

Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar, Ciudad de México, México.
ISSN 2707-2207 / ISSN 2707-2215 (en línea), enero-febrero 2025,
Volumen 9, Número 1.

https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v9i1

MEDICIÓN DE PARÁMETROS CARACTERÍSTICOS DE UN LÁSER CONTINUÓ CW

**MEASUREMENTS OF CHARACTERISTIC PARAMETERS OF A
CW LASER**

Beatriz Adriana Martínez Irvias

Universidad Autónoma de Coahuila, Facultad de Ciencias Físico Matemáticas.

Emma Vianey García Ramírez

Consejo Nacional de Ciencia, Humanidades y Tecnología, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla,
Facultad de Ciencias Físico Matemáticas.

Doralycia Carranza Zuñiga

Instituto Nacional de Astrofísica Óptica y Electrónica. Óptica

Athziri Zúniga Méndez

Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Facultad de Ciencias Físico Matemáticas.

Raúl Ochoa Valiente

Universidad Autónoma de Coahuila, Facultad de Ciencias Físico Matemáticas.

Medición de parámetros característicos de un láser continuo CW

Beatriz Adriana Martínez Irvias¹

beatrizirivas@uadec.edu.mx

<https://orcid.org/0000-0003-4857-2254>

Universidad Autónoma de Coahuila, Facultad de Ciencias Físico Matemáticas.
Saltillo Coahuila, México

Emma Vianey García Ramírez

egarcia@conacyt.mx

<https://orcid.org/0000-0002-7630-1833>

Consejo Nacional de Ciencia, Humanidades y Tecnología, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Facultad de Ciencias Físico Matemáticas.
Puebla, Pue, México

Doralycia Carranza Zuñiga

dora.carranza@inaoe.mx

<https://orcid.org/0009-0007-1829-2629>

Instituto Nacional de Astrofísica Óptica y Electrónica. Óptica
Tonatzintla, Pue, México

Athziri Zúniga Méndez

fernicath@gmail.com

<https://orcid.org/0009-0009-1026-5743>

Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Facultad de Ciencias Físico Matemáticas.
Puebla, Pue, México

Raúl Ochoa Valiente

raul.ochoa.valiente@uadec.edu.mx

<https://orcid.org/0000-0001-7965-0740>

Universidad Autónoma de Coahuila, Facultad de Ciencias Físico Matemáticas.
Saltillo Coahuila, México

RESUMEN

Actualmente, el láser (pulsado o continuo) es usado en diferentes investigaciones desde la explicación en ciencia básica hasta su uso en ciencia de frontera en nuevas tecnologías. Por esta razón se requiere caracterizarlos para conocer sus parámetros y sus especificaciones aplicando diferentes técnicas de caracterización del haz láser. En este trabajo se presentan resultados experimentales de parámetros característicos, de un haz Gaussiano de un haz láser continuo de iones de Argón de longitud de onda 514 nm, tales como: ancho del haz $W(z)$, cintura del haz W_0 y la distancia de Rayleigh z_0 , estos valores se obtienen mediante el montaje de la técnica de la navaja. Los resultados obtenidos se pueden utilizar para implementar la técnica de Z-scan y determinar parámetros no lineales de medios no lineales.

Palabras clave: láser, haz gaussiano, ancho del haz

¹ Autor principal.

Correspondencia: beatrizirivas@uadec.edu.mx

Measurements of characteristics parameters of a CW laser

ABSTRACT

Currently, lasers (pulsed or continuous) are used in various research areas, from basic science explanations to frontier applications in new technologies. For this reason, it is necessary to characterize them to understand their parameters and specifications using different laser beam characterization techniques. In this work we present experimental results of characteristic parameters of a Gaussian beam from a continuous Argon ion laser with a wavelength of 514 nm, such as: beam width $W(z)$, beam waist W_0 , and Rayleigh range z_0 . These values are obtained by setting up the knife-edge technique. The obtained results can be used to implement the Z-scan technique and determine nonlinear parameters of nonlinear media.

Key word: laser, gaussian beam, beam width

Artículo recibido 03 enero 2025

Aceptado para publicación: 09 febrero 2025



INTRODUCCIÓN

Uno de los dispositivos ópticos más emblemáticos, tanto en la ciencia y ciencia ficción, es el láser (Aboites, 2012). Su popularidad abarca una emblemática representación cultural y también múltiples tecnologías basadas en sus singulares propiedades. Se utiliza ya sea en la parte de información de datos o en investigación como: el comportamiento de la luz estructurada (Buono & Forbes, 2022), propiedades ópticas no lineales en materiales (Buono & Forbes, 2022; Henari, 2008), así como en la biofotónica (Bashkatov et al., 2012). El éxito de su amplio uso es gracias a la distribución de la intensidad de tipo Gaussiano, a sus propiedades únicas de propagación y a su focalización. Estas propiedades hacen del láser una herramienta esencial para aplicaciones de alta precisión y tecnología de punta.

El láser es una fuente de luz cuasi-monocromática, coherente (espacial y temporal) y direccionable, que se emite de manera continua (CW) o en forma de pulsos de luz. Su estructura se basa en tres elementos fundamentales: un medio activo, un sistema de bombeo y una cavidad resonante. El medio activo se encuentra contenido dentro de la cavidad y puede encontrarse en estado sólido, líquido o gaseoso (Svelto, 2010), lo que define la clasificación de los diversos tipos de láseres, además, la longitud de onda de la luz emitida está determinada por el medio activo y abarca gran parte del espectro electromagnético, desde el infrarrojo (Ashkin et al., 1987) hasta los rayos X (Suckewer & Jaeglé, 2009). Las dimensiones físicas son ampliamente variables ya que abarcan desde $\sim 1 \mu\text{m}$ hasta 6 km, como los empleados en estudios geodésicos (Smith et al., 2013). El haz con una distribución de intensidad Gaussiana tiene varias propiedades importantes que lo convierten en una herramienta útil en aplicaciones de alta precisión. Por ejemplo, su distribución es simétrica y concentrada en el centro, lo que implica que la mayor parte de la energía del haz se encuentra en una pequeña región, característica ideal para focalizar el haz en un punto específico, lo que es útil en aplicaciones como la cirugía. Otra propiedad es su baja divergencia angular que significa que al propagarse grandes distancias sufre poca difracción, lo que es aplicable en comunicaciones ópticas de larga distancia (Rodríguez Morales et al., 2009).

Además de conocer los elementos del láser, mencionados anteriormente, se requiere conocer la distribución de intensidad, el ancho del haz $W(z)$, la distancia de Rayleigh z_0 , y el ángulo de divergencia θ y la cintura del haz w_0 , a partir de este pueden determinarse los demás atributos, para este propósito se utiliza la técnica de la navaja (Gupta & Bhargava, 1988; Hanwell, n.d.), un método que mide cómo varía la intensidad del



haz cambia cuando se obstruye progresivamente, lo que permite calcular w_0, z_0 y otras características relacionados. El conocimiento de estos parámetros es esencial porque se utilizan en las expresiones que permiten conocer la amplitud compleja del haz es decir el campo eléctrico dependiente de la posición. A partir de la cual puede derivarse la distribución de intensidad Gaussiana del haz, fundamental para su caracterización y uso en aplicaciones prácticas.

En este trabajo se determinan los valores de w_0, z_0 y θ para un láser CW, (Modu-Laser, Stellar-Pro-Select) de iones de Argón multilínea de la marca MODULASER en el modo de propagación TEM₀₀ perfil transversal Gaussiano, para una longitud de onda de 514 nm, y potencia incidente de 15 mW, con una lente convergente de una distancia focal de 3.5 cm.

Haz gaussiano

Una onda está descrita por una función real que depende de la posición y el tiempo, llamada función de onda, está es una solución a la ecuación de onda. Por otro lado, la función de onda puede expresarse en términos de una función compleja, cuya dependencia en el espacio es llamada amplitud compleja y satisface la ecuación de Helmholtz, ecuación (2). Por otro lado, al considerar que en el haz láser las variaciones de los campos electromagnéticos son muy pequeñas en la dirección transversal comparadas con la dirección de propagación (Malacara, 2015). Se puede hacer uso de la aproximación paraxial.

Para construir una onda paraxial se inicia con un perfil de onda plana $A \exp(-ikz)$ considerándola como una onda “portadora” y modulando su amplitud de manera que dependa de la posición, así $A(\vec{r})$ es llamada envolvente compleja, así la amplitud compleja de la onda plana modulada es:

$$U(\vec{r}) = A(\vec{r}) \exp(-ikz) \quad (1)$$

Donde $A(\vec{r})$ es una función lentamente variable respecto a z , la dirección de propagación, de modo que la onda se mantenga con un frente de onda plano (Eugene Hecht, 2003).

Al sustituir la ecuación (1) en la ecuación de Helmholtz (2)

$$(\nabla^2 + k^2)U(\vec{r}) = 0 \quad (2)$$

Al aplicar la aproximación de envolvente lentamente variable $\left| \frac{\partial^2 A}{\partial z^2} \right| \ll \left| \frac{\partial A}{\partial z} \right|$.

La ecuación se reduce a la ecuación paraxial de Helmholtz

$$\nabla_T^2 A - 2ik \frac{\partial A}{\partial z} = 0 \quad (3)$$



Donde $k = \frac{2\pi}{\lambda}$, λ representa la longitud de onda, y $\nabla_T = \frac{\partial^2}{\partial^2 x} + \frac{\partial^2}{\partial^2 y}$ representa el operador laplaciano transversal.

Una solución a esta ecuación es la onda paraboloidal

$$A(r) = \frac{A_1}{z} \exp\left(-ik \frac{\rho^2}{2z}\right) \quad (4)$$

Donde $\rho = x^2 + y^2$ y A_1 es una constante.

La ecuación (4) representa una onda paraboloidal centrada en el origen, al sustituir z por $q(z) = (z - \xi)$ donde ξ es constante, se tiene

$$A(r) = \frac{A_1}{q(z)} \exp\left(-jk \frac{\rho^2}{2q(z)}\right) \quad (5)$$

Que sigue siendo una onda paraboloidal pero fuera del origen y por tanto solución a la ecuación (3). Para el caso para cuando $\xi = -iz_0$ donde $z_0 \in R$, ahora la envolvente compleja del haz Gaussiano se reescribe en términos del parámetro $q(z) = z + iz_0$ y donde z_0 es conocida como la distancia o rango de Rayleigh.

Para separar la amplitud y la fase de la envolvente compleja se definen dos nuevas funciones reales $R(z)$ y $W(z)$:

$$\frac{1}{q(z)} = \frac{1}{R(z)} - i \frac{\lambda}{\pi W^2(z)} \quad (6)$$

donde $W(z)$ es el ancho del haz, $R(z)$ el radio de curvatura del frente onda.

Sustituyendo la ecuación (6) en la ecuación (5) y usando la ecuación (1) se llega a la expresión para la amplitud compleja $U(r)$ del Haz Gaussiano:

$$U(r) = A_0 \frac{W_0}{W(z)} \exp\left[-\frac{\rho^2}{W^2(z)}\right] \exp\left[-jkz - jk \frac{\rho^2}{2R(z)} + j\zeta(z)\right] \quad (7)$$

Donde $A_0 = \frac{A_1}{jz_0}$.

PROPIEDADES DEL HAZ GAUSSIANO

Las propiedades dependen de la posición transversal ρ (ancho) y de la dirección de propagación z , como se tiene en la Tabla 1.

Tabla 1 Propiedades del haz Gaussiano

Parámetro	Ecuación
Cintura del haz	$w_0 = \left(\frac{\lambda z_0}{\pi}\right)^{\frac{1}{2}}$ (8)



Ancho del haz

$$W(z) = w_0 \left[1 + \left(\frac{z}{z_0} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (9)$$

Intensidad del haz

$$I(\rho, z) = I_0 \left[\frac{w_0}{W(z)} \right]^2 \exp \left[-\frac{2\rho^2}{W^2(z)} \right] \quad (10)$$

Radio de curvatura

$$R(z) = z \left[1 + \left(\frac{z_0}{z} \right)^2 \right] \quad (11)$$

Distancia de Rayleigh

$$z_0 = \frac{\pi w_0^2}{\lambda} \quad (12)$$

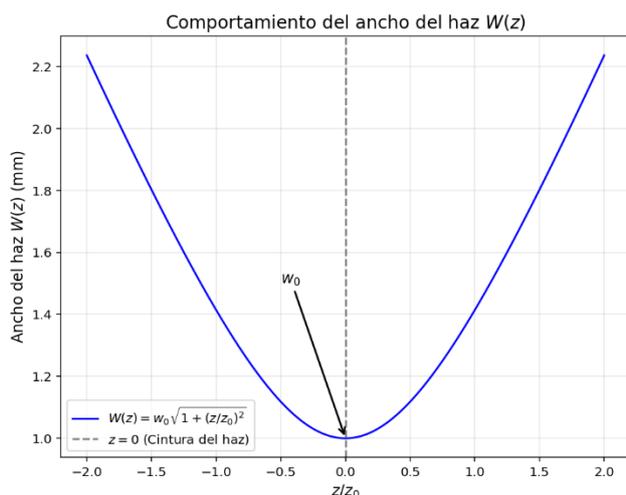
Ángulo de divergencia

$$2\theta_0 = \frac{4}{\pi} \frac{\lambda}{2w_0} \quad (13)$$

* Donde $I_0 = |A_0|^2$.

Se observa de la tabla anterior que w_0 está presente tanto de forma implícita como explícita en todos los parámetros, por lo que es importante determinarlo, La Figura 1 muestra el comportamiento del ancho del haz, ecuación (9). Para este propósito existen varias técnicas de caracterización (Arnaud et al., 1971; Kimura & Munakata, 1988), sin embargo, como se escribió al principio, nos enfocaremos en la técnica de la navaja que se explica en la siguiente sección.

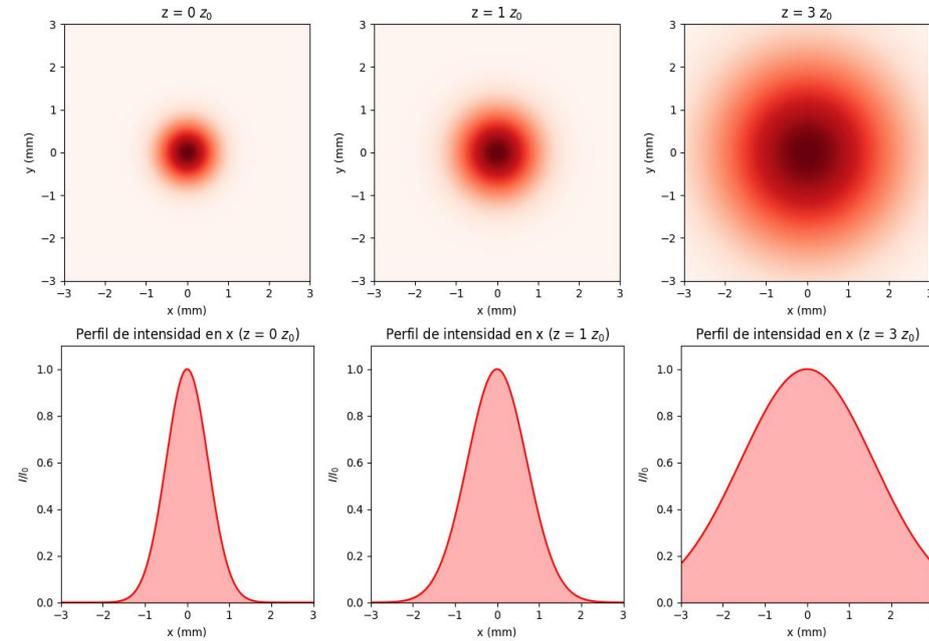
Figura 1 Comportamiento del ancho del haz $W(z)$ en función de la posición normalizada que alcanza su valor mínimo, (indicado por la flecha) en $z=0$.



El objetivo de este trabajo es obtener w_0 , obteniendo datos experimentales que sigan la tendencia de la curva mostrada en la Figura 1.

Analizando la ecuación (10) se puede observar que para cualquier valor de z la intensidad es una función Gaussiana de la distancia radial ρ , como se muestra en la figura 2.

Figura 2 Intensidad del haz normalizado como función de la distancia radial para a) $z=0$, b) $z=z_0$ y c) $z= 3 z_0$.



TÉCNICA DE CARACTERIZACIÓN

Un método ampliamente utilizado para caracterizar los parámetros del láser es la técnica de la navaja. Mediante este procedimiento experimental, se puede medir el ancho de un haz gaussiano. Este consiste en enfocar el haz con una lente convergente y colocar un objeto rectangular y afilado (navaja, de ahí el nombre) que obstruya el paso del haz sobre el eje de propagación z , como se muestra en la Figura 3.

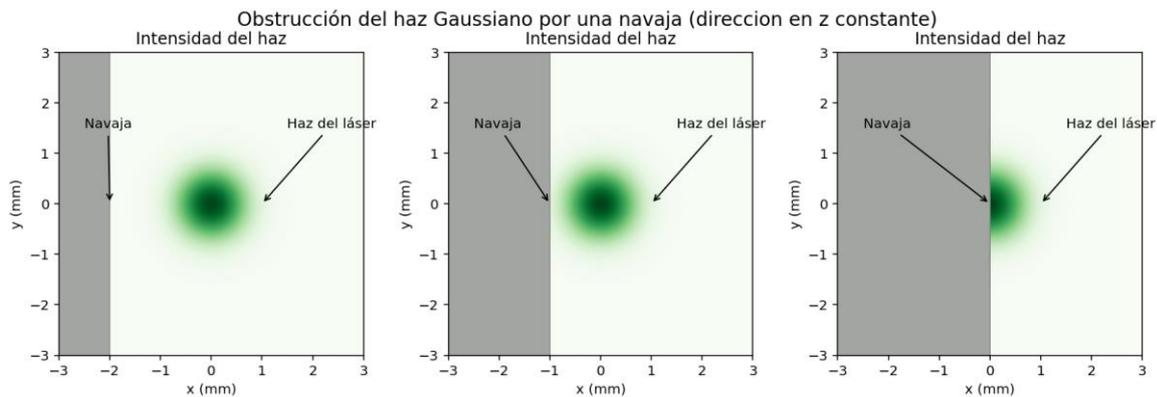
Figura 3 Esquema experimental de la técnica de la navaja.



Para distancias cercanas al punto focal se colocará la navaja de manera que bloquee el spot del haz que se encuentra en plano transversal $x - y$. Posteriormente, la navaja se desplaza gradualmente, descubriendo el haz de manera controlada y permitiendo el paso de una fracción creciente de la intensidad, como se muestra en la Figura 4. En cada posición z de la navaja, se registra el cambio en la potencia detectada, la cual será

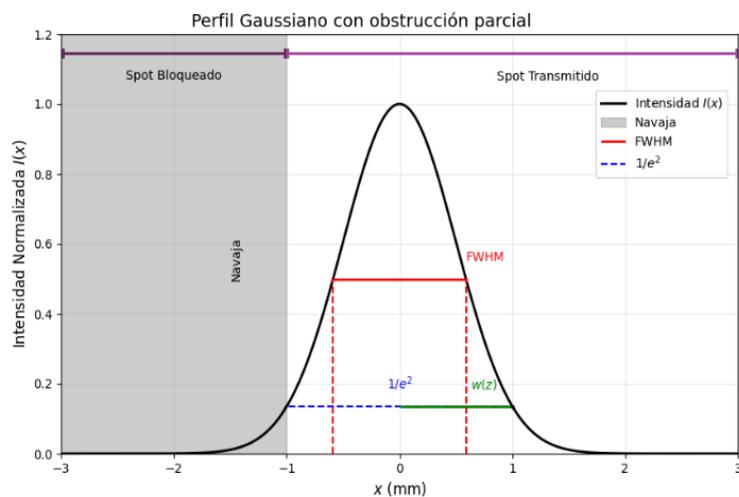
máxima siempre que la navaja no esté bloqueando el haz y será mínima cuando la navaja bloquee por completo el haz.

Figura 4 Obstrucción transversal del spot



A medida que la navaja cubre o descubre el haz, se detectan cambios en la intensidad correspondientes a la señal generada por la variación de la potencia debido al proceso de eclipsar el haz gaussiano, como se muestra en la Figura 5.

Figura 5 Perfil de intensidad eclipsado por la navaja.



La potencia evidentemente también sufre variaciones a medida que la navaja cubre o descubre el haz. Los cambios se detectan mediante el fotodetector y la curva resultante se muestra en la Figura 6.

$$P_N = \frac{P_x}{P} = \frac{1}{2} \left(1 - \operatorname{erf} \left(\frac{\sqrt{2}x}{W(z)} \right) \right) \quad (19)$$

Como la ecuación (18) se encuentra centrada en $x = 0$, es conveniente utilizar una función centrada en un punto arbitrario a .

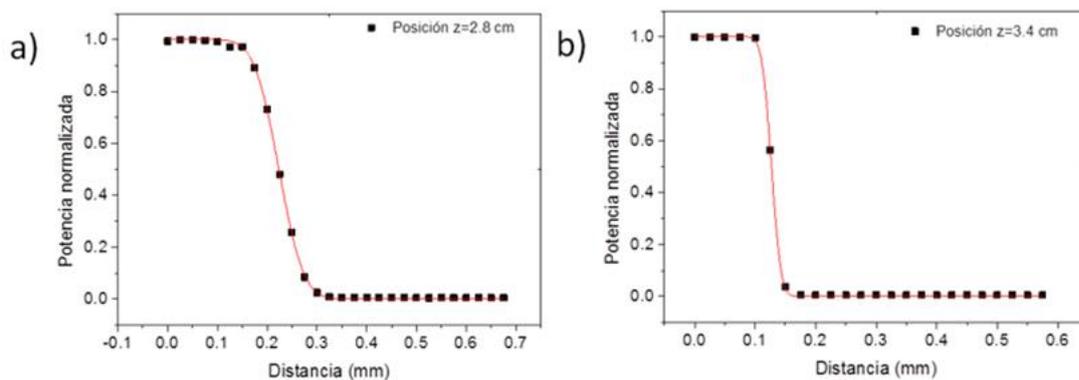
$$P_N = \frac{1}{2} \left(1 - \operatorname{erf} \left(\frac{\sqrt{2}(x-a)}{W(z)} \right) \right) \quad (20)$$

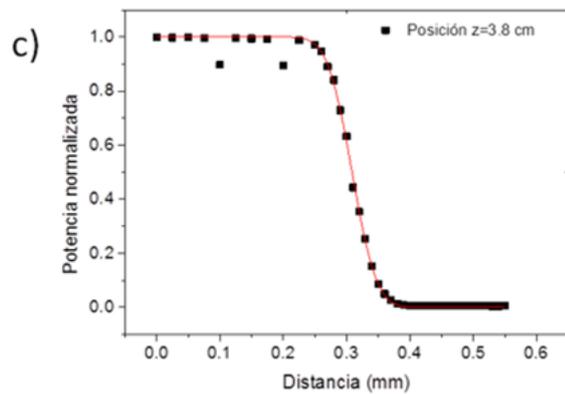
Para cada barrido de la navaja los resultados obtenidos se reproducen numéricamente con la ecuación (19) para obtener el valor de $W(z)$. Los valores obtenidos para el ancho del haz en cada posición de la navaja se grafican y ajustan a un polinomio de segundo orden con el objetivo de encontrar el ancho mínimo w_0 .

DESARROLLO EXPERIMENTAL Y RESULTADOS

Se implementó el arreglo experimental mostrado en la Figura 3, usando un láser de Argón para la longitud de onda $\lambda = 514 \text{ nm}$ para determinar el w_0 generado por una lente de distancia focal de $f = 35 \text{ mm}$. Se realizaron diferentes barridos transversales de la navaja para diferentes posiciones en z de esta, medidas a partir de la posición de la lente y figura 7 se presentan algunas de las curvas obtenidas para diferentes posiciones a lo largo del eje de propagación z .

Figura 7 Resultados experimentales (▪) obtenidos para diferentes z sobre el eje de propagación: a) $z = 2.8 \text{ cm}$, b) $z = 3.4 \text{ cm}$ y c) $z = 3.8 \text{ cm}$, resultados numéricos a partir de la ecuación (20).





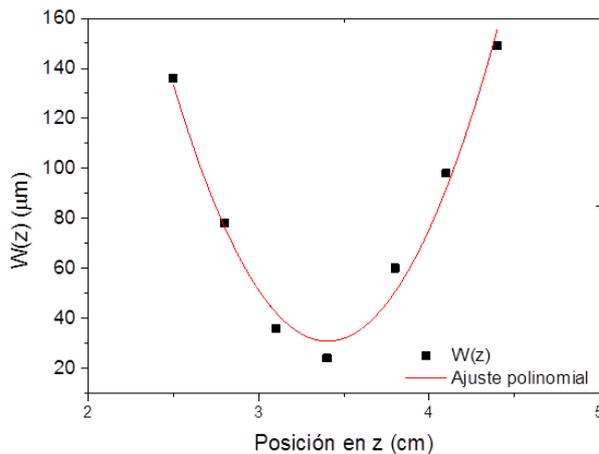
En la Tabla 2 se muestran los resultados obtenidos para el ancho del haz $W(z)$,

Tabla 2. Ancho $W(z)$ para diferentes posiciones de la navaja

Posición en z (cm)	$W(z)$ (μm)
2.5	136
2.8	78
3.1	36
3.4	24
3.8	60
4.1	98
4.4	149

Los datos de la Tabla 2 se grafican y se ajustan a un polinomio de segundo orden para obtener el valor mínimo w_0

Figura 8 Ajuste polinomial de los resultados obtenidos para $W(z)$.



El análisis de los datos de la Figura 8 arroja un valor mínimo $W_0 = 30.7 \pm 2 \mu\text{m}$. Este valor resulta de gran utilidad para obtener z_0 , en la ecuación (12), la cual es fundamental para conocer el rango de la distancia en la que la W_0 se mantiene constante y que es muy importante considerar en la propagación para los experimentos al usar el haz gaussiano. Cabe mencionar que W_0 dependerá de la distancia focal de la lente usada.

Con las ecuaciones que se presentaron en la Tabla 1, se pueden calcular los valores de z_0 y θ_0 . Los valores son $z_0 = 5.76 \text{ mm}$ y $\theta_0 = 5.3 \times 10^{-3} \text{ rad}$.

CONCLUSIONES

Una de las técnicas más sencillas de implementar, para caracterizar un láser de onda continua, en un laboratorio de óptica, es la técnica de la navaja, con ella puede determinarse el W_0 del haz después de ser enfocado por una lente convergente, por lo que W_0 dependerá de la lente empleada en el arreglo experimental. Este valor es de importancia ya que con este se pueden determinar parámetros como: z_0 y θ_0 .

De los datos obtenidos para las diferentes posiciones de la navaja en función de la intensidad medida por el detector y su análisis por medio de la función error, se calcularon los valores para W_0 , z_0 y θ_0 , estos valores son útiles para el análisis de resultados obtenidos en diferentes experimentos que van desde la generación de haces adifraccionales hasta la caracterización no lineal de diferentes materiales.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aboites, V. (2012). *El láser* (3rd ed.). Fondo de cultura económica.
- Arnaud, J. A., Hubbard, W. M., Mandeville, G. D., de la Clavière, B., Franke, E. A., & Franke, J. M. (1971). Technique for Fast Measurement of Gaussian Laser Beam Parameters. *Applied Optics*, 10(12), 2775. <https://doi.org/10.1364/AO.10.002775>
- Ashkin, A., Dziedzic, J. M., & Yamane, T. (1987). Optical trapping and manipulation of single cells using infrared laser beams. *Nature*, 330(6150), 769–771. <https://doi.org/10.1038/330769a0>
- Bashkatov, A. N., Priezhev, A. V., & Tuchin, V. V. (2012). Laser technologies in biophotonics. *Quantum Electronics*, 42(5), 379–379. <https://doi.org/10.1070/QE2012v042n05ABEH014904>
- Buono, W. T., & Forbes, A. (2022). Nonlinear optics with structured light. In *Opto-Electronic Advances* (Vol. 5, Issue 6). Chinese Academy of Sciences. <https://doi.org/10.29026/oea.2022.210174>
- Eugene Hecht. (2003). *Óptica* (3rd ed.).
- Gupta, P. K., & Bhargava, S. (1988). An experiment with Gaussian laser beams. *American Journal of Physics*, 56(6), 563–564. <https://doi.org/10.1119/1.15555>
- Hanwell, A. E. (n.d.). *Smgle mode Ribbon Lens Optics and LaserTechnology Write with career details to.*
- Henari, F. Z. (2008). Optical nonlinearity in hydrogenated amorphous silicon–selenium film. *Optics Communications*, 281(23), 5894–5897. <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2008.08.051>
- Kimura, S., & Munakata, C. (1988). Measurement of a Gaussian laser beam spot size using a boundary diffraction wave. *Applied Optics*, 27(1), 84. <https://doi.org/10.1364/AO.27.000084>
- Malacara, D. (2015). *Óptica básica* (Tercera).
- Rodriguez Morales, G., Sánchez Cruz, F., & Martínez Martínez, S. (2009). Ingeniería de haces láser: Propiedades, manipulación y aplicaciones. *Ingenierías*, XII(44), 1–23.
- Smith, D. E., Kolenkiewicz, R., & Dunn, P. J. (2013). *Geodetic Studies by Laser Ranging to Satellites* (pp. 187–196). <https://doi.org/10.1029/GM015p0187>
- Suckewer, S., & Jaeglé, P. (2009). X-Ray laser: past, present, and future. *Laser Physics Letters*, 6(6), 411–436. <https://doi.org/10.1002/lapl.200910023>
- Svelto, O. (2010). *Principles of Lasers* (Fifth). Springer US. <https://doi.org/10.1007/978-1-4419-1302-9>

