiento, de lo contrario se encontrará apagado.
- Indicador en forma de *ledCommunication*, este se encenderá de manera intermitente indicando que se tiene comunicación con el sistema de posicionamiento y desplazamiento, de lo contrario se mantendrá apagado.
- Indicador en forma de *ledCommunication Error*, este indicador permanecerá apagado siempre, solo se encenderá en caso de que exista un error de comunicación con el sistema de posicionamiento y desplazamiento.
- Indicador Numero de Archivo, este le indicará al usuario cuantos archivos lleva almacenados y tendrán que ser el mismo número que el usuario allá puesto de mediciones.
- Indicador *Position*, este le indicará al usuario la distancia recorrida por la platina, cuando termine la ejecución, esta distancia tendrá que ser igual a la distancia elegida por el usuario para el desplazamiento de la platina multiplicada por el número de mediciones.
- Botón largo *End*, este botón termina con la comunicación con la platina, sin interrumpir los demás procesos del programa.
- Botón largo *Stop*, este botón detiene la ejecución del programa completo.

La ventana de configuración de los parámetros y elementos mencionados se muestra en la figura 3.6.

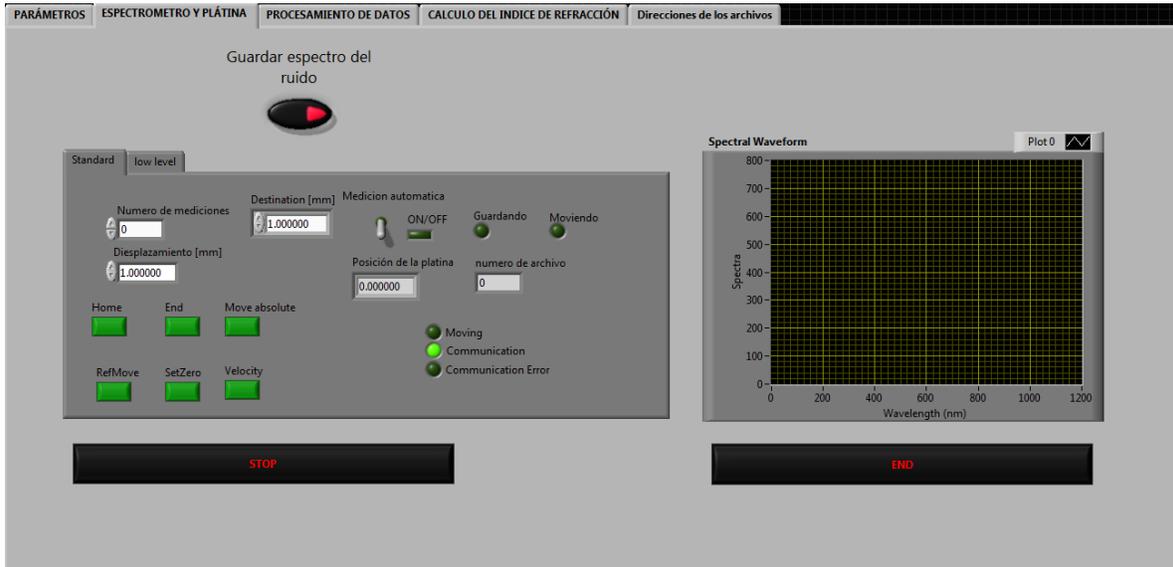


Figura 3.6. Interfaz gráfica de usuario, espectrómetro y platina.

Procesamiento de datos. En esta sección de la interfaz gráfica de usuario se tienen los diferentes graficadores del procesamiento de los datos: las curvas de reflectancia, la derivada de las curvas, la zona útil de estas (seleccionada por el usuario mediante dos botones para el límite inferior y superior respectivamente) y el cambio de escala de posición a escala angular. Esta ventana se muestra en la figura 3.7.

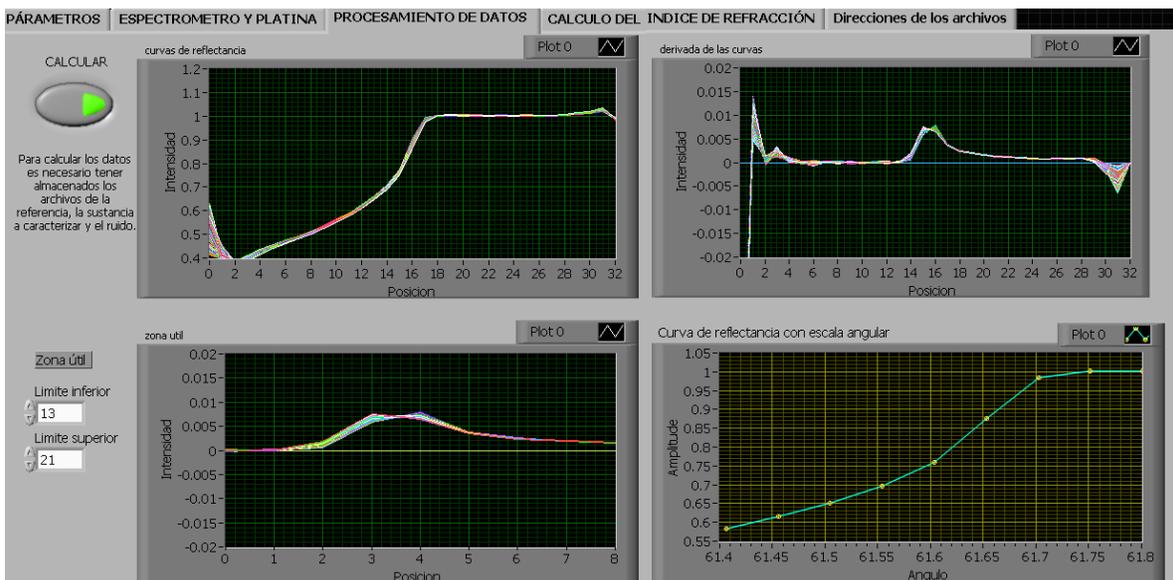


Figura 3.7. Interfaz gráfica de usuario, procesamiento de datos.

Cálculo del índice de refracción. En esta sección aparece una pantalla que muestra la curva de índice de refracción para cada longitud de onda que se mide. Tiene un botón para indicar a que longitud de onda se desea saber el índice de refracción, y el indicador del valor de índice de refracción.

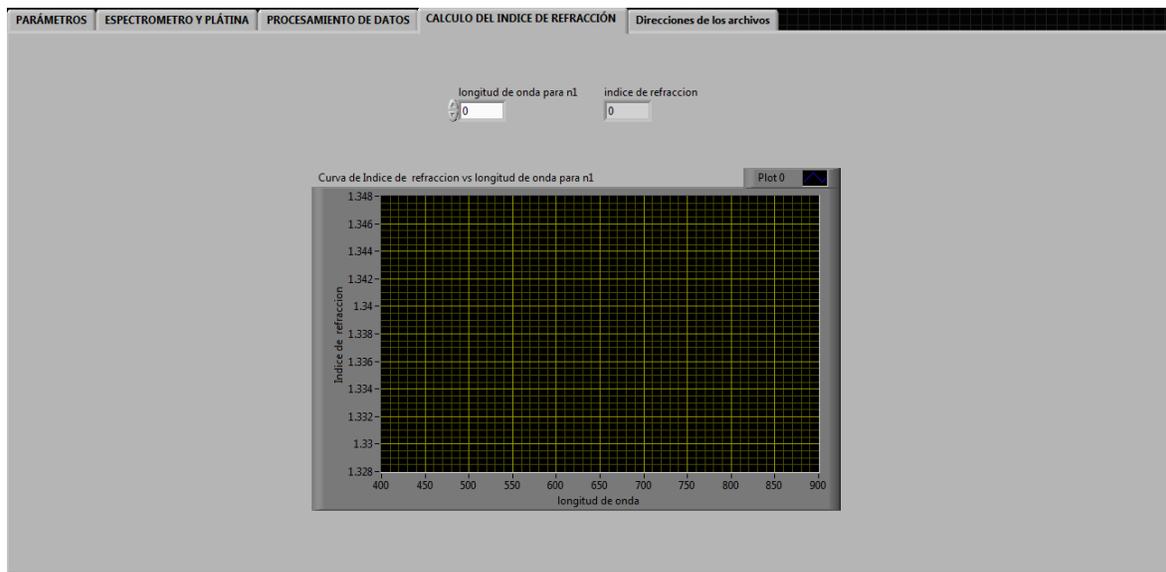


Figura 3.8. Interfaz gráfica de usuario, cálculo del índice de refracción.

Direcciones de los archivos almacenados. En esta sección de la interfaz gráfica de usuario, se encuentran guardadas las direcciones en donde el espectrómetro almacena los datos, esta información será de gran utilidad cuando el usuario cometa un error en el direccionamiento, esta información le indica en dónde se encuentran almacenados.

Ahora que se ha descrito la interfaz gráfica del sistema, explicando las funciones de cada elemento que se encuentra en ella, se mostrará el diagrama de flujo de datos de la ejecución del programa, para después desglosar el proceso en sub-módulos y detallar la ejecución dentro de cada uno.

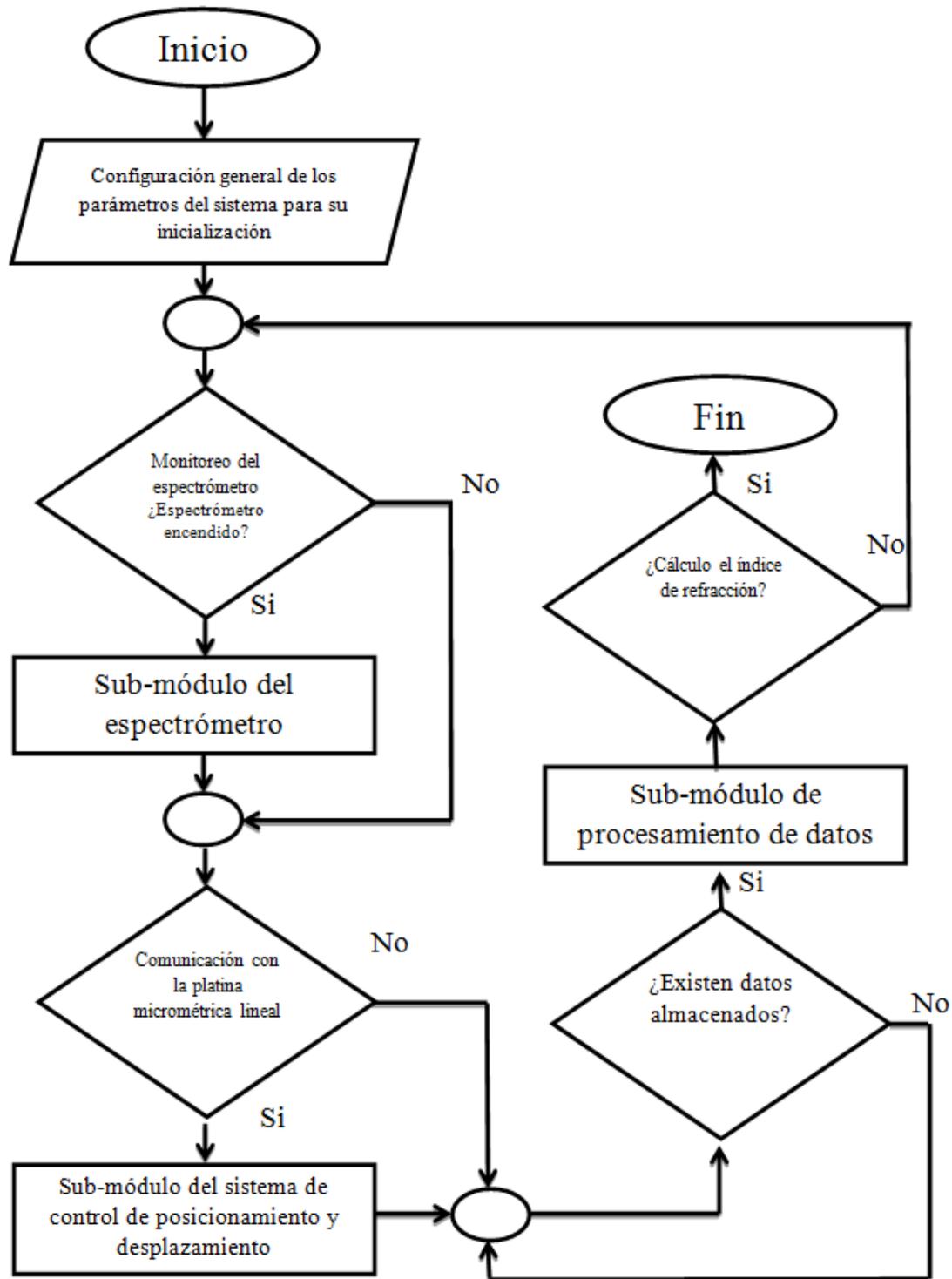


Figura 3.9. Diagrama de bloques del módulo principal.

3.2.2. Sub-módulos del sistema

Como ya se mencionó al principio del tema, la implementación del sistema principal se encuentra conformada por tres sub-módulos, los cuales realizan funciones determinadas para cada proceso dentro del sistema. A continuación, se mostrará dicho proceso mediante sus respectivos diagramas de bloques.

Sub-módulo del espectrómetro

Este sub-módulo es el encargado de calibrar el espectrómetro y configurar sus parámetros iniciales, adquirir los datos por el sistema y visualizarlos mediante el monitoreo de la señal generada por el sistema. El usuario debe de indicar el puerto de la computadora en donde se encuentra conectado el espectrómetro así como el tiempo de integración para comenzar a monitorear la señal. La implementación de este sub-módulo se lleva a cabo a partir de los *drivers* en *LabVIEW* creados por el fabricante. El diagrama de flujo de datos que se muestra en la figura 3.10 pertenece a este sub-módulo.

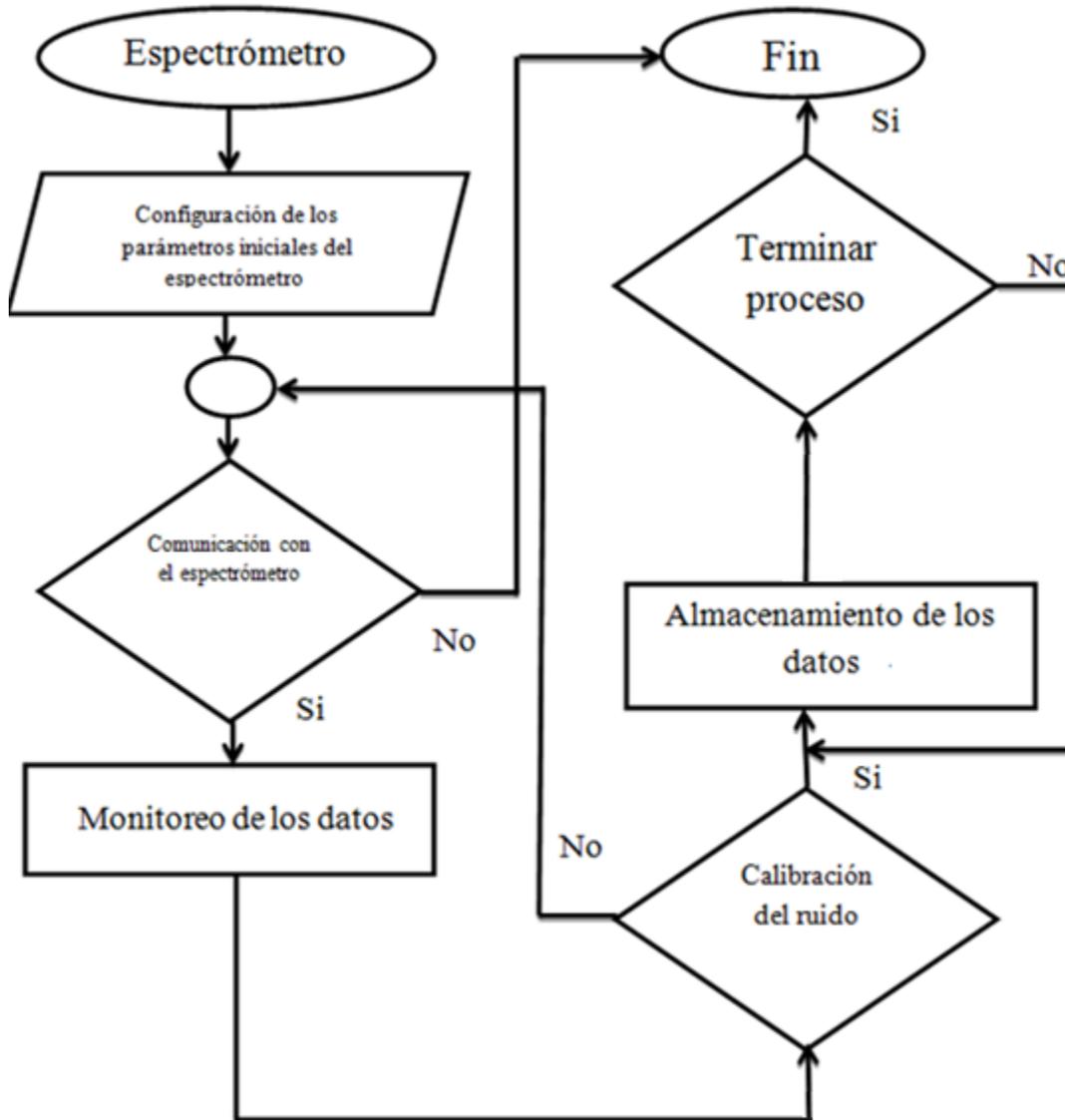


Figura 3.10 Diagrama de bloques del sub-módulo del espectrómetro.

Sub-módulo de posición y desplazamiento.

La función de este sub-módulo es establecer la conexión con la platina micrométrica lineal y configurar sus parámetros iniciales para establecer una comunicación y conexión del controlador de precisión compacto de etapa motorizada y la platina lineal micrométrica con el CPU y establecer el envío de comandos y parámetros de desplazamiento al controlador de precisión. El usuario debe de indicar el puerto de la computadora en donde

se encuentra conectado el *CPCEM* así como la tasa de transmisión de datos para iniciar con control de la platina. La implementación de este sub-módulo se lleva a cabo a partir de los *drivers* en *LabVIEW* creados por el fabricante. El diagrama de flujo de datos se muestra en la figura 3.11.

Sub-módulo de procesamiento de datos.

Este sub-modulo es el encargado de buscar y abrir los datos almacenados del ruido (los cuales se encuentran almacenados en archivos de texto, la referencia y la sustancia a caracterizar, procesarlos matemáticamente y visualizarlos los resultados mediante el uso de pantallas. El usuario debe indicar el número de archivos que desea procesar, la dirección raíz en donde se encuentran, así como los nombres que se asignaron. De igual forma el usuario debe establecer las condiciones mediante las cuales realizó la medición (índice de refracción del prisma, distancia focal de la lente y el ángulo del prisma). La implementación de este sub-módulo se lleva a cabo tomando como base el algoritmo existente para el procesamiento de dichos datos. El diagrama de bloques 3.12 es el que pertenece a este módulo.

Ya que se implementó la interfaz gráfica para la automatización del sistema, y se han descrito los elementos que la componen así como la función de cada uno de ellos, en el siguiente capítulo se realizará una prueba para verificar el comportamiento de la automatización del sistema y observar los resultados que se tienen al trabajar con esta interfaz.

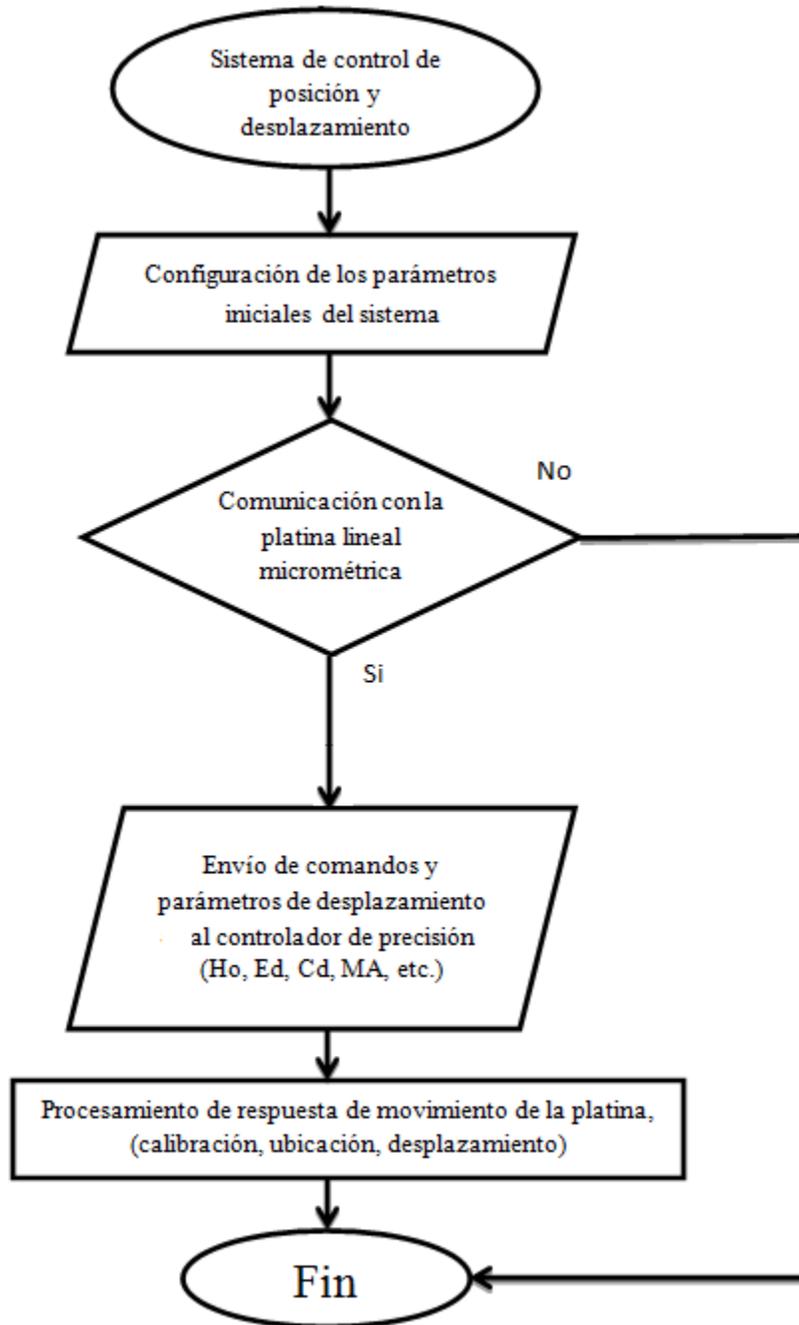


Figura 3.11 Diagrama de bloques del sub-módulo del sistema de control de posición y desplazamiento.

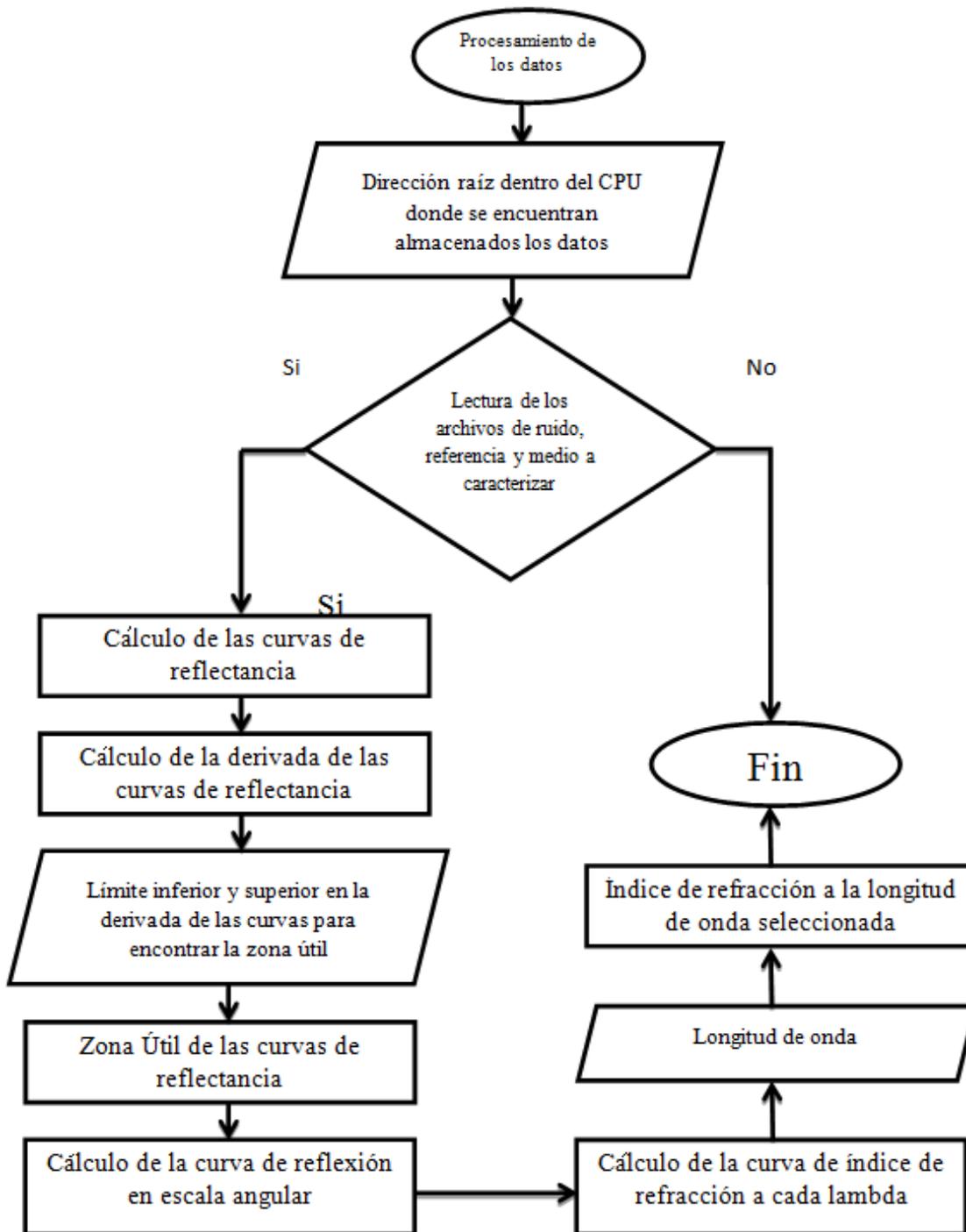


Figura 3.12 Diagrama de bloques del sub-modulo del procesamiento de datos.

CAPÍTULO 4.

RESULTADOS EXPERIMENTALES

Los capítulos dos y tres de esta tesis describen, respectivamente, el método de medición del índice de refracción y su dispersión, así como la descripción detallada de la interfaz gráfica desarrollada a partir de la automatización del sistema para realizar estas mediciones. En este capítulo se presentan las pruebas experimentales que se hicieron a fin de observar el correcto funcionamiento de la automatización del sistema, tomando como base los datos mostrados en el capítulo tres.

4.1. Inicialización del sistema automatizado.

Para poner en marcha la ejecución del sistema, se asignaron los parámetros iniciales como se muestra en la figura 4.1. Esta asignación de valores se encuentra en la primera pestaña de la interfaz gráfica *PARAMETROS* con los siguientes datos:

- Parámetros de almacenamiento de datos.
 - Dirección de la carpeta de almacenamiento de los datos: se creó una carpeta en el escritorio de la computadora de trabajo del laboratorio la cual tenía por dirección `C:\Users\alumno\Desktop\Prueba`.
 - Nombre de la muestra: Agua/Aire respectivamente para cada caso.
 - Nombre del ruido (*dark*): por convención, al ruido le asignamos el nombre de *dark*, pero se le puede asignar el nombre que se desee.
- Parámetros de inicialización del espectrómetro.
 - *VISA resource name*: se selecciona en cuál de los puertos *USB* se encuentra conectado el espectrómetro; para nuestro caso `USB::0x2457:`.
 - *Integration Time* (μs): Se indica el tiempo de integración del espectro de reflectancia adquirido por el espectrómetro. Para las pruebas realizadas se le asigna el valor de 100 [μs].

- Parámetros iniciales del procesamiento de datos.
 - Dirección de la carpeta raíz de almacenamiento:
C:\Users\alumno\Desktop\Prueba
 - Numero de archivos: 27.
 - Nombre del ruido: *Dark*.
 - Nombre de la referencia: aire.
 - Nombre de la muestra: agua.
 - Límite inicial lambda [nm]: 400.
 - Límite final lambda [nm]: 900.

Los valores de índice de refracción para el vidrio y el agua deben de ser a la longitud de onda de calibración con la que se trabajó en esta prueba:

- Longitud de onda de calibración [nm]: 650
- η_{BK7} : 1.51452
- η_{AGUA} : 1.33167

De las especificaciones técnicas de la lente, se indica el valor de la distancia focal y el ángulo del prisma.

- Distancia focal [cm] : 5.1
- Ángulo del prisma [°]: 45

Y finalmente, es necesario especificar la longitud del paso de desplazamiento, con el que se moverá la platina.

- Pasos [μm]: 50

The screenshot shows a software interface with a tabbed menu at the top: PARÁMETROS, ESPECTROMETRO Y PLÁTINA, PROCESAMIENTO DE DATOS, CALCULO DEL INDICE DE REFRACCIÓN, and Direcciones de los archivos. The 'PARÁMETROS' tab is active. The interface is divided into three main sections:

- Parámetros de almacenamiento de datos:** Includes a text field for 'Dirección de la carpeta de almacenamiento de datos' (C:\Users\alumno\Desktop\Prueba), and two text fields for 'Nombre de la muestra' (aire) and 'Nombre del ruido (dark)' (dark).
- Parámetros de inicialización de espectrómetro:** Includes a dropdown for 'VISA resource name 2' (USB::0x2457:), a 'Disable' button for 'Enable Strobe (Disabled)', and a spin box for 'Integration Time (6000µs)' (100).
- Parámetros iniciales para el procesamiento de los datos:** Includes a spin box for 'Numero de archivos' (30), a text field for 'Dirección de la carpeta raíz de almacenamiento' (C:\Users\alumno\Desktop\Prueba), and text fields for 'Nombre del ruido' (dark), 'Nombre del archivo de la muestra' (agua), and 'Nombre del archivo referencia' (aire). Below this are several spin boxes: 'limite inicial lambda [nm]' (400), 'n BK-7' (1.51452), 'Pasos de medición [micrómetros]' (50), 'Lambda crítica' (50), 'limite final lambda [nm]' (900), 'n H2O' (1.33167), 'Distancia focal [cm]' (5.1), and 'Angulo prisma' (45).

Figura 4.1. Interfaz gráfica (PARÁMETROS), parámetros iniciales establecidos.

4.2. Operación del sistema

Una vez que se han llenado los campos de los parámetros iniciales de la interfaz, se procede a ejecutar el programa, con ello, aparece la ventana de la configuración de la platina, como se muestra en la figura 4.2, y se establecen los datos adecuados y los indicados por el fabricante.

- Tipo de conexión: *VISA*.
- Puerto en el *CPU* que se encuentra conectada la platina: *COM3*.
- Cuenta con un botón para habilitar la opción *Visa BaudRate*.
- *Visa BaudRate*: 1920
- *VENUS Language*: 2
- *Number of Axis*: 1
- *Controller Nr*: 1



Figura 4.2 Interfaz gráfica para la configuración de conexión de la platina lineal micrométrica.

Posteriormente, es necesario posicionarse en la ventana de la interfaz gráfica *ESPECTRÓMETRO Y PLATINA*, en ella se observa la señal en tiempo real del sistema como se muestra en la figura 4.3. En esta sección, sólo se indica el número de mediciones (pasos) y la longitud del desplazamiento de estos, para posteriormente activar el interruptor de la medición automática. La configuración de estos datos es:

- Número de mediciones: 27
- Desplazamiento [mm]: .05

Al accionar el interruptor con el señalamiento de medición automática, se observa cómo se desplaza la platina se despliega el espectro en la pantalla, la platina se detiene y se almacenan los datos, así sucesivamente p número de veces. La información obtenida va variando dependiendo de la posición en la que se encuentre la platina.

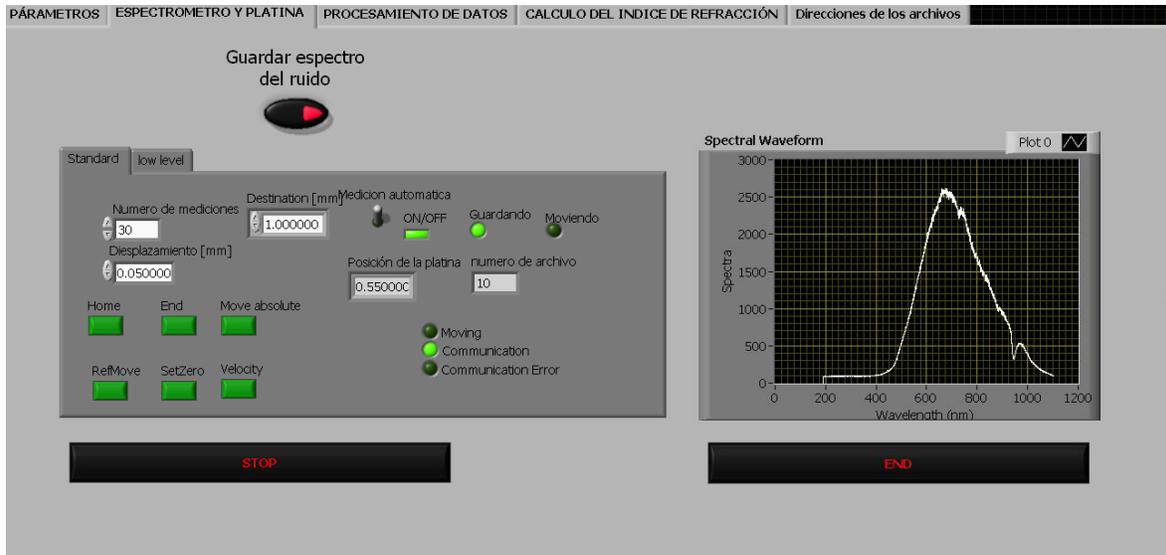


Figura 4.3. Interfaz gráfica (ESPECTRO Y PLATINA), parámetros de desplazamiento establecidos.

4.3. Procesamiento de datos y cálculo del índice de refracción

Una vez realizada la medición de los espectros de reflexión del aire y el agua y ya que se tiene almacenado el ruido del sistema, pasamos a la pestaña de la interfaz gráfica (*PROCESAMIENTO DE DATOS*) figura 4.4, donde se encuentra un botón con el nombre de **CALCULAR**, este se presionará para obtener la gráfica de la curvas de reflectancia figura 4.5 y la gráfica de la derivadas de las curvas figura 4.6. Al mismo tiempo que se despliegan las gráficas en las diferentes pantallas, en la tercer pantalla con el nombre de zona útil se encuentra un cartel con el mismo nombre y con dos controladores, estos tienen la función de limitar los valores de la gráfica derivada de las curvas que el usuario considere para realizar la gráfica zona útil figura 4.7 y la curva de reflectancia con escala angular figura 4.8.

- Zona útil.
 - Límite inferior: 13
 - Límite superior: 20

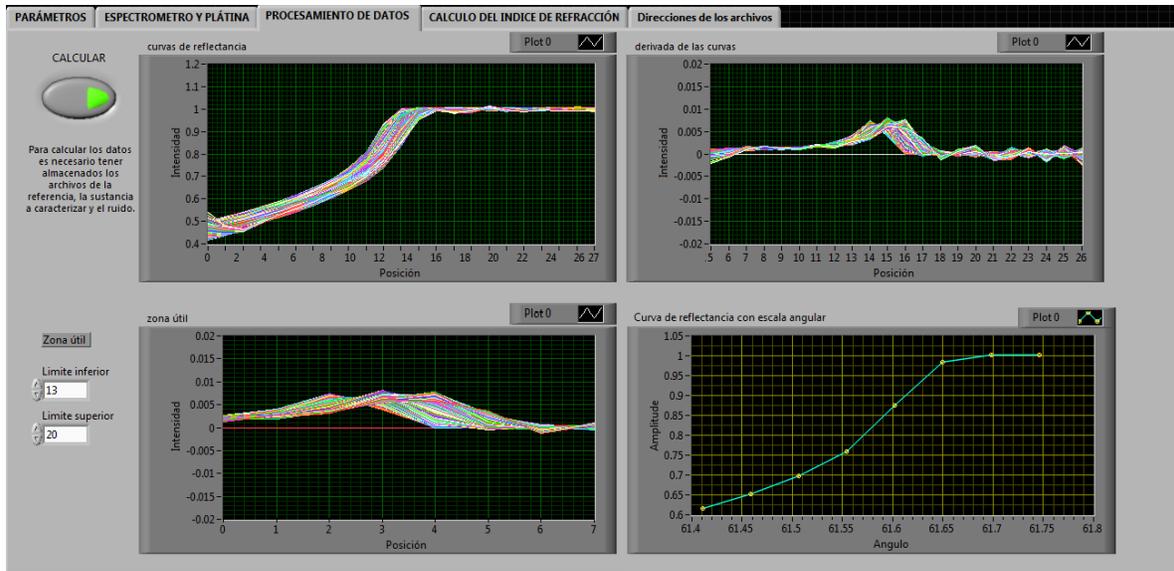


Figura 4.4 Interfaz gráfica (PROCESAMIENTO DE DATOS), datos obtenidos de la medición.

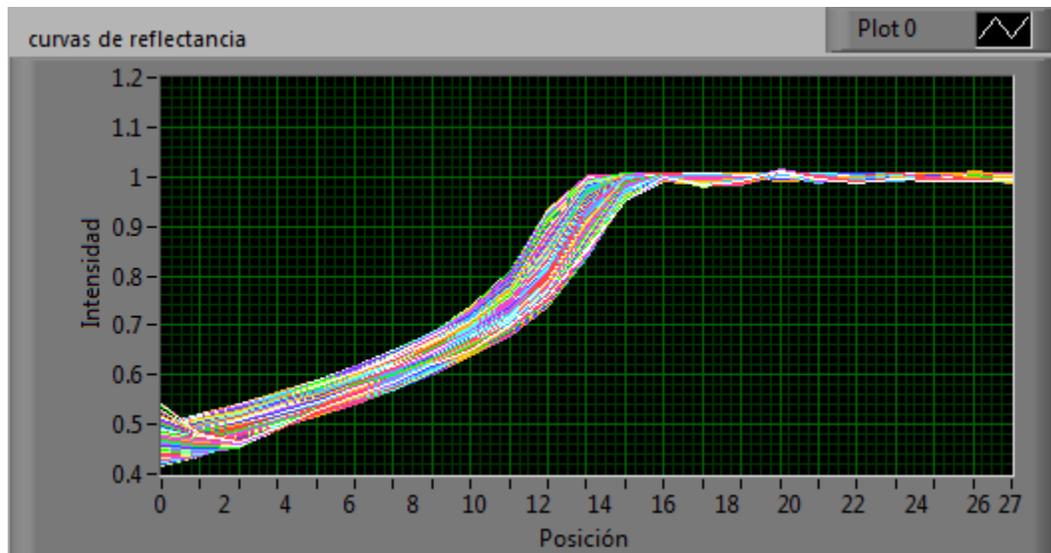


Figura 4.5 Interfaz gráfica (PROCESAMIENTO DE DATOS) curvas de reflectancia.

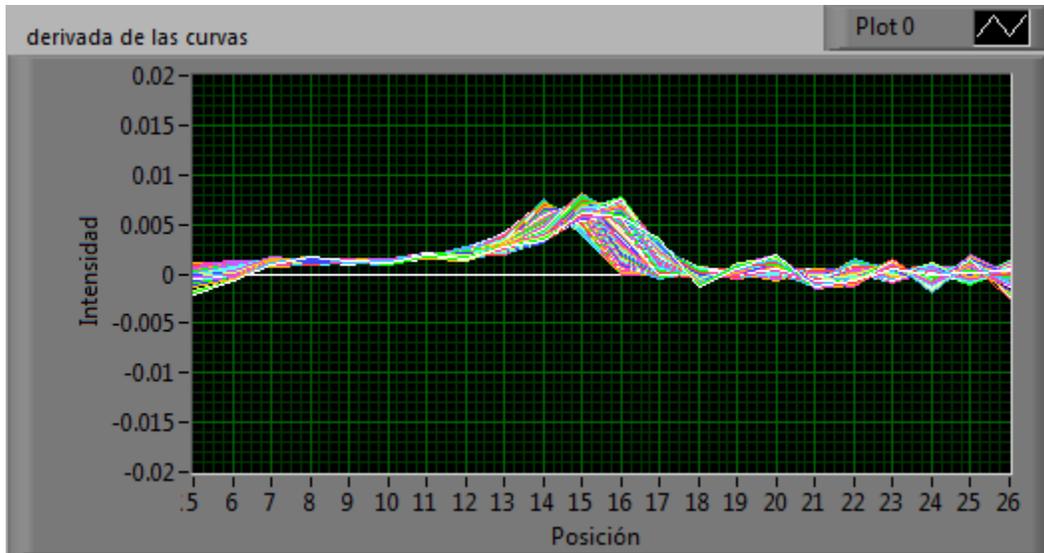


Figura 4.6 Interfaz gráfica (PROCESAMIENTO DE DATOS) derivada de las curvas de reflectancia.

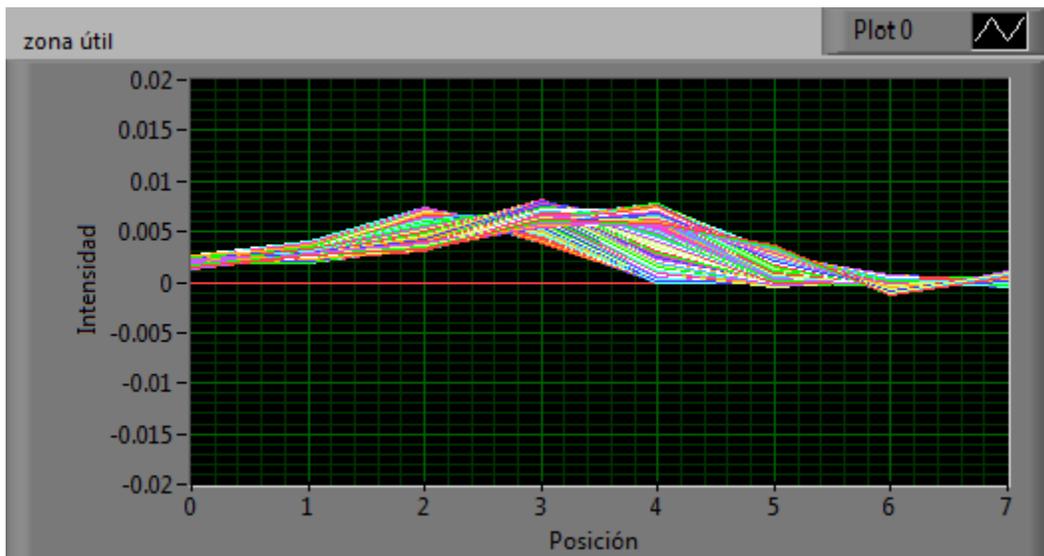


Figura 4.7 Interfaz gráfica (PROCESAMIENTO DE DATOS) zona útil.

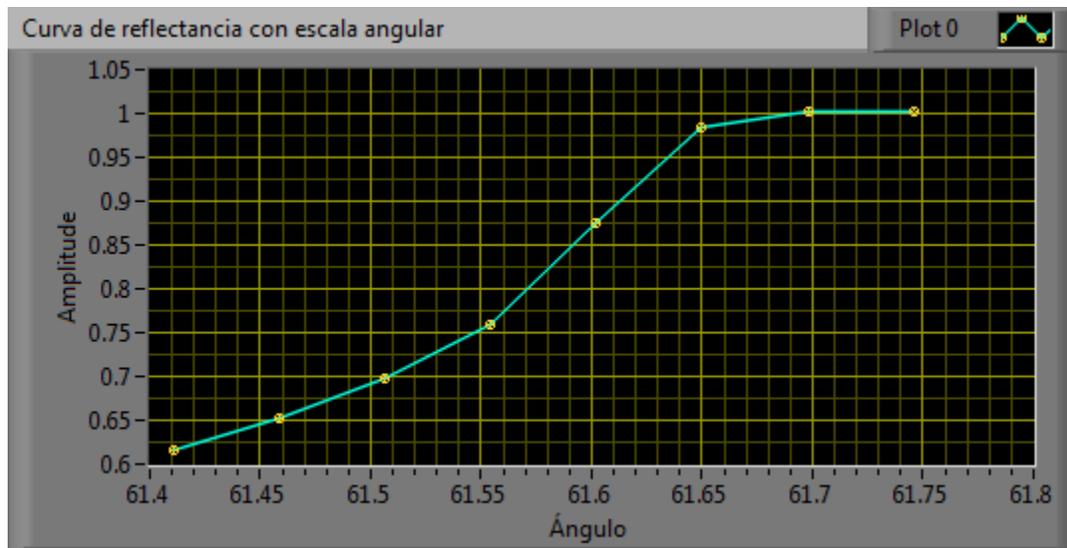


Figura 4.8 Interfaz gráfica (PROCESAMIENTO DE DATOS) curva de reflectancia con escala angular.

Finalmente, con el uso de la pestaña de la interfaz gráfica *CÁLCULO DE ÍNDICE DE REFRACCIÓN*, se observa la curva generada de índices de refracción a cada longitud de onda medida. Se tiene un controlador, en el cual se selecciona la longitud de onda de la cual deseamos saber el índice de refracción, tomaremos el valor con el que hemos venido trabajando $\lambda = 650$ [nm] como se muestra en la figura 4.9.

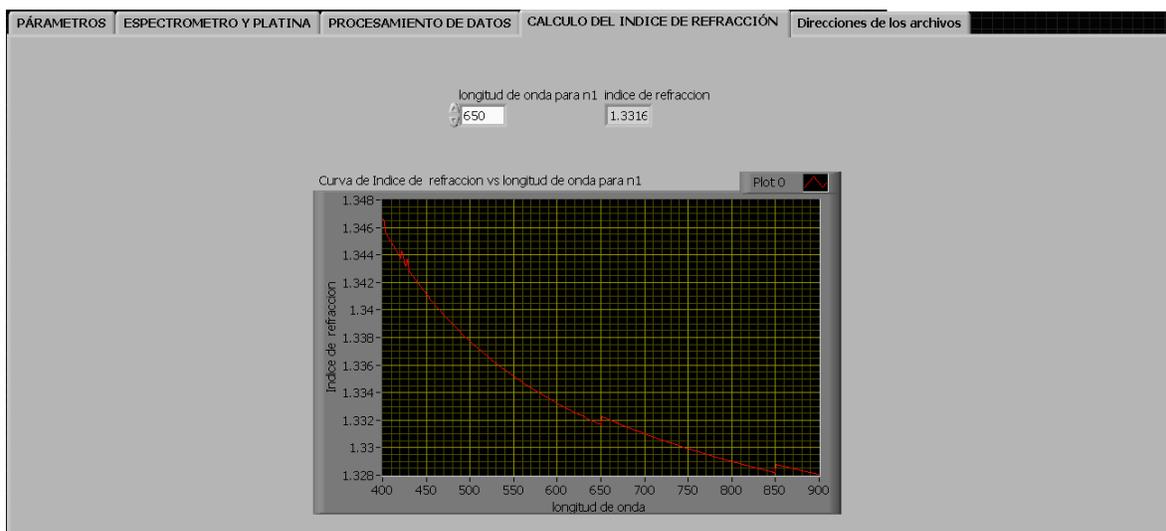


Figura 4.9 Interfaz gráfica (CÁLCULO DEL ÍNDICE DE REFRACCIÓN).

El valor que se obtiene de índice de refracción a la longitud de onda 650 [nm] es igual a 1.33167, como se muestra en la figura 4.10; es decir, el procesamiento es correcto ya que es el valor que se asigna en un inicio y se trabaja en torno a este dato.

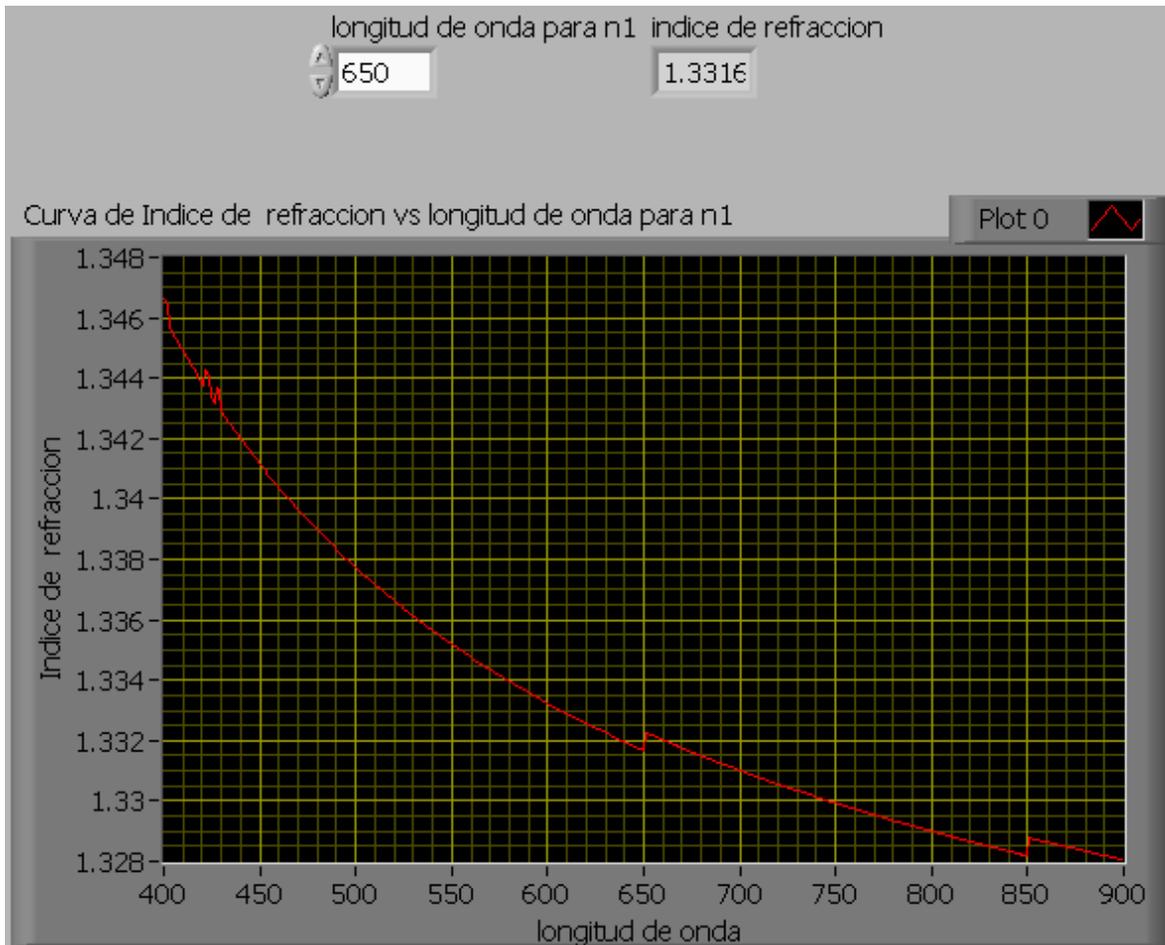


Figura 4.10 Interfaz gráfica (CALCULO DEL ÍNDICE DE REFRACCIÓN) índice de refracción.

Ahora que se ha obtenido la curva de índice de refracción a cualquier longitud de onda, en el intervalo de 400 a 900 [nm] mediante el sistema automatizado, es posible concluir con este trabajo de tesis en el siguiente capítulo.

CONCLUSIONES

El objetivo principal de esta tesis fue la automatización de un refractómetro espectroscópico por reflexión interna propuesto previamente en el Centro de Ciencias Aplicadas y Desarrollo Tecnológico (CCADET) por el Grupo de Sensores Ópticos y Eléctricos (GSOE).

La propuesta planteada consistió en integrar diferentes equipos que contaban con un *software* para su funcionamiento en una sola interfaz gráfica y realizar de manera sincronizada las mediciones del sistema, así como incorporar a ésta el procesamiento de los datos obtenidos de estas mediciones, para finalmente obtener el índice de refracción de medios líquidos con mayor repetibilidad, en menor tiempo y con menor posibilidad de error en la toma de datos, por requerirse un gran número de mediciones.

Al finalizar este trabajo de tesis, se concluye que se logró automatizar de manera satisfactoria el sistema a partir del desarrollo de la interfaz gráfica, logrando con esto la reducción del tiempo de medición de las pruebas de manera considerable, es decir, de aproximadamente 50 minutos a 3 minutos de forma general, esto mediante la sincronización de operación del desplazamiento de la fibra recolectora, la adquisición y procesamiento espectroscópico de datos de forma automatizada.

A su vez, se garantiza una mayor exactitud y repetibilidad en las pruebas experimentales logrando reducir el error sistemático que existía en las mediciones realizadas por el usuario, mediante la sustitución de la platina lineal manual por una platina lineal motorizada. Algo que es importante, es destacar la simplicidad que se logró para trabajar con el sistema en la interfaz gráfica que sistematiza el desplazamiento de la platina lineal motorizada con el despliegue en pantalla del espectro de reflexión adquirido por el espectrómetro y, al mismo tiempo, almacena los datos generados por éste, para posteriormente, y ya que se tienen los datos completos de las pruebas proceder a procesarlos de manera instantánea y poder obtener el resultado final, el cual es el índice de refracción de medios líquidos.

Finalmente se obtuvo el índice de refracción del agua dando como resultado un valor correcto. Este trabajo de tesis ahora abre la posibilidad de caracterizar en detalle el sistema, con el objetivo de que pueda ser propuesto para realizar mediciones en otros laboratorios e inclusive en la industria.

TRABAJO A FUTURO

Una de las razones primordiales para automatizar el refractómetro espectroscópico por reflexión interna, era la de potenciar el funcionamiento de éste, mediante la sencillez de su uso, su rápida respuesta y un menor costo de implementación, comparado con otros dispositivos o arreglos de medición óptica existentes con la misma función, la de caracterizar líquidos, determinando su curva de dispersión e índice de refracción. Por ello, es fundamental ubicar las oportunidades de mejora a largo y corto plazo.

Como siguiente etapa a largo plazo en el desarrollo del refractómetro automatizado, se pretende mejorar el prototipo actual para poder ser llevado a mediciones de campo para poder ser utilizado en otros laboratorios e inclusive en la industria. Para lo anterior será necesario el encapsulamiento del sistema.

Un aspecto a incorporar a corto plazo será la renovación del espectrómetro, el cual permitirá incorporar más funciones a la sección de recolección de luz y mejorar la calidad de los datos adquiridos. Para poder llevar a cabo este cambio, será necesario modificar el programa de la automatización del sistema.

Así mismo será recomendable la creación de sub-vi's, de cada módulo de la programación de la interfaz gráfica, lo que tendría la función de compactar el código de programación, para que posteriormente se pueda facilitar el cambio de algún instrumento o dispositivo por uno distinto, idealmente más nuevo, que conforma o es parte del refractómetro espectroscópico por reflexión interna, para ser modificado su código de programación en el programa completo.

BIBLIOGRAFÍA

Referencias bibliográficas

- [1] Eugene D. Olsen. (1990). “MÉTODOS ÓPTICOS DE ANÁLISIS”, REVERTÉ, S.A., Barcelona España, pp. 1-2
- [2] D. Malacara Hernández. (2004). “Óptica Básica”, Fondo de Cultura Económica, México, pp. 144-146.
- [3] Tipler Mosca. (2005). “FÍSICA PARA LA CIENCIA Y LA TECNOLOGÍA”, quinta edición, REVERTÉ, S.A España. pp. 940.
- [4] Giancoli, C. Douglas. “Física. Principios con aplicaciones” sexta edición. PEARSON EDUCATION, México. pp. 642-643 (2006).
- [5] Giancoli, C. Douglas. “Física. Principios con aplicaciones” sexta edición. PEARSON EDUCATION, México. pp. 645 (2006).
- [6] Elizareth Hernández S. (2010). “Refractómetro espectroscópico por reflexión interna”, Tesis de maestría. Ingeniería Eléctrica opción Instrumentación, pp. 19.
- [7] D. Malacara Hernández. (2004). “Óptica Básica”, Fondo de Cultura Económica, México, pp. 142-146.
- [8] Eugene D. Olsen. (1990). “Métodos ópticos de análisis”, REVERTÉ, S.A., Barcelona España, pp. 446-448.
- [9] B. P. Levitt (1979). “Findlays’s practical physical chemistry”, Ninth edition, Longman Group Limited, London, pp. 228-229.
- [10] Especificaciones técnicas de los elementos mecánicos del sistema
<http://www.edmundoptics.com/optomechanics/>

- [11] Especificaciones técnicas de los elementos ópticos del sistema
<http://www.oceanoptics.com/Products/metrology.asp>
- [12] A. Reyes-Coronado, A. García-Valenzuela, C. Sánchez-Pérez and R. G. Barrera, (2005) “Measurement of the effective refractive index of a turbid colloidal suspension using light refraction”, *New Journal of Physics*, pp. 4-9.
- [13] Elizareth Hernández S. (2010). “Refractómetro espectroscópico por reflexión interna”, Tesis de maestría. Ingeniería Eléctrica opción Instrumentación, pp. 20. (2010).
- [14] Humberto Contreras T. (2010). “Hacia una refractometría en coloides densos”, Tesis de maestría. Ingeniería Eléctrica opción Instrumentación, pp. 19-21.
- [15] A. Cromer “Física para las Ciencias de la Vida.” segunda edición. REVERTÉ, S.A., Barcelona España, pp. 358-360 (1984).
- [16] Tipler Mosca. (2005). “FÍSICA PARA LA CIENCIA Y LA TECNOLOGÍA”, quinta edición, REVERTÉ, S.A España. pp. 940.
- [17] A. Cromer. (2006). “FÍSICA EN LA CIENCIA Y EN LA INDUSTRIA”, REVERTÉ, S.A España. pp. 423.

Bibliografía de consulta

- [I] Barry G. Blundell. (2008) “Computer Hardware” Thompson.
- [II] Ian Sommerville. (2005) "Ingeniería Del Software" séptima edición, Pearson Education, S.A., Madrid.
- [III] Benet Campderrich Falgueras. (2003) “Ingeniería Del Software” Editorial UOC, Barcelona.
- [IV] Robert H. Bishop. (2007) “LabVIEW 8” student edition, Pearson Education Inc.

- [V] Jose Rafael Lajara Vizcaino/ Jose Pelegrí Sebastián (2011). “LabVIEW Entorno grafico de programación.” segunda edición. marcombo, Spain.

Apéndices

Apéndice A

Elementos que conforman el sistema del refractómetro espectroscópico por reflexión interna

El sistema que conforma el refractómetro espectroscópico por refracción interna, está conformado por subsistemas mecánicos y ópticos, ya que se explicó cómo es su principio de funcionamiento y que es lo que ocurre dentro del sistema, detallaremos los elementos que lo integran.

A.1 Subsistema mecánico

El subsistema mecánico [10] esta conforma por elementos cuya función es la de dar soporte a los elementos del subsistema óptico y así como alinearlos.



Diafragma Iris. Se utilizan para limitar la cantidad de luz transmitida, mediante el control del ancho del haz que pasa a través de él, mediante una palanca que ajusta la apertura en un rango de 1-30 mm de diámetro [10].

Goniómetro circular. Sistema que proporciona movimientos giratorios de 360° y cuya resolución es de 1° [10].



Platina de desplazamiento. Sistema mecánico de desplazamiento lineal horizontal con una resolución de $10\ \mu\text{m}$ [10].



A.2 Subsistema óptico

El subsistema óptico [11] corresponde a la implementación del refractómetro y los elementos que lo integran son:



Fuente de luz blanca de deuterio y halógeno-tungsteno. Fuente modelo DH-2000, cuenta con dos lámparas las cuales son combinadas continuamente en un solo recorrido óptico, para obtener un rango espectral UV-VIS-IR de 215 a 1700 nm. Cuenta con la configuración de trabajar con una sola de las fuentes [11].

Fibra óptica Ocean Optics. Fibras ópticas de 100 y 600 micrómetros de diámetro multimodales, con núcleo de sílice y cubierta de plástico. Trabajan en la longitud de onda de UV-VIS de 300 a 1100 nm e IR de 400 a 2100 nm. En los extremos cuentan con conectores SMA estándar [11].

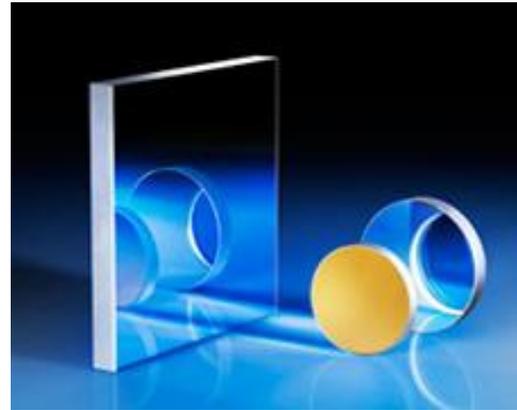


Colimador 74-VIS. Lente óptica de acoplamiento de Ocean Optics, cuenta con una lente BK-7 adecuada para el rango espectral VIS-NRI. Estos sistemas de un solo lente tienen la desventaja de la aberración cromática, debido a la dispersión o variación en el índice de refracción con la longitud de onda [11].



Prisma triangular de vidrio BK7. El tipo de vidrio BK7 tiene como cualidad una alta calidad óptica, por este motivo el índice de refracción se considera uniforme con respecto a un haz de luz que incida en él y teniendo como valor 1.51452. Proporciona de igual manera una transmitancia muy buena en el espectro visible y en el infrarrojo cercano [11].

Espejo de precisión. La superficie de estos espejos se encuentra recubierta con aluminio a fin de minimizar la pérdida de energía cuando se esté incidiendo luz en este, al no permitir que la luz pase a través del sustrato de vidrio. Los espejos con formas rectangulares son ideales para aplicaciones que requieren el espejo para ser montado a 45° con el fin de tener una salida del haz incidente de 90° [10].



Lente acromática plano-convexa. Esta lente está diseñada para un rendimiento máximo en la longitud de onda para la fuente en específico, y son ideales para aplicaciones que trabajan con baja potencia. Tiene una distancia focal de $5 \text{ cm} \pm 1\%$, con un cono angular de $0.25 \text{ mm} \times 45^\circ$. Es una lente en la que se ha corregido la aberración cromática [10].

Espectrómetro Ocean Optics HR-2000. Aparato que mide la intensidad de la luz en función de la longitud de onda en una determinada porción del espectro electromagnético. El espectro se encarga de descomponer la luz blanca que es originada por una fuente en sus diferentes longitudes de onda.

Este espectrómetro cuenta con el software OOibase32 proporcionado por el fabricante, mediante el cual se pueden adquirir datos y procesarlos, así como visualizarlos [11].



Apéndice B

Corrección del incremento del ángulo de salida a incremento del ángulo interno

En esta sección se detalla la corrección realizada del incremento de ángulo de salida del haz de luz del prisma, por el incremento del ángulo dentro de él.

El haz de luz tiene un ángulo de salida con respecto a la normal del prisma como se observa en la figura B.1, el incremento en ángulo se puede obtener a partir de la ecuación 1, pero para este trabajo se necesita encontrar el incremento del ángulo interno, por lo que es necesario realizar la corrección de un incremento de ángulo a la salida, es decir, de un $\Delta\theta_{out}$ a un $\Delta\theta_{int}$.

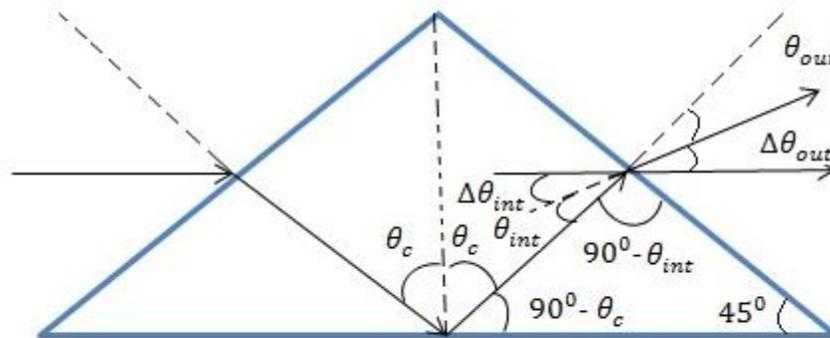


Figura B.1 Consideraciones geométricas para la corrección de $\Delta\theta_{out}$ a $\Delta\theta_{int}$ en la base del prisma.

$$\Delta\theta_{out} = \frac{\Delta x}{f} \quad (1)$$

Mediante la ley de Snell y conociendo el valor de $\Delta\theta_{out}$ así como el valor de ángulo del prisma, el cual sabemos de medir físicamente el prisma y cuyo valor es de 60° , se desarrolla la siguiente ecuación para determinar $\Delta\theta_{int}$.

$$\theta_p = 45^\circ - \theta_{int}$$

Con la ley de Snell

$$n_p \sin \theta_p = n_{aire} \sin \theta_{out}$$

Sustituyendo θ_p en la ley de Snell

$$n_p \sin(45^\circ - \theta_{int}) = n_{aire} \sin \theta_{out} \quad (2)$$

Mediante el teorema de diferencia de ángulos del seno

$$\text{Como } \sin(A - B) = \sin A \cos B - \cos A \sin B$$

Sustituyendo en (2)

$$n_p \sin(45^\circ) \cos(\theta_{int}) - n_p \cos(45^\circ) \sin(\theta_{int}) = n_{aire} \sin \theta_{out} \quad (3)$$

Derivando la ecuación 3 con respecto a θ_{out}

$$n_p \sin(45^\circ) \cos(\theta_{int}) * \frac{d\theta_{int}}{d\theta_{out}} + \cos(\theta_{int}) (0) - n_p \cos(45^\circ) \sin(\theta_{int}) * \frac{d\theta_{int}}{d\theta_{out}} - \sin(\theta_{int}) (0) = n_{aire} \cos \theta_{out}$$

$$n_p \sin(45^\circ) \cos(\theta_{int}) * \frac{d\theta_{int}}{d\theta_{out}} + \cos(\theta_{int}) (0) - n_p \cos(45^\circ) \sin(\theta_{int}) * \frac{d\theta_{int}}{d\theta_{out}} - \sin(\theta_{int}) (0) = n_{aire} \cos \theta_{out} \quad (4)$$

Factorizando $\frac{d\theta_{int}}{d\theta_{out}}$ de la ecuación 4 obtenemos

$$n_p [\sin(45^\circ) \cos(\theta_{int}) + \cos(45^\circ) \sin(\theta_{int})] \frac{d\theta_{int}}{d\theta_{out}} = n_{aire} \cos \theta_{out}$$

$$\frac{d\theta_{int}}{d\theta_{out}} = \frac{n_{aire} \cos \theta_{out}}{n_p [\sin(45^\circ) \sin(\theta_{int}) + \cos(45^\circ) \cos(\theta_{int})]} \quad (A)$$

Considerando que el incremento en ángulo de salida es muy pequeño

$$\text{Para } \Delta\theta_{out} \ll 1$$

$$\Delta\theta_{int} = \frac{\delta\theta_{int}}{\delta\theta_{out}} \Delta\theta_{out} \quad (B)$$

Entonces se tiene que $\theta_{out} = f(\theta_{int})$

Nuevamente a partir de la ley de Snell

$$n_p \sin \theta_p = n_{aire} \sin \theta_{out}$$

Considerando que el índice de refracción del aire es aproximadamente 1

$$n_{aire} \approx 1$$

La ley de Snell queda de la siguiente manera

$$n_p \sin(45^\circ - \theta_{int}) = \sin \theta_{out} \quad (5)$$

Despejando de 5 θ_{int}

$$45^\circ - \theta_{int} = \sin^{-1}\left(\frac{\sin \theta_{out}}{n_p}\right)$$

$$\theta_{int} = 45^\circ - \sin^{-1}\left(\frac{\sin \theta_{out}}{n_p}\right) \quad (6)$$

Sustituyendo 6 en (A)

$$\frac{d\theta_{int}}{d\theta_{out}} = \frac{n_{aire} \cos \theta_{out}}{n_p [\sin(45^\circ) \sin(45^\circ - \sin^{-1}(\frac{\sin \theta_{out}}{n_p})) + \cos(45^\circ) \cos(45^\circ - \sin^{-1}(\frac{\sin \theta_{out}}{n_p}))]} \quad (C)$$

$$\Delta\theta_{int} = (C) \Delta\theta_{out}$$

$$\Delta\theta_{int} = \frac{\delta\theta_{int}}{\delta\theta_{out}} \Delta\theta_{out}$$

Para determinar θ_{out}

$$\theta_{out} = |\theta_p - \theta_c|$$

Donde θ_c es el ángulo crítico que varía dependiendo de la longitud de onda con la cual se está trabajando.

Ahora se asigna la escala angular luego a partir de $\theta_c \pm \Delta\theta_{int}$ como ya se había mencionado anteriormente.

Apéndice C

Código de programación del sistema

En esta sección se encuentra el código de programación del sistema completo, elaborado a partir de los diferentes *Drivers* proporcionados por los fabricantes de los elementos que lo conforman.

En la figura C.1 se observa la estructura general del código de programación, dentro se encuentra indicado con las letras A, B, C y D las cuales indican cada uno de los sub-módulos de la interfaz gráfica.

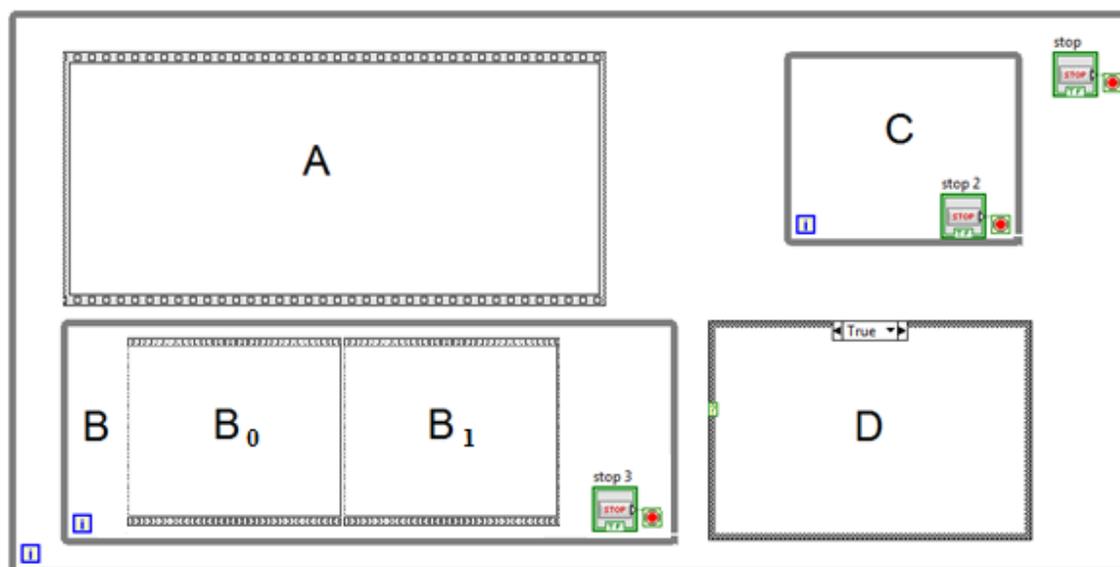


Figura C.1 Estructura general del programa de operación del refractómetro espectroscópico por reflexión interna.

El código de programación correspondiente al sub-módulo del sistema de control de posición y desplazamiento es el correspondiente al letra A dentro de la estructura general del código de programación, se muestra en la figura C.2, el cual se encarga de desplazar y

posicionar a la platina micrométrica lineal, el número de veces necesarias indicadas por el usuario.

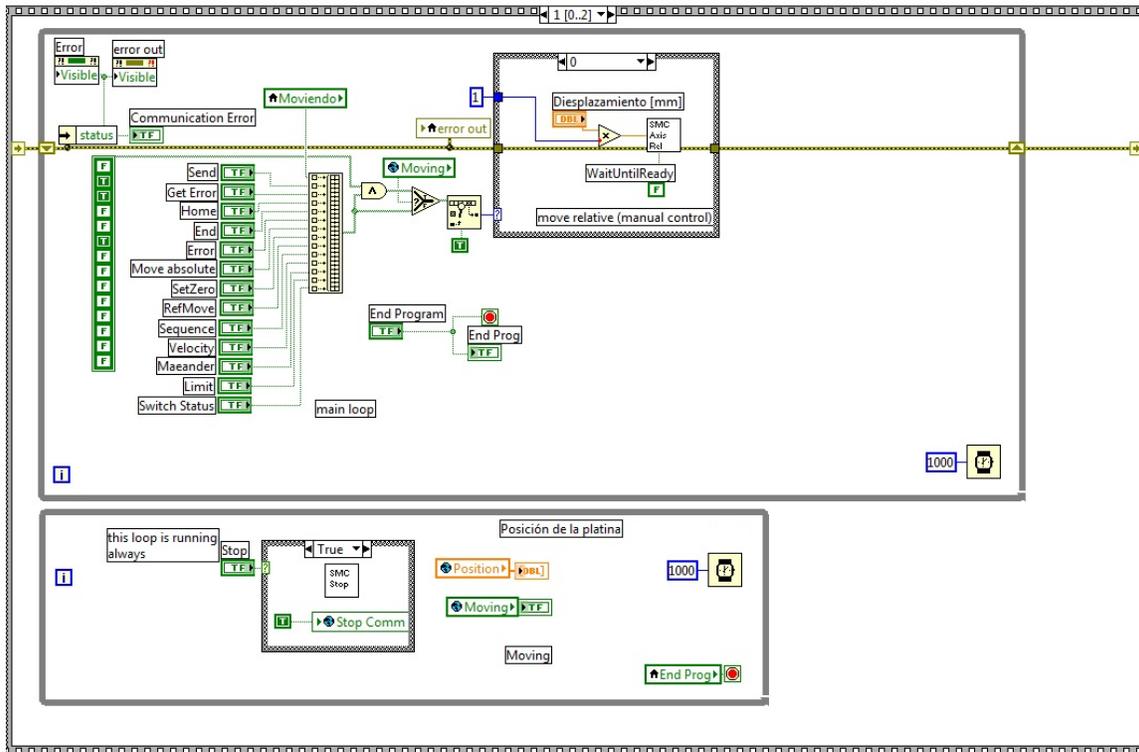


Figura C.2 Código de programación correspondiente al sub-módulo del sistema de control de posición y desplazamiento (A).

El código de programación correspondiente al sub-módulo refractómetro es el correspondiente al letra B que está dentro de la estructura general del código de programación, se encuentra dividido en dos secciones B_0 y B_1 para su mejor visualización dentro de este trabajo, como se muestra en la figura C.3(a) y C.3(b). La sección B_0 se encarga de inicializar la comunicación con el espectrómetro, así como de la asignación de los parámetros iniciales para su funcionamiento, la sección B_1 es la encargada de la visualización de los datos así como del almacenamiento de estos.

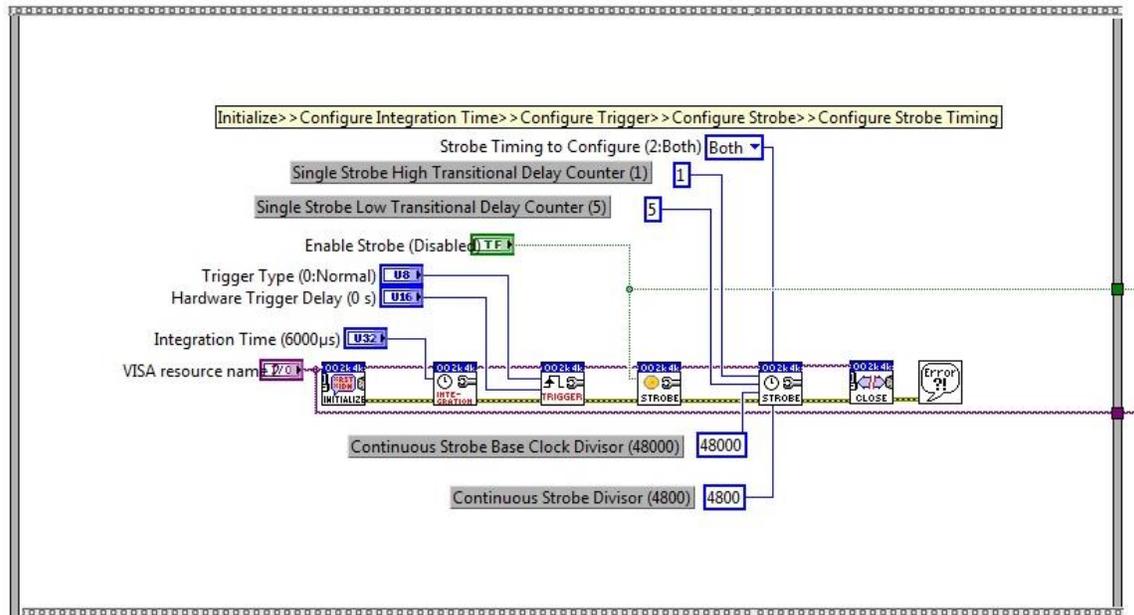


Figura C.3 (a) Código de programación correspondiente al sub-modulo del sistema del refractómetro (B_0).

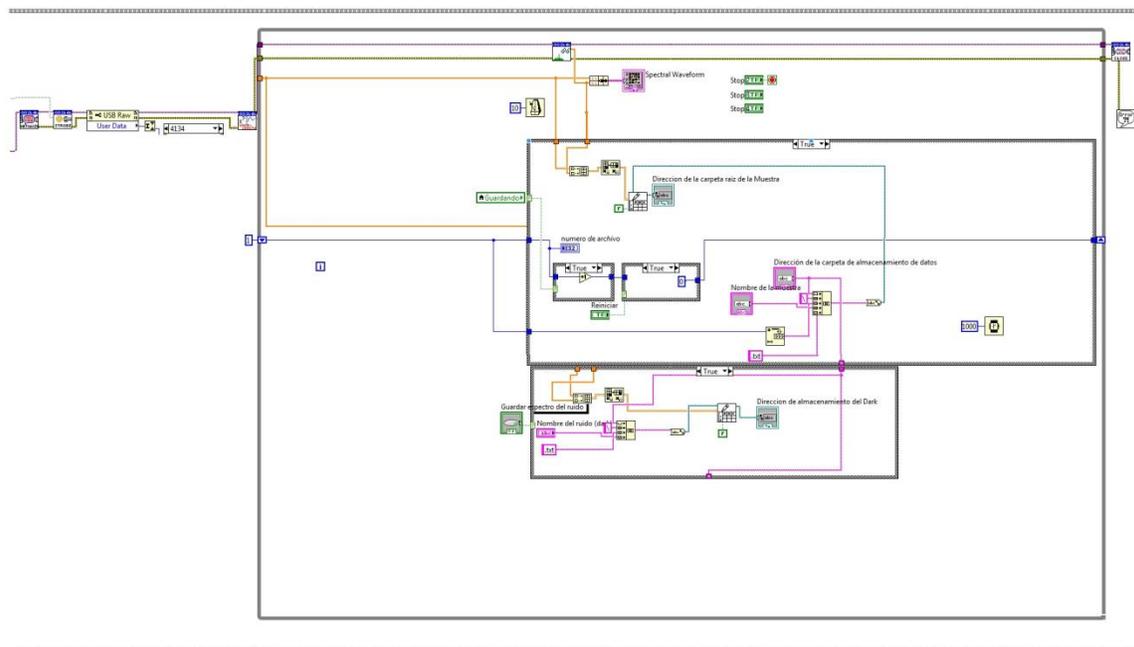


Figura C.3 (b) Código de programación correspondiente al sub-modulo del sistema del refractómetro (B_1).

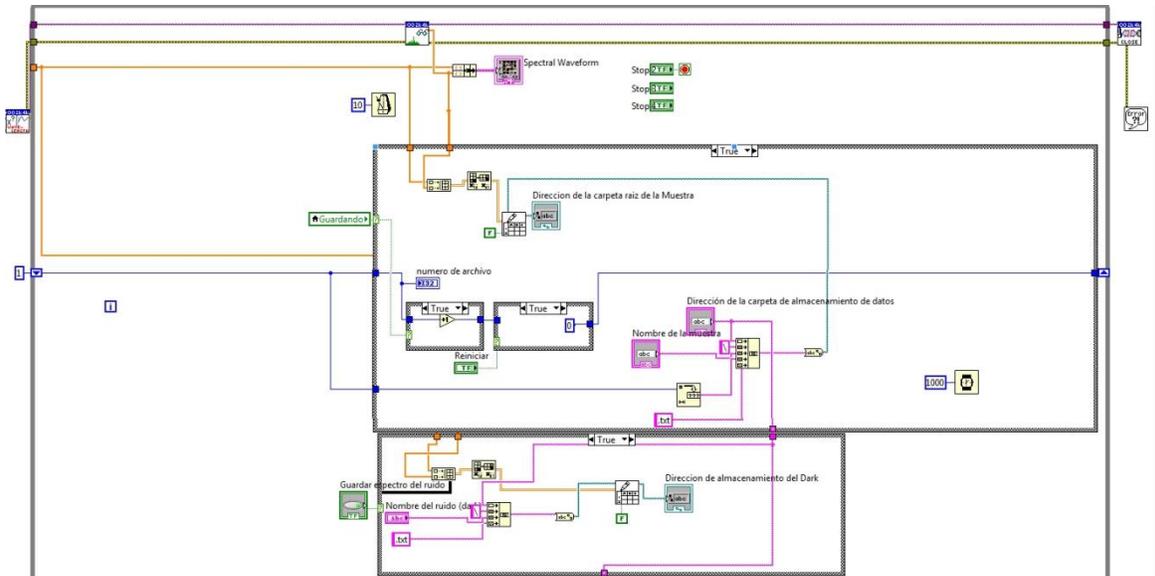


Figura C.3.1 Acercamiento del inciso (b) Código de programación correspondiente al sub-modulo del sistema del refractómetro (B_1).

El código de programación que se encuentra en la sección C de la estructura general del código de programación, es la que se encarga de establecer comunicación y sincronía del sub-modulo del sistema de control de posición y desplazamiento (A) y el sub-modulo refractómetro (B), es el que se muestra en la figura C.4.

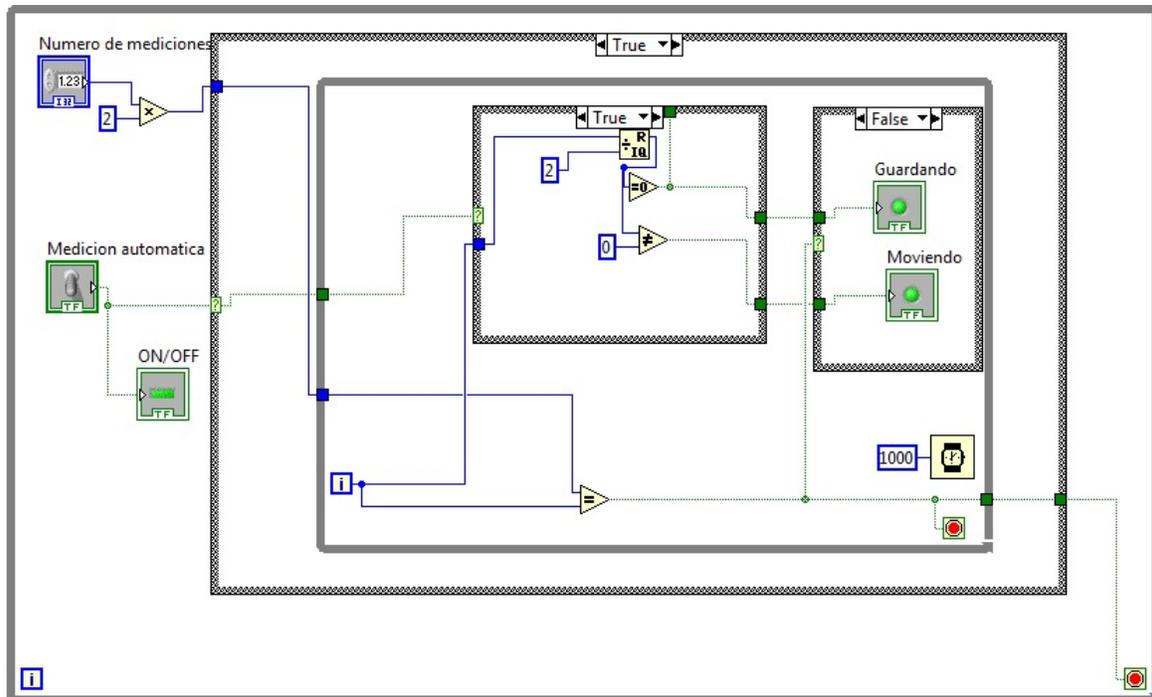


Figura C.4 Código de programación correspondiente a la sincronización de los submódulos (A) y (B).

El código de programación correspondiente al sub-módulo del procesamiento de datos es el de la letra D dentro de la estructura general del código de programación, se muestra en la figura C.5. Este sub-módulo se encarga de buscar los datos almacenados, de leerlos y procesarlos, para finalmente desplegar los resultados.

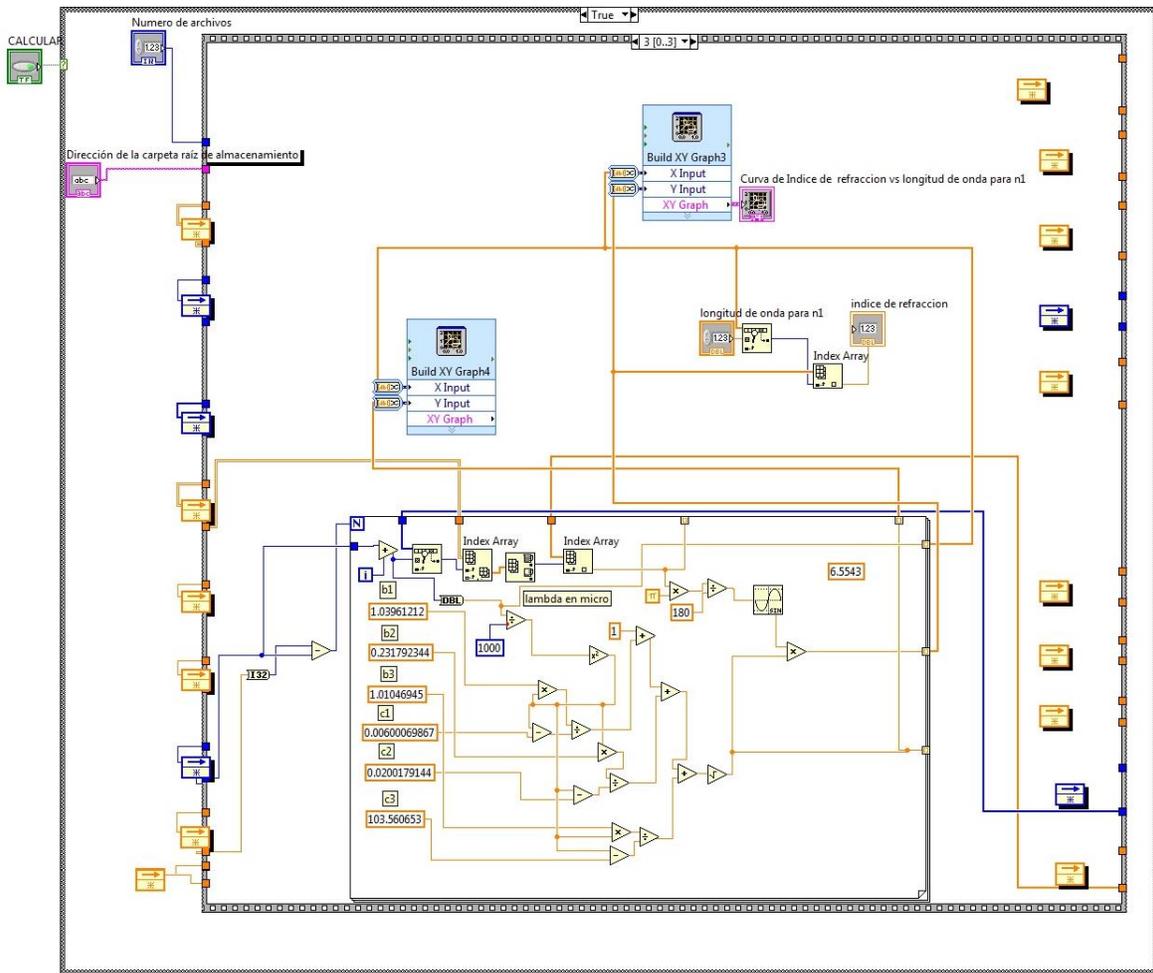


Figura C.5 Código de programación correspondiente al sub-modulo del procesamiento de datos (D).