

Construcción de un perfilador láser portable mediante la adaptación de una webcam al microordenador *Raspberry Pi*.

Leidy Eraso¹, John Suárez²

Departamento de Física, Universidad de los Andes

¹lk.eraso@uniandes.edu.co, ²jf.suarez@uniandes.edu.co

Se construyó un perfilador láser de bajo costo mediante la adaptación de una webcam al microprocesador Raspberry pi 3. El perfilador analiza la fotografía de un haz láser que incide sobre el sensor de la cámara y determina los parámetros de su patrón de intensidad, permitiendo así encontrar la cintura del haz y otros parámetros que se obtienen a partir de ésta. En principio se hizo una calibración de la cámara para hallar la conversión de píxeles (px) a milímetros (mm), esto se logró mediante el análisis de un patrón de difracción de un láser de 633 nm de longitud de onda producido por una doble rendija con 0.15mm de separación y se encontró un factor de conversión de 0.0093mm/px. Para determinar el buen funcionamiento del perfilador se hicieron mediciones de la cintura del haz láser de HeNe de Thorlabs HRP005S del laboratorio de óptica con el Beam Master-Coherent con el cual se obtuvo un valor de $w_o = (0.58 \pm 0.01)mm$ en el eje horizontal y $w_o = (0.53 \pm 0.03)mm$ en el eje vertical, resultados que fueron comparados con los obtenidos mediante el perfilador construido.

I. INTRODUCCIÓN

La palabra láser proviene de las iniciales L.A.S.E.R. cuyo significado es la frase inglesa *light amplification by stimulated emission of radiation*, es decir, amplificación de luz por emisión estimulada de radiación. Este mecanismo se utiliza para generar luz coherente tanto temporal como espacialmente, lo que es altamente aprovechado en los laboratorios. Determinar sus características (forma, cintura, divergencia) es muy importante para el experimentador pues le permite identificar cual se adapta mejor a las exigencias del experimento y como se puede optimizar su uso, por ejemplo, en óptica cuántica se requiere conocer la cintura del haz para acoplarla a una fibra óptica o a una fuente SPDC (Spontaneous parametric down-conversion) para la producción de fotones enredados.

Muchos de los sistemas láser utilizados en los laboratorios son de tipo Gaussiano, y resultan de resolver las ecuaciones de Maxwell sin fuentes (ecuación de Helmholtz) en aproximación paraxial, es decir, considerando que la onda es altamente direccionada, pues se consideran pequeñas variaciones transversales del campo electromagnético. En este caso el patrón de intensidad del haz (figura 1) a una posición z dada tiene forma de una campana de Gauss:

$$I(\rho, z) = I_0 \left[\frac{W_0}{W(z)} \right]^2 e^{\left[-\frac{2\rho^2}{W(z)^2} \right]}, \quad (1)$$

donde $W(z)$ representa el radio del haz medido a 13.5% de intensidad, y en ese caso representa 2 desviaciones estándar de la distribución, I_0 es la máxima intensidad del haz y $\rho = \sqrt{x^2 + y^2}$. $W(z)$ se puede escribir como:

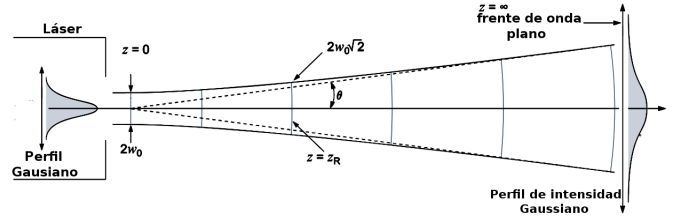


FIG. 1. Perfil de un haz gaussiano (Imagen tomada de [1])

$$W(z) = W_0 \sqrt{1 + \left(\frac{z}{z_R} \right)^2}. \quad (2)$$

donde W_0 se denomina la cintura del haz y corresponde al valor mínimo de W . Por otro lado z_R se conoce como el rango Rayleigh y comprende la región de mínima desviación del haz, el cual depende también de λ la longitud de onda de la luz:

$$z_R = \frac{\pi W_0^2}{\lambda}. \quad (3)$$

Si el haz se observa en campo lejano se observará como un cono de luz, y en ese caso el ángulo de apertura del cono representa la divergencia del haz:

$$\theta = \frac{\lambda}{\pi W_0}. \quad (4)$$

Se observa entonces que conociendo la cintura del haz gaussiano es posible determinar otros parámetros relevantes que lo caracterizan. Para este trabajo generalmente se hace uso de perfiladores de haces láser comerciales, como el Beam Master-Coherent (BMC). Sin embargo estos dispositivos tienen costos elevados, aunque hay alternativas como el mostrado en artículo

“Smartphone laser beam spatial profiler”[2], que fue tomando como base. En éste trabajo se construyó un perfilador portable y de bajo presupuesto, basado en la adaptación de una webcam a un Raspberry pi que permite encontrar la cintura del haz, mediante el análisis de su patrón de intensidad medido a una distancia determinada de la fuente láser.

II. METODOLOGÍA

El dispositivo construido (Figura 2) consta de una cámara web (eSenses con 800x600 de resolución y sensor CMOS) y filtros de densidad neutra que permiten atenuar la intensidad del haz de tal manera que no se sature la cámara, ésta va acoplada al micro-procesador Raspberry Pi3. Estos dispositivos fueron ensamblados con piezas elaboradas usando la tecnología de impresión 3D del laboratorio de óptica cuántica.

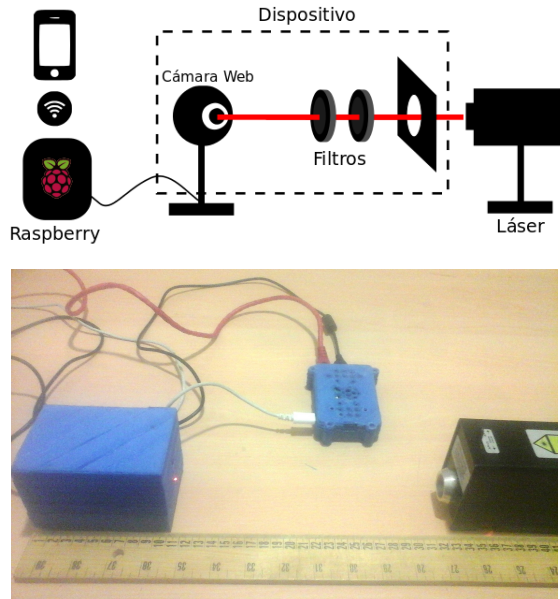


FIG. 2. (a) Esquema del montaje óptico. (b) Montaje Final.

Su funcionamiento se basa en un código desarrollado por nosotros en Python 2.7 *BeamProfiler (SE)* el cual se puede encontrar en GitHub[3] y consta de 3 etapas:

En la primera etapa, la cámara fotografía directamente el haz láser, previamente atenuado mediante filtros de densidad neutra. Si se requiere se hace una toma inicial sin láser para determinar el ruido presente en la medición. En la segunda etapa, el programa transforma la imagen a una matriz de intensidad, elimina el ruido, y es normalizada. Se hacen 2 cortes uno vertical y otro horizontal sobre el centro de los puntos de mayor intensidad de la imagen y estos datos se ajustan a patrones gaussianos. Esto permite encontrar el

diámetro del perfil de intensidad de la fotografía a una determinada distancia. Finalmente en la tercera etapa al registrar varias fotografías a diferentes distancias el dispositivo permite hacer un ajuste acorde a la ecuación 2 entre los anchos de las gaussianas y las posiciones donde se midió para cada corte, y de esta manera encontrar la cintura del haz y la posición respecto a la salida del láser. Cabe notar que esta última etapa no la realiza en BMC por lo tanto a nuestro dispositivo se le ha gregado una funcionalidad adicional.

En la figura 3 se muestra el entorno que se le ha diseñado al software de medida de nuestro perfilador, aquí se han rotulado las diferentes etapas como 1 2 y 3. Se puede observar que la interfaz es amigable al usuario y además durante la etapa 3 se muestra el ajuste de forma gráfica.

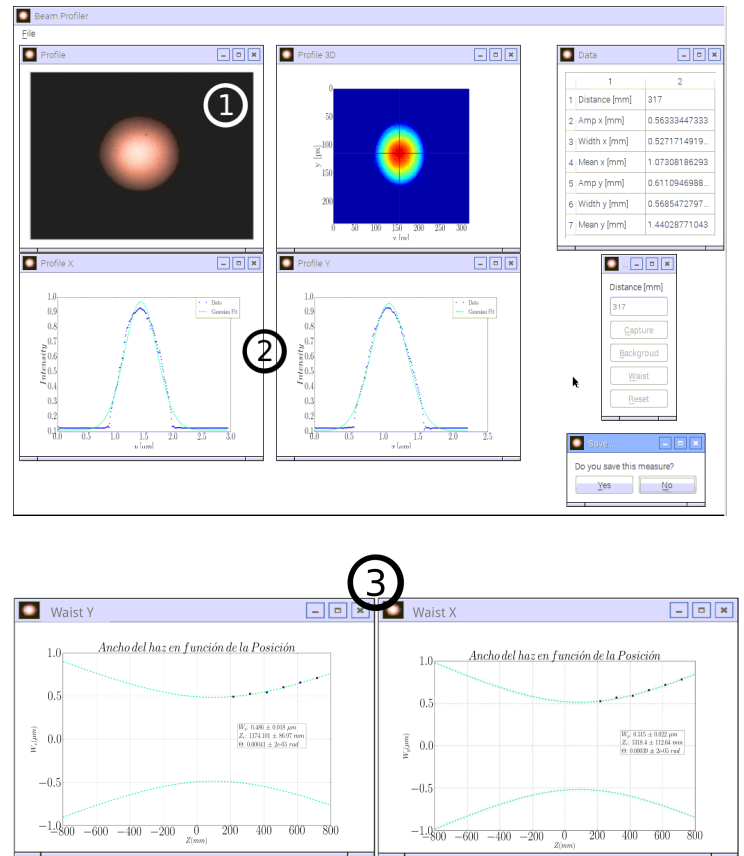


FIG. 3. Screenshot del software *BeamProfiler-SE* diseñado por nosotros.

Todo esto se lleva a cabo en la Raspberry Pi a la cual se puede acceder mediante un computador, un celular o una tablet que se encuentren en red.

III. ANÁLISIS DE DATOS

A. Calibración

Para que la cámara funcionara de acuerdo a los propósitos del trabajo se encontró el factor de conversión de px a mm . Para esto se fotografió el patrón de difracción de un haz láser de HeNe de $632nm$ producido por una doble rendija de $0.15 mm$ de separación. Se comparó la separación entre los máximos observada en la fotografía (h) y la real (h_r) obtenida por la geometría de la configuración [4] (tabla I) y se ajustaron linealmente (fig 4).

$L \pm 1(mm)$	$h_r \pm 0.008(mm)$	$h_c(px)$
157	0.662	91
100	0.422	56
200	0.844	105
250	1.055	127
300	1.266	148
350	1.477	173

TABLA I. Datos para encontrar el factor de conversión de px a mm

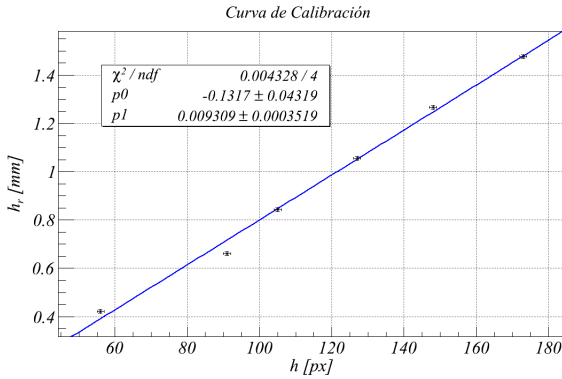


FIG. 4. Curva de calibración lineal de la forma ($h_r = p_1 h + p_0$) para obtener el factor de conversión de píxeles (px) a milímetros (mm). Donde p_1 representa la pendiente y p_0 el punto de corte.

De esta manera se obtuvo la relación de calibración para la cámara de:

$$h_r(mm) = (0.0093 \pm 0.0003)(mm/px)h(px) - (0.13 \pm 0.04)(mm) \quad (5)$$

B. Medida de la cintura del láser de HeNe.

Para garantizar el buen funcionamiento del dispositivo construido se hicieron mediciones para encontrar la cintura del láser de HeNe de Thorlabs HRP005S con el perfilador BMC, con el fin de compararlas con las medidas del perfilador construido. Los datos obtenidos

con BMC se muestran en la tabla II, éstos se graficaron y ajustaron usando un algoritmo en Python 2.7 (figuras 5 y 6).

$z \pm 1(mm)$	$W_x(\mu m)$	$W_y(\mu m)$
107	599.31	585.68
207	649.05	662.74
307	744.66	758.37
407	844.43	848.34
507	960.29	962.03
607	1092.58	1090.73

TABLA II. Resultados de $W(z)$ horizontal y vertical del haz de HeNe de Thorlabs obtenidos con el Beam Master-Coherent.

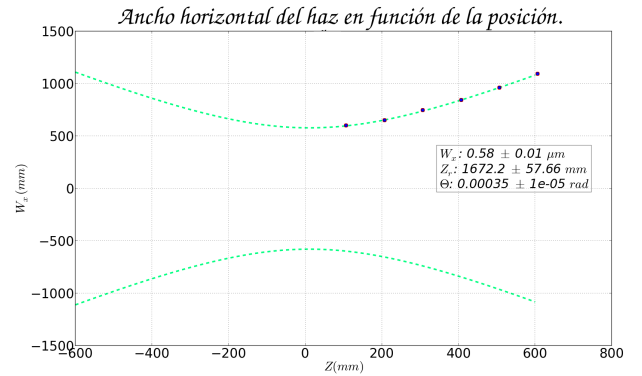


FIG. 5. Cintura horizontal y parámetros obtenidos usando el Beam Master-Coherent

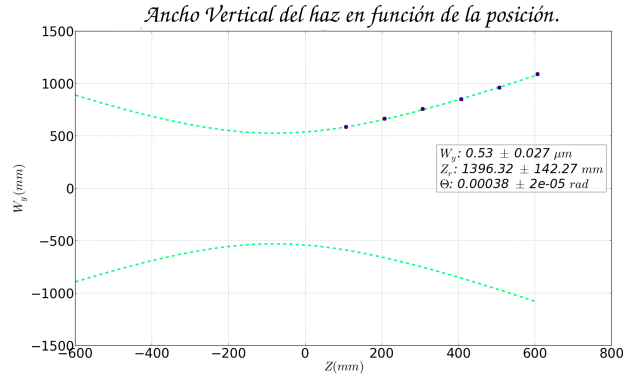


FIG. 6. Cintura vertical y parámetros obtenidos usando el Beam Master-Coherent

Las medidas con el perfilador construido se hicieron usando dos filtros diferentes de densidad óptica (DO). Los resultados usando el filtro de $DO=3.0$ se muestran en la tabla III y los ajustes respectivos en las figura 7 y 8. Y los resultados con el filtro de $DO=4.0$ se presentan en la tabla IV y los ajustes respectivos en las figura 9 y 10.

$z \pm 1(mm)$	$W_x \pm 0.007(mm)$	$W_y \pm 0.006(mm)$
217	0.494	0.526
317	0.527	0.568
417	0.544	0.589
517	0.603	0.657
617	0.658	0.719
717	0.710	0.784

TABLA III. Resultados de $W(z)$ horizontal y vertical del haz de HeNe de Thorlabs obtenidos con el perfilador construido usando un filtro de DO=3.0

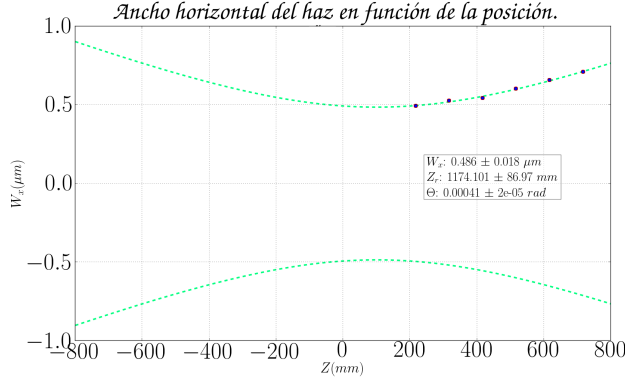


FIG. 7. Medida de la cintura usando nuestro perfilador y un filtro de DO=3.0

$z \pm 1(mm)$	$W_x \pm 0.004(mm)$	$W_y \pm 0.004(mm)$
117	0.374	0.414
217	0.441	0.460
317	0.487	0.504
417	0.590	0.613
367	0.489	0.531
117	0.374	0.414

TABLA IV. Resultados de $W(z)$ horizontal y vertical del haz de HeNe de Thorlabs obtenidos con el perfilador construido usando un filtro de DO=4.0

En resumen obtuvimos los siguientes valores para la cintura del láser con cada perfilador (tabla V):

	Beam Master Coherent	Perfilador construido	
		DO=3.0	DO=4.0
$W_x \pm \Delta W_x(\mu m)$	0.58 ± 0.01	0.49 ± 0.02	0.4 ± 0.1
$W_y \pm \Delta W_y(\mu m)$	0.53 ± 0.03	0.52 ± 0.02	0.42 ± 0.02

TABLA V. Resumen de la medida de la cintura vertical y horizontal del láser de HeNe de Thorlabs usando el perfilador comercial BMC y el construido.

Como se puede observar las medidas obtenidas con el perfilador construido son cercanas a las obtenidas con el BMC, notando en este caso que el filtro usado influye en el proceso de medida, los errores (calculados mediante la relación $E\% = |V_t - V_e|/V_t * 100$) obtenidos con el filtro de DO=3.0 son 15% en el eje horizontal y

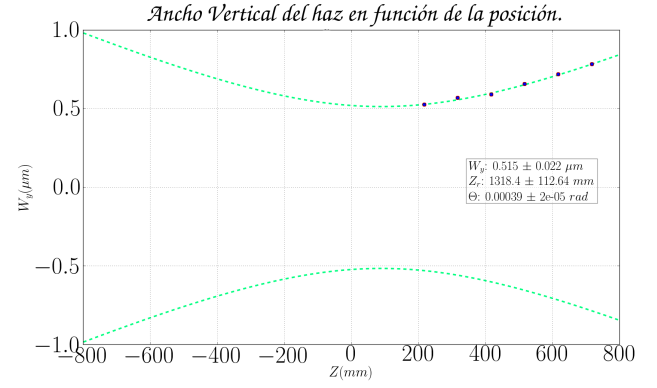


FIG. 8. Medida de la cintura usando nuestro perfilador y un filtro de DO=3.0

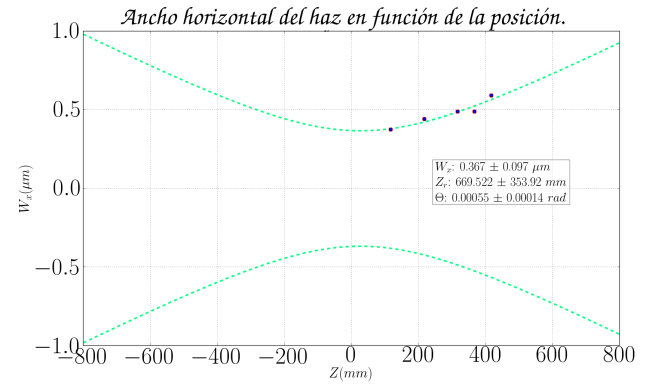


FIG. 9. Medida de la cintura usando nuestro perfilador y un filtro de DO=4.0.

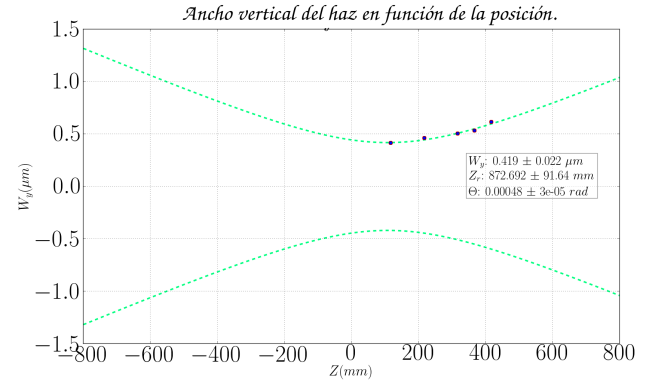


FIG. 10. Medida de la cintura usando nuestro perfilador y un filtro de DO=4.0.

2% en el vertical y con el de $D.O = 4.0$ y se obtuvo errores del 38% en el eje horizontal y 21% en el eje vertical, esto se le puede atribuir al hecho de que la cámara no es lo suficientemente sensible para detectar luz muy atenuada perdiendo información de la imagen que influye en la determinación de los parámetros de su patrón de intensidad, lo que finalmente afecta el ajuste

que permite encontrar la cintura del haz. Siguiendo la misma idea anterior se encontró que hay una distancia límite dependiendo de la potencia del láser y del filtro utilizado, donde las medidas son confiables, es decir, la cámara aún es capaz de obtener información relevante de la imagen.

En conclusión, en este proyecto se pudo construir un perfilador láser de bajo costo y portable que da buenos resultados. Se observó que el tiempo de ejecución para la toma de medidas del software diseñado es mayor al que emplea el BMC (que lo hace en tiempo real). Además con el BMC se pueden establecer medidas sucesivas en tiempo del patrón de intensidad de tal manera que se puede obtener un promedio de estas mejorando los resultados. En contraste el dispositivo diseñado, toma una sola medida en distancia pero trae implementado una rutina que permite calcular y visualizar el ajuste de los radios del haz y determinar su cintura, calculo que no se puede hacer con el BMC.

Finalmente como extensión a este trabajo se propone usar una cámara de mayor resolución para mejorar las medidas y hacer un estudio sobre el filtro y el intervalo de distancia óptimas para que la toma de datos sea satisfactoria.

IV. CONCLUSIONES

El perfilador construido *BeamProfiler (SE)* permitió obtener valores de la cintura del haz gaussiano medido

(con longitud de onda $\lambda = 632.8nm$) en comparación a los obtenidos con el BMC, se encontró que la medición fue óptima cuando se empleó el filtro de $D.O = 3.0$ de acuerdo a los errores obtenidos (15% y 2%), teniendo en cuenta que para este filtro existe un intervalo de distancia en el cuál la cámara es funcional y es capaz de obtener información significativa de la imagen del haz.

La portabilidad del perfilador construido empleando el micrordenador Raspberry Pi 3 facilita su traslado dentro del laboratorio ganando espacio y facilitando el acceso a éste desde cualquier dispositivo en red (PC, Pórtatil, Smartphone, Tablet). El software diseñado *BeamProfiler (ES)* escrito en lenguaje *python* es eficiente y permite medir el ancho del haz a diferentes distancias. A diferencia del Software del BMC el *BeamProfiler* permite calcular la cintura del haz inmediatamente después de realizadas las mediciones a diferentes distancias, optimizando el tiempo de medición en el laboratorio.

En comparación al BMC del laboratorio de óptica cuántica el perfilador construido tuvo un costo bastante bajo, aproximadamente \$100 USD, a diferencia del costo del BMC que es de \$9,935 USD sin contar gastos de importación. Esto demuestra el bajo costo del perfilador construido logrando uno de los objetivos propuestos.

-
- [1] IDEX Optics Photonics. Gaussian beam propagation, https://marketplace.idexop.com/store/SupportDocuments/Gaussian_Beam_PropagationWEB.pdf. [Online; accessed 10-February-2016].
 - [2] K. Cook A. Jamalipour J. Canning, M. A. Hossain. Smartphone laser beam spatial profiler. *Opt. Lett.*, 40(22):5156–5159, 2015.
 - [3] <https://github.com/fnoj/BeamProfiler>, 2016, [online; accessed 11-mayo-2016].

- [4] E. Hecht. *Optics*. Pearson Education, 2015.

Asesora. Alejandra Catalina Valencia, PhD.