

Estudio y caracterización de un láser de Nd-YAG

Facundo Otero Zappa, Marco Hassan y Matías Ezequiel Silva (Grupo 6)

Departamento de Física, Facultad de Ciencias Exactas & Naturales, U.B.A.

Licenciatura en Ciencias Físicas | Laboratorio 5, 2°C 2023 | Jue. de 8:00 a 14:00 hs.

facuotero20.88@outlook.com – hassanmarco96@gmail.com – matias_ezequiel_silva@hotmail.com

Resumen

En este trabajo se construyó un láser de Nd-YAG con una longitud de onda de $\lambda = 1060 \pm 1 \text{ nm}$, a partir de una cavidad semiesférica y utilizando como bombeo un diodo láser. Se determinó el valor porcentual de su pendiente de eficiencia en $\eta = 4.76 \pm 0.08 \%$, llegando hasta una potencia máxima de aproximadamente $P_{\text{máx.}} = 10.5 \pm 0.1 \text{ mW}$ al alimentar el bombeo con una corriente de $I = 2.2 \pm 0.1 \text{ A}$. Se midió la forma del haz sobre un plano perpendicular al eje óptico del láser, y se observó una distribución del haz del láser gaussiana con un ancho a media altura de $\text{FWHM} = 1.16 \pm 0.01 \text{ mm}$.

I. INTRODUCCIÓN

Un láser es un dispositivo que emite radiación electromagnética altamente brillante, colimada y coherente, tanto espacial como temporalmente, basándose en los procesos cuánticos de la emisión inducida o estimulada. La coherencia espacial de estos dispositivos permite que su forma se mantenga en grandes distancias, y su coherencia temporal se relaciona con la capacidad de concentrar la emisión en un rango espectral muy pequeño, lo que permite que su longitud de onda esté bien definida.

El uso del láser se ha extendido a varias áreas desde su invención. Presenta innumerables aplicaciones en la industria entre las que se encuentran el corte, la soldadura, la impresión, y es ampliamente utilizado en medicina para cirugía y tratamientos dermatológicos [1]. En telecomunicaciones, la fibra óptica se basa en un láser para transmitir información alrededor del mundo.

Un láser consta de tres componentes básicos: un mecanismo de bombeo, que se encarga de suministrar la energía necesaria para sostener la emisión láser; un medio amplificador, que se encarga de transferir la energía del bombeo al haz; y un medio de retroalimentación, que le da las características distintivas de alta coherencia, colimación y brillo. Para cada una de estas partes existe gran variedad de opciones, cada una con sus ventajas y desventajas. Por ejemplo, uno de los láser comercialmente más comunes es el láser de helio-neón, el cual usa como bombeo una descarga eléctrica y un medio amplificador que consta de una mezcla de helio y neón gaseosos.

En este trabajo presentamos la construcción de un láser que utiliza como medio amplificador un cristal de Nd-YAG (un granate de litio y aluminio dopado con impurezas de neodimio), una retroalimentación que consiste en una cavidad semiesférica y un bombeo dado por un diodo láser. Este láser tiene una longitud de onda de emisión de $\lambda = 1060 \pm 1 \text{ nm}$, y buscaremos caracterizarlo.

A. Sistema de cuatro niveles

El Nd-YAG se comporta como un sistema de cuatro niveles como el que se muestra en la figura 1. La emisión láser se produce entre los estados $|2\rangle$ y $|1\rangle$, la cual va estar caracterizada por el flujo de fotones emitidos durante las emisiones espontáneas e inducidas. A partir de las llamadas ecuaciones de razón que describen estos procesos [2] y considerando que los decaimientos entre los niveles $|3\rangle|2\rangle$ y $|1\rangle|0\rangle$ se producen rápidamente (o equivalentemente, sin radiación electromagnética), se puede llegar a una expresión que relaciona el bombeo del YAG con la potencia óptica del láser obtenido $P_{\text{lás.}}$, de la forma [3]:

$$P_{\text{lás.}} = \eta(P_{\text{bomb.}} - P_{\text{umb.}}), \quad (1)$$

donde $P_{\text{bomb.}}$ es la potencia óptica del bombeo, η es la “pendiente de eficiencia” y $P_{\text{umb.}}$ es la potencia óptica umbral, o sea la mínima potencia necesaria para que la emisión láser pueda producirse (donde la ganancia de fotones en la

cavidad debida a las emisiones es igual a las pérdidas).

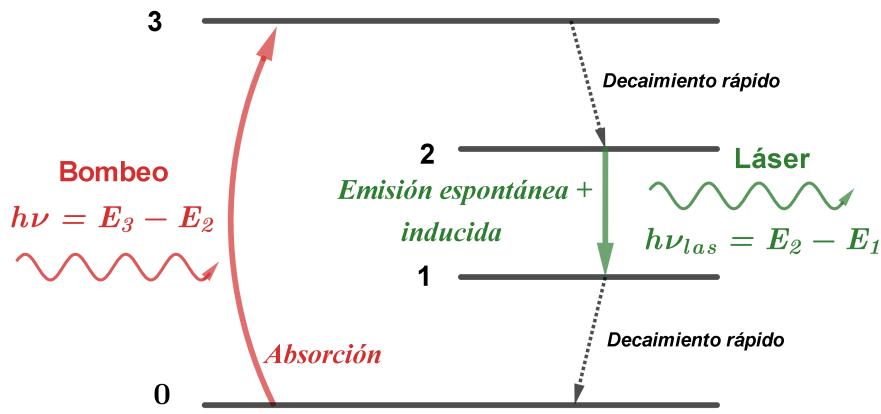


Figura 1: sistema ideal de cuatro niveles. Se bombea al sistema con fotones que son absorbidos por átomos en el estado $|0\rangle$, y entonces se produce una inversión de población en el estado $|3\rangle$. Luego, por emisiones espontáneas y inducidas entre los estados $|2\rangle$ y $|1\rangle$, se produce un flujo de fotones que constituirá el láser.

Físicamente, el valor de η representa el cambio producido en la potencia del láser debido a un cambio en la potencia de bombeo, y se puede demostrar que se desdobra como el producto de dos factores conocidos como *eficiencia cuántica* η_c y *eficiencia de acoplamiento de la cavidad* η_a [3], cada una de las cuales está dada por:

$$\eta_c = \frac{\lambda_{\text{bomb.}}}{\lambda_{\text{lás.}}} \quad (2)$$

$$\eta_a = \frac{1 - R_2}{\alpha - \ln(R_1) - \ln(R_2)}, \quad (3)$$

donde $\lambda_{\text{bomb.}}$ y $\lambda_{\text{lás.}}$ son las longitudes de onda del láser de bombeo y del láser obtenido respectivamente, R_1 y R_2 las reflectancias de los espejos de la cavidad del láser, y α representa las pérdidas pasivas totales. El valor de la eficiencia cuántica representa la fracción de la energía del bombeo que se transfiere al haz láser y la eficiencia de acoplamiento describe qué fracción de los fotones generados están emparejados fuera de la cavidad (es decir, los que forman parte del haz láser).

No es difícil ver que para un láser ideal se cumple que $\eta_a \leq 1$, por lo que tenemos que el valor máximo posible de η es η_c . Este valor es importante pues en el presente informe nos propondremos obtener la pendiente de eficiencia para así caracterizar cuantitativamente el láser obtenido; luego, si lo comparamos con la eficiencia “ideal” (η_c), veremos que tan óptimo es nuestro láser.

Por otro lado, se puede ver que las pérdidas pasivas pueden descomponerse como:

$$\alpha = -2\ln(1 - a)(1 - L)$$

con a la fracción de fotones generados que son absorbidos en los espejos y L la fracción que se pierde en la cavidad debido a reflecciones. En general, puede suponerse que las pérdidas en la cavidad son mucho mayores que las posibles absorciones que puedan producirse en los espejos, y entonces $(1 - a)(1 - L) \approx (1 - L)$ pues $L \leq 1$. Así, queda que:

$$L = 1 - e^{-\frac{\alpha}{2}} \quad (4)$$

son las pérdidas del láser en la cavidad.

II. MECANISMO DE BOMBEO

En este trabajo se realizaron diversas prácticas experimentales, utilizando en cada una de ellas un instrumental como el de la figura 2.

Se contaba con un mecanismo de diodo láser de bombeo que emitía radiación infrarroja con una longitud de onda de $\lambda = 808 \pm 1 \text{ nm}$. Éste era un equipo láser clase 4 modelo ISO/IEC 60825-1 #AV507 que era alimentado y controlado por una fuente de corriente principal modelo SDL 2372 P1 con un rango de potencia de hasta $P = 2.0 \pm 0.1 \text{ W}$, y contaba a su vez con dos fuentes auxiliares modelos DF1762 y GRP-013.

La emisión producida por el láser de bombeo se dirigía hacia un sistema de enfoque que constaba de dos lentes cilíndricas que reducían el ancho del haz. Por último, junto al sistema de enfoque se contaba con un cristal de Nd-YAG que tenía adosado un espejo dieléctrico en la cara que daba al haz de bombeo, con una reflectancia de 99 % para una longitud de onda de $\lambda = 1060 \pm 1 \text{ nm}$. El conjunto de fuentes se encargaba de mantener constante la corriente circulante por el diodo láser así como su temperatura.

A. Caracterización del láser de bombeo

Para caracterizar al láser de bombeo se montó el dispositivo de la figura 2 y se colocó un medidor de potencia óptica modelo Thorlabs PM100D junto al Nd-YAG. Se realizó un barrido de corriente eléctrica y se registró la potencia lumínica del diodo láser. Los resultados se muestran en la figura 3.

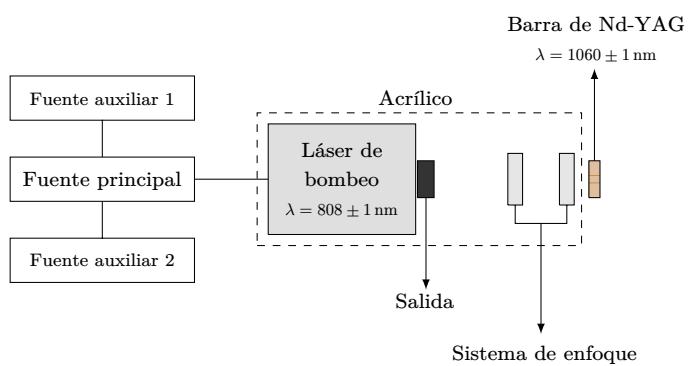


Figura 2: representación gráfica del dispositivo experimental utilizado. Un láser de bombeo alimentado por una fuente principal, que contaba con dos fuentes auxiliares, emitía radiación con una longitud de onda de $\lambda = 808 \pm 1 \text{ nm}$ a un sistema de enfoque y posteriormente al Nd-YAG.

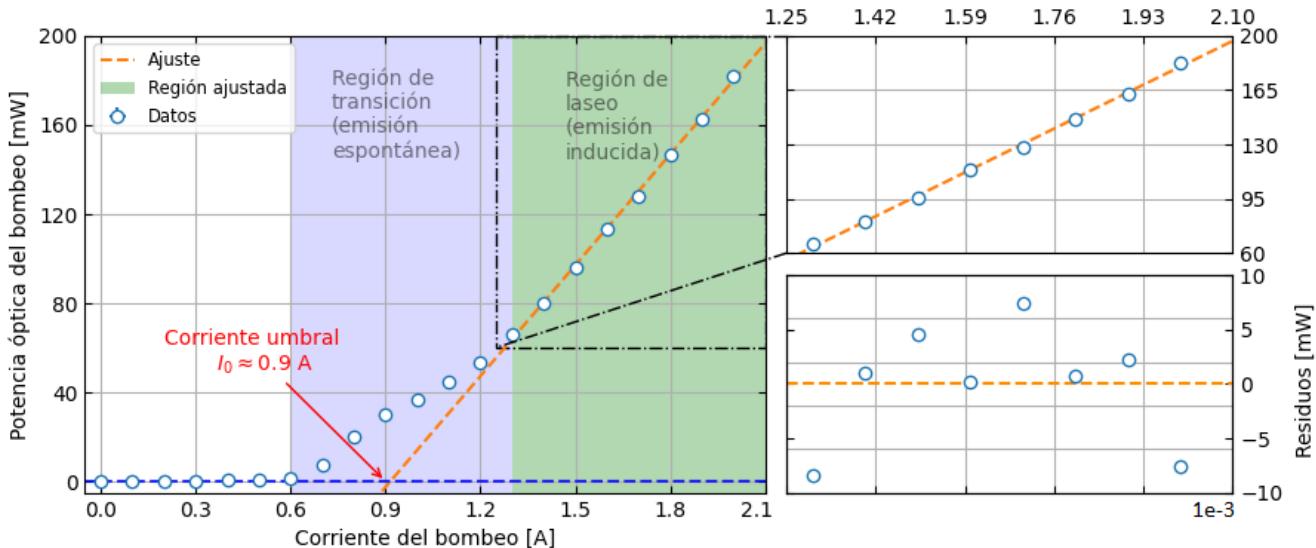


Figura 3: a la izquierda, medición de potencia óptica de bombeo en función de la corriente eléctrica suministrada por la fuente principal. Se realizó un ajuste lineal a partir del valor de corriente $I = 1.30 \pm 0.01 \text{ A}$ y se obtuvo una pendiente de $m_{\text{bomb.}} = 166 \pm 3 \text{ mW/A}$. En la figura superior derecha se muestra el ajuste efectuado en la región correspondiente y en la figura inferior derecha se muestran sus respectivos residuos. Puede observarse una buena correlación en el ajuste, reflejada en comportamiento aleatorio de los residuos así como el valor de $\chi^2 = 0.97$.

En el gráfico puede observarse que existen tres regiones bien marcadas. En la primera región el láser no emite fotones hasta una corriente de corte $I_c = 0.60 \pm 0.01 \text{ A}$ (resultado que coincide con lo especificado por el fabricante [4]), a partir de la cual el diodo comienza a emitir y comienza la segunda región (región de transición). Luego, a partir de $I_{\text{lás.}} = 1.30 \pm 0.01 \text{ A}$ comienza la tercera región (región de *laseo*) donde la potencia incrementa más

rápidamente a medida que aumenta la corriente y parece hacerlo linealmente. Puede suponerse que esta división se debe a los procesos atómicos que se producen en el medio amplificador del diodo láser: en la primera región no hay energía suficiente suministrada por el bombeo como para que exista emisión alguna; en la segunda región, la energía suministrada permite que existan emisiones, pero no es suficiente como para que predominen las emisiones inducidas que caracterizan el haz láser, y en la última región ya se supera este límite de energía logrando que el dispositivo *lasee* comportándose linealmente respecto a la corriente.

Por lo anterior dicho, y como los errores relativos entre ambas variables eran comparables entre sí, se realizó un ajuste de regresión ortogonal u *orthogonal distance regression* (de ahora en más ODR) en la región de *laseo* como se muestra en la figura superior derecha. Puede observarse que los residuos (figura inferior derecha) son prácticamente aleatorios y de dos a tres órdenes de magnitud menores que su correspondiente valor. Además, puede verse una buena correlación en el ajuste evidenciada en el valor de $\chi^2 = 0.97$. Este hecho implica que en esta región la corriente del mecanismo de bombeo efectivamente se comporta linealmente con respecto a la potencia óptica entregada.

III. MEDICIÓN DE LA POTENCIA ÓPTICA DEL LÁSER DE ND-YAG

Para la construcción del láser de Nd-YAG, se debía armar una cavidad estable que permita las sucesivas reflexiones parciales del haz para poder obtener un láser con sus características bien definidas: brillo, colimación y alta coherencia. Para ello, se utilizó un espejo cóncavo con un radio de $r = 50 \pm 1$ cm y con una reflectancia del 90 % para longitudes de onda de $\lambda = 1060 \pm 1$ nm. Se construyó un sistema óptico como el de la figura 4.

Con el mecanismo de bombeo apagado se utilizaron dos espejos planos con una reflectancia del 99 % y un diodo láser auxiliar que emitía luz roja en el espectro visible para alinear todos los componentes del sistema óptico de la figura 4. De esta forma la cavidad estable del láser de bombeo se correspondería a la región entre el Nd-YAG y el espejo cóncavo. La longitud óptima para una cavidad óptica semiesférica es igual al radio de curvatura del espejo de salida [4]. Para esta longitud de cavidad se obtiene la mayor eficiencia posible, teóricamente hablando. Sin embargo, en este límite la cavidad es más propensa a desestabilizarse. Por lo tanto, la distancia que se utilizó fue de 38.3 ± 0.3 cm (l_0 en la figura 4) que equivale a un 76.6 ± 0.6 % del radio del espejo de salida, una distancia suficientemente cercana a la longitud de mayor eficiencia pero no tanto como para que la cavidad pueda desestabilizarse.

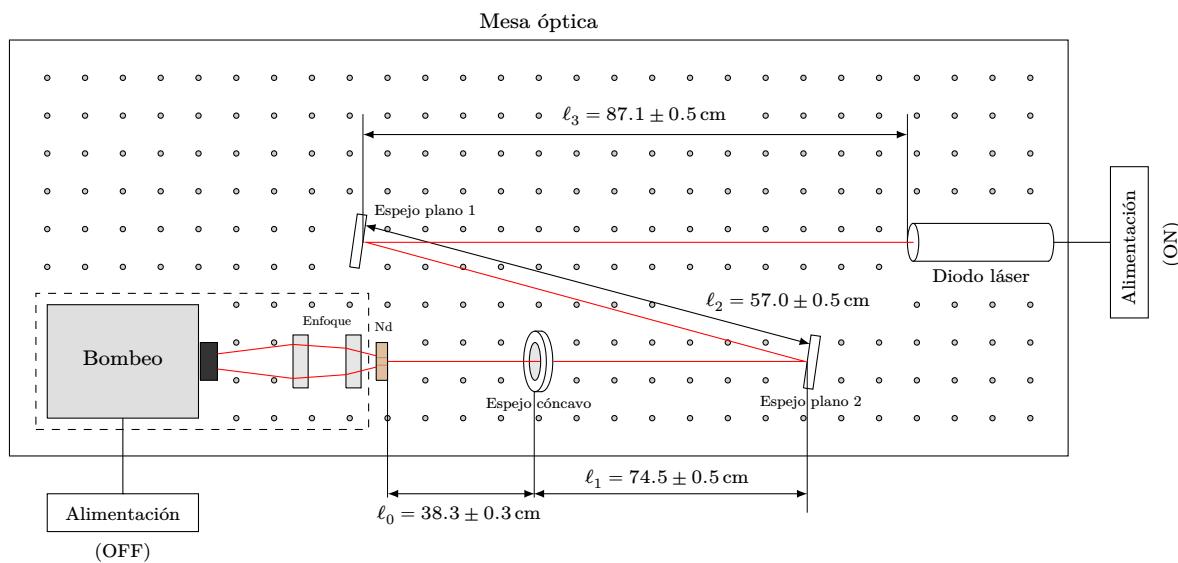


Figura 4: representación gráfica de la práctica experimental realizada para la alineación del láser de Nd-YAG. Abajo a la izquierda se ve el dispositivo experimental de la figura 2. Un diodo láser auxiliar ("Diodo láser") y dos espejos planos sirvieron para alinear el sistema. Se utilizó un espejo cóncavo como espejo de salida de la cavidad resonante.

A. Caracterización del láser de Nd-YAG

Una vez alineado el sistema óptico, se retiraron los espejos planos y el diodo láser auxiliar y se encendió el mecanismo de bombeo. Se obtuvo un láser bien definido en la parte posterior al espejo cóncavo fuera de la cavidad semiesférica. Se colocó un medidor de potencia óptica sobre un posicionador lineal de paso micrométrico y se lo alineó con el haz, como se muestra en la figura 5.

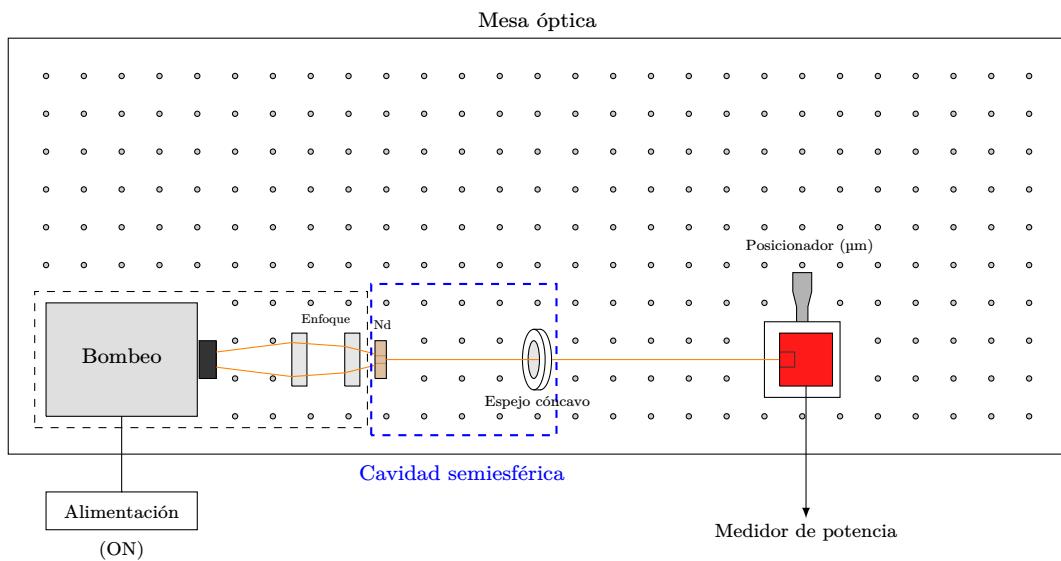


Figura 5: representación gráfica de la práctica realizada para la medición de potencia óptica del láser de Nd-YAG. Se retiró el sistema de alineación (figura 4) y se incorporó un medidor de potencia a la salida de la cavidad óptica.

Utilizando este esquema experimental se realizó un barrido de corriente eléctrica del mecanismo de bombeo y se registró la potencia óptica del láser de Nd-YAG obtenida por el medidor de potencia, como se muestra en la figura 6.

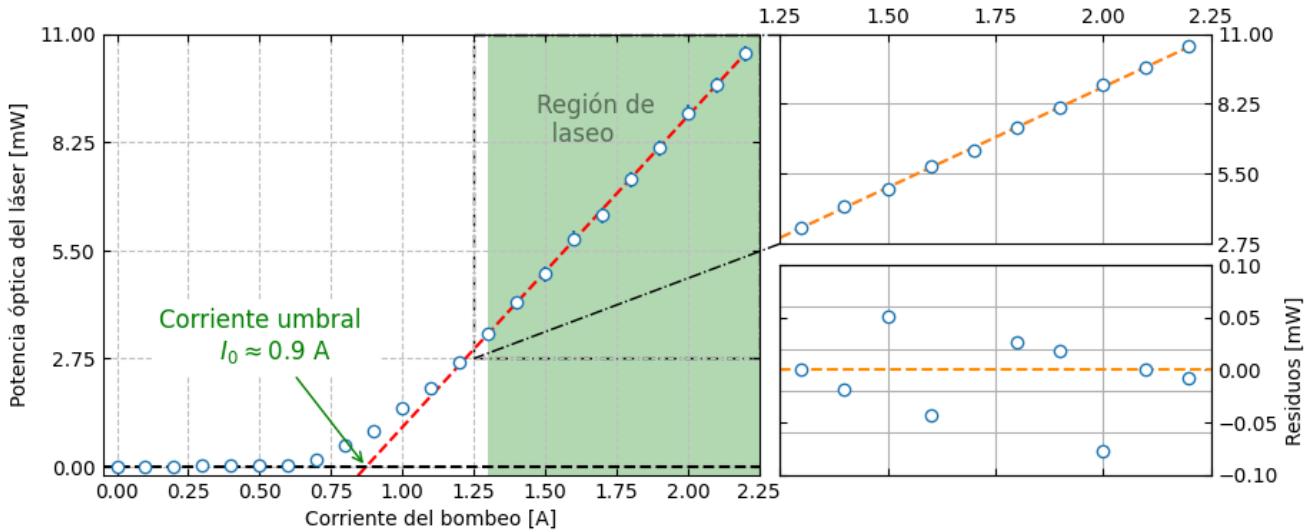


Figura 6: medición de potencia óptica del láser en función de la corriente eléctrica de la fuente principal. Se realizó un ajuste lineal desde las mediciones de $I = 1.30 \pm 0.01$ A en adelante y se obtuvo un valor de pendiente de $m_{\text{lás.}} = 7.84 \pm 0.05$ mW/A. En la figura superior derecha se muestra un zoom del ajuste efectuado en la región correspondiente y en la figura inferior derecha se muestran sus respectivos residuos. Se obtuvo un valor $\chi^2 = 0.10$, lo cual indica una sobreestimación de los errores o la necesidad de más puntos para el ajuste. Sin embargo, el comportamiento de los residuos parece ser aleatorio, lo que es indicativo de un buen ajuste.

Como se puede observar, la potencia óptica del láser de Nd-YAG presenta un comportamiento similar al de la potencia óptica del bombeo obtenida en la figura 3. En esta ocasión la potencia óptica es menor, ya que el medidor de potencia se encontraba más alejado y sólo detectaba el haz del láser de Nd-YAG, llegando a un máximo de potencia de 10.5 ± 0.1 mW. Aún así, pudo observarse el mismo intervalo de corriente umbral y una región prácticamente lineal, correspondiente a la zona del laseo. Esto es un indicativo de que existe una relación entre cada una de las regiones observadas en la figura 6 con las de la figura 3.

Se realizó un ajuste ODR en la zona de laseo y se obtuvo una pendiente de $m_{\text{lás.}} = 7.84 \pm 0.05$ mW/A. Se consiguió un valor de $\chi^2 = 0.10$, lo cual indica que el error está siendo sobreestimado. Sin embargo, los residuos (figura inferior derecha) son prácticamente aleatorios y de hasta dos órdenes de magnitud menores. Este hecho

implica que en el régimen de laseo, se puede considerar que la potencia del láser se comporta linealmente con respecto a la corriente entregada al bombeo.

B. Pendiente de eficiencia del láser de Nd-YAG

En las mediciones obtenidas por las figuras 3 y 6 se observó una relación lineal entre la potencia (de bombeo o del láser de Nd-YAG) y la corriente suministrada a partir de $I_{\text{lás.}} = 1.30 \text{ A}$. Por lo tanto, vale reescribir la potencia de bombeo y del láser como:

$$\begin{cases} P_{\text{bomb.}} = m_{\text{bomb.}} I + I_0^{\text{bomb.}} \\ P_{\text{lás.}} = m_{\text{lás.}} I + I_0^{\text{lás.}} \end{cases}, \forall I \geq I_{\text{lás.}}$$

con $I_0^{\text{bomb.}}$ y $I_0^{\text{lás.}}$ las corrientes umbrales para el bombeo y el láser de Nd-YAG respectivamente. Si despejamos $I(P_{\text{bomb.}})$ y reemplazamos en $P_{\text{lás.}}$ se llega a:

$$P_{\text{lás.}} = \frac{m_{\text{lás.}}}{m_{\text{bomb.}}} \left[P_{\text{bomb.}} - \left(I_0^{\text{bomb.}} - \frac{m_{\text{bomb.}}}{m_{\text{lás.}}} I_0^{\text{lás.}} \right) \right]$$

Luego, si se compara este resultado con la ecuación (1) se concluye que:

$$\eta = \frac{m_{\text{lás.}}}{m_{\text{bomb.}}}$$

$$P_{\text{umb.}} = I_0^{\text{bomb.}} - \frac{I_0^{\text{lás.}}}{\eta}$$

Entonces, con los datos obtenidos de los ajustes de las figuras 3 y 6 se obtuvo una potencia umbral de $P_{\text{umb.}} = 7.1 \pm 5.2 \text{ mW}$ y una pendiente de eficiencia de $\eta = 4.76 \pm 0.08 \%$, valor que se encontraba alejado del ideal en $\eta_c = 76.2 \pm 0.01 \%$, calculado mediante la ecuación (2). Esta gran diferencia entre la eficiencia ideal y la obtenida experimentalmente podría deberse a que la cavidad tenía grandes pérdidas. Puede estimarse el valor de estas pérdidas, calculando α de la ecuación (3) y luego usando la ecuación (4) para obtener las pérdidas en la cavidad L . De esta manera se obtiene un valor de $L = 0.52 \pm 0.01$, es decir que tenemos pérdidas del $52 \pm 1\%$ dentro de la cavidad. La mayor parte de estas pérdidas pueden deberse a que no se utilizaron la distancia ni la reflectancia del espejo de salida óptimas de manera de minimizarlas.

IV. MEDICIÓN DEL PERFIL TRANSVERSAL DE INTENSIDAD DE POTENCIA

Por último, resultaba de interés medir el perfil transversal de intensidad del láser de Nd-YAG obtenido. Para ello, en esta ocasión se armó un sistema óptico como el de la figura 7.

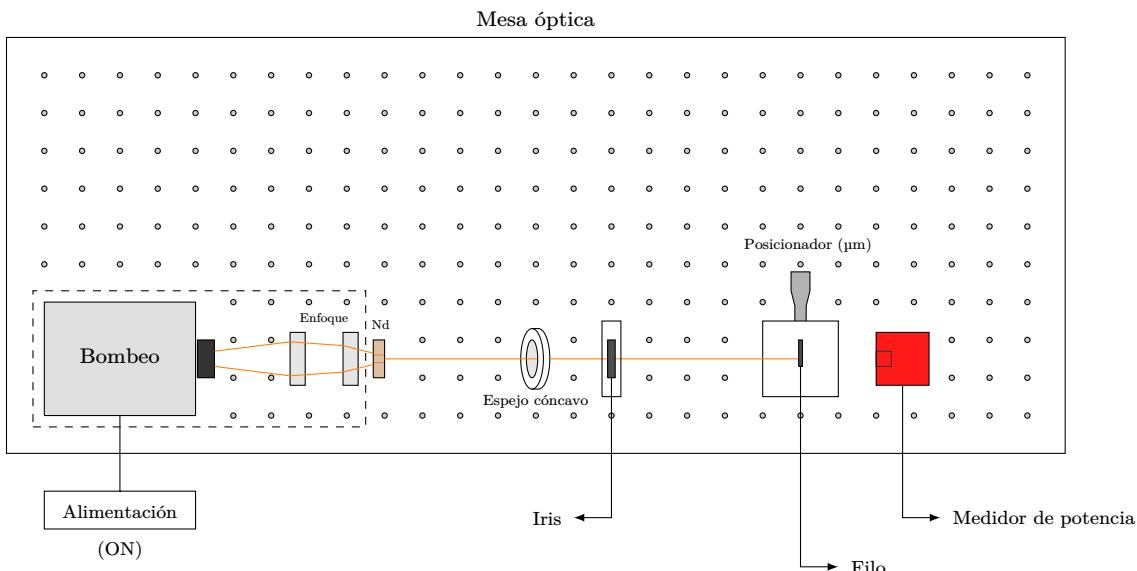


Figura 7: representación gráfica de la práctica experimental realizada para medir el perfil transversal de intensidad del láser incorporando un iris circular y un filo a la práctica experimental de la figura 5.

Se vio que el haz del láser estaba rodeado por una región iluminada por lo que se supuso como radiación proveniente directamente del bombeo y de las pérdidas de la cavidad. Ésta no formaba parte del láser que se buscaba caracterizar, por lo cual se colocó posterior al espejo cóncavo un iris circular con apertura apenas mayor que el haz en cuestión. Se colocó un filo de hoja de cutter en un soporte, fijo al posicionador lineal y en frente del medidor de potencia óptica.

Se realizó un barrido de posición mediante el posicionador lineal y se registró la potencia lumínica con el medidor para cada posición. Los datos obtenidos se muestran en la figura 8.

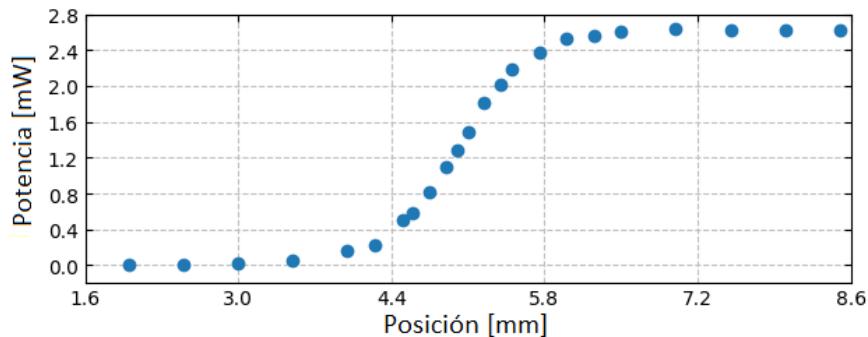


Figura 8: potencia óptica obtenida por el medidor de potencia al cubrir parte del haz láser con un filo en frente al mismo. Se puede observar que sí se avanza hacia los x positivos se descubre más el haz, por lo que aumenta la potencia medida.

Como se puede observar, el filo se encontraba inicialmente cubriendo todo el haz láser, y al deslizarlo progresivamente este se iba descubriendo. Por eso aumenta la potencia óptica al crecer x . Sin embargo, esta curva representa la integral con respecto a x de la componente x del perfil de intensidad del haz. Esto es porque para cada posición del filo se suma la potencia de las posiciones anteriores.

Al efectuar la derivada numérica de los datos obtenidos [5], se obtuvo el perfil de intensidad del haz como se muestra en la figura 9.

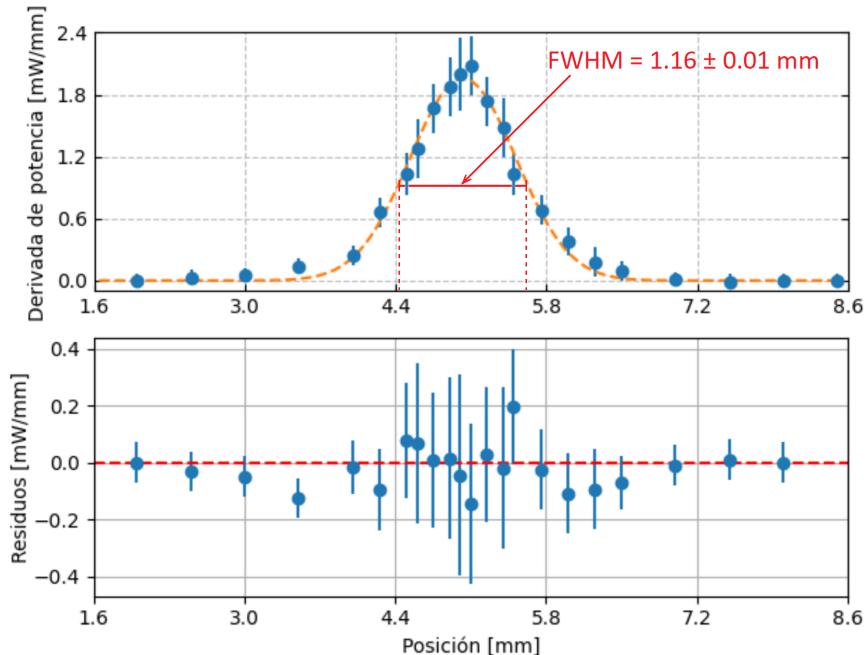


Figura 9: derivada numérica de los datos de potencia obtenidos en la figura 8. En la figura superior se realizó un ajuste ODR por una gaussiana del cual se obtuvo un ancho a media altura $\text{FWHM} = 1.16 \pm 0.01 \text{ mm}$, y los residuos del ajuste se muestran en la figura inferior.

Al ver la forma de campana que presenta la curva se ajustaron los datos por una gaussiana y se obtuvo un ancho a media altura $\text{FWHM} = 1.16 \pm 0.01 \text{ mm}$. En la figura inferior se muestran los residuos del ajuste realizado, que presentan cierta aleatoriedad. Aún así, su magnitud no superó aproximadamente los 0.4 mW/mm en módulo, por lo cual consideramos que el ajuste es bueno.

V. CONCLUSIONES

Tras efectuar las mediciones detalladas anteriormente y el posterior análisis de los datos se destacan los siguientes puntos:

Se caracterizó el mecanismo de bombeo del láser infrarrojo de longitud de onda $\lambda = 808 \pm 1 \text{ nm}$. Se observó que para una corriente de corte no mayor a $I_c = 0.60 \pm 0.01 \text{ A}$ el mecanismo no emite potencia óptica, que para un intervalo entre 0.6 y 1.30 A el láser se encuentra en el régimen de emisión espontánea de radiación y desde la corriente $I_{\text{lás.}} = 1.30 \pm 0.01 \text{ A}$ en adelante puede obtenerse un haz láser, donde el bombeo trabaja en el régimen de emisión inducida.

Se pudo encontrar un régimen de trabajo similar para el láser de Nd-YAG utilizando una cavidad semiesférica con un espejo plano de entrada y uno cóncavo de salida. Se determinó la eficiencia de potencia del láser de neodimio con respecto al láser de bombeo en $\eta = 4.76 \pm 0.08 \%$ para el régimen lineal, valor que se encontró alejado del ideal en $\eta = 76.2 \pm 0.01 \%$. Esto se debe en gran parte a las pérdidas que se producían en la cavidad, que eran del $52 \pm 1\%$. Se propone para futuros experimentos caracterizar estas pérdidas para determinar los valores óptimos de longitud de la cavidad y reflectancia del espejo de salida, y así obtener una pendiente de eficiencia más cercana a la ideal.

Se caracterizó el perfil transversal de potencia óptica del láser de Nd-YAG y se determinó que tiene un comportamiento gaussiano. Se midió el perfil utilizando un filo (sección 4). Se ajustó la curva obtenida con un modelo gaussiano y se obtuvo un ancho a media altura de $\text{FWHM} = 1.16 \pm 0.01 \text{ mm}$. Podemos afirmar que el haz estaba bien definido en la región determinada por este diámetro.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] MedlinePlus Medical Encyclopedia. *Laser therapy for cancer*. February 24, 2021. Retrieved December 15, 2017. [medlineplus.gov](https://medlineplus.gov/laser-therapy-for-cancer.html).
- [2] O. Svelto. *Principles of Laser*. New York, NY. Springer Sci. Business Media, Inc.. 1998.
- [3] N.A. Barboza, L.A. Ríos y R.S. Cudney. *Láser de alta potencia y alta eficiencia bombeado por diodo*. Revista Mexicana de Física, Vol. 56. Página 1. Diciembre del 2010 .
- [4] http://materias.df.uba.ar/1ab05a2013v/files/2013/02/yag_manual.pdf
- [5] <http://materias.df.uba.ar/15a2023c1/files/2012/07/laser2k.pdf>

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos al Profesor Diego Grosz, al J.T.P. Mariano Marziali Bermúdez y a la Ay. 1º Natalia Philipp por ayudar a comprender los conceptos de este informe y colaborar con las prácticas experimentales realizadas, y agradecemos a Alejandro por brindarnos las herramientas e instrumental para realizar las experiencias.

Agradecemos a la Facultad de Ciencias Exactas & Naturales de la Universidad de Buenos Aires por hacer posible la realización de este trabajo.