

# Armado y estudio de láser de Nd-YAG con cavidad lineal y en forma de “v”.

Ivan Eduardo Paganini, Andres Daniel Perez

Laboratorio 5, Departamento de Cs. Físicas, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, UBA,  
Argentina. Abril 2011.

Profesora: Andrea Bragas

En el presente trabajo se armó un láser de Nd-YAG utilizando como medio de bombeo un láser diodo. Se caracterizó dicha fuente de bombeo, hallando, por ejemplo, la corriente umbral y la curva de potencia de salida en función de la corriente. En cuanto al láser de Nd-YAG se estudiaron dos clases de cavidades resonantes estables, lineal y en forma de “v”, analizando las características de los láseres en ambos casos. Asimismo se caracterizó el perfil del haz de luz para observar los distintos modos transversales excitados (TEM).

## Introducción

En el informe se presenta una discusión acerca de las características de un láser de Nd-YAG., cuyo haz de longitud de onda de 1064nm, se sitúa en el espectro infrarrojo.

Se armó dicho dispositivo prestando énfasis en la correcta alineación de sus componentes. Se utilizó un diodo láser como fuente de bombeo, una barra de Nd-YAG como medio amplificador y dos tipos de sistemas de realimentación, cavidades resonantes estables: lineal y en “v”.

Se obtuvieron las curvas de eficiencia y la corriente o potencia umbral, para cada cavidad y para el diodo láser.

También se hallaron los perfiles de intensidad del haz de salida de ambas cavidades, para identificar los modos transversales de oscilación o TEM excitados. En el caso de la cavidad lineal, se utilizó una navaja con la cual se fue obturando parcialmente el haz. En cambio, para la cavidad en forma de “v” se trabajó con una cámara digital, se tomaron fotografías y se analizó el perfil de intensidad de las imágenes.

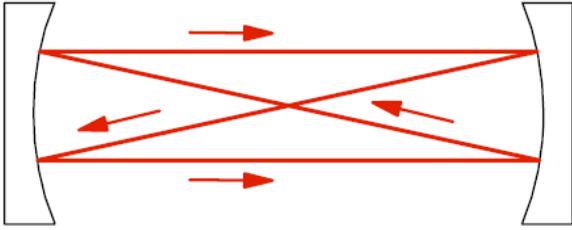
## Marco teórico

Un láser es instrumento que amplifica la luz y produce un rayo direccionado de alta intensidad que usualmente es puro en términos de longitud de onda. El láser realiza procesos que amplifican una señal de luz generada por otros mecanismos.

Un láser esta compuesto por tres componentes básicos: un mecanismo de bombeo, un medio de amplificación y un mecanismo de realimentación.

El mecanismo de bombeo es la forma que tiene el sistema de recibir energía para sostener la emisión láser.

El medio activo o amplificador es aquel que toma la energía del bombeo y la “transfiere” al haz láser. El medio amplificador actúa mediante el principio de emisión estimulada, donde fotones producidos por el bombeo inciden sobre electrones del medio y estos decaen a un nivel menor de energía emitiendo un fotón. A su vez, los electrones también absorberán fotones para subir niveles energéticos. Ambos procesos se suceden en la medida que el sistema busque el equilibrio térmico, Por lo tanto, el medio amplificador funciona si los parámetros son tales que la emisión de fotones es sostenida.



**Figura 1:** Ejemplo de cavidad resonante estable y diagrama del recorrido de los rayos.

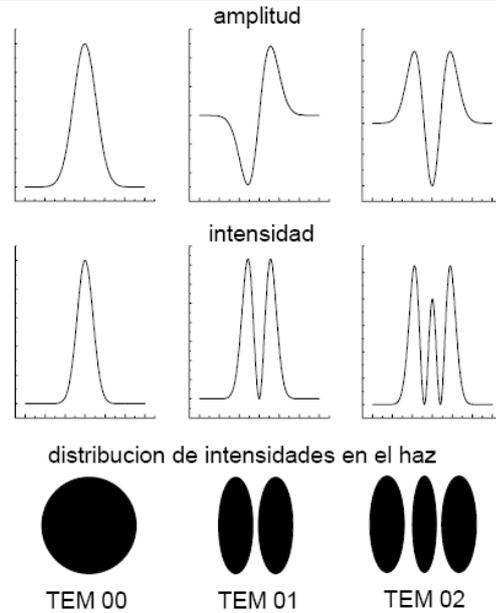
El mecanismo de realimentación tiene como objetivo que el haz adquiera una gran colimación, alta coherencia y gran brillo. En el caso de la luz, la utilización de espejos funciona para reinyectar una parte de la señal en el amplificador de luz.

La utilización de espejos resulta en la conformación de una cavidad resonante. Donde se busca que la luz emitida por el amplificador se refleje sobre si misma y recorra el mismo camino óptico muchas veces. Utilizando un espejo con una reflectividad inferior a 100%, la luz que oscila dentro de la cavidad tendrá una perdida que será la salida del láser.

Las cavidades resonantes se dividen en estables e inestables. Las estables son aquellas cuya conformación no altera la distribución de intensidades en los sucesivos pasajes de la luz a través de la cavidad. Por otro lado, en las inestables el haz va divergiendo y pasa pocas veces por el amplificador. En la figura 1 se muestra un ejemplo de cavidad estable.

El sistema en su conjunto define la condición de umbral cuando los parámetros son tales que la ganancia del medio activos es superior a las perdidas experimentadas por la cavidad.

También es importante destacar que dado que el medio amplificador es espacialmente acotado, el efecto esperado es que el haz no va a ser una onda plana sino que va experimentar difracción.<sup>[1]</sup>



**Figura 2:** Amplitud, intensidad y distribución de intensidad en el haz, para TEMs 00, 01, 02.

La onda estacionaria en cuestión va a tener simetría cilíndrica, con Z como la dirección de propagación de la onda. La distribución de intensidades va a estar dada por las funciones llamada  $TEM_{pq}$  o de “modo transversal electro magnético”. Dichas funciones son el producto de polinomios de Hermite con una gaussiana (fórmula 1):

$$U_{pq}(x, y) = H_p\left(\frac{\sqrt{2}x}{w}\right)H_q\left(\frac{\sqrt{2}y}{w}\right)e^{-(x^2+y^2)/w^2}$$

[1]

Donde x e y representan ejes perpendiculares a la dirección de propagación de la onda. Los polinomios de Hermite tienen la estructura mostrada en la fórmula 2.

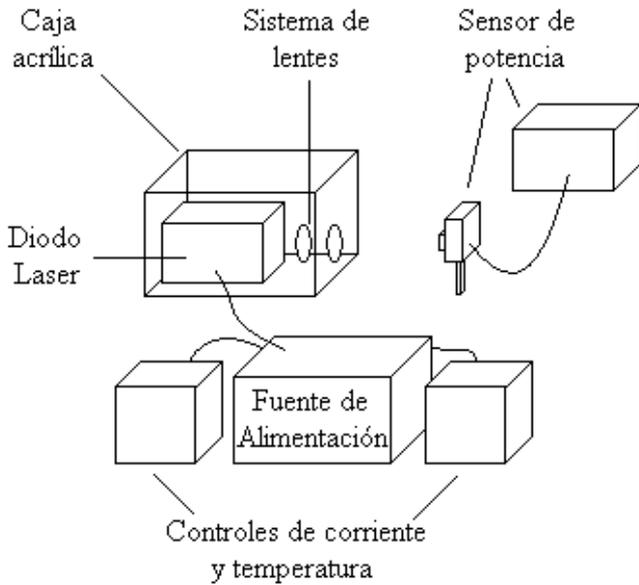
$$H_m(u) = (-1)^m e^{u^2} \frac{d^m(e^{-u^2})}{du^m}$$

[2]

Luego, los subíndices “p” y “q” representan los grados de dichos polinomios, que a su vez indican la cantidad de raíces que tienen.<sup>[2]</sup>

### Descripción experimental

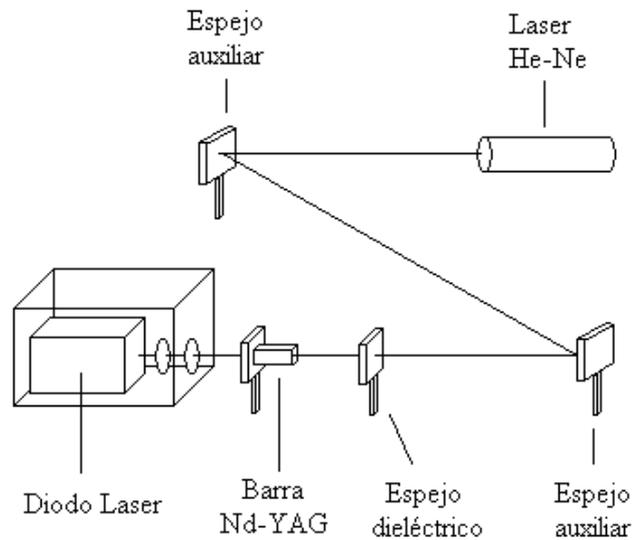
A lo largo de la experiencia se contó con un diodo como mecanismo de bombeo de los láseres que eventualmente se armarían.



**Figura 3:** Dispositivo experimental para la caracterización del diodo láser

El diodo de bombeo, SDL 2371-P1 modelo #AV 507, posee una longitud de onda de 810nm. La estructura inicial estaba constituida por el diodo y una serie de lentes que tenían la función de colimar el haz tanto vertical como horizontalmente. Los mencionados elementos se encontraban dentro de una caja de acrílico transparente con una salida por donde debía pasar el haz. El diodo tenía un mecanismo que mantenía su temperatura estable alrededor de los 25C° y la intensidad del haz se podía controlar variando la corriente con una perilla. El manejo de la corriente podía ser con una precisión de 0,01A y podía llegar a un máximo de 2,4A.

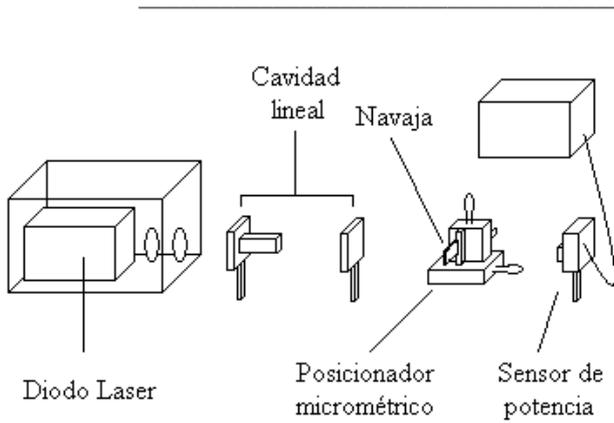
Inicialmente se midió la potencia emitida en la salida de la caja con un sensor de potencia Melles Griot 13 PEM 001, como se ve en la figura 3. Dicha potencia se midió en función de la corriente que recibía el diodo. La posición del sensor fue importante dado que se observó una fuerte caída de la potencia en función de la distancia de la fuente emisora del haz. La caracterización del diodo de bombeo permitió obtener un valor de corriente umbral y también poder confirmar un comportamiento lineal de la potencia en función de la corriente.



**Figura 4:** Dispositivo experimental para la alineación de la cavidad lineal del láser He-Ne.

Concluida la caracterización del diodo se procedió con la colocación de la barra de Nd-YAG en la salida de la caja de acrílico. La barra, que sería el medio amplificador de las posteriores cavidades, estaba unida a un espejo con una reflectividad máxima para una longitud de onda de 1064 nm y ambos estaban montados sobre un posicionador angular que se regula con mecanismo de tornillos.

Ubicada la barra, se procedió con alinear un láser auxiliar (He-Ne) cuya ventaja es que el haz estaba dentro del espectro visible y permitía una veloz confirmación de la posición de los rayos. La alineación se realizó mediante la utilización de dos espejos auxiliares, como se muestra en la figura 4, utilizando posicionadores angulares montados sobre torretas. Una vez logrado que el haz de He-Ne incida de manera perpendicular sobre el montaje de la barra de Nd-YAG y que el haz reflejado vuelva precisamente sobre su camino, entonces se colocó y alineó un espejo dieléctrico de reflectividad 98% para conformar el medio de realimentación de la cavidad lineal. Se procuró que el haz en el brazo de la barra de Nd-YAG quedara paralelo a la mesa de trabajo.



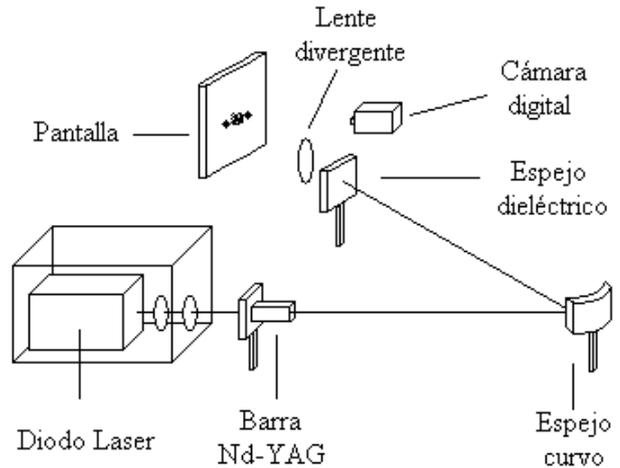
**Figura 5:** Dispositivo experimental mediante el cual se midió el perfil de intensidades del haz del láser con una navaja.

#### Cavity lineal estable:

Teniendo el haz de He-Ne alineado con la barra, se agregó el espejo dieléctrico entre los espejos auxiliares y la barra ( $(5,0 \pm 0,5)$ cm de la barra). En un proceso análogo, se alineó el espejo con el resto de la configuración de tal manera que el haz recorra el mismo camino ida y vuelta.

Finalizada la alineación se verificó el correcto funcionamiento de la cavity: se encendió el diodo de bombeo y se utilizó unas tarjetas que permiten transformar el haz incidente al espectro visible, lo importante del chequeo visual inmediato era confirmar que el rayo en sí fuese relativamente concentrado y apreciablemente potente. Posteriormente también se corroboró que el decaimiento en función de la distancia es tenue por lo que se pudo terminar de confirmar que la cavity funcionaba correctamente.

Nuevamente se midió la potencia en función de la corriente y luego se procedió con la caracterización del perfil del haz. Utilizando una cuchilla montada sobre un posicionador milimétrico se obtuvo el haz de forma completa y se midió la potencia a medida que se desplazó la cuchilla (ver figura 5). El corte del rayo se hizo perpendicular a este, tanto de manera horizontal como vertical a la mesa óptica.



**Figura 6:** Dispositivo experimental mediante el cual se midió el perfil de intensidades del haz del láser, con una cámara digital.

#### Cavity en V estable:

Se utilizó como punto de partida la alineación de la cavity lineal y se procedió con la ubicación de un espejo cóncavo de 50cm de radio de curvatura, dispuesto a  $(52,0 \pm 0,5)$ cm de la barra de Nd-YAG. Luego se agregó un espejo dieléctrico como indica la figura 6, a  $(36,0 \pm 0,5)$ cm del espejo curvo. La alineación de los nuevos elementos presentó la dificultad de que el rayo se encuentra en el infrarrojo por lo que el uso de la tarjeta para localizar el haz fue indispensable.

Concluida la alineación se verificó que la cavity efectivamente funcionaba como un láser: concentración del frente de onda en un área pequeña y un decaimiento relativamente tenue con la distancia. Luego, se midió la potencia de salida en función de la potencia de bombeo. Finalmente, se utilizó una cámara infrarroja para poder tomar fotos de los perfiles del haz. Para dicha labor se puso una lente divergente que habría de expandir el haz y se hizo incidir a este sobre una superficie plana blanca (para reducir la absorción por parte de la superficie). Luego se tomó fotos de dicha superficie, se fue moviendo el espejo curvo con los tornillos de posicionador angular y se fueron observando distintos perfiles del haz.

## Resultados

### Caracterización del diodo láser:

Para el armado del láser Nd-YAG se utilizó como fuente de bombeo un diodo, por lo tanto fue necesario estudiar las características del mismo.

Se midió la corriente de entrada en función de la potencia de salida, con el sensor de potencia ubicado en dos distancias diferentes, con el dispositivo experimental mostrado en la figura 3.

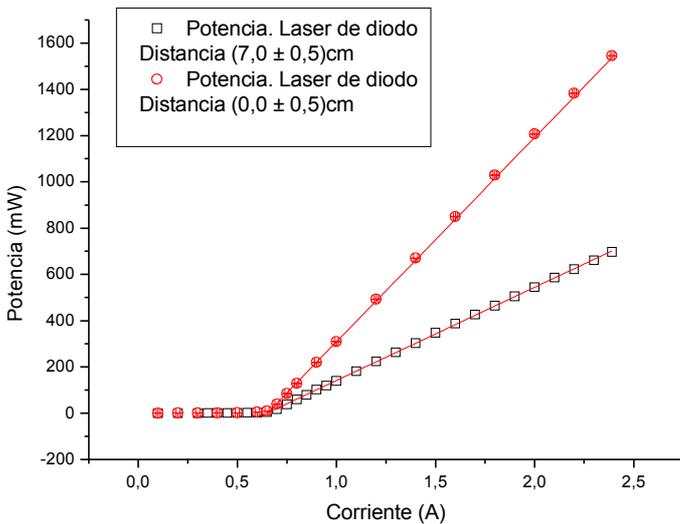
Se midió a  $(0,0 \pm 0,5)\text{cm}$ , tratando de colocar el sensor en la posición donde posteriormente se ubicaría la barra de Nd-YAG; y a  $(7,0 \pm 0,5)\text{cm}$ . Para ambos conjuntos de datos se realizó un gráfico, mostrado en la figura 7. Se observa que a partir de una determinada corriente de entrada, el diodo comienza a emitir. Dicha corriente, es llamada corriente umbral.

Además, en la figura 7 se presenta un ajuste lineal,  $y=A+B*x$  a los datos en la sección donde el diodo emite:

A  $(7,0 \pm 0,5)\text{cm}$ ,  $B=(406,1 \pm 0,2)\text{mW/A}$

A  $(0,0 \pm 0,5)\text{cm}$ ,  $B=(894,7 \pm 0,3)\text{mW/A}$

$R=0,99$  para ambos casos.



**Figura 7:** Potencia de salida en función de la corriente de alimentación para el diodo láser.

Se presenta un ajuste  $y=A+B*x$ .

Para  $(7,0 \pm 0,5)\text{cm}$ :  $A=(-266,2 \pm 0,2)\text{mW}$

$B=(406,1 \pm 0,2)\text{mW/A}$ .

Para  $(0,0 \pm 0,5)\text{cm}$ :  $A=(-586,9 \pm 0,3)\text{mW}$

$B=(894,7 \pm 0,3)\text{mW/A}$ .  $R=0,99$  en ambos casos

Los parámetros hallados luego se utilizaron para determinar la potencia de entrada en el láser Nd-YAG.

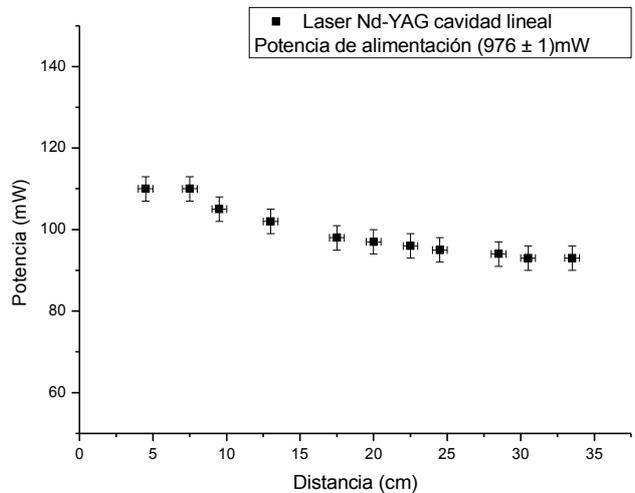
Para ambas distancias se observa un comportamiento lineal con la corriente, tal como era esperado para el diodo. La corriente umbral es de  $(0,70 \pm 0,05)\text{A}$ .

También hay que resaltar la diferencia de potencia para las dos distancias. Cuando se utilizó una tarjeta infrarroja con el haz del diodo, se pudo observar que este es relativamente disperso y que su intensidad decae velozmente a medida que se aleja de la fuente. Se puede inferir un alto grado de pérdida de potencia por la divergencia del rayo, que explicaría las pendientes distintas.

### Cavidad lineal estable:

Para el armado del la cavidad lineal de láser Nd-YAG, como se muestra en la figura 4, se utilizaron dos espejos metálicos auxiliares, y un láser He-Ne, brindando una referencia visual para el recorrido del haz.

Se midió la potencia de salida, con el sensor ubicado a la salida del espejo dieléctrico, en función de la distancia. La potencia de alimentación se fijó a  $(976 \pm 1)\text{mW}$ . Los datos se muestran en la figura 8.



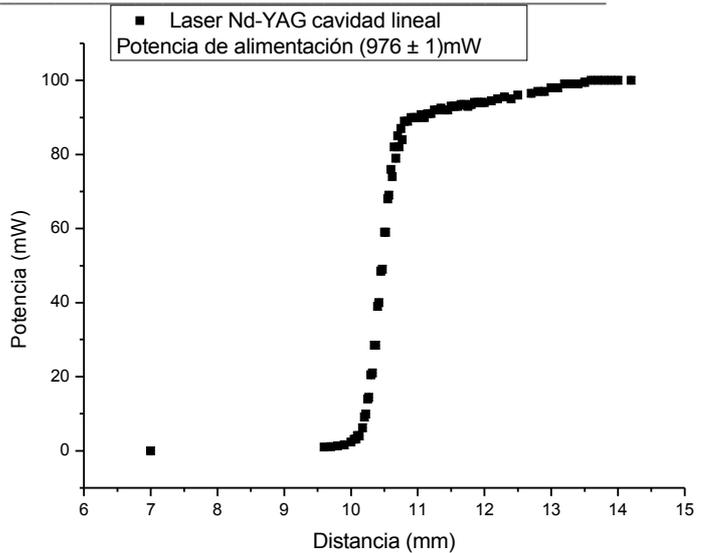
**Figura 8:** Potencia de salida en función de la distancia para el láser Nd-YAG cavidad lineal. Potencia de alimentación fija  $(976 \pm 1)\text{mW}$

Notamos que, además del punto concentrado característico del láser Nd-YAG, parte de la radiación producida por el diodo llega a la posición del sensor (se observa una mancha rectangular). Por lo tanto, las variaciones de intensidad mostradas en la figura 8, pueden ser causadas por dicha radiación, ya que la potencia del diodo decae fuertemente con la distancia, a diferencia del láser Nd-YAG.

Posteriormente, se analizó la curva de eficiencia para el láser lineal paralelo construido.

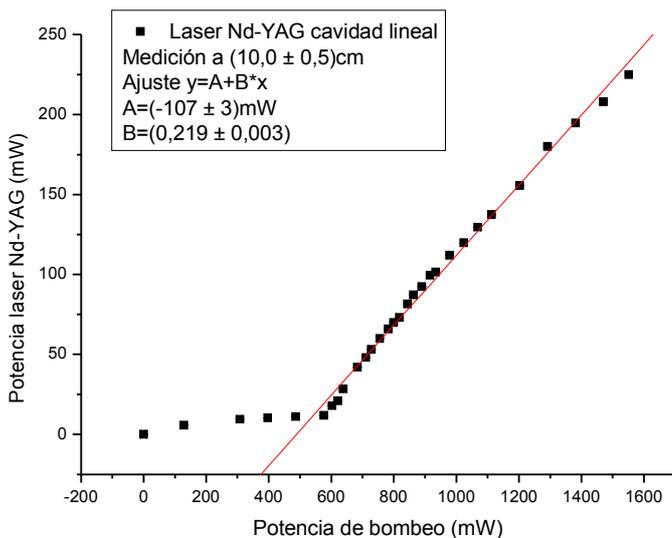
Se mantuvo fija la distancia del sensor de potencia al espejo dieléctrico en  $(10,0 \pm 0,5)\text{cm}$ , y se midió la potencia de salida en función a la potencia de entrada. Los datos se presentan en la figura 9, junto con un ajuste lineal  $y=A+B*x$ ,  $A=(-107 \pm 3)\text{mW}$ ,  $B=(0,219 \pm 0,003)$ .  $R=0,99$ .

Se observa un comportamiento lineal de los datos a partir de la potencia umbral de  $(575 \pm 25)\text{mW}$ . Recordamos que se observa, en la posición del sensor, radiación no deseada proveniente del diodo.

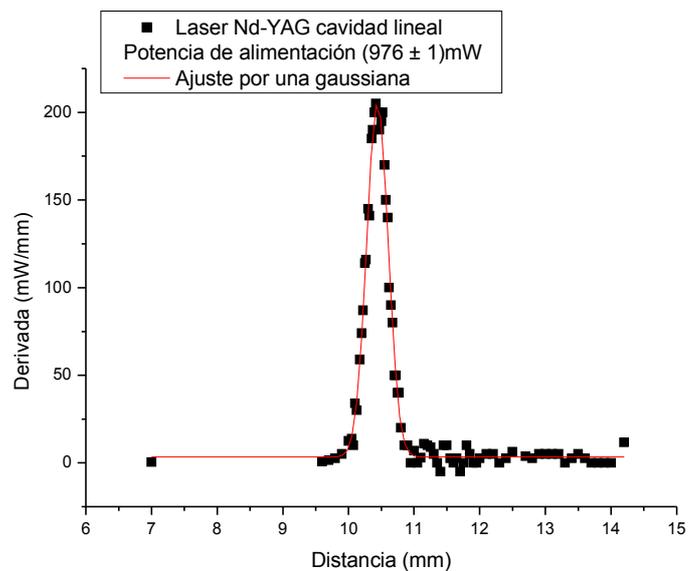


**Figura 10:** Gráfico de potencia de salida en función de la posición de la navaja al obturar el láser Nd-YAG cavidad lineal. Potencia de bombeo fija  $(976 \pm 1)\text{mW}$

Finalmente, se estudió el perfil de intensidades del haz para observar el modo transversal excitado en la cavidad lineal. Para ello se utilizó el dispositivo mostrado en la figura 5. Con una navaja se fue obturando el haz parcialmente y se midió la potencia con el sensor a una distancia fija de  $(9,5 \pm 0,5)\text{cm}$ . La potencia de bombeo también se mantuvo constante a  $(976 \pm 1)\text{mW}$ .



**Figura 9:** Gráfico de potencia de salida en función de la potencia de bombeo para el láser Nd-YAG cavidad lineal. Distancia del sensor fija  $(10,0 \pm 0,5)\text{cm}$ . Ajuste lineal  $y=A+B*x$ ,  $A=(-107 \pm 3)\text{mW}$ ,  $B=(0,219 \pm 0,003)$ .  $R=0,99$ .



**Figura 11:** TEM 00. Derivada numérica del gráfico mostrado en la figura EE para el láser Nd-YAG cavidad lineal. Potencia de bombeo fija  $(976 \pm 1)\text{mW}$ . Se presenta un ajuste por una gaussiana.  $R=0,97$ .

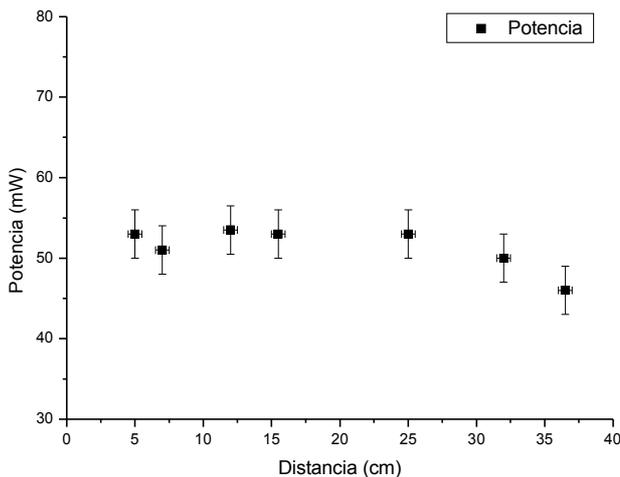
Se analizó el perfil horizontal y el perfil vertical, obteniendo en ambos casos situaciones similares. Mostramos en la figura 10, el perfil horizontal. Debido al método de medición utilizado, el gráfico de la figura 10 resulta ser la integral del modo de oscilación, por lo que en la figura 11 se presenta la derivada numérica.

Notamos que para ambos casos, el perfil obtenido tiene forma de una gaussiana, por lo que el modo transversal excitado en la cavidad lineal es el más bajo, TEM 00, tal como era esperado para este tipo de cavidad.

#### *Cavidad en V estable:*

Para el armado de la cavidad en forma de v, se utilizó como punto de partida, la cavidad lineal. En la figura 6 se muestra el dispositivo experimental. Se empleó un espejo curvo de 50cm de radio de curvatura.

Se midió la potencia de salida, con el sensor ubicado a la salida del espejo dieléctrico, en función de la distancia. La potencia de alimentación se fija a  $(976 \pm 1)mW$ . Los datos se muestran en la figura 12, y tal como era esperado, no presentan un decaimiento considerable con la distancia.

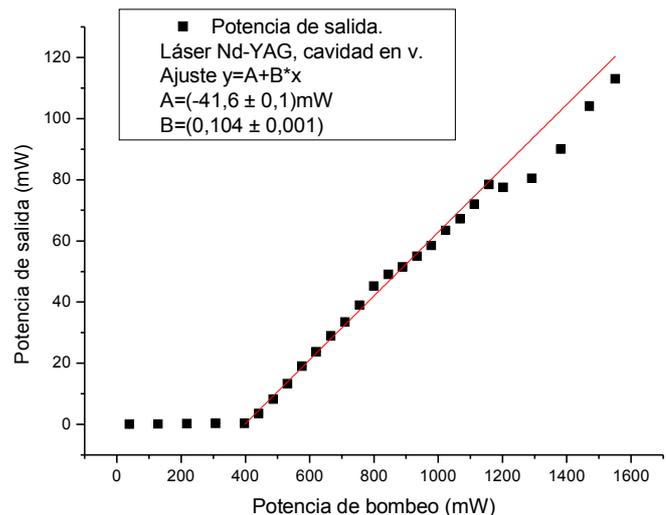


**Figura 12:** Gráfico de potencia de salida en función de la distancia para el láser Nd-YAG cavidad en "v". Potencia de alimentación fija  $(976 \pm 1)mW$

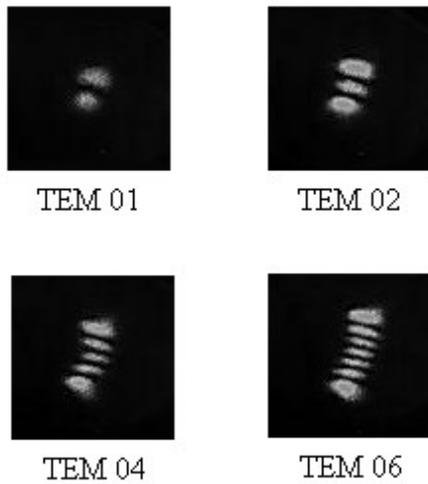
Nuevamente la medición de la potencia de salida en función de la potencia de bombeo permite un posterior estudio de la eficacia. Dicho gráfico se muestra en la figura 13.

Si bien no puede ignorarse del todo el valor de la ordenada de origen, el hecho de que la pendiente de la nueva recta de eficacia sea aproximadamente la mitad de la previa da un indicio de la marcada diferencia. Efectivamente las potencias obtenidas son aproximadamente la mitad que las medidas en la cavidad lineal. Un resultado lógico considerando que la nueva cavidad es de dimensiones mucho mayores y su alineación, si bien efectiva, probablemente sea inferior por las dificultades técnicas. Con lo señalado el resultado es que la cavidad presentará mayor cantidad de pérdidas a lo largo de la trayectoria donde se retroalimenta. Sin embargo, la potencia umbral es de  $(415 \pm 25)mW$ , un valor menor al hallado para la cavidad lineal.

Notamos que en el gráfico de la figura 13, a partir de los 1200mW aproximadamente, se aprecia una discontinuidad en la tendencia lineal de la curva.



**Figura 13:** Gráfico de potencia de salida en función de la potencia de bombeo para el láser Nd-YAG cavidad en "v". Ajuste lineal  $y=A+B*x$ ,  $A=(-41,6 \pm 0,1)mW$ ,  $B=(0,104 \pm 0,001)$ .  $R=0,99$



**Figura 14:** Imágenes tomadas por una cámara digital del perfil de intensidades del láser con cavidad en “v”, proyectado sobre una superficie. Se identifican los TEMs.

Este fenómeno puede ser debido a la gran sensibilidad que presenta la cavidad en “v”, como más adelante se observará cuando se analice el perfil de intensidad del haz, frente a pequeñas variaciones en la posición del espejo curvo. Es posible que durante el proceso de medición, alguna vibración haya provocado la excitación de un modo diferente, de distinta intensidad.

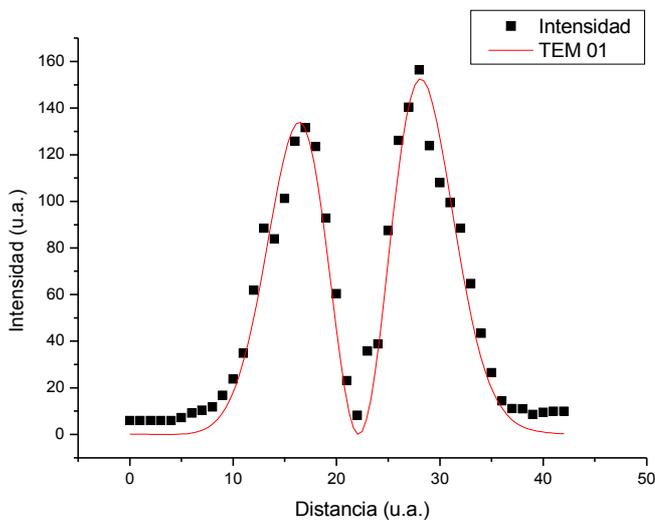
Con la cámara se pudo obtener algunos perfiles de intensidad con marcadas diferencias cualitativas, variando levemente el ángulo del espejo curvo de la cavidad.

Al más mínimo cambio de ángulo con los tornillos de paso fino, le corresponde una apreciable variación tanto del modo como de intensidad del haz observado en la pantalla. Dichas fotos se observan en la figura 14.

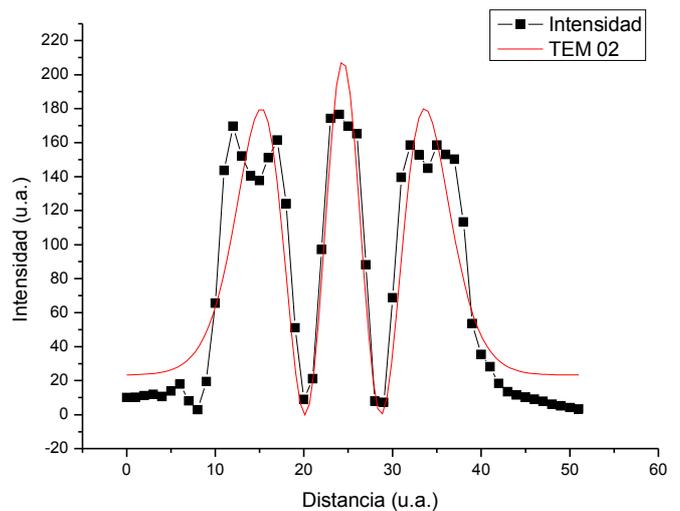
El modelo teórico indica la existencia de modos normales discernibles a partir de los nodos de la amplitud que presenta la función de onda, que se traduce en pozos de intensidad. Lo que da lugar a interpretar la resonancia de distintos modos para las imágenes obtenidas

Luego, se buscó un análisis más detallado por medio del estudio del contraste que presentaban las fotos y verificar que los cortes realizados coincidiesen en un grado aceptable con las funciones propuestas por el modelo. Los gráficos se presentan en la figura 15 para TEM 01, con  $R=0,94$ , y en la figura 16 para TEM 02, con  $R=0,86$ .

Es importante destacar que la precisión del estudio se ve afectada tanto por el ángulo con el que la cámara tomo la foto, como el ángulo con el que el haz incidió sobre la superficie plana. También hay que considerar la baja definición de la cámara y lo problemas de contraste producidos por la iluminación del espacio de trabajo.



**Figura 15:** TEM 01. Perfil de intensidad, para la cavidad en “v” a partir del análisis de las fotografías de la cámara digital.  $R=0,96$ .



**Figura 16:** TEM 02. Perfil de intensidad, para la cavidad en “v” a partir del análisis de las fotografías de la cámara digital.  $R=0,86$ .

## Conclusión

En el trabajo se obtuvo la curva de calibración del diodo de bombeo, hallando el comportamiento lineal esperado a partir de la corriente umbral de  $(0,70 \pm 0,05)A$ .

Para el láser Nd-YAG, se armaron dos tipos de cavidades, lineal y en “v”, para las cuales se analizó la curva de eficiencia. Posteriormente, se relevaron los perfiles de intensidades, pudiéndose observar el TEM 01 para la cavidad lineal, con el método de la navaja; y los TEMs 01, 02, 04 y 06 para la cavidad en “v”, mediante el análisis de las imágenes de la cámara digital.

En principio es importante destacar lo relativamente simple que es la conformación de diversas cavidades con características cualitativas tan diversas (teniendo el mecanismo de bombeo y el medio amplificador ya resueltos). La construcción del medio de realimentación no requiere de precisión exhaustiva (una labor que no requiere de ningún mecanismo especial) y los montajes tienen pocos elementos. Sin embargo, a partir de ciertas alteraciones geométricas a la configuración o variando levemente alguna lente o espejo se puede obtener resultados muy dispares. Por ejemplo, se pudo observar como distintos modos se iban imponiendo con solo mover sutilmente los tornillos del espejo curvo en cavidad en V.

Con lo señalado, se puede realizar un estudio más minucioso de la onda variando las cavidades. También se puede mejorar el análisis del perfil de intensidades evaluando métodos con resultados más precisos. Incluso se puede ver como la eficacia podría variar con distintas configuraciones.

## Referencias

[1] Láser de Nd-YAG. Cavidades de Oscilación-Modos transversales; Diodo de bombeo; Cavidades. Cátedra Laboratorio 5, FCEyN, UBA.

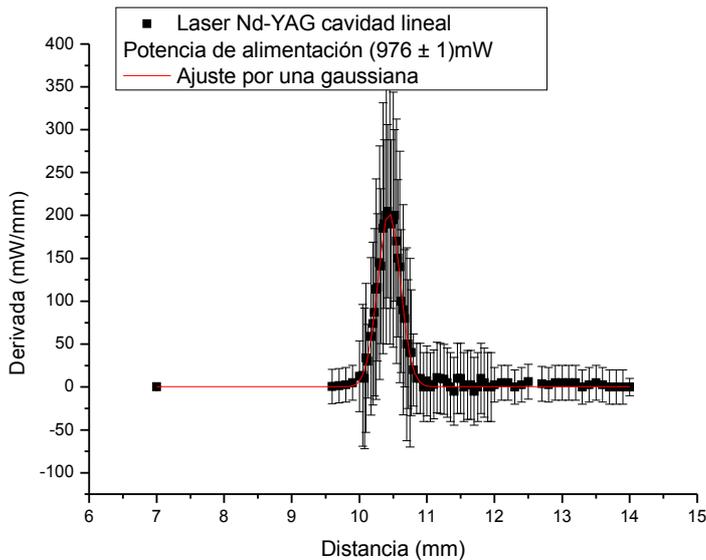
[2] Laser fundamentals, Silfvast, William T. Cambridge University, Press, 2004.

## Apéndice

En el caso de la cavidad lineal, se midió el perfil de intensidad del haz del láser con el método de la navaja descrito. Posteriormente se procedió a realizar una derivada numérica con el software OriginPro, utilizando la fórmula 3:

$$\frac{f(x_2) - f(x_1)}{x_2 - x_1} \quad [3]$$

Se realizó el análisis de error, como se muestra en la figura 17. Para mayor claridad, el gráfico de la figura 11 no posee las barras de error, no obstante el ajuste realizado no presenta diferencias significativas en sus parámetros o en R, para ambos casos.



**Figura 17:** TEM 00. Derivada numérica del gráfico mostrado en la figura EE para el láser Nd-YAG cavidad lineal. Se presenta un ajuste por una gaussiana.  $R=0,97$ .

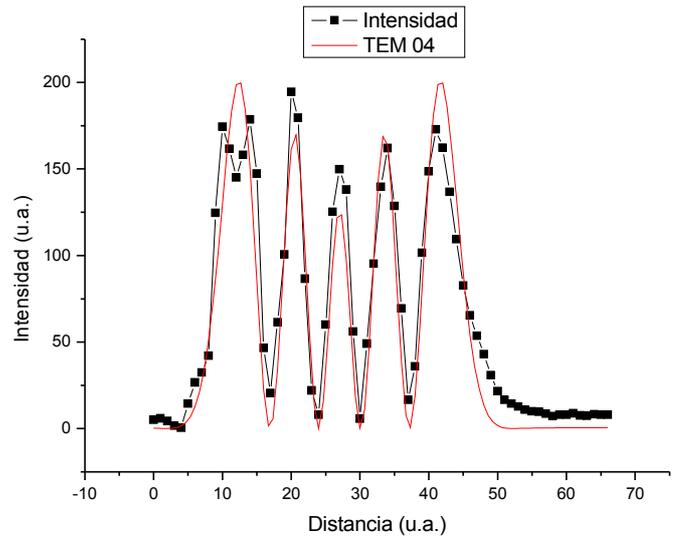
En cuanto al perfil de intensidades de los modos transversales de oscilación para la cavidad en “v”, se obtuvo:

$R=0,96$  para TEM 01 (ver figura 15)

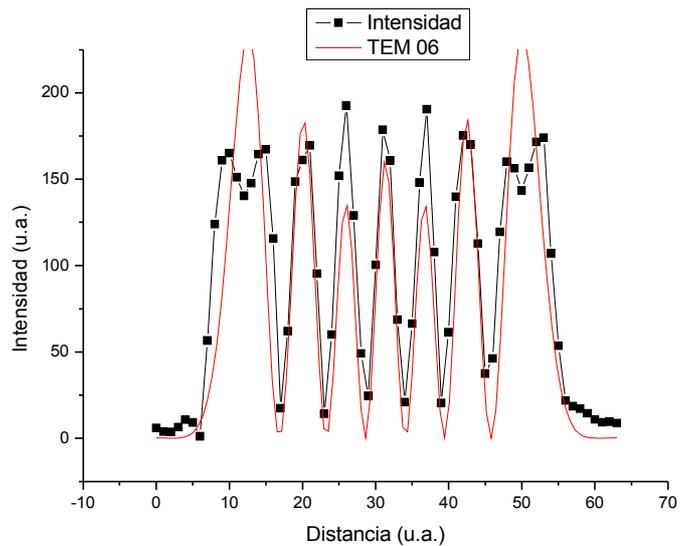
$R=0,86$  para TEM 02 (ver figura 16)

$R=0,86$  para TEM 04 (ver figura 18)

$R=0,64$  para TEM 06 (ver figura 19)



**Figura 18:** TEM 04. Perfil de intensidad, para la cavidad en “v” a partir del análisis de las fotografías de la cámara digital.  $R=0,86$ .



**Figura 19:** TEM 06. Perfil de intensidad, para la cavidad en “v” a partir del análisis de las fotografías de la cámara digital.  $R=0,64$ .

Recordamos que la precisión se ve afectada por las cuestiones antes mencionadas. Sin embargo, los gráficos y las imágenes de la cámara digital de la figura 14 nos permiten hacer un análisis cualitativo para discernir los distintos modos TEM excitados.