

**Caracterización del haz del láser He-Ne con el interferómetro de Michelson y el programa tracker****Characterization of the He-Ne laser beam with the Michelson interferometer and tracker program**Anicia Giménez Vega<sup>1,\*</sup>, Tomás Rolón<sup>1</sup> & Marcos Franco<sup>1</sup><sup>1</sup>Universidad Nacional de Asunción, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Departamento de Física, San Lorenzo, Paraguay.\*Autor correspondiente: [anigime19@gmail.com](mailto:anigime19@gmail.com).

**Resumen:** En este trabajo de investigación se reporta la caracterización de un láser de He-Ne usando un interferómetro de Michelson y el programa tracker, donde también fueron analizados los fundamentos teóricos y el funcionamiento del láser gaseoso y del interferómetro. Fueron encontrados valores para la longitud de onda usando el interferómetro por dos métodos, con una medición manual y con una técnica de análisis del video de la medición con el programa tracker, encontrándose errores relativos menores al 1 % respecto a valor de referencia de 632,8 nm. Con un método simple asistido por el programa tracker fue medida la longitud de coherencia o componente temporal de la coherencia, para la cual no se encontró un valor de referencia con este método para su comparación. Para el ensanchamiento del haz, con mediciones del diámetro del haz a diferentes distancias se encontró un valor de ángulo promedio mayor que el del valor teórico calculado. Los resultados de las mediciones muestran el estado de funcionamiento relativamente bueno del láser antiguo, de más de 50 años de uso en las prácticas docentes de la carrera de Física.

**Palabras clave:** láser, He-Ne, interferómetro, tracker, coherencia, metaestable.

**Abstract:** In this research work, the characterization of a He-Ne laser using a Michelson interferometer and the tracker program is reported, where the theoretical foundations and the operation of the gaseous laser and the interferometer were also analyzed. Values for the wavelength were found using the interferometer by two methods, with a manual measurement and with a video analysis technique of the measurement with the tracker program, finding relative errors less than 1% with respect to the reference value of 632, 8 nm. With a simple method assisted by the tracker program, the length of coherence or temporal component of coherence was measured, for which a reference value was not found with this method for comparison. For the broadening of the beam, with measurements of the diameter of the beam at different distances an average angle value was found greater than that of the theoretical calculated value. The results of the measurements show the relatively good working condition of the old laser, with more than 50 years of use in the teaching practices of the Physics career.

**Key words:** laser, He-Ne, interferometer, tracker, coherence, metastable.

**Introducción**

El término LASER (Light Amplification by Stimulate Emission of Radiation), que significa amplificación de la luz por emisión estimulada de radiación, es un fenómeno de la mecánica cuántica, donde se genera un haz luminoso monocromático (de una sola frecuencia), coherente y muy intenso durante la excitación, eléctrica o térmica entre otros, de los átomos, moléculas o iones de un material para producir la emisión estimulada de radiación. Los láseres tienen muchas aplicaciones en diferentes áreas, como en procesamiento de materiales, construcción, medicina, comunicaciones, producción de energía, usos militares, soldadura, topografía y

como herramienta en muchas áreas de investigación científica. Existen numerosos tipos de láseres comercialmente disponibles, que cubren en tamaño desde dispositivos que pueden estar en la punta de un dedo y otros que llenan grandes edificios. Todos los dispositivos láser tienen ciertas características básicas en común y han tenido un gran impacto en las importantes ramas de la ciencia y sus aplicaciones tecnológicas. Debido a que cada aplicación requiere diferentes condiciones, es fundamental caracterizar el láser para conocer y cuantificar sus parámetros (Hernández *et al.*, 2008).

Actualmente el Departamento de Física de la Facultad de Ciencias Exactas y Naturales ha

Recibido: 10/09/2021      Aceptado: 12/09/2022



adquirido a través de proyectos financiados por el CONACYT, un equipo de interferometría de moteado laser o speckle y un sistema de holografía, además cuenta con tres láseres de He-Ne para uso en la docencia. Por todo esto, es importante realizar trabajos de investigación y trabajos de grado con los equipos disponibles, que apoyen a la formación de especialistas, al entrenamiento del personal de laboratorio y a estudiantes avanzados de la carrera de Física.

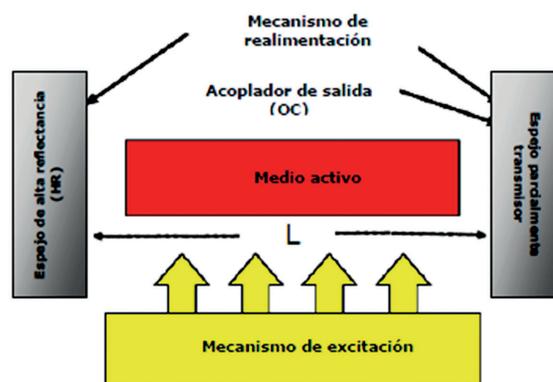
El interferómetro de Michelson es uno de los dispositivos más conocidos e históricamente importantes, con el que fue demostrada la constancia de la velocidad de la luz, aunque su objetivo inicial fue demostrar la existencia del éter, y necesita utilizar una fuente de luz monocromática. Usando un láser como fuente de luz, el interferómetro es un instrumento capaz de medir con mucha precisión pequeños desplazamientos o distancias, como las longitudes de ondas de fuentes de luz (González, 2009).

En los laboratorios de física normalmente se usa el equipo láser para demostraciones simples y rápidas, como las propiedades de la luz entre ellas la reflexión y refracción, ángulo crítico e incluso para medición de la longitud de onda en forma rápida con una red de refracción. Sin embargo, no se realizan mediciones más exactas de los parámetros del láser, como ser la frecuencia, la coherencia y la divergencia del haz.

En este trabajo se estudia en forma teórica y experimental la constitución, el funcionamiento y algunas características de un láser de He-Ne, midiendo la longitud de onda y la coherencia con un interferómetro de Michelson, y estimando el ensanchamiento del haz a través de mediciones geométricas del haz.

### Materiales y Métodos

Los materiales principales utilizados fueron el Láser de He-Ne y el Interferómetro de Michelson y Morley con los accesorios como lentes de enfoque y pantalla. También fue utilizado el programa informático Tracker y un móvil celular para la filmación de la medición.



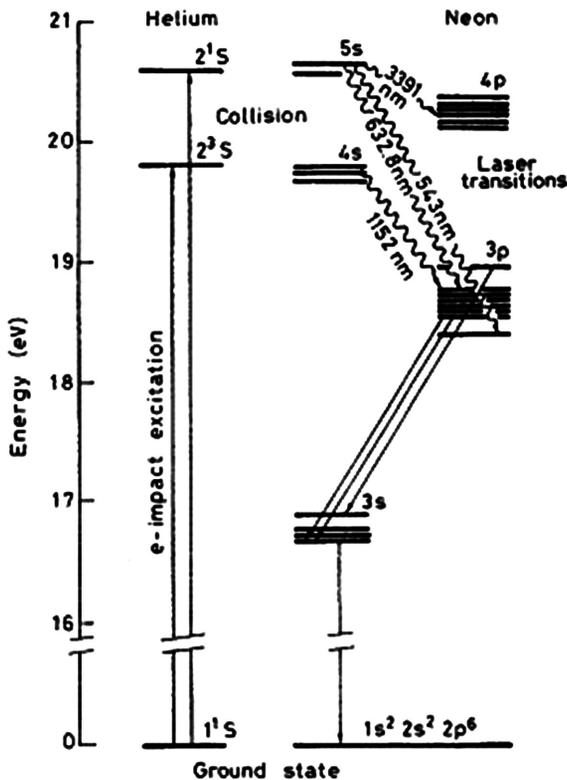
**Figura 1.** Elementos de un láser: medio activo, mecanismo de excitación y cavidad resonante de longitud  $L$  (Según Marín, 2006).

El montaje utilizado para la medición de la longitud de onda y de la coherencia se muestra en la Fig. 1, constituido por el interferómetro de Michelson, el láser de He-Ne y una lente divergente colocada entre ellos, todos sobre un banco óptico, además de una pantalla para proyectar el haz de interferencia resultante.

### El láser He-Ne

Para generar el haz láser es necesario un dispositivo donde exista un conjunto de átomos o medio activo, en estado excitado por medio de una fuente de bombeo, y una cavidad resonante formado por dos espejos, como se ve en la Fig. 1 (Alonso *et al.*; 2010). En este proceso, los electrones elevados a un nivel electrónico inestable espontáneamente decaen a un estado menor que es metaestable, de donde los electrones no pueden retornar rápidamente (espontáneamente) a su nivel de energía fundamental (basal), por lo tanto, es posible acumular gran cantidad de átomos excitado obteniendo una inversión de población (Rodríguez W. *et al.*; 2016)

El láser He-Ne es de 4 niveles y puede generar haces en muchas longitudes de onda, siendo el más popular el de color rojo de 632,8 nm, después está el verde de 543 nm y en el infrarrojo están el de 1,15  $\mu\text{m}$  y el de 3,39  $\mu\text{m}$ , como se puede ver en el diagrama de niveles de energía en la Fig. 2. También se observa que los niveles  $2^3\text{S}$  y  $2^1\text{S}$  del He son metaestables (tienen tiempo de vida grande),



**Figura 2.** Niveles de energía relevantes del láser He-Ne. (Según Svelto, 1998).

los átomos de He en estos estados demuestran ser muy eficientes para bombear niveles 4s y 5s del Ne por transferencia de energía resonante. Como el bombeo es continuo por la aplicación del alto voltaje, se genera el haz en forma continua. La mezcla de gases es 10-15 % de gas Neón y, 85-90% de gas Helio, siendo la proporción de 1:6 a 1:10. La presión del gas es alrededor de 0.01 atmósferas. En los extremos del tubo, los electrodos están conectados a una fuente de potencia de alto voltaje DC de 2000 (Svelto, 1998).

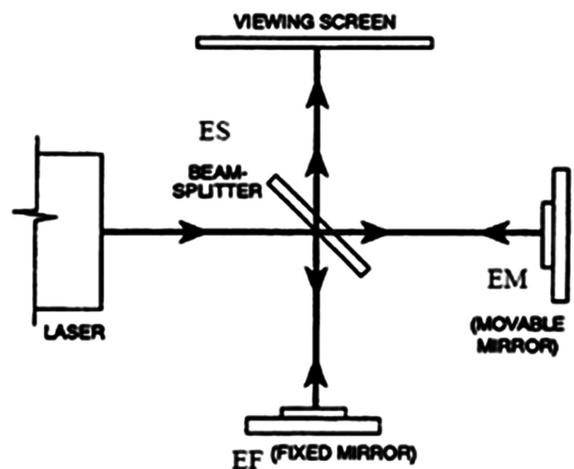
### El interferómetro de Michelson

La principal ventaja del Interferómetro de Michelson sobre las primitivas técnicas de producir interferencias es que los dos haces están ampliamente separados, pudiéndose variar la diferencia de recorrido moviendo uno de los espejos en la trayectoria de uno de los haces (Duarte *et al.*, 2009).

Observando el esquema del interferómetro (Fig. 3), un rayo procedente del láser es desdoblado mediante un espejo semitransparente ES (espejo que refleja sólo el 50% de la luz incidente, dejando pasar el otro 50%). Uno de los rayos se refleja en el espejo fijo EF, y el otro en el espejo móvil EM, que puede ser desplazado por un micrómetro. Ambos rayos vuelven a juntarse en la pantalla, sobre la que vemos la superposición o interferencia de los dos haces de luz, que cuando están en fase producen las franjas de interferencias, formadas por anillos concéntricos alternativamente claros y oscuros. Moviendo el espejo EM con el micrómetro, es posible variar el camino óptico de ese haz, para que su fase coincida con la del otro haz cuando llega a la pantalla (García, 2004).

### Principios del video o imágenes en movimiento

La proyección continua de imágenes (fotogramas), con pequeños cambios sobre una pantalla dan al espectador la impresión de una única imagen en movimiento, a partir del fenómeno llamado persistencia retiniana. Debido a la persistencia retiniana se retiene por un instante la imagen en el cerebro, tras su percepción a través del ojo después de que esta haya desaparecido, enlazándola con la siguiente y así sucesivamente percibiendo una serie visual de imágenes continuas, a una velocidad de 24 imágenes por segundo, que es la cadencia por la



**Figura 3.** Esquema del interferómetro de Michelson (Según García, 2004).

que percibimos el movimiento natural y realista de las personas y objetos de la filmación o video. Por encima o por debajo de esta cadencia obtenemos distorsiones rítmicas que son usadas para obtener ciertos efectos de aceleración o ralentización de la imagen. Todo esto nos indica que los videos están formados por imágenes, fotogramas o cuadros que pueden ser visualizadas con programas específicos, como el Tracker (Velduque, 2011).

La metodología utilizada se divide en tres etapas como se detalla a continuación.

### Medición de la longitud de onda

Se realizó usando dos métodos, uno en forma manual y otro a través del análisis de la filmación de la imagen resultante de la interferencia sobre la pantalla durante la medición.

En el montaje de medición, el interferómetro de Michelson se ubicó a 30 cm de la fuente laser, colocando entre ellos una lente divergente sujeta con un porta lente, todos montados en un banco óptico y la salida del haz era proyectada a la pantalla a 42cm, donde se observaba la imagen de interferencia; como se ve en la Fig. 4, constituida por bandas claras y oscuras.

La medición en forma manual se inicia ubicando el indicador del micrómetro en una posición en que aparece en la pantalla las franjas de interferencia, la que se registra como posición inicial. Se desplaza el micrómetro desapareciendo las franjas hasta que vuelven a aparecer como estaban inicialmente, lo que corresponde al desplazamiento de una  $\lambda$ , y este proceso se repite contando la cantidad de  $m$  veces que se quiera, desplazando  $m$  longitudes de ondas. Entonces se registra como posición final el valor indicado por el micrómetro. A medida que aumenta el valor de  $m$ , disminuye la incertidumbre en la medición de la longitud de onda, que se calcula usando la ecuación:

$$\lambda = \frac{2d_m}{m} \quad (1)$$

donde  $d_m$  es la distancia que se desplaza EM con el micrómetro y  $m$  es la cantidad de  $\lambda$  contenidas

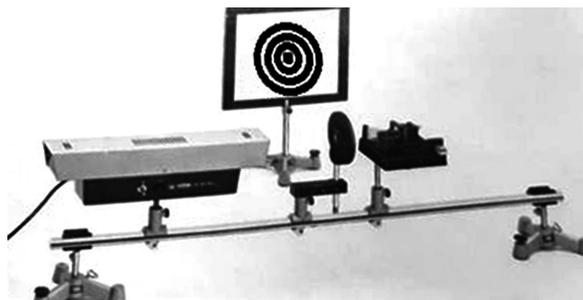


Figura 4. Imagen del experimento para calcular la longitud de onda (Según el Manual de PHYWE).

en ese desplazamiento (García, 2004).

Para el método de análisis del video, se realizó la filmación de la medición empezando con el indicador del micrómetro en una posición en que aparecen las franjas de interferencia, posición que se registra, de la misma manera que en el método manual y después se va moviendo el micrómetro en forma uniforme, lenta y continua pasando por las posiciones en que aparecen las franjas la cantidad veces deseadas, terminando cuando aparecen las franjas y registrando dicha posición. La diferencia de ambos registros proporciona el desplazamiento total de la cantidad de longitudes de ondas contenidas. Posteriormente el video es analizado con el programa tracker, en cámara lenta o haciendo correr en forma manual, donde se cuenta la cantidad de zonas con franjas que aparecen durante todo el desplazamiento del espejo móvil del interferómetro por medio del micrómetro.

### Medición de la coherencia

La coherencia de una fuente láser es una cantidad compleja que determina la calidad de la radiación, la cual es fundamental en tareas de alta precisión, como en el campo de la medicina, por ejemplo, en la cirugía de ojos, entre muchos más (Muñoz et al., 2002).

Se midió la coherencia, en este caso la componente temporal, por medio del interferómetro de Michelson determinando la relación del tiempo en que se mantiene la franja de interferencia respecto al período. Esto se consigue midiendo la distancia que se puede mover el

espejo móvil del interferómetro sin perder el patrón de interferencia (Adjimann y Kunik, 2001). Como este desplazamiento es muy pequeño, la determinación se hace con ayuda del video similar a la de la medición de la longitud de onda, donde se hace el análisis dentro del desplazamiento de una  $\lambda$  con el programa tracker, en las zonas próximas antes y después de obtener las franjas de interferencias. La coherencia se determina analizando la imagen cuadro por cuadro, contando la cantidad de cuadros en que se mantienen las franjas de interferencias y el número total de cuadros en el período, usando la ecuación:

$$\ell_c = \left( \frac{\text{N}^\circ \text{ de cuadros que mantien en las franjas}}{\text{N}^\circ \text{ cuadros en una } \lambda} \right) \times \lambda \text{ (nm)} \quad (2)$$

La condición para la validez de este método es que el desplazamiento del micrómetro sea uniforme durante todo el periodo de medición y para una mejor estadística se analizaron numerosos periodos.

### Medición del ensanchamiento del haz laser

El ángulo de ensanchamiento se determinó a través de mediciones del diámetro del haz láser a diferentes distancias, proyectándolo sobre una regla milimetrada hasta 10 m, a partir del gráfico  $D_x$  vs.  $L_x$  por el método de regresión lineal, donde  $D_x$  es el diámetro del haz a la distancia  $L_x$ . En la ecuación de la recta resultante de los datos,  $y = A x + B$ ,  $A$  es la tangente del ángulo de ensanchamiento, a partir del cual se obtiene:

$$\tan \theta_M = A \quad y \quad \theta_M = \arctg(A) \quad (3)$$

El ángulo teórico se calculó con la relación, para pequeños ángulos, resultante al resolver la ecuación de ondas para una cavidad resonante de un láser, donde se encuentra una relación entre la divergencia angular y la anchura mínima del haz (Dorronsoro, 1995):

$$\text{sen } \theta_T \approx \theta_T \approx 2,44 \frac{\lambda}{D} \quad (4)$$

donde  $D$  es el diámetro del haz a la salida del tubo láser y  $\lambda$  la longitud de onda del haz láser.

El diámetro teórico se determina por la ecuación:

$$D_x = D + L_x \text{tg}(\theta_T) \quad (5)$$

donde  $D$  es el diámetro del haz a la salida del tubo láser y  $L_x$  es la distancia de medición.

### Resultados y discusión

Se presentan a continuación los resultados obtenidos en la medición de la longitud de onda, de la coherencia y de la divergencia del haz láser y la comparación con los valores de referencias.

#### Para la longitud de onda

Con el método manual (Tabla 1), se encontró un valor promedio para la longitud de onda de  $630,1 \pm 24$ , haciendo mediciones con desplazamientos de 10, 25, 30, 50 y 54 longitudes de ondas. El error relativo encontrado fue de 0,4 % respecto al valor teórico 632.8 nm.

En la medición con el programa tracker (Tabla 2), se encontró para la longitud de onda un valor de  $638,0 \pm 19$ , analizando en 5 mediciones des-

**Tabla 1.** Longitud de onda obtenida con desplazamientos de m longitudes de ondas en forma manual.

Nº de medida	m	$\Delta d$ Medida (nm)	2 x $\Delta d$ Medida (nm)	$\lambda$ Medida (nm)	$\lambda$ Teórica (nm)
1	10	0,003	6000	600,0	632,8
2	25	0,0078	15600	624,0	
3	30	0,0101	20200	673,3	
4	50	0,0155	31000	620,0	
5	54	0,0171	34200	633,3	
$\lambda_{\text{Promedio}}$ (nm)				630,1	+ 24
Error Relativo (%)				0,4	

**Tabla 2.** Longitud de onda, analizado con el programa tracker.

N° de medida	m	$\Delta d_{\text{Medida}} \text{ (nm)}$	$2 \times \Delta d_{\text{Medida}} \text{ (nm)}$	$\lambda_{\text{Medida}} \text{ (nm)}$	$\lambda_{\text{Teórica}} \text{ (nm)}$
1	32	0,01	20000	625,0	632,8
2	33	0,011	22000	666,7	
3	38	0,012	24000	631,6	
4	39	0,012	24000	615,4	
5	43	0,014	28000	651,2	
$\lambda_{\text{Promedio}} \text{ (nm)}$				638,0	+ 19
<b>Error Relativo (%)</b>				0,8	

plazamientos de 32, 33, 38, 39 y 43 longitudes de ondas. El error relativo respecto al valor teórico fue de 0,8 %.

### Para la longitud de coherencia

Fueron realizadas 4 mediciones (Tabla 3), filmando la operación de desplazamiento de varias longitudes de ondas del espejo móvil EM del interferómetro con el micrómetro, de forma más lenta y uniforme que en la medición de la longitud de onda. De cada medición fueron elegidas y analizadas 2 desplazamientos de una  $\lambda$ , obteniéndose la longitud de coherencia respectiva. Se encontró un valor promedio para la longitud de coherencia de  $62,1 \pm 5$  nm, que representa aproximadamente el 10 % de la longitud de onda. Los errores en esta medición provienen de

la falta de uniformidad en la velocidad de desplazamiento del micrómetro, pudiendo existir diferencias en la cantidad de cuadros en cada media longitud de onda, y por la precisión del micrómetro, que en este caso no es alta porque es para demostraciones docentes. En este sentido, el tornillo debe contar con un paso de 1 micrómetro y no de 10, como comúnmente se utiliza, ya que cuando se mueve el tornillo se producen movimientos involuntarios que entorpecen la visión de la interferencia y hace muy difícil visualizarla (Adjimann y Kunik, 2001).

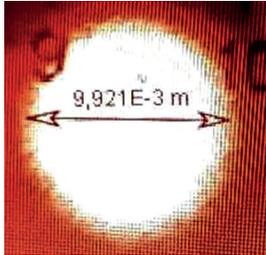
### Para el ensanchamiento del haz laser

En las mediciones del ensanchamiento del haz láser a diferentes distancias se introducen incertidumbres en el valor del diámetro, debido al contorno difuso

**Tabla 3.** Datos obtenidos en las observaciones de los videos de las mediciones de  $\lambda$  con el programa Tracker y cálculos de la longitud de coherencia.

Medición N°	N° de Cuadros en una longitud de onda	N° de Cuadros consecutivos con Franjas	Longitud de coherencia (nm) ( $\lambda = 632,8$ nm)
	$Nc\lambda$	NCF	Lc
1	19	2	66,6
	18	2	70,3
2	21	2	60,3
	20	2	63,3
3	21	2	60,3
	21	2	60,3
4	20	2	63,3
	24	2	52,7
$Lc_{\text{Promedio}} \text{ (nm)}$			$62,1 \pm 5$

**Tabla 4.** Diámetros del haz láser medidos y calculados en forma teórica, a diferentes distancias. Además, se presenta la imagen con el diámetro indicado por el programa Tracker.

L (m)	D <sub>Medido</sub> (cm)	D <sub>Teórico</sub> (cm)	Imagen del haz láser
0	0,2	0,2	 <p>Visualizada con el programa Tracker</p>
1	0,583	0,277	
2	0,758	0,354	
3	0,893	0,432	
4	0,896	0,509	
5	0,992	0,586	
6	1,301	0,663	
7	1,56	0,740	
8	1,898	0,818	
9	1,986	0,895	
10	2,019	0,972	

de la imagen, que se ve en la Tabla 4, y donde se observa el valor calculado con el programa Tracker.

El ángulo teórico calculado con la ecuación (4) fue:

$$\theta = 2,44 \frac{632,8 \times 10^{-9}}{0,002} = 7,72 \times 10^{-4} \text{ radianes} = 0,044 \text{ grados}$$

siendo D = 0,002 m, diámetro del haz láser al salir del equipo (distancia L = 0).

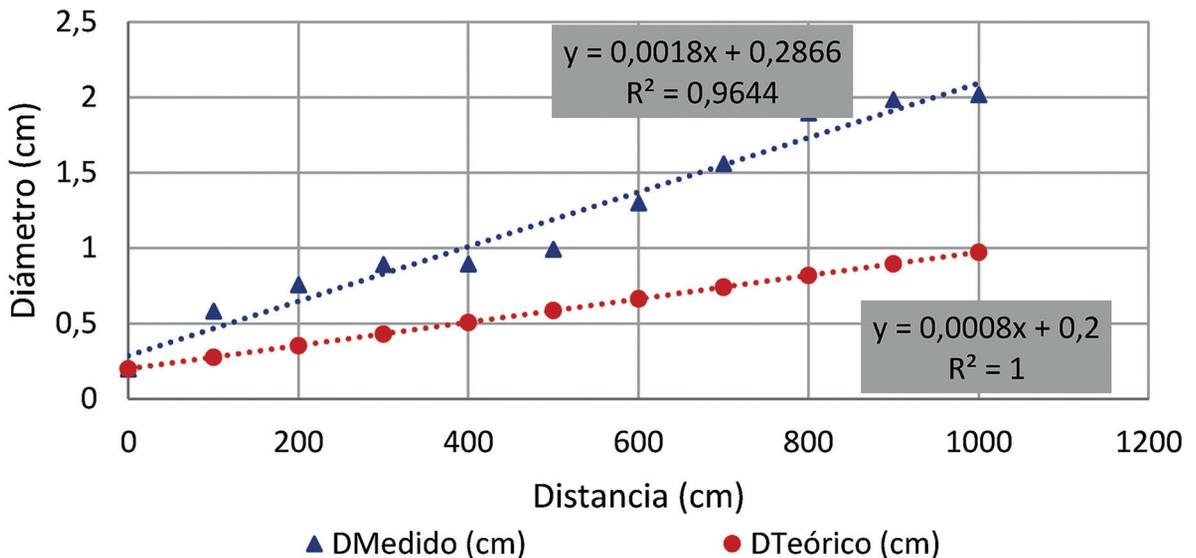
El valor del ángulo de ensanchamiento obtenido

con las mediciones, usando el método de regresión lineal como se muestra en la Fig. 5, fue:

$$\tan \theta = 0,0018 \rightarrow \theta = \tan^{-1}(0,0018) = 0,10 \text{ grados}$$

### Conclusiones

Se pudo realizar la caracterización del láser He-Ne con el interferómetro de Michelson y el programa Tracker, midiendo valores de la longitud de onda, la coherencia y el ensanchamiento del haz.



**Figura 5.** Gráficos de la medición del ensanchamiento del haz láser y del ensanchamiento teórico calculado.

En la medición de la longitud de onda por los dos métodos fueron encontrados valores con errores relativos menores que el 1 % respecto al valor teórico de referencia de 632,8 nm.

La medición de la longitud de coherencia con la asistencia del programa tracker, que es la componente temporal, dio  $62,1 \pm 5$  nm para esta longitud de onda de 632.8 nm, que equivale a un valor del 10 % de la longitud de onda, no encontrándose un valor de referencia para su comparación. Para obtener un valor correcto de la longitud de coherencia es necesario automatizar el movimiento del micrómetro del interferómetro de Michelson.

Para el ensanchamiento del haz láser, en la medición se encontró un ángulo mayor que el del valor teórico calculado.

**Conflictos de interés:** Los autores declaran no tener conflictos de interés.

**Contribución de los autores:** Los autores contribuyeron manera equitativa en la elaboración de este artículo.

### Agradecimientos

Un agradecimiento especial a todos los encargados de laboratorio del Departamento de Física, por permitir el uso de los materiales e instrumentos y por el apoyo permanente.

### Literatura citada

- Adjimann, A. & Kunik, A. (2001). *Aplicaciones del Interferómetro de Michelson*. Buenos Aires: Universidad de Buenos Aires. 3 pp. [Consulted: 15.iii.2022]. <[https://www.fisicarecreativa.com/informes/infor\\_mod/interfero\\_michelson\\_2kl.pdf](https://www.fisicarecreativa.com/informes/infor_mod/interfero_michelson_2kl.pdf)>.
- Alonso, B., Borrego, R., Hernández, C., Pérez, J.A. & Romero, C. (2010). *El Láser, la luz de nuestro tiempo*. Salamanca: OSAL. 199 pp.
- Dorronsoro M. (1996). *La tecnología láser fundamentos, aplicación y tendencia*. Madrid: McGraw-Hill Interamericana. Xii + 262 pp.
- Duarte, J., Fernández, F. & Moreno, M. (2009). Técnicas de medida para pequeños desplazamientos. *Dyna*, 76(158): 167–176.
- García, M. (2004). *Interferencias por división de amplitud*. Almería: Universidad de Almería. 8 pp. [Consulted: 15.iii.2022]. <<https://w3.ual.es/~mjgarcia/interferencias.pdf>>.
- González, Á. (2009). *El viento del éter lumífero y el experimento de Michelson-Morley*. Investigación y Ciencia. [Consulted: 15.iii.2022]. <<https://www.investigacionyciencia.es/blogs/fisica-y-quimica/10/posts/el-viento-del-ter-lumifero-y-el-experimento-de-michelson-morley-10195>>.
- Hernández, A., Orellana, A., González B. M. (2008). La terapia láser de baja potencia en la medicina cubana. *Revista Cubana de Medicina General Integral*, 24(2): 1–10.
- Muñoz, J., Cabrera E., Montilla, J., León J. y A. (2002). Caracterización y monitoreo de un haz láser de baja potencia. *Revista Colombiana de Física*, 34(2): 507–511.
- Marín, L.D. (2006). *Introducción al láser y su aplicación práctica en la óptica moderna*. San Pedro Montes de Oca: Universidad de Costa Rica. [Consulted: 15.iii.2022]. <<https://cientec.or.cr/archivo/exploraciones/ponencias2006/LuisDiegoMarin.pdf>>.
- Rodríguez, W., García, P. & Fajardo, A. (2016). Aplicaciones de técnicas espectroscópicas para el análisis de suelos. *Revista Facultad de Ciencias Básicas*, 12(2): 228–251.
- Svelto, O. (1998). *Principles of lasers*. (5th ed.). New York: Springer. xxi + 620 pp.
- Carreras, C. & Yuste, M. (2011). Fundamentos físicos del láser. *100cias@uned (nueva época)*, 3: 65–72.
- Velduque, M. J. (2011). Historia del cine I: principio técnico y perceptivo de la imagen en movimiento. Desarrollo del lenguaje cinematográfico. *Revista digital de Historia y Ciencias Sociales*, 199: 1–13.