

REFRACTÓMETRO INTERFEROMÉTRICO PARA LÍQUIDOS, BASADO EN BARRIDO POR HAZ LÁSER

E. E. Alanís^o, C. C. Martínez^o, G. G. Romero¹, L. Alvarez^o, D. O. Dominguez^{o2}

^oFacultad de Ciencias Exactas – ¹Facultad de Ingeniería
Consejo de Investigación - Universidad Nacional de Salta
Buenos Aires 177- 4400- Salta – Argentina
alanise@ciunsa.edu.ar

Se propone un método interferométrico para la determinación del índice de refracción relativo de líquidos. Se describe el diseño de la celda utilizada para contener los líquidos, uno de los cuales se toma como referencia (por ejemplo, agua). La celda se coloca en el brazo objeto de un interferómetro de Mach-Zehnder. Un delgado haz láser efectúa un barrido de la celda en la dirección del gradiente de camino óptico que se establece en el interior de la misma. Este haz interfiere con el haz de referencia y las variaciones de intensidad son registradas por un fotodetector, digitalizadas y almacenadas en computadora para su posterior análisis. Se determina la fase módulo 2π de la función intensidad, aplicando el método de la transformada de Fourier. La fase desenvuelta permite determinar la diferencia de caminos ópticos y de allí el índice de refracción relativo de las sustancias. El dispositivo se utilizó para medir el índice de refracción de una solución salina, a diferentes concentraciones y temperaturas. Se comparan los resultados obtenidos con medidas realizadas en un refractómetro de Abbe.

A simple interferometric method to determine the relative refraction index of liquids is proposed. The design of the cell, used for containing liquids, one of which taken as reference (e.g. water) is also described. The cell is placed in one arm of a Mach-Zehnder interferometer and it is scanned by a thin laser beam in the direction of the optical path gradient. This beam interferes with the reference one and the intensity variations are recorded by means of a photomultiplier tube, digitized and stored in a computer for its further analysis. The interference phase modulo 2π is measured using the Fourier-Transform method. Unwrapping the 2π discontinuities, the optical path differences and the relative refraction index of the substances can be determined. The device was used to determine the refractive index of a saline solution at different concentrations and temperatures. The results are compared with measurements carried out in an Abbe's refractometer.

I. INTRODUCCIÓN

Dado que en metrología óptica se emplea luz coherente, por lo general láser, es necesario disponer de datos del índice de refracción para la longitud de onda correspondiente. Estos datos no siempre están disponibles por lo que contar con un método alternativo a los refractómetros convencionales, resulta conveniente. Los métodos interferométricos se basan en la interferencia de dos haces coherentes que han seguido distintas trayectorias, uno pasando a través de una sustancia de referencia (haz de referencia) y el otro a través de la sustancia de interés (haz objeto). Entre los dispositivos interferométricos clásicos podemos mencionar el refractómetro de Rayleigh, diseñado para la medición de índice de refracción en gases como así también pequeñas diferencias de índice de refracción en sólidos y líquidos. Los haces en su camino pasan a través de dos tubos en los que se colocan las sustancias de referencia y de prueba respectivamente. Cuando se trata de gases, los dos tubos son previamente evacuados. A continuación en uno de ellos se va admitiendo lentamente el gas en estudio hasta que la presión alcanza el valor de interés. De esta forma el camino óptico va incrementándose en forma continua desde el valor de referencia y es posible contar el número de franjas a medida que éstas van desplazándose por el campo de visión. Este procedimiento no es aplicable

cuando se trata de líquidos, ya que al introducir el mismo en uno de los tubos, se produce una discontinuidad en el camino óptico y no puede determinarse directamente el número de franjas correspondiente. Para superar este inconveniente es necesario el uso de láminas compensadoras y una calibración previa del instrumento, pero sólo es posible medir pequeñas diferencias en el índice de refracción.

En este trabajo se propone un método para medir el índice de refracción de líquidos, mediante un dispositivo que permite una variación continua del camino óptico y la determinación automática del número de franjas de interferencia. El método es similar al propuesto en un trabajo anterior⁽¹⁾, donde se utilizó para determinar el coeficiente de difusión en sustancias transparentes. En lo que sigue se describe el dispositivo experimental y el método propuesto. Finalmente se consignan los valores del índice de refracción de soluciones de NaCl-H₂O, para distintas concentraciones y temperaturas, obtenidos por este método.

II. DISPOSITIVO EXPERIMENTAL

Un esquema del dispositivo experimental se muestra en la Figura 1. Se trata de un interferómetro de Mach-Zehnder, que usa como fuente de iluminación un láser de He-Ne ($\lambda = 632.8$ nm), en cuyo brazo objeto se coloca la celda que contiene los líquidos. En la Figura 2 se muestra

²Becario CIUNSA

un esquema de la celda utilizada. Consiste en un recipiente de caras plano-paralelas transparentes, cuyo interior es dividido en dos compartimentos estancos, por medio de una delgada lámina transparente, en los que se colocan las sustancias de referencia y de prueba respectivamente. La forma que se le da a la interfaz es tal que el espesor de cada compartimiento varía continua y progresivamente desde cero hasta un valor preestablecido, dado por el espesor uniforme de la celda, siendo complementarios uno del otro. La celda va montada sobre un dispositivo trasladador que la desplaza a velocidad constante, perpendicularmente al haz objeto. De esta manera, en el curso de una experiencia, el haz objeto recorre la celda desde un extremo al otro variando su camino óptico como consecuencia de la variación de espesor recorrido en cada líquido. El haz objeto atraviesa la celda, perpendicularmente a sus caras, habiéndose reducido previamente su sección transversal por medio de la lente L_2 , lo que se hace para aumentar la resolución espacial de la medida, como se discutirá más adelante.

El haz objeto interfiere con el haz de referencia a la salida del interferómetro, produciendo un patrón de franjas circulares concéntricas. Esto se logra colocando la lente L_1 en el haz de referencia, como se muestra en la Figura 1, de manera que los dos haces son divergentes y concéntricos a la salida del interferómetro. En el centro del patrón de franjas se coloca un fotodetector para registrar las variaciones de intensidad producidas por las variaciones de fase del haz objeto. La señal es digitalizada y almacenada en computadora.

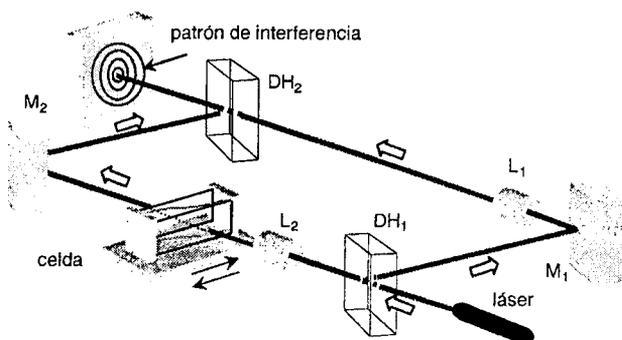


Figura 1: Esquema del interferómetro. M_1, M_2 , espejos; DH_1, DH_2 , divisores de haz; L_1, L_2 , lentes convergentes.

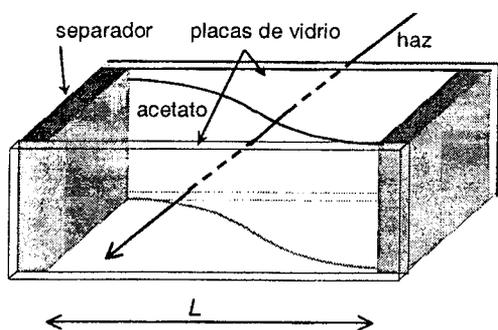


Figura 2: Esquema de la celda (no a escala).

III. PRINCIPIO

Al principio de una experiencia, el haz objeto atraviesa la celda por uno de sus extremos donde, por construcción, se encuentra, por ejemplo, el líquido de referencia. Éste es, usualmente, agua destilada. El camino óptico recorrido por el haz dentro de la celda es $s_a = n_a d$, donde n_a es el índice de refracción del agua y d el espesor de la celda.

A medida que el haz va barriendo la celda, progresivamente disminuye su trayectoria en el agua y aumenta en el líquido de prueba. Al llegar al otro extremo, el espesor de agua es nulo y el del líquido incógnita es máximo, igual a d . En esas condiciones, el camino óptico recorrido por el haz dentro de la celda vale, $s = n d$, donde n es el índice de refracción a determinar.

La diferencia de caminos ópticos es entonces:

$$\Delta s = (n - n_a) d \quad (1)$$

Supóngase que en el centro del patrón de interferencia hay una franja brillante. Cada vez que la diferencia de caminos ópticos, dada por la ecuación anterior, varía en una longitud de onda, la fase del haz objeto varía en 2π y la franja central volverá a ser brillante. En función de la longitud de onda, la ecuación (1) puede reescribirse:

$$\Delta s = (n - n_a) d = N(L) \lambda \quad (2)$$

donde λ es la longitud de onda, $N(L)$ el número de franjas que aparecieron en el centro del diagrama y L la longitud de la celda. De la ecuación (2) puede determinarse el índice de refracción de la sustancia de prueba. Para ello es necesario procesar la señal del fotodetector para determinar $N(L)$.

IV. PROCESAMIENTO DE LA SEÑAL

La Figura 3 muestra un intervalo de una señal típica obtenida por el fotomultiplicador. Si bien es posible contar el número de franjas directamente de la gráfica, se obtienen mejores resultados y ahorro de trabajo automatizando el proceso.

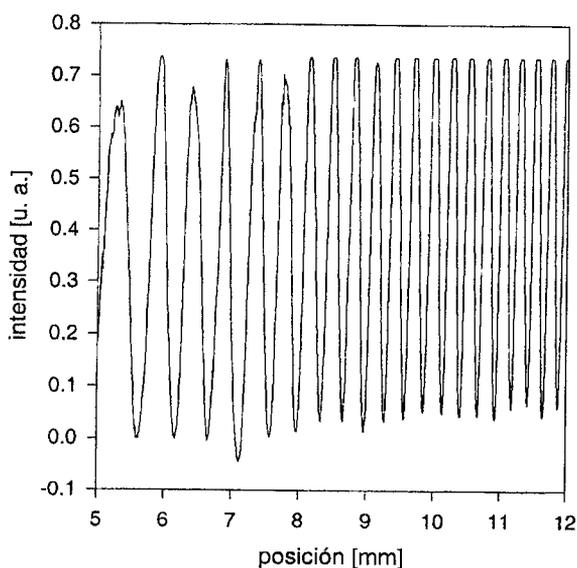


Figura 3: Intervalo de una señal típica del fotodetector.

Para ello se comienza calculando la Transformada de Fourier de la señal, obteniéndose su espectro. Se aplica un filtro pasa-banda de manera tal de eliminar el ruido, correspondiente a las altas frecuencias, y el orden cero, que representa la componente continua. El filtro también elimina la región correspondiente a las frecuencias negativas. Al efectuar la Transformada Inversa de Fourier, se obtiene una función compleja a partir de la cual se calcula la fase como el arco tangente del cociente entre la parte imaginaria y la parte real. Esta es la denominada fase módulo 2π , ya que la función está definida en el intervalo $(-\pi, \pi)$.

Mediante un algoritmo adecuado⁽²⁾ se calcula la fase continua, que se muestra en la Figura 4.

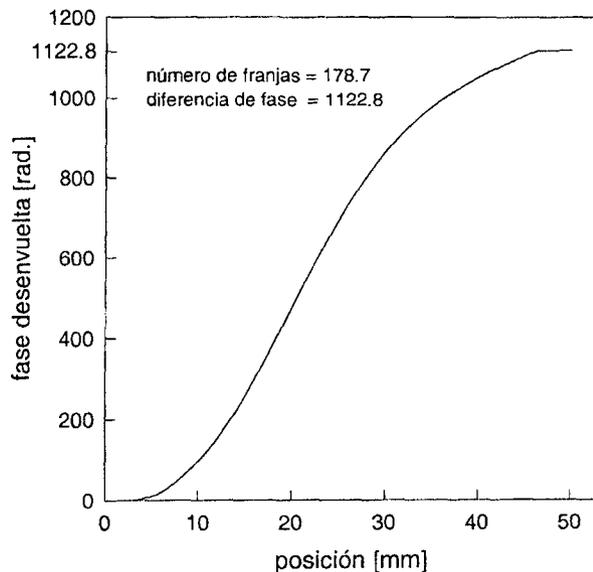


Figura 4: Fase continua, correspondiente a una experiencia típica.

Esta función representa las variaciones de fase del haz objeto en función de la posición a lo largo de la celda. Varía desde cero, para $x=0$, hasta $2\pi N(L)$ para $x=L$. A partir de este valor se determina el valor $N(L)$ a utilizar en la ecuación (2).

V. CORRECCIÓN DE ERRORES DE FASE

Errores debidos a la celda

Este método interferométrico no compensa los errores de fase introducidos por las ventanas de la celda, como lo harían los métodos holográficos. Los errores de fase pueden deberse ya sea a irregularidades en el espesor de los vidrios o falta de paralelismo entre las ventanas de entrada y salida. Los primeros en general se distribuyen aleatoriamente y, en el promedio, no contribuyen al error si los vidrios de las ventanas son de buena calidad. La falta de paralelismo entre ellos puede compensarse de la siguiente manera: la celda se llena con el líquido de referencia en ambos compartimientos y mediante el procedimiento explicado anteriormente se miden las variaciones espurias de fase. Este valor de fase debe ser sustraído de la distribución de fase obtenida en la

experiencia. Para la celda construida en el laboratorio, la señal obtenida por el detector es la que se muestra en la Figura 5. Se desprende de la figura que la variación de espesor a lo largo de la celda es menor que 3λ , es decir, $\sim 2 \mu\text{m}$. Un estudio detallado muestra que para esta celda en particular estas variaciones se compensan, dando una diferencia *cuasi* nula entre un extremo y otro.

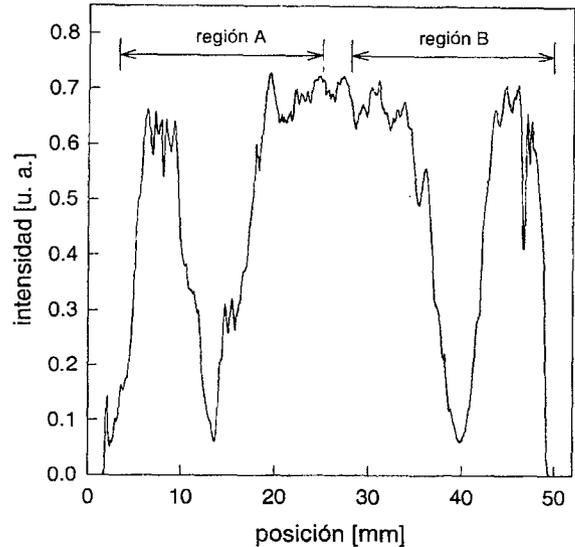


Figura 5: Variaciones de fase de la celda. En la región A aparecen franjas en el centro del diagrama y en la región B desaparecen. El error de fase se compensa.

Errores de refracción

Otra fuente de error proviene de los efectos de refracción en la interfaz de los líquidos, la cual no es normal al haz incidente. El máximo error se produce en la zona central de la celda donde la deflexión del haz es máxima. Teniendo en cuenta las refracciones en la interfaz y en la ventana de salida, para la solución de mayor concentración (ver sección VI), se ha calculado una deflexión máxima de 3,5 mrad en la ventana del detector, la cual subtende un ángulo de 0,9 mrad respecto de la fase, que el centro del patrón de franjas circulares siempre incide en la ventana del detector. Esta condición se logra ajustando la posición del punto focal de la lente L_2 en el punto medio del espesor de la celda. Mirando desde el detector, hay una posición donde la imagen virtual de la fuente puntual objeto permanece sobre el eje óptico del sistema, a pesar de la deflexión del haz, es decir, alineada con la fuente puntual de referencia, producida por la lente L_1 . Por lo tanto, no ocurre corrimiento de las franjas, lo que constituye una importante ventaja de la geometría de iluminación particular propuesta aquí.

Resolución de las franjas

Para resolver adecuadamente una franja de interferencia, la distancia Δx a lo largo de la celda, en que se produce una variación de camino óptico de una longitud de onda, debe ser mucho mayor que el diámetro, D , del haz objeto dentro de la celda, es decir:

$$\frac{ds}{dx} \ll \frac{\lambda}{D} \quad (3)$$

El gradiente de camino óptico depende de la geometría de la celda y del índice de refracción de la sustancia de prueba. Con la geometría de iluminación propuesta se logra disminuir la sección efectiva del haz dentro de la celda⁽¹⁾, ubicando la lente L₂ en la posición indicada anteriormente, de manera que no se observa submuestreo de la señal debido a esta causa.

VI. RESULTADOS EXPERIMENTALES

Se ha determinado el índice de refracción de soluciones de NaCl-H₂O a distintas concentraciones y temperaturas. Los resultados se muestran en la tabla 1.

TABLA 1: INDICE DE REFRACCION DE SOLUCIONES DE NaCl-H₂O ($\lambda = 632,8 \text{ nm}$).

Temperatura [°C]	Concentración			
	1 M	2 M	3 M	4 M
14,7	1,3422			
15,1		1,3511		
15,3			1,3595	
15,5				1,3681
17,9				1,3678
18		1,3506	1,3590	
18,1	1,3419			
22	1,3417	1,3497		
23,6	1,3416			
23,7		1,3498	1,3587	1,3673

Para comparación, el índice de refracción de estas soluciones ha sido medido a distintas temperaturas en un refractómetro Bausch&Lomb, ABBE-3L con una apreciación de $\pm 0,0001$, correspondiente a la longitud de onda del Na. El error estimado del método propuesto es del orden de $\pm 0,0002$. A efectos comparativos, se muestra en la Figura 6 una gráfica donde se consignan las medidas obtenidas por ambos instrumentos. Los valores del índice de refracción del agua, en función de la temperatura y para $\lambda = 632,8 \text{ nm}$, fueron obtenidos usando una aproximación cuadrática de Dobbins y Peck, de datos obtenidos por Tilton y Taylor⁽³⁾,

$$n - 1,3331733 = -(1,936 T + 0,1699 T^2) 10^{-5} \quad (4)$$

donde T se mide en grados Celsius.

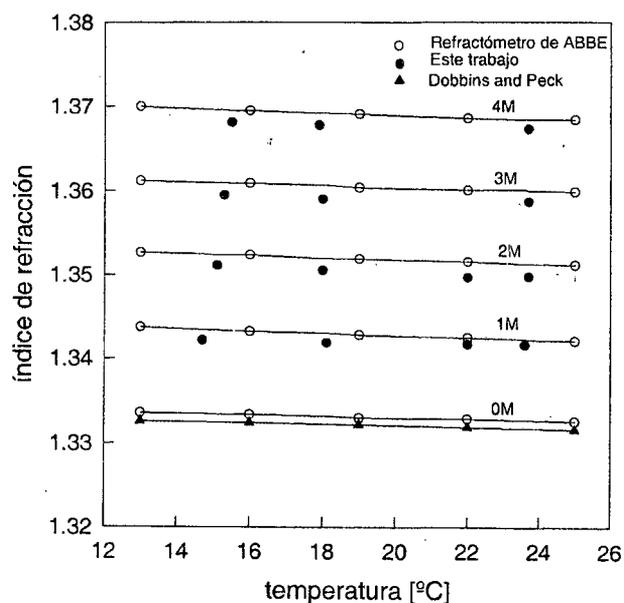


Figura 6: Valores del índice de refracción para soluciones de NaCl-H₂O, a distintas temperaturas y concentraciones. (●), este trabajo. (▲), ecuación 4. (O), refractómetro de Abbe.

VII. CONCLUSIONES

Los valores obtenidos con el método propuesto están afectados de un error del orden de 10^{-4} . Se han comparado con medidas realizadas en un refractómetro de Abbe, de apreciación similar, observándose valores del índice de refracción consistentemente menores para la longitud de onda utilizada.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por la Fac. de Cs. Exactas y la Fac. de Ingeniería de la UNSa.

Referencias

1. E. E. Alanís, G. G. Romero, C. C. Martínez. Op. Eng. Vol. 39 (3), pp 744 - 750, march 2000.
2. T. Kreis. J. Opt. Soc. Am. A 3, (6) 847-855 (1986).
3. C. Vest. Fringe Interpretation in "Holographic Interferometry". pp 365, Wiley, New York, (1979).