Determinación del índice de refracción en objetos sólidos transparentes mediante el uso del interferómetro de Michelson

Esteban Morales1, Abraham Pérez2, Fernando Velázquez2, G.E Sandoval-Romero2

1) Facultad de Estudios Superiores Aragón, Universidad Nacional Autónoma de México, Av. Universidad Nacional S/N, Bosques de Aragón, 57171 Nezahualcóyotl, Méx. estebanmorales317@aragon.unam.mx

2) Instituto de Ciencias Aplicadas y Tecnología, Universidad Nacional Autónoma de México,

Circuito Exterior s/n, Coyoacán, Ciudad Universitaria, Cd. De México, 04510, México

a.perez.iee.daia@gmail.com; fvelazqu@ciencias.unam.mx; eduardo.sandoval@icat.unam.mx

**RESUMEN**

El interferómetro de Michelson es un dispositivo óptico que consta de una fuente luminosa monocromática y una placa semirreflectora, la cual divide el haz en amplitud, generando dos haces resultantes que se dirigen hacia un espejo fijo y otro movible. Los haces regresan hacia la placa divisora de haz, se superponen y finalmente llegan a un fotodetector, donde se observan las franjas de interferencia. La interferencia entre las ondas coherentes de luz puede ser constructiva o destructiva. El cambio en las franjas ocurre cuando hay una diferencia de longitud entre los dos caminos ópticos de los dos haces resultantes.

En este trabajo, se introdujo un objeto sólido transparente perpendicular a uno de los haces, lo que ocasiona una alteración en el camino óptico que varía dependiendo el tipo de material del objeto transparente. La diferencia de fase resultante entre las dos ondas de luz altera el patrón de interferencia, lo que lleva al paso de un cierto número de franjas proporcional a dicha diferencia. Este número se modifica conforme el objeto se rota sobre su eje vertical.

Se utilizó una fuente de luz monocromática de 633nm y diversos objetos sólidos transparentes para determinar sus índices de refracción. Para rotar el objeto, se empleó una platina de rotación y se desplazó a diversos ángulos. Se diseñó un programa en Matlab para simular los resultados esperados. Para el conteo de las franjas, se utilizó un fotodetector y se diseñó un circuito para acondicionar la señal y diferenciar entre franjas claras y oscuras. Además, se acopló la señal para una recepción de datos mediante un ESP32. Se utilizó un programa previamente diseñado para realizar el conteo automático, estableciendo dos umbrales ajustables según las necesidades de la señal. Los resultados fueron satisfactorios y precisos.

**PALABRAS CLAVE:** Interferómetro de Michelson, índice de refracción, franjas de interferencia, conteo de franjas.

abstract

The Michelson interferometer is an optical device consisting of a monochromatic light source and a semi-reflector plate, which divides the beam in amplitude, generating two resulting beams that are directed towards a fixed and a movable mirror. The beams return to the beam splitter plate, overlap and finally reach a photodetector, where interference fringes are observed. Interference between coherent light waves can be constructive or destructive. The fringe shift occurs when there is a difference in length between the two optical paths of the two resulting beams.

In this work, a transparent solid object was introduced perpendicular to one of the beams, which causes an alteration in the optical path that varies depending on the type of material of the transparent object. The resulting phase difference between the two light waves alters the interference pattern, leading to the passage of a certain number of fringes proportional to this difference. This number changes as the object is rotated about its vertical axis.

A 633nm monochromatic light source and various transparent solid objects were used to determine their refractive indices. To rotate the object, a rotating stage was used and moved at various angles. A Matlab program was designed to simulate the expected results. For fringe counting, a photodetector was used, and a circuit was designed to condition the signal and differentiate between light and dark fringes. In addition, the signal was coupled for data reception by means of an ESP32. A previously designed program was used to perform the automatic counting, establishing two adjustable thresholds according to the needs of the signal. The results were satisfactory and accurate.

**KEY WORDS:** Michelson interferometer, Refractive index, Interference fringes, fringes count.

# INTRODUCCIÓN

El interferómetro de Michelson nace a consecuencia de efectuar el muy conocido experimento acerca de la velocidad de la luz de Michelson y Morley. Michelson y Morley fueron dos científicos que realizaron un experimento para medir la velocidad en la que se mueve el planeta tierra respecto al entonces hipotético éter. El interferómetro de Michelson está constituido por una fuente de luz monocromática la cual se dirige hacia una placa semirreflectora, la cual divide el haz en amplitud. Los dos haces resultantes se dirigen, hacia dos espejos planos fijos ubicados en ángulo recto, de donde vuelven para juntarse otra vez en la placa semirreflectora y finalmente llegar a lo que se implementó en este caso para observar las franjas de interferencia producidas, un fotodetector. [1][2].

El interferómetro de Michelson puede ser utilizado en múltiples aplicaciones de precisión, ya que es un instrumento óptico muy sensible debido a que hace uso del principio de interferencia para medir las pequeñas diferencias en longitudes de onda o cambios que tiene la velocidad de la luz al atravesar diferentes índices de refracción. La interferencia es un fenómeno en el que dos o más ondas de luz se superponen y se combinan [2].

En este trabajo se aprovechó la sensibilidad que tiene el interferómetro para determinar el índice de refracción de distintos materiales transparentes. Para lograr esto, se construyó el interferómetro de Michelson en espacio abierto y se colocó el material transparente a analizar en uno de los dos brazos del interferómetro, mientras que el otro brazo se dejó en aire. La diferencia en el índice de refracción entre el material transparente y el aire provoca que la velocidad de propagación de la luz sea distinta en cada brazo del interferómetro y que el camino óptico recorrido por el haz láser donde se encuentra el material a analizar sea mayor respecto al otro brazo. Esto provoca que los dos caminos ópticos de ambos brazos sean distintos incluso si se encuentran a la misma distancia respecto al divisor de haz. La longitud que recorrerá el camino óptico donde se encuentra colocado el material varía de acuerdo con el espesor de dicho material [3].

Para este trabajo, se aplicaron rotaciones mayores o iguales a 10° al objeto transparente sobre el eje vertical. Mientras el objeto se rotaba, se contaron con precisión las franjas de interferencia que transcurrían. Para realizar el conteo, se diseñó un circuito para acoplar la señal obtenida por el fotodetector, la señal eléctrica se visualiza en forma de voltaje después del circuito diseñado. Un microcontrolador modelo ESP32 (sus siglas se deben a la compañía que lo fabrico Espressif Systems y el número 32 se refiere a la arquitectura de 32 bits que el microcontrolador utiliza) de la familia Arduino cargado con un programa [4], diseñado en el entorno de desarrollo de Arduino contó con precisión los semiciclos que al dividirlo entre dos se obtiene el número de las franjas de interferencia transcurridas.

A diagram of a microcontroller

Description automatically generated

**Figura 1.** Diagrama de bloques para el sistema desarrollado (IDE: Entorno de desarrollo integrado).

# MATERIALES Y MÉTODOS

* 1. **Diseño del dispositivo sensor**

El dispositivo-sensor diseñado consta del interferómetro de Michelson, el cual es un instrumento óptico muy sensible que se utiliza para medir con alta precisión las pequeñas diferencias en longitudes de onda o cambios que tiene la velocidad de la luz al atravesar medios de diferentes índices de refracción [3]. Además, se utiliza una platina de rotación para rotar a un ángulo *Φ* el objeto a analizar (de acuerdo al desarrollo experimental se comprobó que las rotaciones menores a 10° eran imprecisas, al igual que si son mayores a 30°), un circuito de acoplamiento de la señal proveniente del fotodetector, una tarjeta de adquisición de datos modelo ESP32 y un programa diseñado en lenguaje basado en C++ para la adquisición de datos y para realizar el conteo de las franjas de interferencia de acuerdo con los datos adquiridos. El sistema óptico con el objeto colocado en uno de los brazos del interferómetro de Michelson se muestra en la figura 2.

Diagram of a diagram of a optical system

Description automatically generated with medium confidence

**Figura 2**. Esquema del Interferómetro de Michelson con el objeto a analizar.

La fuente de luz monocromática pasa por una placa semirreflectora, la cual divide el haz. Posteriormente, un haz se dirige hacia un espejo plano sin nada más que aire de por medio, mientras que el otro haz pasa por aire después por el material a analizar y vuelve a pasar por aire hasta llegar al espejo y reflejarse de la misma manera. Para determinar el índice de refracción del objeto a analizar se necesitó hacer una rotación a este mismo objeto. Para llevar a cabo lo anterior fue necesario usar una platina de rotación. Mientras más grande sea el ángulo de rotación del objeto, mayor número de franjas de interferencia serán visualizadas ya que la longitud de ese camino óptico del brazo irá aumentando al pasar por una superficie mucho más ancha que cuando el objeto estaba perpendicular al haz láser [5].

El movimiento debe ser lento y tener la precaución adecuada para evitar producir ruido mecánico que afecte las mediciones. Además, es importante estar constantemente monitoreando la adquisición de datos para evitar ruido electrónico indeseado que pueda afectar el conteo de las franjas de interferencia del programa [5][6].

## Componentes

Para realizar este dispositivo fueron necesarios los siguientes componentes:

1. Fuente láser 633nm HeNe Melles Griot 0.50 mW (x1): Esta es una fuente de luz láser que emite luz monocromática con una longitud de onda de 633nm.
2. Fotodetector de Silicio, de respuesta normal (x1): Este es un dispositivo que convierte la luz en una señal eléctrica.
3. Microcontrolador ESP32 (x1): Este es un microcontrolador que se utiliza para contar los semiciclos de las franjas de interferencia y para adquirir y procesar datos.
4. Espejo plano (x2): Estos son espejos planos que se utilizan para reflejar la luz en el interferómetro de Michelson.
5. Divisor de haz 57% transmisión 43% Reflexión: Este es un dispositivo que divide un haz de luz en dos haces separados.
6. Amplificador de Instrumentación AD620AN (x1): Este es un amplificador que se utiliza para amplificar la señal eléctrica proveniente del fotodetector.
7. Amplificador operacional TL081 (x1): Este es otro amplificador que se utiliza para amplificar la señal eléctrica proveniente del fotodetector.
8. Potenciómetro de bajo ruido, 20 vueltas (x2): Estos son dispositivos que se utilizan para ajustar la ganancia y offset de los amplificadores.
9. Materiales analizados (placas de vidrio soda lime, de acrílico y de vidrio) (x5): Estos son los materiales transparentes que se analizaron en el experimento.

Se utilizaron tres muestras de vidrio soda lime de diversos tamaños y espesores: cubre objetos #2865, 22x22mm con espesor de 0.20mm, portaobjetos #2947 25x75mm con espesor de 1.07mm y otro portaobjetos #2935N 24x50mm con un espesor de 1.2mm, todos ellos del fabricante Corning. También se utilizó una muestra de vidrio común de 104x104mm con espesor de 4.10mm y una muestra de acrílico de 80x28mm con un espesor de 2.7mm.

* 1. **Determinación del índice de refracción**

Si un objeto transparente con un índice de refracción distinto al del medio en el que se encuentra el interferómetro (en este caso es aire) es insertado en uno de los brazos del interferómetro de Michelson, habrá un desplazamiento de franjas de interferencia debido a que la luz que atraviesa el objeto tendrá un cambio en la velocidad causada por la variación en el índice de refracción. Esto significa que la velocidad de propagación de la luz será menor en los materiales insertados en el brazo del interferómetro que en el aire.

Cuando la luz pasa a través del objeto transparente insertado, experimenta una desviación de su trayectoria y se introduce un cambio en la longitud del camino óptico en ese brazo en comparación con el otro brazo que sigue en aire sin alteraciones. La diferencia de camino óptico se compone de dos partes: la distancia geométrica del camino que recorre la luz en cada brazo y la diferencia adicional debido al cambio en el índice de refracción.

Este cambio en la diferencia de camino óptico provocará un cambio en la fase de la luz cuando las ondas de ambos brazos se combinen nuevamente. Al combinar las ondas de luz que han experimentado diferentes longitudes de camino óptico, se generará un patrón de interferencia diferente al observado cuando no hay objeto transparente presente [6].

El patrón de interferencia observado tendrá franjas que se desplazan en función del índice de refracción y el espesor del objeto transparente colocado en uno de los brazos del interferómetro. La magnitud del desplazamiento depende de la diferencia de índices de refracción entre el objeto y el medio, así como del grosor del objeto y el ángulo de rotación aplicado al objeto transparente. Estas franjas se observan desde un punto especifico o en este caso se perciben a través de un fotodetector [5]. Para explicar este fenómeno, se utiliza la relación en la cual el camino óptico en el aire es el mismo que la distancia recorrida por el haz, pero si el haz laser pasa a través de un objeto transparente, el camino óptico en el objeto estará dado por nt siendo t el espesor de dicho objeto y n su índice de refracción. Desde que el haz laser pasa por ese objeto transparente, la diferencia del camino óptico entre los brazos del interferómetro estará dado por:

. (1)

A diagram of a machine

Description automatically generated

**Figura 3.** Esquema representando la diferencia de camino óptico en ambos brazos del Interferómetro de Michelson con un objeto transparente insertado en uno de los brazos.

El número de franjas de interferencia que se desplazaron al introducir el objeto estará dado por

, (2)

dónde λ es la longitud de onda de la fuente de luz.

Si se inserta un objeto plano transparente perpendicular al haz laser y este se rota lentamente, habrá un número de franjas pasando conforme este movimiento se efectúe. Esto debido a que habrá un incremento en el camino óptico y, por lo tanto, la diferencia del camino óptico se verá afectada [6]. El camino óptico que la luz recorrerá estará determinado por la longitud del ancho del objeto insertado t, el índice de refracción n y el ángulo de incidencia *Φ*. [5]

A diagram of lines and dots

Description automatically generated

**Figura 4.** Diagrama para analizar la diferencia de la trayectoria recorrida por el haz dentro del objeto conforme modifica su posición inicial.

De acuerdo con la figura 4 la diferencia del camino óptico, cuando el objeto está rotado respecto de cuando el objeto está en su posición original, estará dada por

(3)

Si un arco incidente con centro en y es golpeado a través de para cortar en el análisis será mas sencillo. La diferencia del camino óptico es ahora

(4)

Dado que los rayos pasan dos veces a través de ambos bloques,

(5)

Realizando el desarrollo

(6)

Además,

(7)

De acuerdo con lo anterior AE, GC, GE, y AC pueden ser expresados en términos de t y de funciones trigonométricas de *Φ* y *Φ’*.

(8)

De acuerdo con la ley de Snell [7]

(9)

Donde *Φ’* puede ser expresada en términos de *Φ* y n de esta manera

(10)

Y finalmente

(11)

Para los casos experimentales la expresión

(12)

puede ser descartada ya que el resultado es demasiado pequeño para ser tomado en cuenta, por lo que usarlo no tiene ninguna influencia con los resultados.

Con esa expresión se puede determinar el índice de refracción de cualquier material transparente que esté perpendicular a la incidencia del haz laser, siempre y cuando se contabilicen el número de franjas que pasan cuando se rota y se tenga en cuenta el ángulo de rotación del objeto y además se conozca la longitud de onda de la fuente laser [5].

## Circuito y programa implementado para el conteo de franjas de interferencia

El conteo de las franjas de interferencia al aplicar una rotación a un objeto transparente es necesario que se realice con la mayor precisión posible. Esto es necesario debido a que el número de franjas de interferencia que pasan mientras se rota el objeto a analizar, es proporcional al espesor del objeto. El número de franjas que pasan en algunos casos es grande, por lo que contarlas visualmente resulta complicado [9], por esto se diseñó un circuito que acopla la señal recibida de un fotodetector, que convierte la luz en una señal eléctrica, y permite el conteo de las franjas de manera electrónica. Para esto, se hizo uso de un circuito de transimpedancia, utilizando un amplificador TL081 que transforma la corriente dada por el fotodetector en voltaje. Una vez obtenido este voltaje, se pasa por diversos filtros, pasa bajas y pasa altas, y por un circuito que aumenta o disminuye la ganancia a la salida respecto a la señal de entrada utilizando un amplificador de instrumentación AD620.

A diagram of a circuit

Description automatically generated

**Figura 5.** Circuito diseñado para el acoplamiento de la señal recibida por el fotodetector.

Después de que la señal está acondicionada, se proporciona a una tarjeta de desarrollo modelo ESP32. Esta tarjeta es un microcontrolador que se utiliza para adquirir y procesar datos. El programa previamente desarrollado, escrito en el lenguaje de programación C++, se ejecuta en el microcontrolador de la tarjeta ESP32.

El programa lee el valor del fotodetector en la entrada analógica seleccionada, en este caso al pin 34 del microcontrolador, y lo almacena en la variable S. Luego, el programa compara el valor actual de S con el valor anterior almacenado en la variable Sant y con los dos umbrales establecidos Us y Ui. Si se cumple la condición de pasar por ambos sin importar el orden (esta restricción es para evitar el conteo erróneo de ruido electrónico o el conteo de franjas incompletas), se incrementa el contador. El programa también actualiza el valor de la variable lastu y almacena el valor actual de S en la variable Sant para su uso en la siguiente iteración del bucle.

Diagrama

Descripción generada automáticamente

**Figura 6.** Diagrama de flujo del programa contador de franjas. Se repetirá infinitamente hasta que se detenga la ejecución del programa.

El programa se ejecuta continuamente, leyendo el valor del sensor, comparándolo con los valores anteriores y las constantes, y actualizando el contador y las variables según sea necesario. De esta manera es como se asegura que el conteo de las franjas sea usado de manera adecuada.

## Procedimiento

Primero, es necesario iniciar con la parte experimental (debido a que la Ec. (11) necesita del valor de dichas variables para realizar el cálculo correspondiente). Para esto se diseñó la configuración del interferómetro de Michelson. Sobre uno de los brazos del interferómetro se añadieron distintos objetos a analizar de manera que el objeto quede paralelo al haz láser [6]. El haz de luz, en el brazo donde se colocan los objetos, recorre una distancia en aire, después atraviesa el material a analizar y finalmente recorre otra distancia en aire hasta llegar al espejo. Cuando el espejo refleja este haz, sucede este mismo fenómeno, pero invertido [7]. Con el circuito del fotodetector se observan claramente los máximos y mínimos de interferencia en forma de máximos y mínimos de voltaje. Posteriormente, se realiza el conteo de franjas de interferencia en una computadora y se muestran en el monitor serie del IDE del programa Arduino.

Se colocó el material sobre una platina de rotación y lentamente se fue girando hasta llegar a un determinado ángulo *Φ,* a medida que esto sucede el número de franjas de interferencia se incrementa (el número de franjas depende del espesor de los objetos que se requieren analizar). El experimento se repitió veinte veces. Posteriormente, se calculó el promedio de los resultados obtenidos y se usó la Ec. (11) para calcular su índice de refracción y por último se comprobaron los resultados con los datos proporcionados por el fabricante de los materiales utilizados. Adicionalmente se realizó una simulación diseñada en Matlab que permite obtener el número de franjas que deben de pasar dependiendo del espesor del material y de la longitud de onda de la fuente de luz. Se obtuvieron los siguientes resultados:

**Tabla 1**. Objetos para analizar y sus espesores medidos y dados por el fabricante.

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Material | Dimensiones (mm) | Espesor medido (mm) | Espesor dado por el fabricante (mm) |
| Soda lime glass 2947 | 75x25 | 2.69 | 2.68-2.70 |
| Soda lime glass 2935N | 25x50 | 0.23 | 0.20-0.23 |
| Soda lime glass 2865 | 23x23 | 0.20 | 0.20-0.21 |
| Vidrio | 104x104 | 4.05 | -- |
| Acrilico | 80x29 | 2.7 | -- |

El espesor medido de los objetos en la Tabla 1 se obtuvo con un vernier, el cual es un instrumento de medición de longitud. Se realizaron 5 mediciones para cada objeto, y se calculó el promedio para obtener el valor final. En el caso de los materiales hechos de soda lime glass el fabricante proporciona el espesor aproximado, pero para el caso del vidrio y el acrílico no se tenía ningún registro del fabricante, por lo que solo se hizo uso de la medición tomada. Teniendo en cuenta el espesor de los objetos, se procede a contabilizar las franjas de interferencia que transcurren mientras el objeto se rota. En algunos casos, está disponible el índice de refracción de los materiales dado por el fabricante. Los valores proporcionados por el fabricante se utilizaron solo como medida comparativa con los resultados obtenidos en este trabajo.

A white electronic device with a screen

Description automatically generated

**Figura 7.** Fotografía de las franjas de interferencia vistas en tiempo real desde el osciloscopio.

## Resultados

En las Fig. 6 y Fig. 7 se muestra el resultado de cada una de las 20 repeticiones del experimento para cada objeto con una rotación de 10°. De esta manera se obtuvo el promedio del número de semiciclos a diversos ángulos, al dividir el número entre dos se obtiene el número de las franjas de interferencia.

Gráfico, Gráfico de barras, Histograma

Descripción generada automáticamenteGráfico, Histograma

Descripción generada automáticamente

1. **b)**

**Figura 8.** Conteo de semiciclos al rotar 10° los objetos de vidrio tipo soda lime glass con las medidas a) 25x50mm y b) 23x23mm. 20 repeticiones para cada objeto.

Gráfico, Histograma

Descripción generada automáticamente Gráfico, Gráfico de barras

Descripción generada automáticamente

**c) d)**

**Figura 9.** Conteo de semiciclos al rotar 10° los objetos de c) vidrio tipo soda lime 25x75mm, d) vidrio común de 104x104mm. 20 repeticiones para cada objeto.

Gráfico, Histograma

Descripción generada automáticamente

**e)**

**Figura 10.** Conteo de semiciclos al rotar 10° la placa de acrílico. 20 repeticiones.

Posteriormente se realizaron mediciones a distintos ángulos de rotación, en la Tabla 2 se muestran los resultados.

**Tabla 2.** Franjas de interferencia transcurridas a distintos ángulos de rotación para cada objeto. Las mediciones se repitieron 20 veces

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| Material | Dimensiones (mm) | Promedio de franjas de interferencia Rotación de 10° | Promedio de franjas de interferencia Rotación de 20° | Promedio de franjas de interferencia Rotación de 30° |
| Soda Lime Glass #2947 | 75x25 | 17.05 | 176 | 395 |
| Soda Lime Glass #2935N | 25x50 | 3.975 | 16 | 37.6 |
| Soda Lime Glass #2865 | 23x23 | 3.575 | 14 | 37.7 |
| Vidrío | 104x104 | 69.375 | 467.8 | 748.55 |
| Acrílico | 80x29 | 88.825 | 178 | 356 |

El número de franjas de interferencia se sustituye en la Eq. (11) y con el espesor medido, como en el siguiente ejemplo se utilizó la rotación de 10° para el Material Soda Lime Glass 2947:

Diagrama

Descripción generada automáticamente

**Figura 11.** Diagrama de flujo del programa en Matlab que calcula el índice de refracción.

Se realizó un programa en Matlab para calcular el espesor de los objetos a partir del número de franjas de interferencia obtenidos experimentalmente. El programa solicita todas las variables al usuario y muestra el índice de refracción, en la Tabla 3 se muestran los resultados:

**Tabla 3.** Indices de refracción obtenidos experimentalmente para cada material.

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Material | Dimensiones (mm) | Espesor del objeto (mm) | Índice de refracción calculado cuando =10° | Índice de refracción calculado cuando =20° | Índice de refracción calculado cuando =30° |
| Soda Lime Glass 2947 | 75x25 | 2.69 | 1.1498 | 1.4914 | 1.46 |
| Soda Lime Glass 2935N | 25x50 | 0.23 | 1.5541 | 1.5403 | 1.5449 |
| Soda Lime Glass 2865 | 23x23 | 0.20 | 1.5843 | 1.5457 | 1.6953 |
| Vidrio | 104x104 | 4.05 | 1.5464 | 2.4465 | 1.6712 |
| Acrílico | 80x29 | 2.7 | 3.1452 | 1.4971 | 1.5926 |

En la Fig. 11 se pueden observar los resultados obtenidos se comparan con el índice de refracción que proporciona el fabricante, en los casos en los que se tienen dichos valores.

A graph with different colored bars

Description automatically generated

**Figura 12.** Resultados obtenidos para el índice de refracción de distintos materiales comparados con los valores proporcionados por el fabricante.

# 3 conclusiones

Con los resultados mostrados, se puede determinar que la medición menos precisa es la de 10° por eso es recomendable realizar la rotación a un ángulo mayor a este, principalmente se observan resultados más inexactos cuando la muestra tiene un espesor más grande, por otro lado al aplicar la rotación a 20° los resultados parecen estar mucho más cerca del valor real, por ultimo con 30° parece ser una rotación excesiva que si bien los resultados no son tan imprecisos es mejor hacerlo a 20° de acuerdo a la muestra experimental desarrollada en este trabajo.

La Ec. (11) también se puede utilizar para determinar el espesor del material a analizar. Claro que, para esto se debe saber el índice de refracción de dicho material. Consultando la hoja de datos, se puede obtener esta información y, mediante el número de franjas contabilizadas, se puede obtener el espesor.

# 4 agradecimientos

Este trabajo fue realizado en el laboratorio de Sensores en Fibra Óptica del Área de Instrumentación en el Instituto de Ciencias Aplicadas y Tecnología (ICAT) de la UNAM con apoyo de la DGAPA por medio del proyecto PAPIIT 104123, bajo la tutoría del Dr. Gabriel Eduardo Sandoval Romero.

REFERENCIAS

[1] Malacara D. Óptica Básica, 3rd ed. México D.F: Fondo de Cultura Económica pp. 29-52.

[2]Hecht E. Óptica, 3rd ed. Madrid: Adisson Wesley Iberoamericana 2000.

pp. 23-33.

[3] Malacara D. Óptica Básica, 3rd ed. México D.F: Fondo de Cultura Económica pp. 245-246, 254.

[4] DigiKey. Colaboración de editores de Digikey de América del norte: Cómo seleccionar y usar el módulo ESP32 con Wi-Fi/Bluetooth adecuado para una aplicación de IoT industrial. Disponible en: [Los módulos inalámbricos ESP32 simplifican el diseño IoT | DigiKey](https://www.digikey.com/es/articles/how-to-select-and-use-the-right-esp32-wi-fi-bluetooth-module) (Consultado el 7 de agosto de 2023).

[5] Andrews C.L., Optics of the Electromagnetic, 1ra ed. New Jersey: Spectrum, Prentice-Hall 1960. pp. 149-152.

[6] Hecht E. Óptica, 3rd ed. Madrid: Adisson Wesley Iberoamericana 2000.

pp. 142-149.

[7] Grant R.F. Introduction to modern optics, 2da ed. New York: Dover publication INC, 1975. pp. 63-78.