

# **Estudio del láser Nd: YAG**

**Laila Kazimierski Cristian Ferreyra**

*Laboratorio 5 Facultad de Ciencias Exactas y Naturales*

*Universidad de Buenos Aires*

*03 de mayo de 2011*

## **Resumen**

*El objetivo del presente trabajo fue diseñar y caracterizar el funcionamiento y eficiencia de un láser Nd:YAG estudiando la potencia de salida en función de la potencia de bombeo. Dicha caracterización se realizó conformando cavidades estables de tipo lineal y en V, estudiando en cada caso cómo se modificaba la potencia umbral de láser en función de la variación de las distancias características del sistema y las reflectividades de los espejos usados. Pudo determinarse un aumento de la potencia umbral con el aumento de la distancia para el caso de la cavidad lineal y con la disminución de la reflectividad en el de la cavidad en V. Finalmente, se estudiaron los modos transversales para el caso de ésta última cavidad, pudiendo construir los perfiles de intensidad de los mismos.*

## **1.-Introducción**

### **1.1 – Composición de un láser**

Un láser es un instrumento que genera o amplifica radiación electromagnética coherente, ya sea del espectro visible, infrarrojo o ultravioleta. Éste se compone básicamente de un mecanismo de bombeo, uno de amplificación (medio activo) y otro de realimentación. El bombeo se encarga de entregar la energía necesaria al sistema para que este pueda sostener la emisión láser. Los mecanismos de bombeo son variados, pueden ir desde una reacción química hasta la excitación por medio de luz coherente (otro láser). El amplificador recibe la energía de bombeo y la transfiere al haz láser que genera.

El mecanismo de realimentación es el que da al láser sus características distintivas: alta coherencia, gran colimación y brillo. La realimentación se logra mediante espejos que re-inyectan una parte de la señal nuevamente en el dispositivo amplificador. Este mecanismo de realimentación define una cavidad resonante que consiste en dos o más espejos alineados de manera tal que la luz emitida por el amplificador se refleja sobre sí misma recorriendo el mismo camino óptico muchas veces. Uno de los espejos de la cavidad resonante debe tener una reflectividad menor que el 100%, para que parte de la luz que está oscilando salga de la cavidad produciendo un haz colimado. La figura 1.1.1 esquematiza el láser armado, en la que se detallan sus componentes.

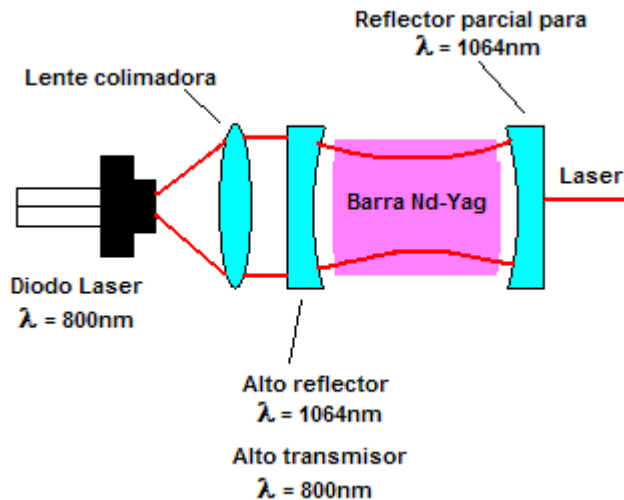


Figura 1.1.1- Representación del láser armado

Existen diferentes tipos de cavidades resonantes, dependiendo de la distancia y disposición entre los espejos, sus radios de curvatura, su reflectividad, etc. Dentro de estas posibilidades se puede hacer una clasificación en cuanto a su geometría, donde son de especial importancia para esta experiencia las cavidades lineales y las cavidades en V. Una cavidad en V consta de dos cavidades resonantes cuyos brazos se hallan formando un ángulo agudo.

A su vez, las cavidades resonantes se pueden dividir en dos grupos de importancia: las cavidades estables y las inestables.

Las cavidades estables son aquellas donde la distribución de intensidades se mantiene constante ante los sucesivos recorridos dentro de la cavidad, mientras que en las cavidades inestables el haz diverge en forma progresiva. La figura 1.1.2 esquematiza ambas cavidades<sup>1</sup>.

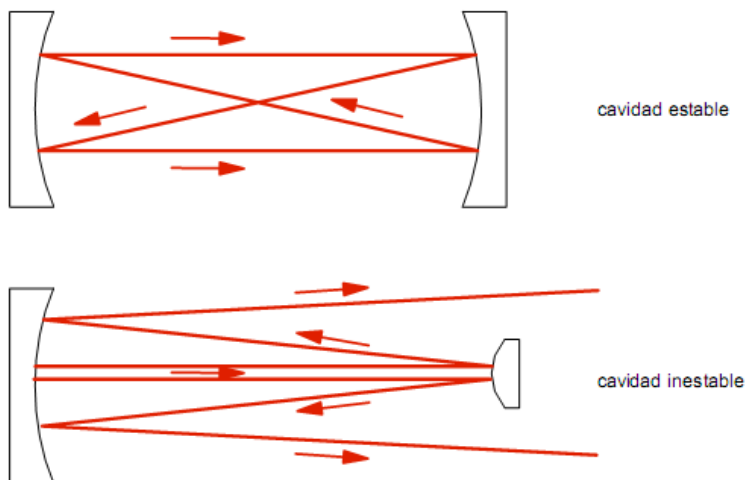


Figura 1.1.2- Esquemática de una cavidad estable (arriba) y una inestable (abajo)

Es claro, entonces, que no toda configuración de los espejos conformará una cavidad estable (conservación de la intensidad). Una cavidad será estable si, dados dos espejos de radios de curvatura  $R_1$  y  $R_2$ , se tiene<sup>1</sup>

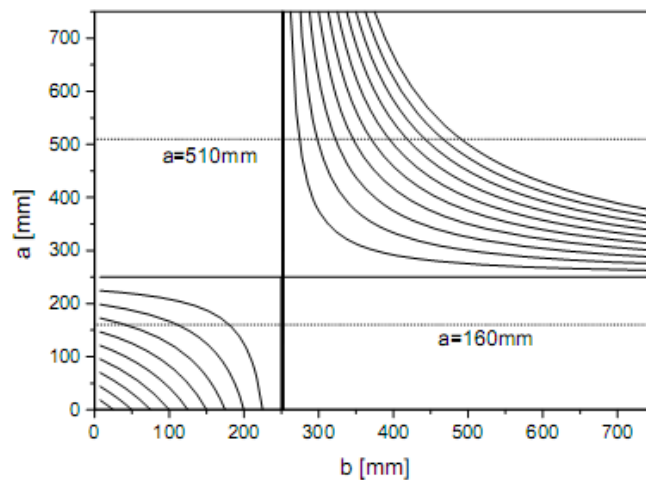
$$0 \leq g_1 g_2 \leq 1 \quad (1)$$

donde  $g$  es:

$$g = 1 - \frac{d}{R} \quad (2)$$

Donde  $d$  es la distancia entre los espejos R1 y R2.

En el caso de cavidades en V la relación entre los brazos de la misma que se deben cumplir para que la cavidad resulte estable se halla representada en las “curvas de estabilidad” que se muestran en la figura 1.1.3, donde la distancia  $a$  representa la distancia entre la barra de Nd:YAG y el espejo cóncavo y la distancia  $b$  representa la que existe entre éste espejo y el de salida<sup>2</sup>.



**Figura 1.1.3-** Relación entre las distancias  $a$  y  $b$  para conformar una cavidad en V estable

### 1.2 – Modos transversales

El modo transversal de un frente de [onda electromagnética](#) es el perfil del [campo electromagnético](#) en un plano perpendicular (transversal) a la dirección de propagación del mismo. Modos transversales ocurren cuando las ondas electromagnéticas están confinadas en una [guía de ondas](#), tal como ocurre en la cavidad de un [láser](#). Los modos transversales son debidos a las [condiciones de frontera](#) impuestas por la guía de ondas.

Los llamados *Modos TEM<sub>pq</sub>* (*Modo Transverso-Magnético de Orden pq*) son las funciones solución de la distribución de intensidades de una cavidad resonante, donde los índices  $pq$  indican el orden de los polinomios de Hermite<sup>3</sup> que son solución.

### 2.-Descripción del experimento

En esta experiencia se utilizó una mesa óptica, un diodo láser con un sistema de lentes cilíndricas (estos dos últimos contenidos en una caja acrílico), un sensor de potencia *Melles Griot – Broadband Power/Energy meter 13PEM001*, una fuente de alimentación de corriente, un dispositivo de control de temperatura para la fuente,

posicionadores angulares, una tarjeta infrarroja, un láser de He-Ne, espejos metálicos de plata, un espejo curvo dieléctrico de radio 50cm y espejos dieléctricos de reflectividades 98%, 94%, 90% y 85%, una PC, una cámara CCD, el software *Origin* y el *Image J*.

### 2.1 – Caracterización del diodo láser

Se comenzó encendiendo la fuente de corriente y el dispositivo de control de temperatura, esperando un tiempo aproximado de 10 minutos. Con el objetivo de calibrar el instrumento, se estudió la potencia del sistema en función de la corriente proporcionada por la fuente, midiendo con el sensor posicionado a una distancia  $d = (0 \pm 0.5)$ cm de la abertura de la caja.

De esta manera se pudo confeccionar una curva que relaciona la corriente de alimentación con la potencia entregada por el diodo láser.

### 2.2 – Alineación

Primeramente se buscó alinear la barra de Nd: YAG con el diodo láser, de modo tal de obtener un máximo de potencia del haz. Luego de hallar la ubicación que maximizara la potencia, se fabricó una cavidad lineal con un espejo dieléctrico plano de 98% de reflectividad<sup>1</sup>, el cual se alineó con la barra de ND-YAG con la ayuda de 2 espejos metálicos ubicados cada uno en un posicionador angular y un láser de He-Ne. La figura 2.2.1 muestra la disposición de los elementos en el proceso de alineación.

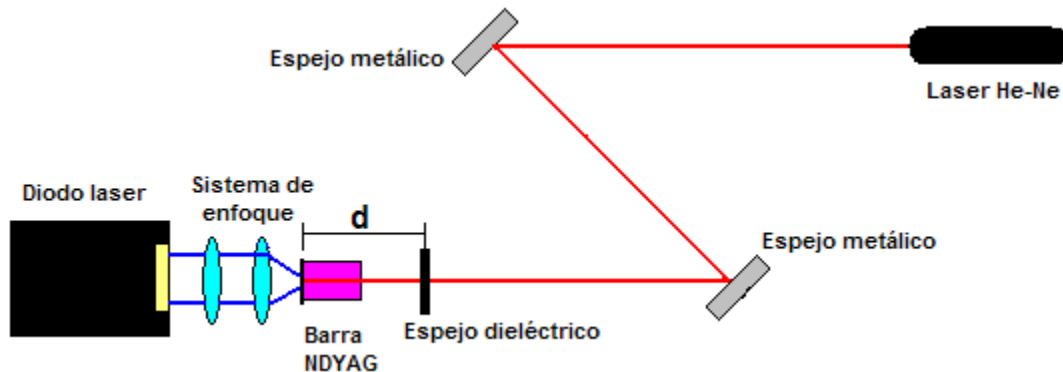


Figura 2.2.1- Disposición de los elementos en el proceso de alineación

Una vez alineada la cavidad, utilizando la tarjeta infrarroja y el sensor de potencia, se buscó nuevamente la posición de maximización de potencia. Este último procedimiento se realizó cada vez que fue modificándose la distancia  $d$  de la figura 2.2.1, reubicando el espejo plano.

### 2.3 – Curva de eficiencia de la cavidad lineal

Con el objetivo de caracterizar la cavidad lineal, esquematizada en la figura 2.2.1, se buscó estudiar la dependencia de la eficiencia, que se define como el cociente entre la potencia de láser y la de bombeo, con respecto a la distancia  $d$  (representada en la figura) y la reflectividad del espejo plano de salida.

Primeramente se utilizó un espejo dieléctrico plano de reflectividad 98% y se estudió la potencia de salida medida con el sensor en función de la potencia de bombeo (proporcional a la corriente generada por la fuente). Este proceso se repitió para tres cavidades distintas de longitudes  $d$ :  $(4.5 \pm 0.5)$ cm,  $(6.5 \pm 0.5)$ cm y  $(10 \pm 0.5)$ cm.

Posteriormente, fijando la distancia  $d = (6 \pm 0.5)\text{cm}$ , se realizó un estudio de eficiencia en relación a la reflectividad del espejo dieléctrico. Se estudió la relación entre la potencia de salida en función de la de bombeo utilizando espejos de reflectividad 98%, 94%, 90% y 85%.

#### 2.4 – Cavity en V

La figura 2.4.1 esquematiza la cavity en V armada<sup>2</sup>.

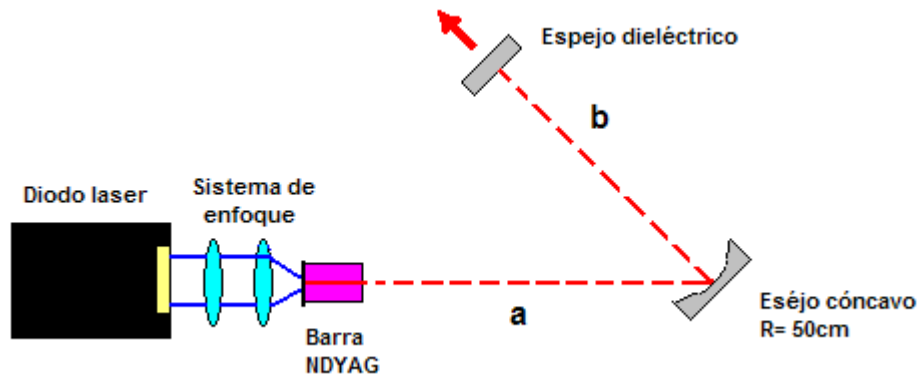


Figura 2.4.1- Esquematización de la cavity en V

Para armar la cavity en V de la figura 2.4.1, primero se realizó el proceso de alineación esquematizado en la figura 2.2.1 con la distancia  $d$  fijada en  $(6 \pm 0.5)\text{cm}$ . Utilizando el sensor de potencia se buscó maximizarla y, una vez logrado, se colocó un espejo cóncavo dieléctrico de  $R = 50\text{cm}$  y un espejo plano de igual naturaleza de 98% de reflectividad tal como se muestra en la figura 2.4.1, conformándose así la cavity en V.

Las distancias  $a = (30 \pm 0.5)\text{cm}$  y  $b = (36 \pm 0.5)\text{cm}$ , fueron fijadas teniendo en cuenta la relación expresada en la ecuación (1) para conformar una cavity estable.

El láser de cavity lineal construido fue el que sirvió para alinear esta nueva cavity en V. Una vez lograda la alineación se retiró el espejo dieléctrico de la cavity lineal quedando conformado el láser con cavity V propiamente dicho.

Ubicando el sensor de potencia en la salida del espejo plano, se estudió la relación entre la potencia de salida y la de bombeo.

#### 2.5 – Modos transversales

Para el estudio de los modos transversales TEM, se fijó una potencia de bombeo y se proyectó el haz de salida de la cavity V del láser fabricado sobre una pantalla. La imagen producida en el espectro infrarrojo pudo ser detectada y digitalizada mediante el uso de una cámara CCD para su posterior análisis. Variando cuidadosamente los posicionadores de los espejos cóncavos y plano fue posible apreciar algunos modos transversales horizontales y verticales.

Una vez digitalizadas las imágenes correspondientes a cada modo TEM, por medio del programa *Image J* se pudieron constituir los perfiles de intensidades de cada uno.

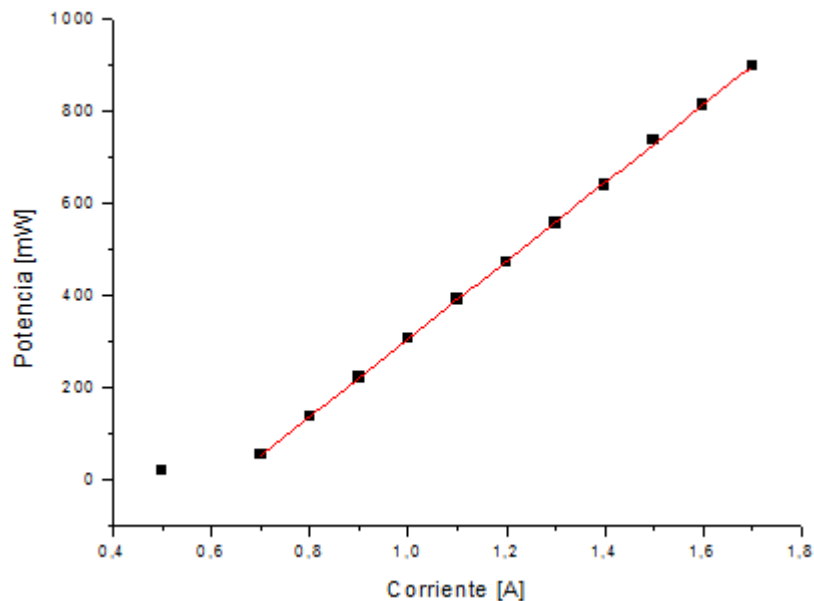
Con el sensor de potencia se estableció la potencia máxima de láser correspondiente al modo TEM<sub>00</sub>, considerando el offset de dicho sensor (que se logra enfocando al mismo a una zona oscura) se confeccionó una recta de calibración la cual serviría luego para reescalar los perfiles obtenidos a las unidades convenientes.

Integrando el perfil de intensidades correspondiente a cada modo transversal y con la calibración realizada se construyó el respectivo gráfico de potencia en función de la posición. Derivando nuevamente se reobtuvieron los perfiles de intensidad en las unidades deseadas.

### 3.-Resultados

#### 3.1 – Caracterización del diodo láser

La figura 3.1.1 muestra la respuesta en potencia del diodo láser, medida con el sensor posicionado a  $d = (0 + 0.5)\text{cm}$  de la abertura de la caja de acrílico. Donde la corriente umbral resultó ser...

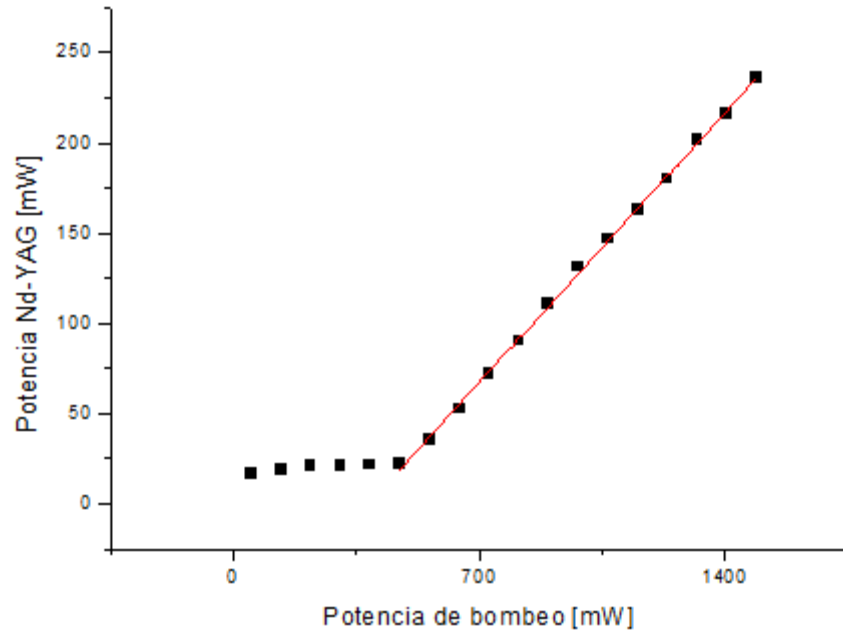


**Figura 3.1.1-** Potencia en función de la corriente de alimentación al diodo de bombeo con  $d = (0 + 0.5)\text{cm}$ , con sus respectivos errores y ajuste lineal de pendiente  $m = (846 \pm 4)\text{mW/A}$ . Coeficiente de correlación  $R = 0.99979$

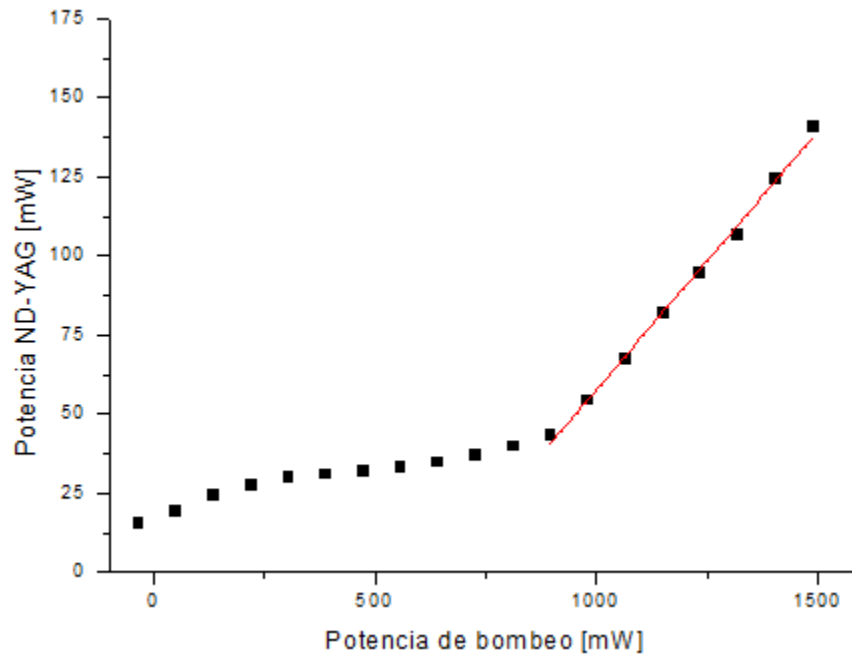
El ajuste lineal realizado a la relación proporcional entre la potencia y corriente, dio como resultado una recta de pendiente  $(846 \pm 4)\text{mW/A}$ . Esta es la recta que se utilizará en los siguientes estudios para relacionar corriente de alimentación con potencia de bombeo.

#### 3.2 – Curva de eficiencia de la cavidad lineal

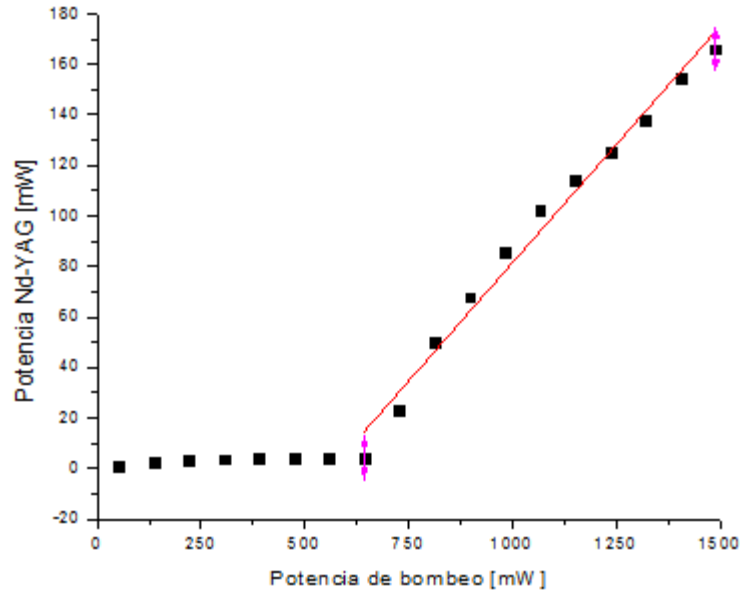
Las figuras 3.2.1, 3.2.2 y 3.2.3 muestran la relación entre la potencia de salida y la de bombeo para las cavidades de longitud  $d = (4.5 \pm 0.5)\text{cm}$ ,  $d = (6.5 \pm 0.5)\text{cm}$  y  $d = (10 \pm 0.5)\text{cm}$ , respectivamente.



**Figura 3.2.1-** Relación entre la potencia de salida y la de bombeo para  $d = (4.5 \pm 0.5)\text{cm}$ , con sus respectivos errores y ajuste lineal de pendiente  $m = (474 \pm 80)\text{mW}$ . Coeficiente de correlación  $R = 0.99903$



**Figura 3.2.2-** Relación entre la potencia de salida y la de bombeo para  $d = (6.5 \pm 0.5)\text{cm}$ , con sus respectivos errores y ajuste lineal de pendiente  $m = (910 \pm 100)\text{mW}$ . Coeficiente de correlación  $R = 0.99499$



**Figura 3.2.3-** Relación entre la potencia de salida y la de bombeo para  $d = (10 \pm 0.5)\text{cm}$ , con sus respectivos errores y ajuste lineal de pendiente  $m = (686 \pm 42)\text{mW}$ . Coeficiente de correlación  $R = 0.98277$

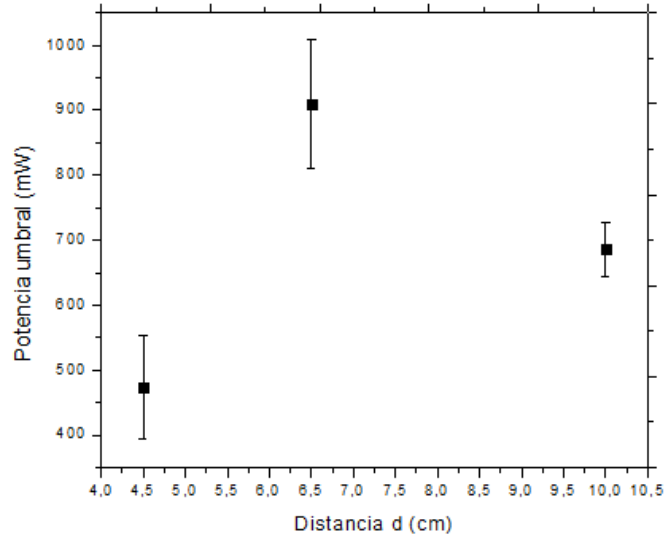
Se obtiene del gráfico de la figura 3.2.1 que la potencia umbral de láser para la cavidad lineal resultó ser  $P_b = (474 \pm 80)\text{mW}$ . Del gráfico de la figura 3.2.2 se obtuvo una potencia de umbral de láser de  $P_b = (910 \pm 100)\text{mW}$ . Finalmente, del gráfico de la figura 3.2.3 se obtuvo una potencia de umbral de láser de  $P_b = (686 \pm 42)\text{mW}$ . Se esperaba observar que la potencia umbral aumentara al aumentar la distancia  $d$ . No obstante, el resultado del caso de distancia  $(6.5 \pm 0.5)\text{cm}$  es notablemente mayor que el de la distancia mayor  $(10 \pm 0.5)\text{cm}$ . El resultado de este caso particular se atribuye a no haberse posicionado el sensor de manera tal de maximizar la potencia previamente a la medición.

El error en la determinación de la potencia umbral proviene de tomar el promedio entre el primer y segundo punto de la curva a partir de los cuales comienza a crecer la potencia de salida, dado que el valor exacto debe encontrarse entre ellos.

De los ajustes lineales realizados a los gráficos de las figuras 3.2.1, 3.2.2 y 3.2.3 se obtuvieron pendientes de  $(0.21 \pm 0.002)$ ,  $(0.16 \pm 0.004)$  y  $(0.18 \pm 0.007)$ , respectivamente.

Tanto los resultados del análisis de las potencias umbral y de las pendientes se desprende que no pudo determinarse una dependencia fija respecto al aumento de la distancia  $d$ , dado que la potencia umbral máxima corresponde a una cavidad de longitud “ $d$ ” intermedia. La figura 3.2.4 detalla este resultado.



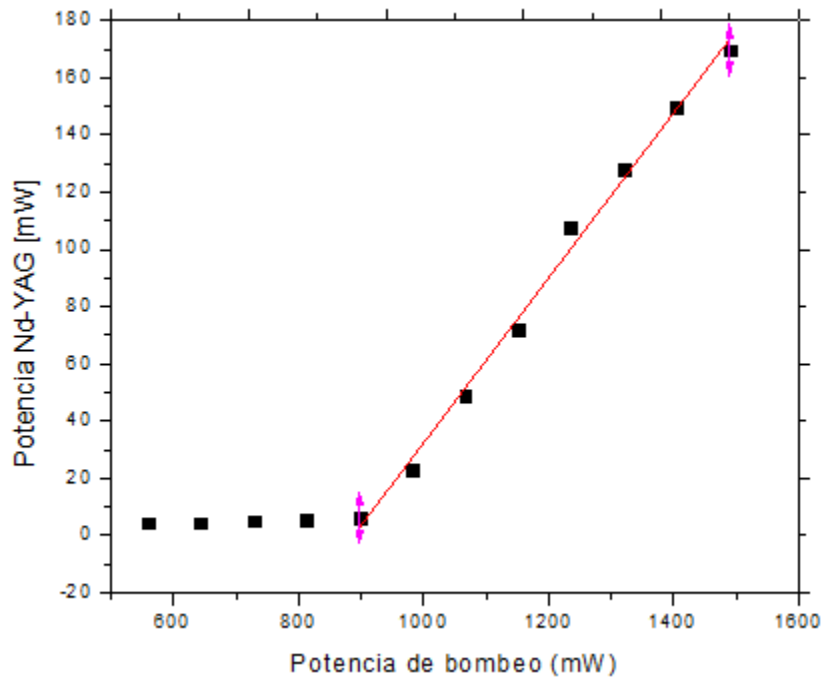


**Figura 3.2.4-** Dependencia de la potencia umbral con las distancias fijadas

Además, el valor de la pendiente que corresponde a la distancia para la cual se obtuvo mayor potencia umbral ( $d = (6.5 \pm 0.5)\text{cm}$ ), resultó ser la menor.

Posteriormente, habiendo fijado la distancia  $d = (6 \pm 0.5)\text{cm}$ , se obtuvieron gráficos de la potencia de salida del Nd: YAG en función de la potencia de bombeo utilizando en cada caso espejos con diferentes reflectividades.

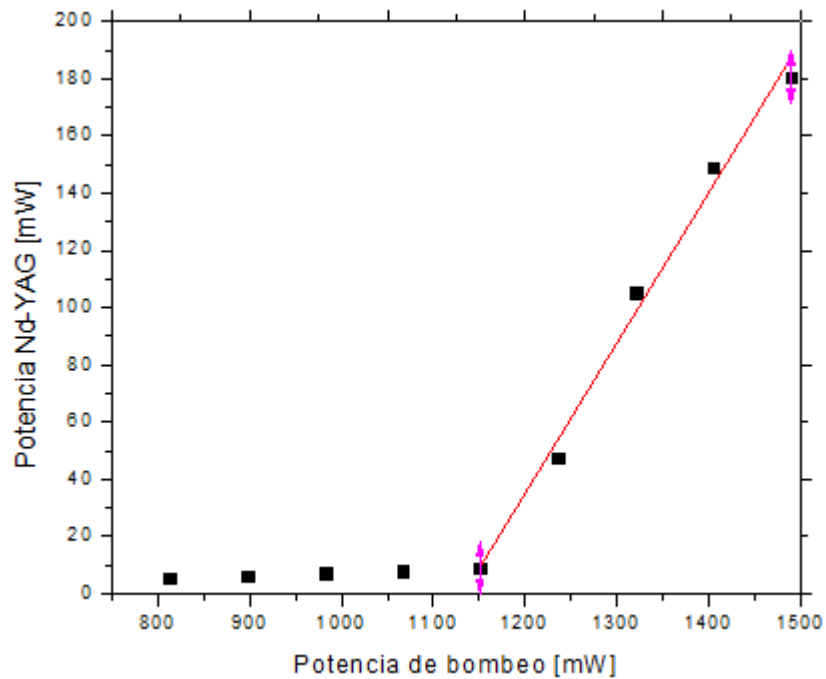
La figura 3.2.5 muestra dicha relación habiendo utilizado el espejo de reflectividad 98%.



**Figura 3.2.5** Relación entre la potencia de salida y la de bombeo en una cavidad lineal con espejo de reflectividad 98%, con sus respectivos errores y ajuste lineal de pendiente  $m = (940 \pm 40)\text{mW}$ . Coeficiente de correlación  $R = 0.99402$

De la figura 3.2.5 se desprende que la potencia umbral de laseo para el espejo de reflectividad 98% resultó ser de  $P_b = (940 \pm 40)\text{mW}$ .

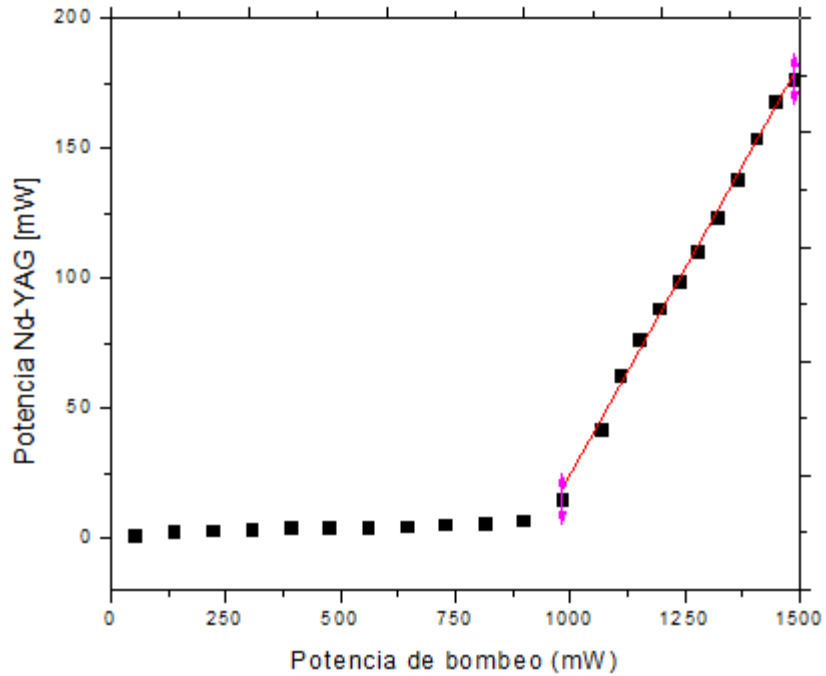
El gráfico de la figura 3.2.6 muestra dicha relación entre potencias habiendo utilizado el espejo de reflectividad 94%.



**Figura 3.2.6** Relación entre la potencia de salida y la de bombeo con espejo de reflectividad 94%, con sus respectivos errores y ajuste lineal de pendiente  $m = (1194 \pm 44)\text{mW}$ . Coeficiente de correlación  $R = 0.98672$

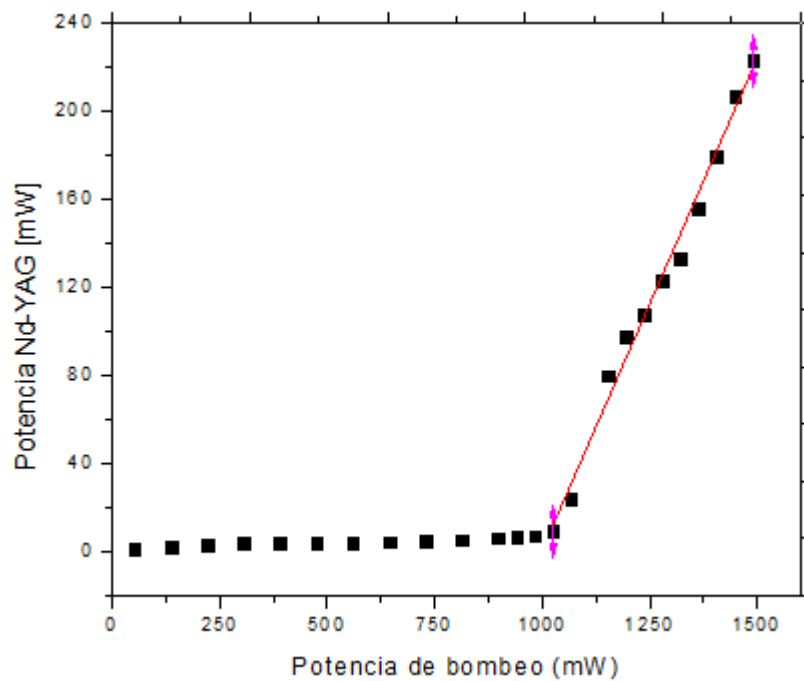
En este caso se obtuvo una potencia umbral de laseo de  $P_b = (1194 \pm 44)\text{mW}$ , tomando el mismo criterio que en el caso de reflectividad 98%.

La figura 3.2.7 muestra la relación entre potencias con el espejo de reflectividad 90%.



**Figura 3.2.7** Relación entre la potencia de salida y la de bombeo con espejo de reflectividad 90%, con sus respectivos errores y ajuste lineal de pendiente  $m=(943 \pm 44)\text{mW}$ . Coeficiente de correlación  $R = 0.9965$

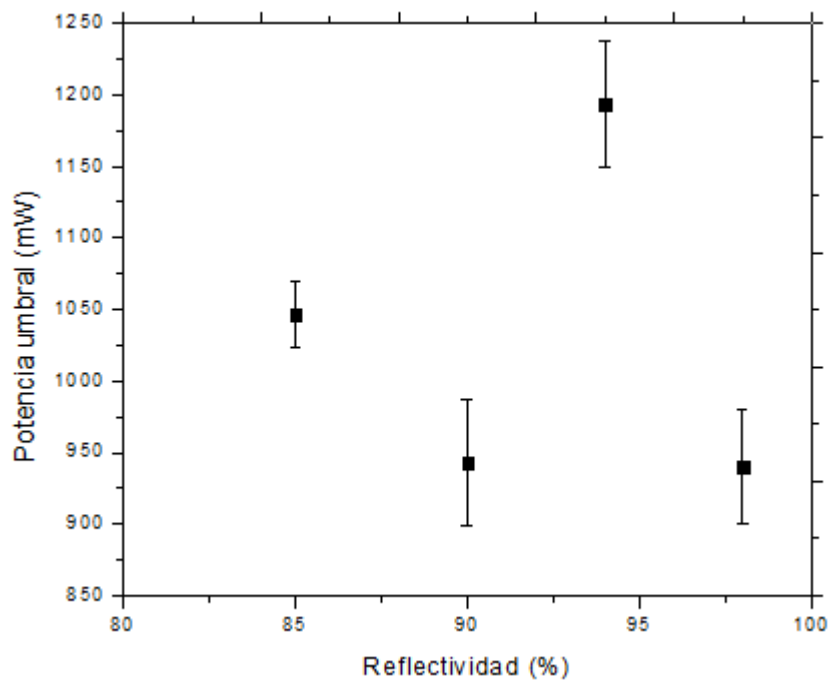
En este caso se obtuvo una potencia umbral de laseo de  $P_b=(943 \pm 44)\text{mW}$  Por último, el gráfico de la figura 3.2.8 muestra la relación de potencias habiendo utilizado el espejo de reflectividad 85%.



**Figura 3.2.8** Relación entre la potencia de salida y la de bombeo con espejo de reflectividad 85%, con sus respectivos errores y ajuste lineal de pendiente  $m = (1047 \pm 23)\text{mW}$ . Coeficiente de correlación  $R = 0.9875$

En este último caso, la potencia umbral resultó ser  $P_b = (1047 \pm 23)\text{mW}$ . De los ajustes lineales realizados a los gráficos de las figuras 3.2.5, 3.2.6, 3.2.7 y 3.2.8 se obtuvieron los valores de pendiente  $(0.288 \pm 0.008)$ ,  $(0.52 \pm 0.03)$ ,  $(0.31 \pm 0.005)$  y  $(0.44 \pm 0.01)$ , respectivamente.

Los gráficos de las figuras 3.2.9 y 3.2.10 muestran con mayor detalle la relación entre la potencia umbral y la reflectividad en cada caso.



**Figura 3.2.9-** Relación entre la potencia umbral y la reflectividad del espejo utilizado

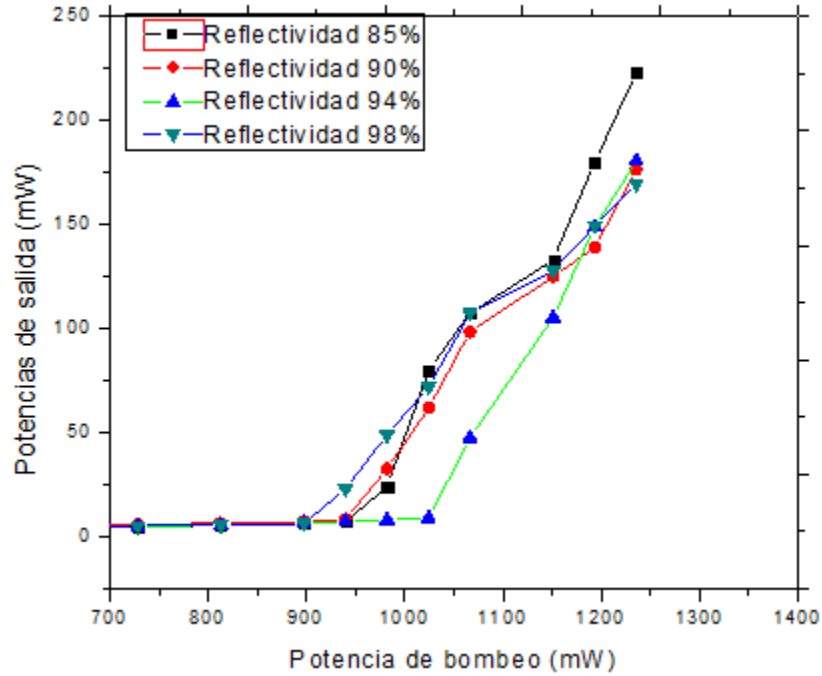


Figura 3.2.10- Relación entre las potencias de salida para cada reflectividad en función de la potencia de bombeo

La figura 3.2.11 detalla el rango de potencias umbral para las distintas reflectividades en función de la potencia de bombeo.

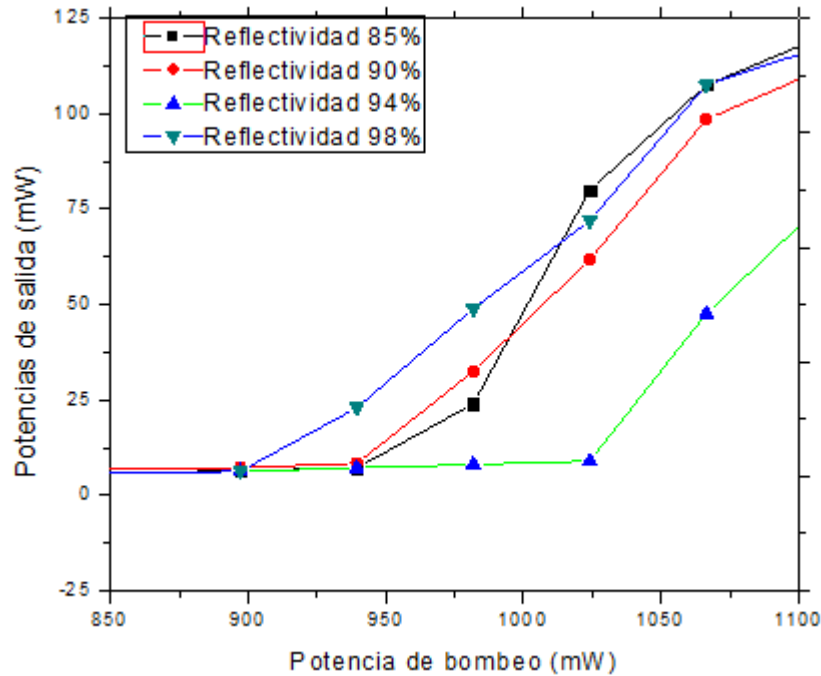


Figura 3.2.11- Detalle de la relación entre las potencias de salida para cada reflectividad en función de la potencia de bombeo

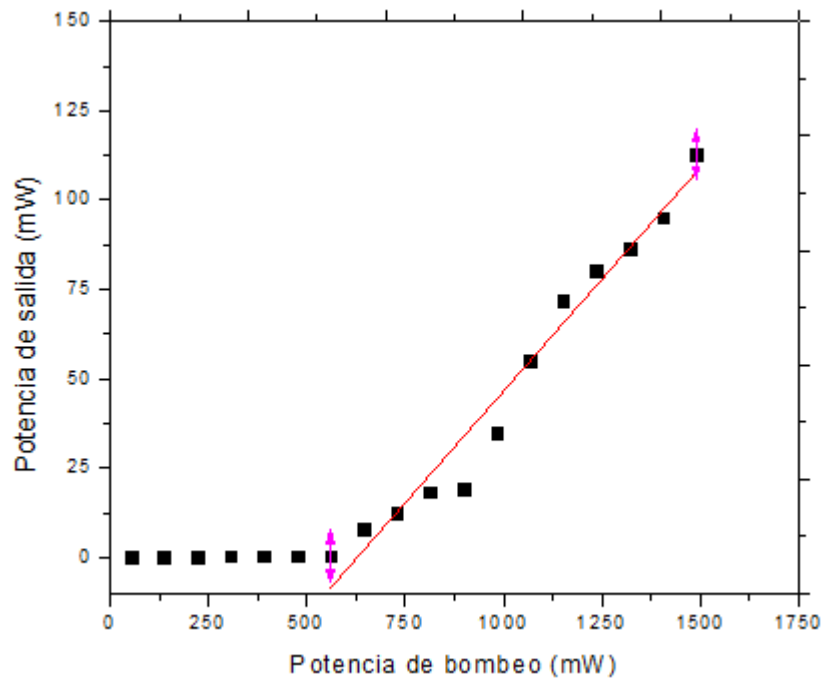
Dado que los espejos re-inyectan la señal y esto forma parte de la realimentación del láser, se tiene que cuanto mayor es el porcentaje de señal que se refleja, más efectiva será dicha realimentación y menos corriente

necesitará para comenzar el laseo. Este modelo del láser se ajusta a los resultados obtenidos dado que, a menor reflectividad, mayor resultó ser la potencia umbral. Sin embargo, el caso del espejo de reflectividad 94% no se ajusta a los restantes casos, debido a que su potencia umbral resultó aún mayor que en el caso de reflectividad menor 85%. Se considera que esto es debido a los daños en la superficie de este espejo.

Adicionalmente, se observa un aumento en la pendiente conforme disminuye la reflectividad del espejo usado y la distancia d.

### 3.3 – Cavity en V

La figura 3.3.1 muestra la relación entre la potencia de salida y la potencia de bombeo para la cavidad en V con distancias a y b de la figura 2.4.1 fijadas en  $(30 \pm 0.5)\text{cm}$  y  $(36 \pm 0.5)\text{cm}$ , respectivamente.

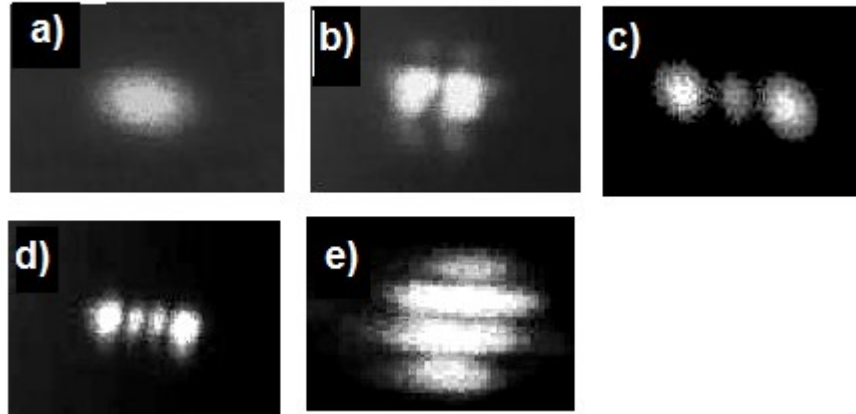


**Figura 3.3.1-** Relación entre la potencia de salida y la de bombeo para la cavidad en V con distancias  $a = (30 \pm 0.5)\text{cm}$  y  $b = (36 \pm 0.5)\text{cm}$  y ajuste lineal de pendiente  $m=(601 \pm 42)\text{mW}$ . Coeficiente de correlación  $R = 0.9873$

Del ajuste lineal realizado se obtuvo una pendiente de  $(0.12 \pm 0.007)$ . Para este caso, se obtuvo una potencia umbral de  $P_b = (601 \pm 42)\text{mW}$

### 3.4 – Modos transversales

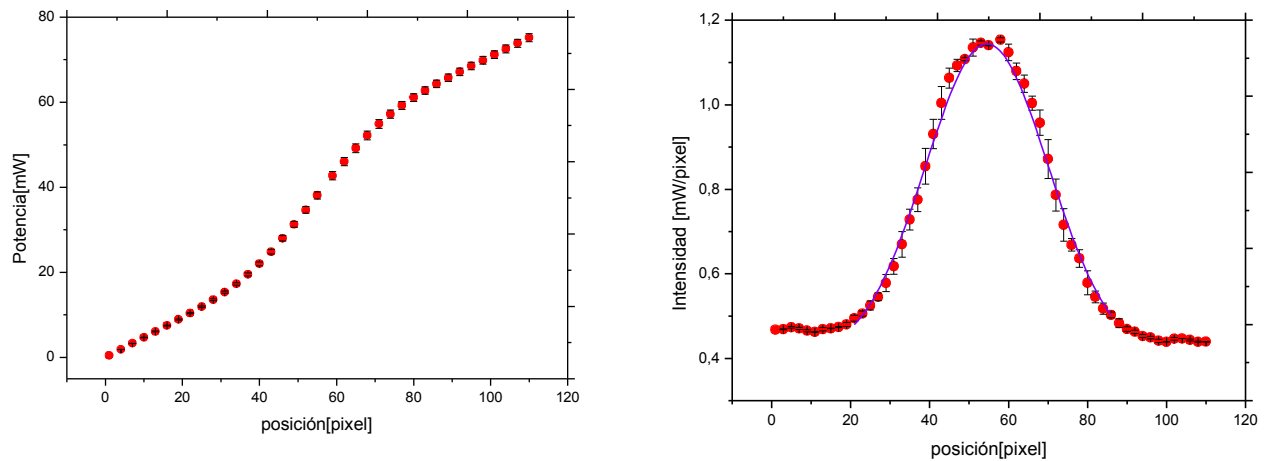
Las imágenes fotográficas de los modos TEM obtenidas se muestran en la figura 3.4.1.



**Figura 3.4.1-** Imágenes fotográficas de los modos transversales TEM  
a)TEM<sub>00</sub> , b)TEM<sub>01</sub>, c)TEM<sub>02</sub> , d)TEM<sub>03</sub>,e)TEM<sub>30</sub>

A partir de estas imágenes se construyeron los gráficos de potencia y perfil de intensidades correspondiente a cada modo.

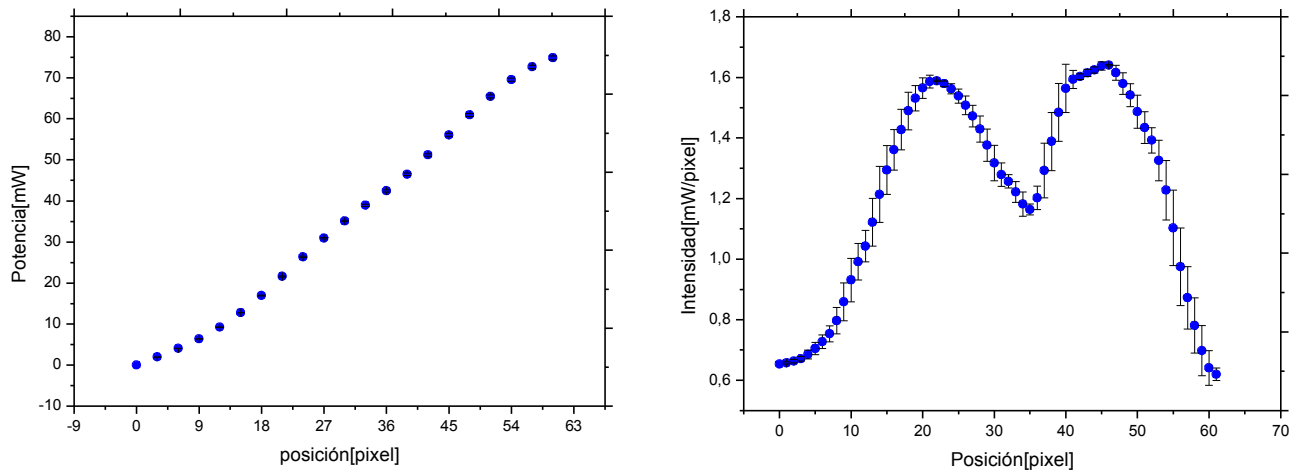
Los gráficos de potencia y perfil de intensidades para el modo TEM<sub>00</sub> se muestran en la figura 3.4.2 (4), (6)



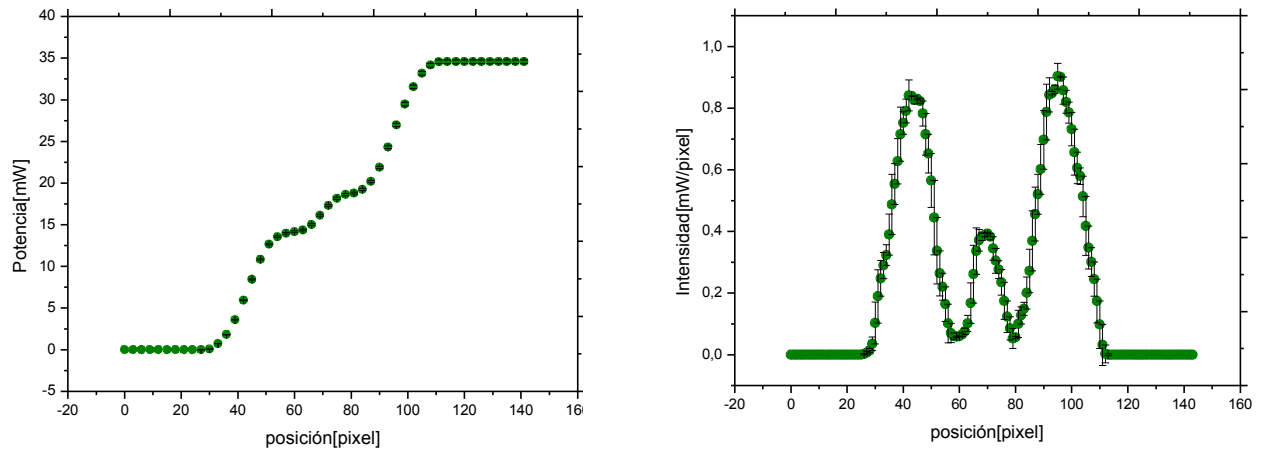
**Figura 3.4.2** Potencia de salida de la cavidad V (izquierda) y perfil de intensidades (derecha) para el modo TEM<sub>00</sub>

El perfil de intensidades pudo ser ajustado por una curva gaussiana.

Para los modos transversales superiores se obtuvieron las gráficas análogas que se muestran en las figuras 3.4.3 para el TEM<sub>01</sub>, 3.4.4 para el TEM<sub>02</sub>, 3.4.5 para el TEM<sub>03</sub> y 3.4.6 para el TEM<sub>30</sub>.

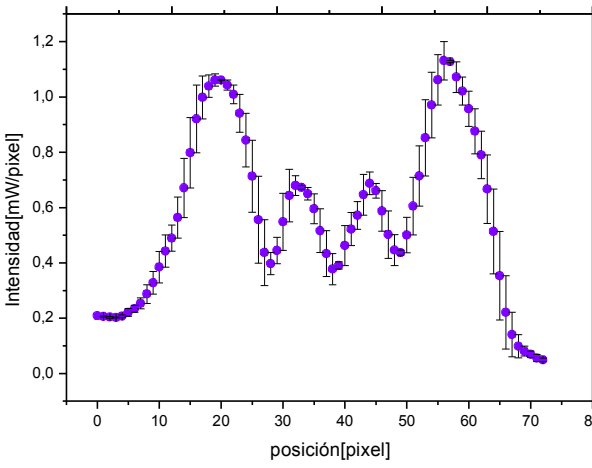
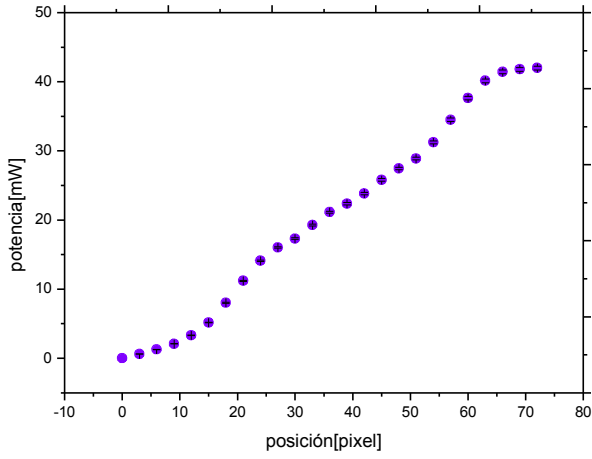


**Figura 3.4.3** Potencia de salida de la cavidad V (izquierda) y perfil de intensidades (derecha) para el modo TEM<sub>01</sub>

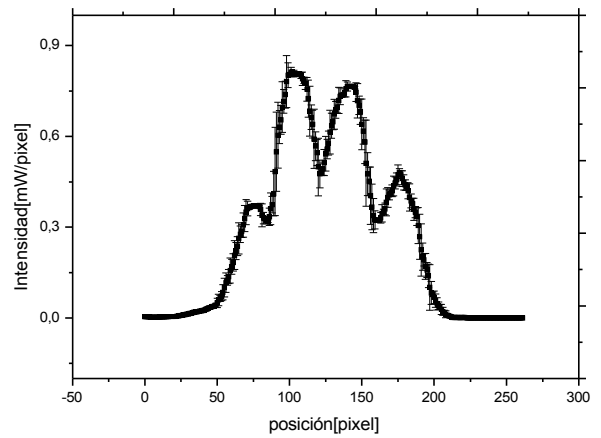
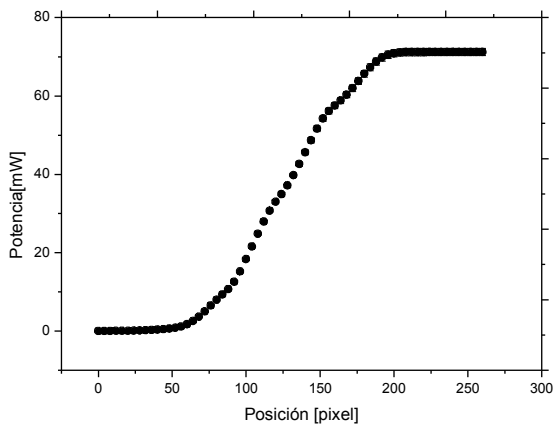


**Figura 3.4.4-** Potencia de salida de la cavidad V (izquierda) y perfil de intensidades (derecha) para el modo TEM<sub>02</sub>





**Figura 3.4.5-** Potencia de salida de la cavidad V (izquierda) y perfil de intensidades (derecha) para el modo TEM<sub>03</sub>



**Figura 3.4.6** Potencia de salida de la cavidad V (izquierda) y perfil de intensidades (derecha) para el modo TEM<sub>30</sub>

Se observa que los valores máximos de intensidad varían entre un modo y otro. Es de esperar que a medida que se avanza en los modos normales los picos de intensidad máxima disminuyan, ya que el láser se dispersa. En este caso dicha tendencia no se observa debido a que, para poder obtener mejores imágenes de los modos TEM, se cambió la pantalla de proyección de manera conveniente, por superficies con distintos grados de reflectividad, variándose además la ubicación de la misma. De esta manera se evitaron reflejos que introducirían ruidos indeseados en los perfiles.

Por otra parte y tal como era de esperar, se observa que el perfil de intensidades se va deformando para los distintos modos transversales, desde una curva gaussiana correspondiente al modo TEM<sub>00</sub>, con un solo pico, hasta una curva con 4 picos, como la representada para el modo TEM<sub>03</sub>. Se intentó ajustar las curvas de los perfiles de intensidad de los modos superiores con los polinomios de Hermite que propone el modelo teórico, pero los ajustes logrados no eran satisfactorios.

#### 4.-Conclusiones

En primer lugar, fue posible establecer una relación lineal entre la corriente proporcionada y la potencia de salida del diodo láser, el ajuste obtenido dio una recta de pendiente  $(846 \pm 4)\text{mW/A}$  y ordenada al origen  $(-541 \pm 5)\text{mW}$  que fue utilizada luego para realizar las conversiones de corriente de alimentación a potencia de bombeo en los análisis de eficiencia de la distintas configuraciones diseñadas. Dicho análisis consistió en estudiar las relaciones entre potencia de bombeo y potencia de salida.

Respecto al estudio de la eficiencia del láser de cavidad lineal, pudo concluirse que la misma depende de los distintos parámetros característicos. Fundamentalmente pudo observarse un aumento en la potencia umbral con el aumento de la distancia característica entre la barra de Nd:YAG y el espejo dieléctrico plano que definen la cavidad. Sin embargo, la potencia umbral correspondiente a la cavidad lineal con la distancia  $d = (6.5 \pm 0.5)\text{cm}$  muestra que debe maximizarse la potencia antes de comenzar a medir; de lo contrario, la potencia umbral aumentará no sólo por haberse incrementado la distancia, sino porque se necesitará mayor corriente para que el haz de luz resuene en la cavidad, es decir, la potencia de bombeo deberá ser mayor, lo que equivale a decir que la potencia umbral aumenta. Por otro lado, a mayor reflectividad del espejo usado, un mayor porcentaje del haz será reflejado dentro de la cavidad y más efectivo resultará ser el láser, dado que necesitará menos corriente (menos potencia) para iniciar el laseo. Adicionalmente debe tenerse en cuenta el daño superficial de los espejos, debido a que esto modifica su capacidad de reflejar el haz. Para determinar exactamente el porcentaje de reflectividad, se quiso medir el porcentaje de transferencia de cada uno inyectando un haz láser y utilizando un fotodiodo, pero dado que los espejos dieléctricos cumplen su función a longitudes de onda específicas, sólo se podía utilizar el láser fabricado el emite en el infrarrojo y además es de elevada potencia para los fotodiodos disponibles en el laboratorio por lo que la experiencia se atuvo a los valores de reflectividad indicados por el fabricante, aunque dicha caracterización se podría haber hecho con el mismo Nd:YAG armado en la práctica.

Por otro lado, pudo estudiarse los modos transversales de oscilación para el caso de la cavidad en V, obteniendo los perfiles de intensidad de cada uno. En el caso del modo TEM<sub>00</sub> resultó satisfactorio el ajuste gaussiano a la curva obtenida, tal como era de esperarse<sup>1</sup>. Si bien no pudieron ajustarse los siguientes modos utilizando los polinomios de Hermite, el análisis del perfil de intensidades de cada uno se corresponde a lo esperado respecto a la imagen capturada con la cámara, en el que la intensidad es máxima alrededor de un punto para el caso de  $p=0$

y  $q=0$  (ver *figuras 3.4.1a y 3.4.2*), alrededor de dos para  $p = 0$  y  $q=1$  (*figuras 3.4.1b y 3.4.3*), alrededor de tres para  $p = 0$  y  $q = 2$  (ver *figuras 3.4.1c y 3.4.4*), alrededor de 4 para los casos  $p = 0$  y  $q = 3$  (*figuras 3.4.1d y 3.4.5*) y para  $p = 3$  y  $q = 0$  (*figuras 3.4.1e y 3.4.6*). Haber hallado estos últimos dos modos permitió comparar los perfiles cuando la cantidad de ceros de intensidad en uno u otro eje quedaban alternados.

## 5.- Referencias:

- [1] **Láser**, *Guía laboratorio 5*, Dpto. de Física FCEyN, UBA\_  
 [2] **Cavidades**, *Guía laboratorio 5*, Dpto. de Física FCEyN, UBA\_  
 [3] **Eisberg, Robert. M** *Fundamentos de Física moderna*, ed. Limusa México (1997) pág., 263\_

## 6.-Apéndices

### 6.1 Apéndice de errores

Expresión para la estimación de derivadas del software Origin:

$$\sum_{i=1}^{n-1} \frac{f(x_{i+1}) - f(x_i)}{x_{i+1} - x_i} \quad (3)$$

Propagación del error en la estimación de derivadas según la expresión (3)

$$\sum_{i=1}^{n-1} \frac{\Delta f(x_{i+1}) + \Delta f(x_i)}{|x_{i+1} - x_i|} + \frac{(|f(x_{i+1})| + |f(x_i)|)}{(x_{i+1} - x_i)^2} (\Delta x_i + \Delta x_{i+1}) \quad (4)$$

Expresión para la estimación de integrales del software Origin:

$$\sum_{i=1}^{n-1} (x_{i+1} - x_i) \frac{1}{2} (f(x_{i+1}) + f(x_i)) \quad (5)$$

Propagación del error en la estimación de derivadas según la expresión (5)

$$\frac{1}{2} \sum_{i=1}^{n-1} (|f(x_{i+1})| + |f(x_i)|) (\Delta x_{i+1} + \Delta x_i) + |(x_{i+1} - x_i)| (\Delta f(x_{i+1}) + \Delta f(x_i)) \quad (6)$$