



33
29
1990 01 29
UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE CIENCIAS

DESARROLLO DE UN ACOPLADOR
LASER-FIBRA OPTICA

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE

F I S I C O

P R E S E N T A

CARLOS GERARDO TREVIÑO PALACIOS

MEXICO, D. F.

FALLA DE ORIGEN

JULIO, 1990.

INDICE

	PAGINA
INDICE	1
INTRODUCCION	3
CAPITULO I FIBRAS OPTICAS Y LASERES	5
I.1 Motivación.	5
I.2 Fibras ópticas.	6
I.3 Abertura numérica.	9
I.4 Método para determinar aberturas numéricas y criterio de máxima potencia	11
I.5 Pulido de los extremos de las fibras opticas	14
I.6 El láser de argón	17
I.7 Características de la emisión láser	21
CAPITULO II ACOPLADOR LASER-FIBRA OPTICA	23
II.1 Consideraciones para el desarrollo del acoplador	23
II.2 Módulo adaptador láser-acoplador	25
II.3 Módulo lente	25
II.4 Módulo diafragma	29
II.5 Módulo fibra óptica	30
II.6 Módulo obturador	31
II.7 Instalación del acoplador	32
CAPITULO III RADIACION DE MATERIALES CON UN LASER DE ARGON	34
III.1 Selección de materiales radiados	34
III.2 Muestras radiadas	39
III.2.1 Acrílico	40
III.2.2 Madera de pino	47
III.2.3 Papel ilustración	52
III.2.4 Placa fenólica con cobre	55
III.3 Tamaño de las muestras	57

CAPITULO IV RESULTADOS	61
IV.1 Medición de las aberturas numéricas	61
IV.2 Medición del diámetro del haz del láser	63
IV.3 Respuesta del acoplador láser-fibra óptica	64
IV.4 Discusión del diámetro de las muestras radiadas	66
CONCLUSIONES	67
BIBLIOGRAFIA	68
APENDICE 1 PLANOS DEL ACOPLADOR LASER-FIBRA OPTICA	69
APENDICE 2 TABLAS	81

En el capítulo dos se describe el diseño del producto más importante del presente trabajo, un acoplador láser-fibra óptica, el cual representa un instrumento necesario para trabajar con fibras ópticas como conductoras de luz láser.

En el capítulo tres se presenta una aplicación de la combinación láser-fibra óptica, consistente en irradiar diversos materiales con radiación proveniente de un láser de argón.

Se enlistan en el capítulo cuatro los resultados encontrados en el presente trabajo en lo que respecta a la determinación de la abertura numérica de las fibras ópticas, las perforaciones hechas en los materiales irradiados y la respuesta del acoplador láser-fibra óptica

Se incluyen dos apéndices al trabajo. En el primero se reproducen los planos del prototipo de acoplador láser-fibra óptica que se diseñó y en el segundo se enlistan las tablas de los diámetros de las perforaciones hechas con el láser de argón sobre diversos materiales, descritas en el capítulo - tres.

CAPITULO I

FIBRAS OPTICAS Y LASERES

1.1 MOTIVACION.

Dentro del desarrollo de la óptica contemporánea existen elementos que han ayudado al avance de la ciencia y tecnología en diversas direcciones. Entre éstos encontramos a los láseres, dispositivos electro-ópticos y acusto-ópticos, la holografía, las fibras ópticas, etc. En particular nos interesa el estudio de las fibra ópticas para la elaboración de diversos instrumentos. Estas han permitido un desarrollo notable en diferentes campos:

- Telecomunicaciones.
- Computación.
- Litografía.
- Metrología.
- Industrial.
- Medicina.
- Instrumentación.

Las aplicaciones de las fibras ópticas en estos campos van desde realizar una interfase de control hasta elaborar una complicada red de comunicación o desde la transmisión de señales hasta ser usadas en intervenciones quirúrgicas complejas.

Los sistemas que involucran fibras ópticas pueden contener diversos elementos, pero cualesquiera que éstos sean es posible ubicarlos dentro de la siguiente clasificación¹:

<i>Transmisores.</i>	<i>Fibras Ópticas.</i>
<i>Receptores.</i>	<i>Acopladores.</i>
	<i>Conectores.</i>

los dos grupos de la izquierda se denominan "activos" y los tres restantes "pasivos". Cualquier sistema con fibras ópticas debe contener al menos elementos de los cuatro primeros grupos.

Debido a sus características, las fibras ópticas ofrecen ventajas sobre sistemas electrónicos que usan pares de cobre e incluso sobre algunos arreglos ópticos convencionales²; dentro de las ventajas que podemos mencionar se encuentran:

<i>Tamaño pequeño *</i>	<i>Flexibilidad.</i>
<i>Ancho de banda muy grande *</i>	<i>Versatilidad geométrica.</i>
<i>Inmune al ruido electromagnético *</i>	<i>Alta resolución.</i>
<i>Pocas pérdidas en la señal *</i>	<i>Permite realizar mediciones In-situ.</i>
<i>No existen corto circuitos *</i>	<i>Son elementos pasivos.</i>
<i>Posibilidad de multiplexación de la señal.</i>	

¹ Un ejemplo es el interferómetro tipo Sagnac usado en giroscopos, que usando fibras ópticas puede detectar variaciones de posición de algunos segundos de arco.

² Dentro de éstas las marcadas con asterisco (*) se consideran en el área de las comunicaciones y las demás en el área de la instrumentación

Las fibras ópticas presentan también algunos inconvenientes: se requiere de tiempos largos para realizar desarrollos con éstas, además que los parámetros involucrados no son fáciles de comprender sin una preparación previa.

Quando se utiliza la fibra óptica para transmitir información en forma digital o analógica, se dice que se trata de una "transmisión inteligente", mientras que si lo que interesa es el transporte de energía o de imágenes se trata de una "transmisión ininteligente" (o no inteligente).

El desarrollo de las fibras ópticas ha sido mayor en unas áreas que en otras. En el campo de las telecomunicaciones por razones económicas a sido donde más se ha desarrollado el uso de éstas, debido a que se puede transportar un mayor número de canales que la usual comunicación a través del cable eléctrico. Otras áreas donde las fibras ópticas han sido muy explotadas han sido la automatización y la computación, permitiendo una comunicación rápida entre máquinas, a velocidades en ocasiones cientos de veces mayores que por el cable eléctrico.

Un campo donde la fibra óptica ha tenido particular aceptación ha sido - en la Medicina ya que permite trabajar dentro del cuerpo humano por los canales naturales (conductos gástricos, venas, arterias, etc.) sin necesitar de cirugía o inspección indirecta como las radiografías. Las áreas de la medicina donde el uso de la fibra óptica ha sido más frecuente han sido la endoscopia, cardiología, oftalmología y cirugía en general. Como no se requiere de contacto directo con los órganos se tiene una esterilidad absoluta.

Estas posibilidades de aplicar las fibras ópticas, son dependientes de la técnica y la tecnologías extranjeras, excepto en el campo de las comunicaciones donde se empieza a tener conocimiento a nivel nacional. Por esto, nos hemos preocupado por realizar estudios para familiarizarnos con el uso de fibras ópticas para desarrollar instrumentación en los campos que he mencionado como de transmisión ininteligente.

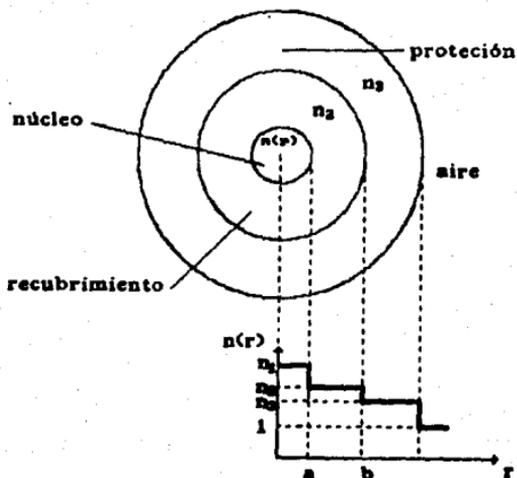
Así en el presente trabajo desarrollamos instrumentación básica para - trabajar con fibras ópticas, que sirvan de base para trabajos futuros.

1.2. FIBRAS OPTICAS.

¿Pero que es en sí una fibra óptica? En su forma más simple consiste de un arreglo coaxial de dos vidrios homogéneos con distribución de índices de refracción como se muestra en la Figura 1.1.

Las fibras ópticas se clasifican principalmente por el perfil de índices de refracción de las dos capas centrales visto como una función del radio. El perfil más común es el mostrado en la Figura 1.1 donde el cambio de índices es una función de escalón, por lo que este tipo de fibras se conoce como: "fibras ópticas de índice-en-escalón". Al cilindro interior le llamamos núcleo, al intermedio recubrimiento y al exterior protección, la cual cubre a la fibra óptica y la protege de daños físicos. El índice de refracción de la protección debe ser menor al índice de refracción del núcleo por razones que veremos más adelante.

Figura 1.1
Perfil de índices de refracción para una fibra óptica del tipo "índice en escalón"



Hay fibras con perfiles más generales, como ejemplo, se presenta en la Figura 1.2 una fibra óptica con un núcleo inhomogeneo rodeado por un recubrimiento homogéneo y cubierta por una protección plástica. El índice de refracción de este tipo de fibra tiene una distribución no-constante que varía como una función del radio por lo que llamamos a este tipo de fibras de tipo "fibras ópticas de gradiente de índice"

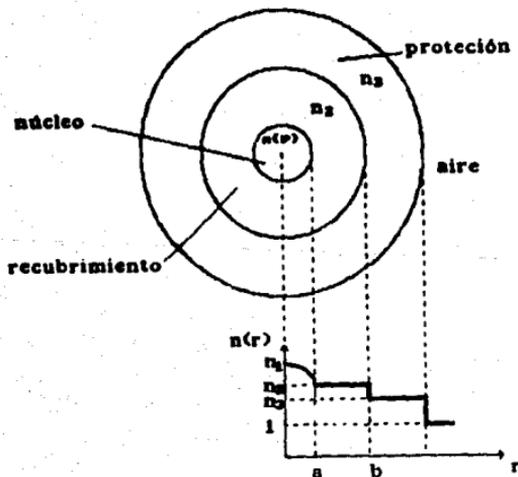


Figura 1.2
Perfil de índices de refracción para una fibra óptica del tipo "gradiente de índice"

Existen otras distribuciones de índices de refracción las cuáles son usadas para aplicaciones específicas: fibra óptica tipo "W", fibra óptica - birrefringente (la cual conserva el estado de polarización). Dependiendo de los materiales con los que se elaboran éstas (plástico, vidrio, cuarzo), permiten que se transmitan señales con pérdidas de intensidad despreciables, muy útil para comunicaciones, o transmitir potencias de hasta decenas de Kilowatts* para aplicaciones industriales.

Comercialmente se venden con protecciones adicionales para cuidar daños por el manejo de éstas (Fig 1.3), pero la configuración mínima es con solo - las tres primeras capas: núcleo, recubrimiento y protección.

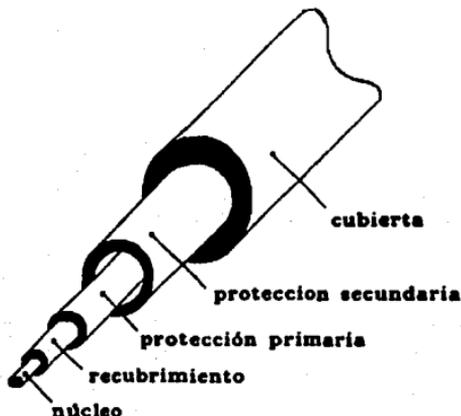


Figura 1.3
Configuración común
de una fibra óptica

Concentrados en las configuraciones más comunes, tenemos que en forma - funcional podemos escribir el índice de refracción de las fibras ópticas de - la siguiente forma :

Fibra óptica de índice-en-escalón	$n(r) = \begin{cases} n_1 & 0 \leq r < a \\ n_2 & a \leq r < b \\ n_0 & r \geq b \end{cases}$	Osr-sa asr-sb bsr	(1.1)
--------------------------------------	---	-------------------------	-------

Fibra óptica de gradiente de índice	$n(r) = \begin{cases} n_1 \left(1 - \left(\frac{r}{a}\right)^2 \Delta\right) & 0 \leq r < a \\ n_1 (1-\Delta) = n_2 & a \leq r < b \\ n_0 & r \geq b \end{cases}$	Osr-sa asr-sb bsr	(1.2)
--	---	-------------------------	-------

donde Δ es la diferencia de índices

$$\Delta = \frac{n_1^2 - n_2^2}{2 n_1^2} \quad (1.3)$$

* Existe por ejemplo la fibra óptica GLPC construida por la compañía 3M que - soporta potencias de hasta 31 kW.

A partir de las ecuaciones (I.1) y (I.2) podemos conocer cual es el comportamiento de la luz dentro de las fibras ópticas y el porque se comportan como guías de onda. Para hacer ésto utilizaremos conceptos de la óptica geométrica.

I.3 ABERTURA NUMERICA

Para poder continuar tenemos que introducir uno de los parámetros más importantes que definen a las fibra ópticas, su *abertura numérica* (N.A.)[†], la cual nos da la medida de la cantidad de luz (o dicho propiamente de energía) que entra a la fibra óptica, este concepto de apertura numérica se deriva de consideraciones de microscopía.

La apertura numérica de un sistema se define en general como el producto del seno del semiángulo del rayo más oblicuo de entrada a un sistema, el cual es medido desde la normal a la superficie (θ_{max}), por el índice de refracción del medio en el que esta inmerso éste.

$$N.A. = n_0 \sin \theta_{max} \quad (I.4)$$

Para deducir la expresión para la apertura numérica de las fibras partimos de la ley de Snell, el fenómeno de reflexión total interna y de la geometría de la fibra. Sabemos que la Ley de Snell (ec I.3) nos relaciona los ángulos de los rayos medidos desde la normal a la superficie cuando éstos pasan a través de una interfase entre dos medios homogéneos (Fig I.4).

$$\text{Ley de Snell} \quad n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2 \quad (I.5)$$

Recordemos que el el fenómeno de reflexión interna total ocurre cuando un rayo pasa de un medio con índice de refracción mayor al de un segundo medio y el ángulo de incidencia (θ_1) es mayor o igual a aquel en el que el ángulo transmitido es paralelo a la interfase ($\theta_2 = 90^\circ$), llamado ángulo crítico ($\theta_1 = \theta_c$), ésto ocurre cuando:

$$n_1 \sin \theta_c \geq n_2 \sin 90^\circ = n_2 \quad \rightarrow \quad \sin \theta_c \geq \frac{n_2}{n_1} \quad (I.6)$$

En la Figura I.5 se muestra un corte transversal típico de una fibra óptica del tipo "índice en escalón". Para que en el punto (1) haya reflexión total interna se requiere que el ángulo de incidencia (θ_2) sea mayor o igual al ángulo crítico entre el núcleo y el recubrimiento. Haciendo el cálculo con el valor crítico se tiene:

$$\sin \theta_c = \frac{n_2}{n_1} \quad (I.7)$$

[†] Utilizamos la abreviación NA en vez de AN para la apertura numérica ya que es más común encontrar en la literatura la contracción de la expresión en inglés "Numerical Aperture"

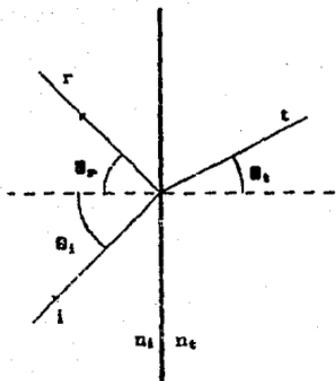


Figura I.4
Diagrama de rayos en una interfase
usados en la ley de Snell

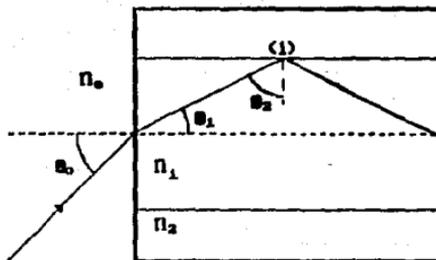


Figura I.5
Corte transversal de una fibra
óptica del tipo índice en escalón

Entonces en la interfase entre n_0 y n_1 se tiene que para este rayo:

$$\begin{aligned}
 \text{sen } \theta_0 &= \frac{n_1 \text{ sen } \theta_1}{n_0} \\
 &= \frac{n_1 \cos \theta_{2c}}{n_0} \\
 &= \frac{n_1 \sqrt{1 - \text{sen}^2 \theta_{2c}}}{n_0} \\
 &= \frac{n_1 \sqrt{1 - \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2}}{n_0} \\
 &= \frac{\sqrt{n_1^2 - n_2^2}}{n_0} \quad (I.8)
 \end{aligned}$$

Así la expresión para la apertura numérica de las fibras ópticas de "índice en escalón" es:

$$\text{N.A.} = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad (I.9)$$

También podemos deducir la expresión para la apertura numérica para fibras ópticas de tipo gradiente de índice, la cual es una función del radio:

$$\text{N.A.}(r) = \sqrt{n^2(r) - n_2^2} \quad (I.10)$$

1.4 METODO PARA DETERMINAR ABERTURAS NUMERICAS Y CRITERIO DE MAXIMA POTENCIA

La abertura numérica de las fibras ópticas de tipo *índice-en-escalón* está dada por:

$$\text{N.A.} = n_0 \text{ sen } \theta_{\text{max}} = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad (1.9)$$

Donde n_0 es el índice de refracción del medio externo y θ_{max} es el semi-ángulo de aceptación del cono de entrada o salida de la fibra óptica. Estrictamente la abertura numérica está dada por el ángulo del rayo límite de entrada al sistema, lo cual en ocasiones es difícil de determinar con precisión, por ésto para fines de medir la N.A. se suele tomar ésta en función del ángulo al cual la luz de entrada o salida de la fibra óptica cae al 50% del valor máximo axial. Esta es normalmente medida mediante el uso de un goniómetro (instrumento que se usa para medir intensidades relativas en función del ángulo).

Con este método se mide la N.A. en la salida de las fibras ópticas, para lo cual se ilumina la fibra óptica con luz difusa y llenar así todo el cono de aceptación. Una placa esmerilada sirve como difusor. El extremo de salida de la fibra óptica se coloca en el centro de rotación del brazo detector del goniómetro, luego con un arreglo electro-óptico se determina el ángulo donde la intensidad baja al 50%, usando una lente con abertura numérica pequeña - acoplada a un fotodetector, a través del brazo del goniómetro; a continuación se mide la intensidad en función del ángulo θ ; para la fuente difusa (sin la fibra óptica) estableciendo una referencia y se coloca la fibra caracterizando su comportamiento de la misma forma que se hizo con la fuente esmerilada sola. Se toman los cocientes de potencia de estas mediciones y se determina la abertura numérica donde este cociente cae al 50% del valor axial.

Nosotros para simplificar la medición de las aberturas numéricas se desarrolló un método alternativo, al que llamamos *criterio de máxima potencia*. Con este método se mide el ángulo límite del cono de aceptación de la fibra óptica. Para esto se monta el siguiente dispositivo (Fig 1.6):

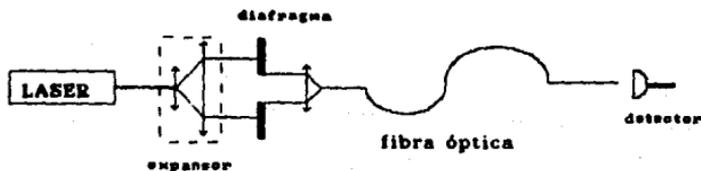


Figura 1.6 Configuración para medir aberturas numéricas mediante el criterio de máxima potencia, usando como fuente un láser de He-Ne.

Con la fibra óptica en la posición (B) y el diafragma en la posición (b), lo que tenemos es un triángulo rectángulo (Fig I.8):

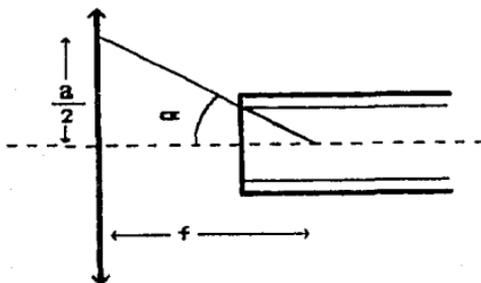


Figura I.8 Geometría del criterio de máxima potencia

De esta forma podemos fácilmente determinar el seno del ángulo α en términos de un parámetro conocido (la distancia focal de la lente) y un parámetro medible (el diámetro del haz incidente que deja pasar el diafragma), el cual para mediciones en aire ($n=1$), está dado por:

$$\text{sen } \alpha = \frac{(a/2)}{\sqrt{f^2 + a^2/4}} = \text{N.A.} \quad (I.11)$$

Así con una medición directa, después de alinear a la fibra óptica con el criterio de máxima potencia y conocida la distancia focal de la lente es directa la medición de la abertura numérica de la fibra óptica.

Notemos que cuando usamos lentes con diámetros pequeños en comparación - con su distancia focal ($a/2 \ll f$), podemos hacer algunas aproximaciones que - facilitan los cálculos. La ecuación (I.11) se escribe:

$$\text{N.A.} = \frac{a/2}{\sqrt{f^2 + a^2/4}} \approx \frac{a/2}{\sqrt{f^2}} = \frac{a}{2f} \quad (I.12)$$

Otra cantidad involucrada con la abertura numérica es el número f (f/θ), el cual nos da una medida de la cantidad de energía que entra a un sistema, - también se asocia este número con la "velocidad" de un sistema de detección. Se define el número f como:

$$f/\theta = \frac{f}{a} \quad (I.13)$$

De esta forma encontramos una nueva forma de escribir (I.9):

$$\text{N.A.} = (2 f/\theta)^{-1} \quad (I.14)$$

Recordemos que las ecuaciones (1.13) y (1.14) son las mismas que se derivan de consideraciones en microscopía, donde para poder usar la aproximación (1.12) con errores menores al 10% se requiere que $f/\# \geq 1.0$, lo cual en la mayoría de los casos es totalmente válido (i.e. son pocas las lentes con $f/\# < 1$).

Para elaborar experimentalmente este método se usó un láser de Helio-Neón de 10 mW-CW marca NEC, un expansor colimador marca ORIEL, un triplete acromático ($f=40$ mm, $\phi=36$ mm) marca MELLES-GRIOT, un detector de potencia láser marca NRC modelo 820, un desplazador de fibras ópticas marca NRC, un diafragma de iris (diámetro 40 mm), soportes portavástagos, vástagos de 4" y portaleses de autocentrado (Desarrollados en el CIUNAM). La forma de montar la fibra óptica se muestra en la Figura 1.9.

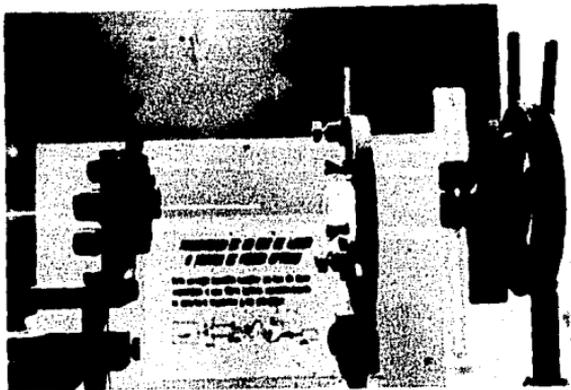


Figura 1.9 Sistema de enfoque de un láser expandido a una fibra óptica usando el criterio de máxima potencia; a la derecha tenemos el diafragma, al centro un triplete para enfocar a la fibra óptica colocada a la izquierda.

Los resultados obtenidos en el laboratorio según el método descrito en esta sección, se enlistan en la sección IV.1.

1.5 PULIDO DE LOS EXTREMOS DE LAS FIBRAS OPTICAS

En lo general se supone a priori que el terminado de la fibra óptica es plano y perpendicular al eje de la misma (perfil ideal), lo que no es siempre cierto. Existen dos problemas que se originan al no tener un acabado ideal de las fibras ópticas: (1) Se ve afectado el acoplamiento de potencia entre la fuente y la fibra óptica. (2) El problema mismo de lograr un terminado ideal en la fibra óptica.

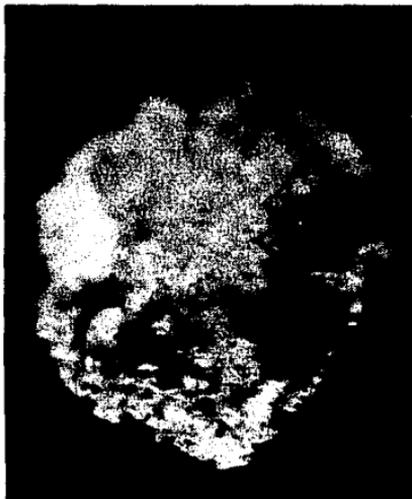


Figura I.10 Fibra óptica cortada con navaja (200X)



Figura I.11 Fibra óptica terminada con lija del 280, grano de 100 μm (200X)

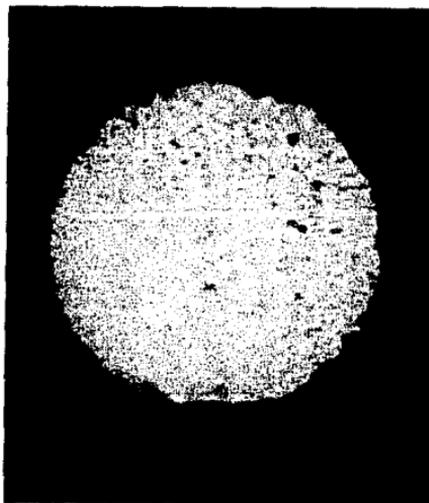


Fig I.12 Fibra óptica terminada con lija del 400, grano de 63 μm (200X)

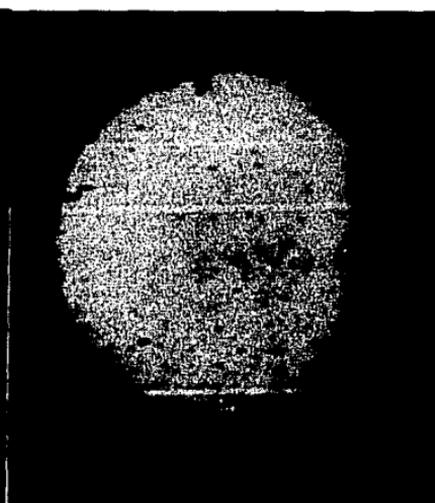


Fig I.13 Fibra óptica terminada con lija del 600, grano de 32 μm (200X)

La Figura 11.2 ilustra una representación esquemática de un láser de - argón. El tubo debe estar especialmente construido para resistir la gran densidad de corriente de descarga que se requiere para excitar al ArII. Comúnmente se usa tubería de cuarzo, aunque los modelos comerciales usan también - grafito segmentado u óxido de berilio, ésto con el fin de resistir las altas temperaturas y la corrosión en las terminales. El tubo de descarga puede ser enfriado por agua o por aire. Se provee la circulación del gas dentro del tubo segmentado para prevenir la acumulación de argón neutro cerca del ánodo - debido a efectos de electrofóresis. Se requiere una descarga de corriente de alta densidad de aproximadamente 5 Amp. Un campo magnético axial es aplicado al tubo para estabilizar la descarga y mantenerla alejada de las paredes del tubo. Las ventanas de cuarzo en ángulo de Brewster sirven como sellos de vacío y para polarizar la luz que sale del instrumento; a los extremos se colocan espejos recubiertos con materiales dieléctricos, cuyo pico de reflectancia está cerca de las longitudes de onda de operación.

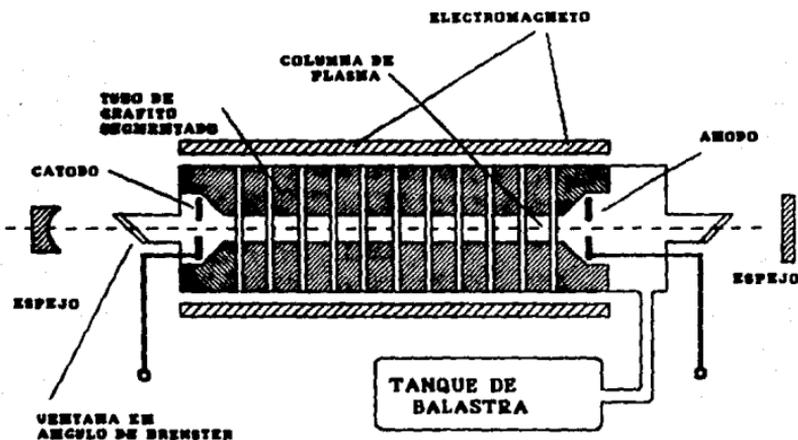


Figura 1.17 Diagrama esquemático de un láser de Argón

El láser usado es el modelo 553-A de la compañía "CONTROL LASER". Consiste en una fuente de poder donde están los controles de operación y una cabeza donde se encuentra el tubo con el medio activo (argón), ambos unidos mediante un cordón llamado umbilical (Figuras 11.3 y 11.4). El instrumento necesita para su operación un suministro eléctrico de 280 VAC @ 60 Amp. y un sistema de enfriamiento por agua con un flujo de 8 lt/min a una presión de 2.5 kg/cm². La salida del haz tiene una potencia máxima de 7 Watts-CW, que se manifiesta como un haz azul-verdoso.

† LASER es acrónimo de: "Light Amplification by Stimulated Emission of - Radiation".

‡ Se utiliza en la literatura la contracción CW para denotar que existe emisión en forma de "onda continua" o en inglés "continuous wave"

Es necesario alinear ópticamente la cavidad del instrumento para conseguir la emisión láser. Para ésto se requiere destapar la cabeza del láser, por lo que se está expuesto a la radiación UV del plasma en el tubo de argón y además debido a que se manejan altos voltajes y corrientes, se recomienda que en este proceso nunca esté sola-una persona con el aparato.

El procedimiento para alinear ópticamente la cavidad es el siguiente:

- 1) Con el equipo apagado se destapa la cabeza del láser.
- 2) Se quita el espejo posterior de la cavidad resonante.
- 3) Se prende el sistema.
- 4) Se mueve el espejo anterior de la cavidad hasta lograr que el reflejo pase a través del tubo.
- 5) Se apaga el sistema y se recoloca el espejo posterior de la cavidad.
- 6) Se arranca nuevamente el sistema y se mueve el espejo posterior de la cavidad hasta lograr la emisión láser.
- 7) Se apaga el sistema y se coloca nuevamente la tapa en la cabeza

Después se debe optimizar la potencia de salida con pequeños movimientos en los espejos de la cavidad. Esta alineación debe realizarse al menos una vez cada semana debido a que por cambios en las condiciones del entorno (temperatura, humedad, etc.) la cavidad resonante sufre esfuerzos mecánicos y se desalinea ópticamente el sistema.

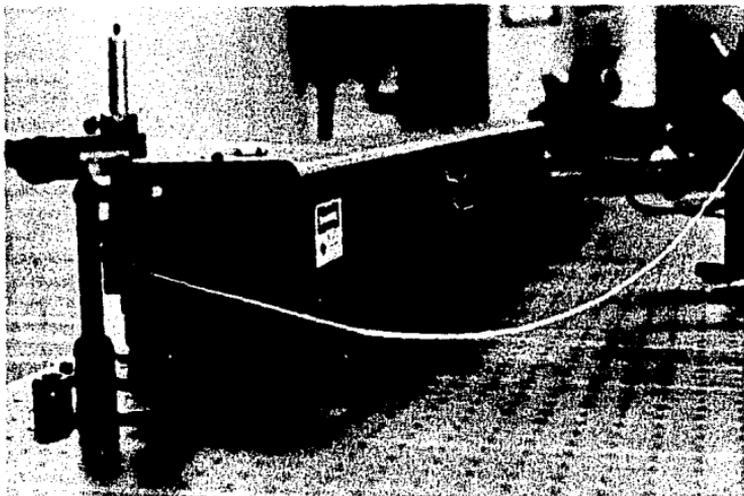


Figura I.18. Láser de argón CONTROL LASER. A la izquierda se observa la cabeza de éste y frente a éste un fibra óptica (línea delgada). Al fondo se ve un tubo flexible que es el cordón umbilical por donde pasan las conexiones eléctricas y las mangueras que conducen el agua para enfriar el tubo en la cabeza del láser.

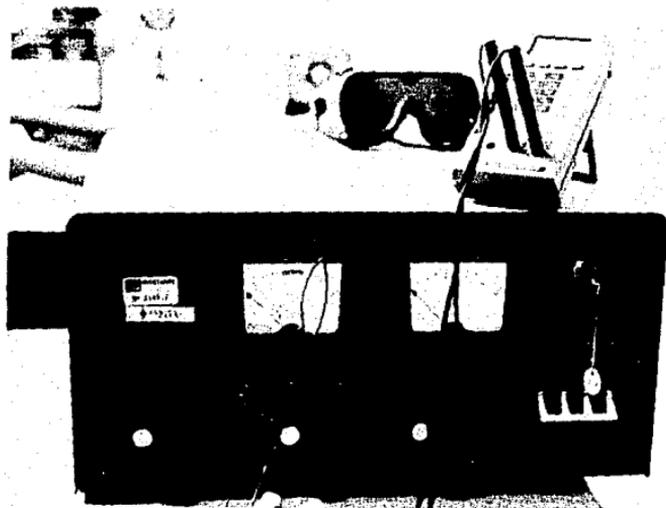


Figura 1.19 Fuente de poder del láser CONTROL LASER. A la izquierda se encuentran los interruptores y botón de encendido. Se tienen dos medidores, uno para medir la potencia que entrega el aparato y otro para medir la corriente a través del tubo controlados mediante las perillas en la parte inferior de la fuente.

De la naturaleza del material activo (argón), se puede tener emisión en líneas espectrales separadas o tenerlas todas juntas (líneas juntas). Tenemos todas las líneas juntas si usamos en la parte posterior de la cavidad resonante un espejo o líneas espectrales separadas mediante el uso de un prisma de Littrow en vez de el espejo posterior de la cavidad resonante. Dentro de las líneas de emisión de argón, logramos distinguir en este instrumento las correspondientes a: 514.5, 501.7, 496.5, 488.0, 476.5 y 457.9 nm, faltando distinguir las correspondientes a 465.8 y 472.7 nm. Estas líneas están en el intervalo del espectro electromagnético que va del verde al cercano UV.

Para separar las diferentes líneas espectrales mencionadas es necesario cambiar el espejo posterior de la cavidad resonante por un prisma de Littrow. La potencia individual de cada línea espectral, es menor que la potencia de todas juntas. De las líneas espectrales las que tienen mayor potencia son las correspondientes a la longitud de onda 514.5 y 488.0 nm (2.0 y 1.7 Watt-CW respectivamente), teniendo en las restantes potencias menores a 1 Watt.

1.7 CARACTERISTICAS DE LA EMISION LASER

El láser es una fuente de luz con características diferentes a las fuentes de luz convencionales (lámparas de filamento, velas, focos, etc.) debido a que es una fuente cuasimonocromática, coherente† lo que le permite mantenerse colimada por grandes distancias, además presenta un patrón de emisión gaussiano, donde éste término describe la variación de la irradiancia en una línea perpendicular a la dirección de propagación y que pasa por el centro del haz (fig 1.20), la irradiancia es simétrica respecto al eje del haz y varía radialmente apartir del eje de acuerdo con la forma:

$$I(r) = I_0 \exp(-2r^2/r_1^2) \quad (1.15)$$

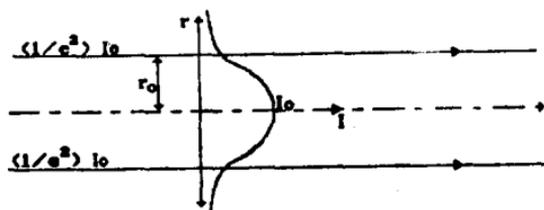


Figura 1.20 Perfil de un haz gaussiano. Se grafica la irradiancia contra la distancia radial apartir del eje del haz.

Donde r_1 se define como el radio donde la irradiancia a caído a $1/e^2$ del valor en el eje I_0 y por convención general se considera a este punto como el radio del haz de láser.

En la figura 1.20 se muestra un haz de rayos paralelos, en realidad un haz gaussiano diverge o converge de la región donde el haz es más angosto, conocida como la *cintura del haz*, este comportamiento se muestra en la figura 1.21. Que tanto converge o diverge un haz de láser es medida por el *ángulo de divergencia* θ , el cual es el ángulo que subtienen por los puntos diametrales $1/e^2$ para distancias lejanas a la cintura del haz. De acuerdo a las leyes de la óptica geométrica un haz gaussiano convergiendo a un ángulo θ debería formar un punto, pero debido a efectos de difracción esto no ocurre, sin embargo en la intersección de las asíntotas que definen a θ , el haz alcanza su menor valor d_0 , el *diámetro de la cintura del haz*, el cual para el modo fundamental de oscilación, tiene una dependencia con el ángulo de divergencia θ de la forma:

$$d_0 = \frac{4 \lambda}{\pi \theta} \quad (1.16)$$

† luz monocromática es aquella cuyo espectro está constituida por una línea espectral con ancho espectral cero, cuasimonocromática es aquella cuyo espectro consta de una sola línea espectral con un ancho espectral muy pequeño

‡ coherencia de una fuente de luz significa que la diferencia de fase de un frente de onda es constante

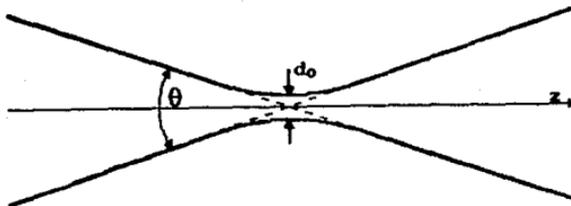


Figura I.21 Variación del diámetro de un haz gaussiano alrededor de la cintura del haz. El tamaño del haz en su parte más angosta es d_0 ; el ángulo de divergencia del haz, definido como las asintotas de los puntos $1/e^2$ para distancias lejanas al a cintura es θ .

Este comportamiento no permite enfocar con el uso de una lente simple un haz de rayos paralelos en un punto y existe un diámetro mínimo el cual está dado como el disco de Airy para una abertura circular⁶:

$$d_{\text{min}} = 1.22 \frac{\lambda f}{D} \quad (I.17)$$

Donde f es el foco de la lente usada, λ la longitud de onda y D es el diámetro del haz del láser; en nuestro caso conocemos los valores tanto de la lente (dada por el fabricante) como de la longitud de onda ya que trabajamos con un láser de argón (sec. II.1), pero el diámetro del haz no es un dato reportado y tiene que ser medido.

Existen métodos para determinar este valor⁷, pero por simplicidad fué medido el diámetro del haz de láser con ayuda de un vernier montado en un desplazador de precisión; el método consistió en usar las quijadas de éste como una rejilla de anchura variable, que si se coloca frente al láser cada borde de la rejilla presenta un patrón de difracción y si se abren o cierran las quijadas hasta el momento en el cual el patrón de difracción desaparece lo que implica que éste se encuentra justo en el borde de la quijada; combinando posición del vernier perpendicular al haz con el movimiento de las quijadas hasta que el haz de láser este justo entre los bordes de la quijada se tiene el diámetro del haz.

Los resultados de las mediciones del diámetro del haz de láser hechas en el laboratorio se reportan en la sección IV.2

⁶ En el caso de que la lente sea menor que el diámetro del haz D es el diámetro de la lente, si el diámetro del haz es menor al de la lente entonces éste es D .

5 El acoplador debe ser versátil para ser usados en varios equipos, esto es que se pueda adosar a diferentes láseres.

6 Debe ser un elemento de fácil manejo tanto en su instalación como en uso.

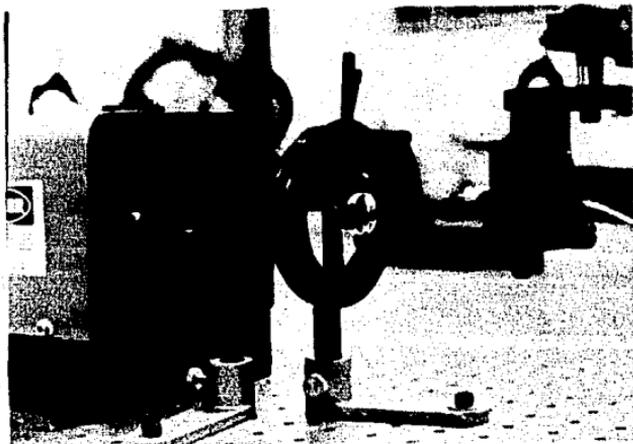


Figura II.1 Montura convencional de acoplamiento láser-fibra óptica

Con estas características se desarrolló el acoplador láser-fibra óptica, elaborado en forma modular con el fin de tener la versatilidad de probar diferentes configuraciones con el mismo número de elementos. El instrumento se diseñó en módulos cilíndricos, ya que esta geometría es la más accesible para su elaboración además que representa la geometría natural para trabajar un rayo luminoso.

Se elaboraron todos los módulos en latón, debido a que este es un material sencillo de tornearse y no se oxida con facilidad, características necesarias en un prototipo. Se escogió que los módulos del acoplador se maquinaran en una barra con diámetro exterior de $1\frac{1}{2}$ plg con cuerdas de ajuste entre éstos de $1\frac{1}{16}$ plg X 32 H/P*.

En las siguientes secciones se describen de los diferentes módulos que integran el acoplador láser-fibra óptica.

* H/P es usado para señalar el paso por pulgada que se requiere en una cuerda

Los planos del diseño de las piezas de este módulo se encuentran en el Apéndice 1, dibujos: AC-2A, AC-2B, AC-2C y AC-2ISO.

Para alinear una lente en este módulo se usa un método usual en un laboratorio de óptica, que puede ser generalizado cuando se requiere alinear una o varias lentes en un arreglo óptico. Primero debemos darnos cuenta de que si solo se colocan una lente frente a una fuente de luz cualquiera, es seguro que introduzcamos errores en las imágenes (aberraciones) debido a que no usamos la lente de acuerdo a lo que dice la teoría.

Para visualizar el problema supongamos que alineamos con un láser una lente simple que consta de solo dos superficies, que son casquetes esféricos. Al colocar al lente frente a la fuente, nos damos cuenta de que encontramos dos reflejos que provienen de la lente uno producido por la reflexión en la primera superficie y otro producido por el rayo que se transmite por la primera superficie y se refleja en la segunda, pasando nuevamente por la primera. Si observamos estos dos reflejos, uno está bien definido y el otro es difuso que corresponden a las reflexiones en primera y segunda cara respectivamente, los que por lo general no coinciden en su posición.

De la forma en que es construida una lente (dos casquetes esféricos), la teoría dice que la imagen producida por la lente es correcta si el eje de revolución de la lente coincide con la dirección del rayo del láser, lo que equivale a decir que tenemos todo alineado con el eje óptico del sistema. Así para tener el sistema alineado necesitamos que el rayo pase por el centro de las dos superficies que es paralelo al eje de simetría de la lente, el cual identificamos como el eje óptico, lo cual significa que el rayo ha de reflejarse en la misma dirección incidente.

Existe una técnica visual para lograr que esto ocurra, utilizando los reflejos que mencionamos, la cual consiste en movimientos transversales de la lente y rotaciones respecto de ejes perpendiculares al eje de la lente. Las reglas para alinear la lente son simples:

- Si los reflejos provenientes de la lente no están alineados en la dirección vertical, mover la lente en dirección horizontal, perpendicular al eje de ésta hasta logra que los dos rayos estén alineados verticalmente (Fig II.2).
- Si los reflejos provenientes de la lente no están alineados en la dirección horizontal, mover la lente en dirección vertical, perpendicular al eje de ésta hasta lograr que los dos rayos estén alineados horizontalmente (Fig II.3).
- Si los reflejos provenientes de la lente se distinguen como dos puntos separados, combinar los movimientos anteriores hasta lograr que los dos puntos se sobrepongan (Fig II.6).
- Si al tener los reflejos provenientes de la lente sobrepuestos pero éstos se encuentran desplazados horizontalmente de la dirección del haz incidente, rotar la lente respecto al eje horizontal perpendicular al eje óptico, hasta lograr que los dos puntos se alineen horizontalmente con el rayo que sale de la fuente (Fig II.4).

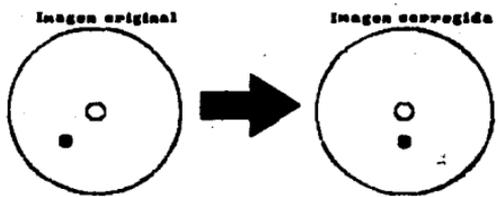


Figura II.4
Rotación horizontal
de la lente

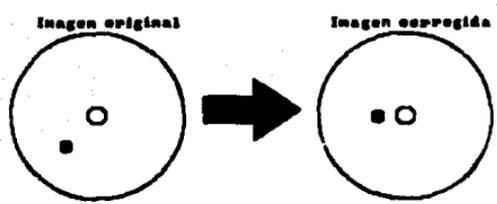
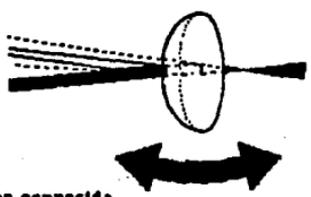


Figura II.5
Rotación vertical
de la lente

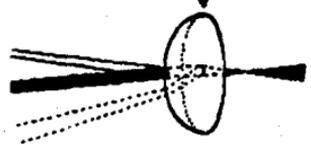
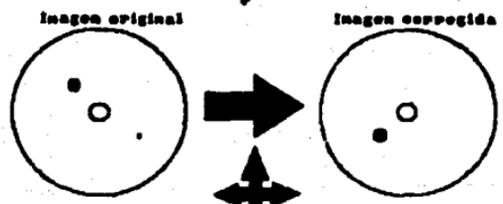
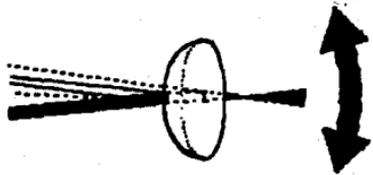


Figura II.6 Combinación de desplazamientos vertical y horizontal de la lente

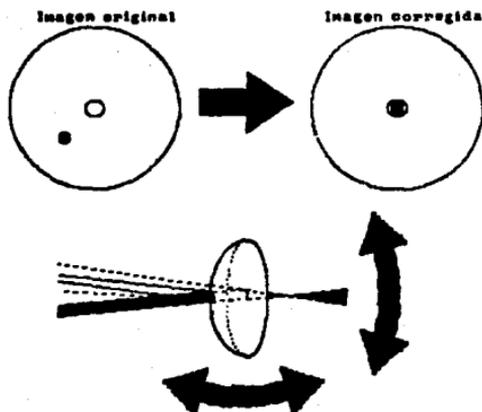


Figura II.7 Combinación de rotaciones vertical y horizontal de la lente

Con este método, mediante movimientos simples (desplazamientos y rotaciones), podemos tener la lente alineada con la fuente y así poder decir que nuestro experimento se parece a la teoría. En el caso de el sistema conste de una fuente con más de una lente simple, tenemos un mayor número de reflexiones y para poder alinear estos elementos solo necesitamos que todos estos reflejos coincidan con el rayo que proviene de la fuente.

II.4 MODULO DIAFRAGMA.

Para tener control sobre el diámetro del haz del láser cuyo diámetro a la salida es de aproximadamente 2.2 mm, se incluyó un módulo para montar un diafragma, el cual permite 2 diferentes funciones:

- 1) Controlar el diámetro del haz del láser, lo que controla variaciones de potencia y de la abertura numérica a la entrada de la fibra óptica.
- 2) Tener una mascarilla en la parte posterior de la lente usada en el acoplador, con el fin de alinearla.

El diafragma usado es de tipo iris con diámetro exterior de 2 cm y 90° de giro en el brazo de control de diámetro. Notemos que debido a las potencias que se manejan con el láser de argón, la primera función de este módulo se ve limitada, ya que si se utilizan potencias grandes (mayores a 1 Watt-CW) se corre el riesgo de dañar al diafragma. Pero de cualquier forma la segunda función es suficiente para aprovechar éste módulo.

La pieza flotada es un cilindro de $7/8$ pig con un agujero pasante de $1/4$ pig, notamos que en este prototipo no se considera la posibilidad de controlar las rotaciones de la fibra óptica. Para sujetar la fibra óptica, en la pieza flotada se usan monturas con diámetro exterior de $1/4$ pig e interior con diámetro de la fibra, para desplazar esta pieza se usan dos resortes en la cavidad y se fijan con un tornillo, en el extremo diametralmente opuesto se colocan otros dos tornillos para controlar el desplazamiento de la pieza flotada.

El anillo de seguridad se usa con el fin de que la pieza flotada no se salga de su lugar y es el mismo que se usó en el módulo diafragma. Por último tenemos dos guías, que constan de cubos de $1/4$ pig por lado con un agujero pasante central de $1/8$ pig, donde en uno de ellos se suelda un poste de $1/8$ pig, y ambos postes se fijan tanto en el cuerpo principal como en el acoplador; de esta forma logramos que las piezas a los extremos del tornillo estén fijas una respecto a la otra.

Los planos del diseño de la pieza de este módulo se encuentran en el Apéndice 1, dibujos: AC-4A, AC-4B, AC-4C, AC-4D, AC-4E, AC-4F, AC-3B y AC-4ISD.

Con el fin de alinear la fibra óptica, primero se debe alinear la lente con el método descrito en la sección anterior y después mediante el criterio de máxima potencia alinear la fibra óptica con el resto del sistema. Este procedimiento es complicado ya que el extremo de la fibra óptica está oculto dentro de el módulo y solo lo podemos alinear en forma indirecta, corriendo el riesgo de dañar el extremo de la fibra óptica con la radiación del láser - no enfocada en el núcleo de ésta.

11.6 MÓDULO OBTURADOR

Para controlar los tiempos de exposición a través de la fibra óptica, es necesario contar con un elemento que nos permita interrumpir la emisión de radiación láser a discreción. Las formas de lograr esto son varias: Apagar y prender el láser, abrir y cerrar el obturador del láser (ver Figura 11.3) u obturar el haz del láser ya sea antes o después de las fibras ópticas.

La opción que nosotros escogimos fue obturar el haz del láser entre la cabeza de éste y la punta de entrada de la fibra óptica, usando un obturador electro-mecánico que básicamente es una bobina, en la cual al pasar una corriente a través de ésta funciona como electroimán y acciona una placa de dos secciones que dejan libre el paso de la luz por el centro de esta pieza.

Debido a las dimensiones del obturador electro-mecánico que utilizamos, el tamaño de esta pieza varía con respecto a los demás módulos del acoplador. Se trabajó la pieza en una barra de latón de $2\ 1/2$ pig en la cual se le hizo un escalón con fresadora con profundidad de $1/4$ pig a $1/8$ pig del centro con el fin de soportar el electroimán. Se hicieron tres agujeros roscados ciegos de $1/8$ pig X 40 H/P para fijar el obturador a el cuerpo de la pieza. En la de la pieza principal se maquinó una cuerda de $1\ 1/16$ pig X 32 H/P para adaptarse con los demás módulos del acoplador

En la figura 11.8 se muestra el acoplador desglosado por partes, mostrando todas las piezas construidas y en la figura 11.9 se presenta una vista general de este acoplador instalado. Aclaremos que no se hace hincapie en la forma de montar la fibra óptica al cuerpo del acoplador, debido a que se usaron monturas para las fibras ópticas que se consiguen comercialmente o fueron producto de trabajos desarrollados dentro del propio laboratorio anteriormente.

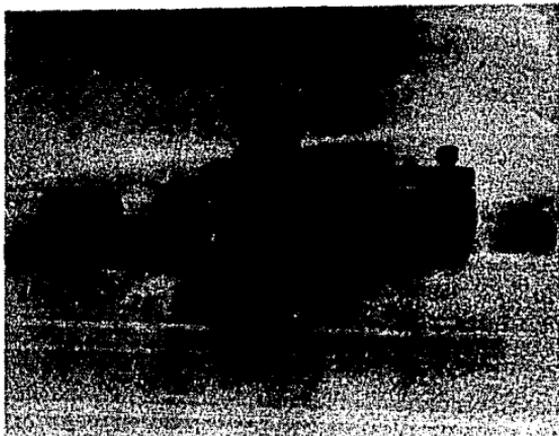


Fig 11.8 Vista general del acoplador láser-fibra óptica donde se muestran todos los módulos construidos.

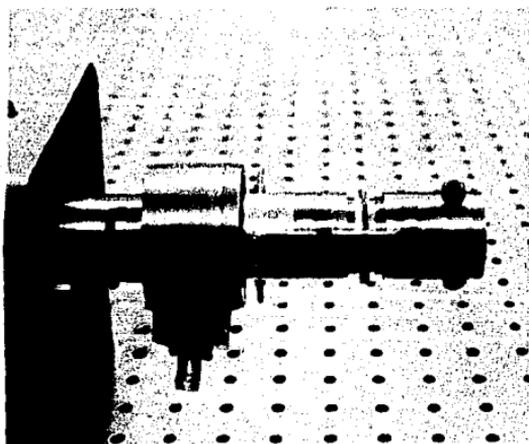


Figura 11.22 Acoplador láser-fibra óptica instalado en el láser de argón - CONTROL LASER

En la clasificación general de los materiales⁹, estos materiales abarcan diferentes grupos: polímeros (acrílico), compuestos (placa fenólica con cobre) y compuestos orgánicos (madera y papel ilustración). Fueron escogidos como representativos del grupo al que corresponden, aunque sabemos que no podemos generalizar el comportamiento que presentan. Las características particulares de cada material se expondran al mostrar los resultados.

Con el fin de tener un estudio completo de los efectos que se producen - en estos materiales por la radiación láser, se expusieron en el modo de todas la líneas de emisión en tres diferentes posiciones:

- 1) Exposición directa al láser.
- 2) En el foco de un lente.
- 3) A la salida de una fibra óptica.

En exposición directa al láser, el material se colocó frente a éste en - una montura que es una platina de microscopio sujeta en un soporte que permite posicionar y fijar a la mesa de trabajo (Fig III.1).

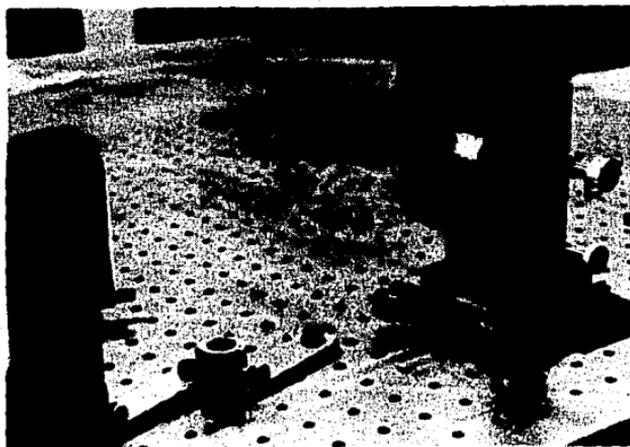


Figura III.1 Montura para estudiar materiales en exposición directa a un láser de argón. En la Figura se expone directamente placa fenólica con cobre, - notese el punto brillante producido por el láser.

La exposición en el foco de la lente se realizó a través de un lente de tipo doblete acromático ($\phi = 10 \text{ mm}$, $f = 20 \text{ mm}$), misma que fué usada en el acoplador, alineandola según lo descrito en la sección II.3. Para irradiar materiales en el foco de la lente se montó el mismo soporte para materiales que fué usado en la exposición directa de los materiales (Fig III.2).

En las tres posiciones se irradiaron los materiales a potencias y tiempos iguales para tener punto de comparación, salvo en algunos casos que se detallan más adelante. Se realizaron las exposiciones a los tiempos y potencias listados en la Tabla III.2. Se ilustra la forma como fueron distribuidas sobre las muestras en la Fig. III.4.

El motivo para realizar esta selección de potencias, teniendo hasta 7.5 Watt-CW (todas las líneas) es que a potencias menores a 2.3 W-cw se tiene la mejor estabilidad en el láser de argón CONTROL LASER, mientras que a potencias mayores el láser es inestable para períodos de más de dos minutos no es siempre posible. El hecho de usar el modo de todas las líneas en vez de líneas espectrales separadas, es debido a que se obtiene mayor potencia a la salida del láser en el primer modo de emisión.

La selección de los tiempos de exposición, se hizo en cuanto a aquellos que son fáciles de manejar en el medidor de potencia y son los submúltiplos de un minuto más usados. Para controlar los tiempos de exposición se usó un obturador electro-mecánico controlado por un medidor de potencia láser (NRC - Mod 880), en el cual se pueden seleccionar tiempos desde 1 mseg hasta de 999 seg.

TABLA III.2 TIEMPOS Y POTENCIAS SELECCIONADOS PARA RADIAR LOS DIFERENTES MATERIALES

TIEMPOS	POTENCIAS
1 seg	250 mW
5 seg	500 mW
10 seg	1000 mW
30 seg	1500 mW
60 seg	2000 mW

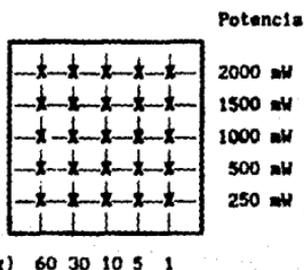


Figura III.4 Distribución de tiempos y potencias para radiar materiales

III.2 MUESTRAS RADIADAS

En esta sección se presentan los diferentes materiales expuestos y los resultados obtenidos. Se agrupan los resultados para cada material mostrando los resultados de la exposición en las tres diferentes posiciones de exposición. En todos los casos donde se menciona potencia se trata de emisión en onda continua (CW).

Para visualizar los efectos producidos por el láser, las pruebas realizadas fueron observadas bajo un microscopio de reflexión de tipo metalográfico, marca UNION OPTICAL, modelo VERSAMET-2, con capacidad de hasta 1000 aumentos y capacidad de fotografiar con cámara de 35 mm. Para conseguir una mejor calidad en las imágenes de las muestras se usaron métodos de procesamiento de imágenes, lo que nos permite mejorar el contraste y resaltar detalles de las muestras. Para poder utilizar éstos métodos de procesamiento de imágenes se removió la cámara de 35 mm del microscopio de reflexión y en ese lugar se colocó una cámara de video (vidicón) y de ésta forma se filmaron en un videocassete las imágenes de las muestras. Estas imágenes se procesaron en una tarjeta digitalizadora MATROX PIP 1024B, la cual con ayuda del programa IMAL-200 de la compañía francesa BIOCORN, nos permite digitalizar las imágenes de las muestras.

Debemos anticipar que al exponer a la salida de una fibra óptica con núcleo de cuarzo y diámetro de 600 μm , no obtenemos los resultados deseados, ya que aunque la fibra tiene núcleo de cuarzo y soporta irradiancias altas, el recubrimiento plástico no es útil producir la clase de efectos que nosotros queremos, los cuales son principalmente procesos producidos por calor.

Esto es debido a que al atacar algún material éste se calienta y si está cerca de la fibra óptica, se calienta la protección plástica y ésta se derrite, lo cual se observa ya que empieza a salir humo del extremo de la fibra óptica. Así el fenómeno de reflexión total interna entre dos materiales con índices n_1 y n_2 cambia a reflexión total interna entre n_1 y aire ($n=1$). De acuerdo a la ecuación 1.9, si n_2 disminuye, entonces N.A. aumenta, lo que repercute en que se tiene un cono más amplio y éste, como la recubierta de la fibra óptica se ha derretido, empieza a formarse desde antes de llegar a la parte que se había pulido. El proceso se repite hasta que el extremo de la fibra se "enfria" y se detiene el proceso de fundición. Entonces si la muestra está a aproximadamente 1 mm a salida de la fibra óptica, se irradia una zona del orden del diámetro de la fibra (≈ 1 mm). Después del daño en la fibra óptica se abarca un área mayor (≈ 20 mm) donde la densidad de potencia disminuye y no es posible ya obtener el resultado deseado.

El que no se pueda realizar un estudio completo con esta fibra, no implica que no haya ningún resultado. A la hora de enlistar los resultados se muestra el resultado al exponer en solo una ocasión cada uno.

III.2.1 ACRILICO

La placa de acrílico con la que se trabajó es del tipo mate de color blanco, con espesor de 5 mm. Los resultados obtenidos en exposición directa y en el foco de una lente se listan en las tablas III.4 y III.5; en la columna de figuras se menciona la figura en que se observa el resultado.

TABLA III.4

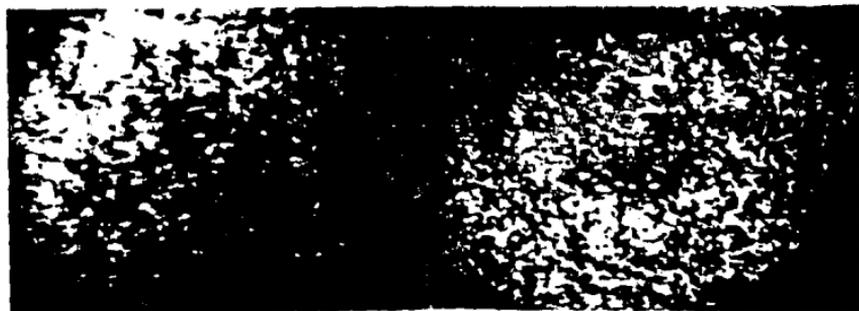
RESULTADOS OBTENIDOS AL EXPONER UNA PLACA DE ACRILICO EN EXPOSICION DIRECTA A UN LASER DE ARGON

Potencia (W-CM)	Tiempo de exposición (seg)	Resultado	Figura
0.25	(1)	Ninguno	
0.50	(1)	Ninguno	
1.00	1.0	Ninguno	
1.00	5.0	Marca superficial sobre el material (2)	III.5.a
1.00	10.0	Marca superficial sobre el material (2)	III.5.b
1.00	30.0	Marca superficial sobre el material (2)	III.5.c
1.00	60.0	Marca superficial sobre el material (2)	III.5.d
1.50	1.0	Ninguno	
1.50	5.0	Marca superficial sobre el material (2)	III.5.e
1.50	10.0	Perforación con la orilla quemada (3)	III.5.f
1.50	30.0	Perforación con la orilla quemada (3)	III.6.a
1.50	60.0	Perforación con la orilla quemada (3)	III.6.b
2.00	1.0	Marca superficial sobre el material (2)	(4)
2.00	5.0	Marca superficial sobre el material (2)	III.6.c
2.00	10.0	Perforación con la orilla quemada (3)	III.6.d
2.00	30.0	Perforación con la orilla quemada (3)	III.6.e
2.00	60.0	Perforación completa del material (5)	III.6.f

NOTAS:

- (1) No se observa ningún efecto en todos los tiempos de exposición: 1, 5, 10, 30 y 60 seg.
- (2) Estas marcas se confunden a simple vista con defectos del material.
- (3) A mayor tiempo de exposición a una misma potencia se tiene una perforación más ancha.
- (4) Esta figura no se muestra ya que es muy similar a la que se obtiene en exposición a 2.00 W-CM y 5 seg de exposición.
- (5) Para resaltar la perforación se colocó una lámpara por detrás de la placa

OBSERVACION: Al sacar este material, fue necesario usar un tapabocas para no inhalar el humo que expelía este material, el cual es tóxico



(a)

(b)



(c)

(d)



(e)

(f)

Figura III.5 Imágenes de las marcas producidas por radiación láser sobre una placa de acrílico mate en exposición directa al láser con una potencia de - 1.00 W-CW, a tiempos de (a) 5 seg (100X), (b) 10 seg (50X), (c) 30 seg (50X), (d) 60 seg (50 X) y con potencia de 1.50 W-CW a (e) 5 seg (50X) y (f) 10 seg (50X)

TABLA III.5

RESULTADOS OBTENIDOS AL EXPONER UNA PLACA DE ACRILICO A UN LASER DE ARGON EN EL FOCO DE UNALENTE

Potencia (W-CW)	Tiempo de exposición (seg)	Resultado	Figura
0.25	(1)	Ninguno	
0.50	(1)	Ninguno	
1.00	1.0	Ninguno	
1.00	5.0	Marca pequeña (2)	III.7.a
1.00	10.0	Ninguno (3)	- - - -
1.00	30.0	Perforación pequeña y profunda	III.7.b
1.00	60.0	Perforación pequeña y profunda	III.7.c
1.50	1.0	Perforación pequeña (4)	III.7.d
1.50	5.0	Perforación pequeña (4)	III.7.e
1.50	10.0	Perforación pequeña (4)	III.7.f
1.50	30.0	Perforación pequeña (4)	III.8.a y b
1.50	60.0	Perforación completa de la placa (4)	III.8.c
2.00	1.0	Perforación pequeña (4)	III.8.d
2.00	5.0	Perforación pequeña (4)	III.8.e
2.00	10.0	Perforación pequeña (4)	III.8.f
2.00	30.0	Perforación completa de la placa (4)	III.9.a(4)
2.00	60.0	Perforación completa de la placa (5)	III.9.b(4)

NOTAS:

- (1) No se observa ningún efecto en todos los tiempos de exposición: 1, 5, 10, 30 y 60 seg.
- (2) Estas marcas se confunden a simple vista con defectos del material.
- (3) No se observa ningún resultado posiblemente por un defecto en la placa.
- (4) A mayor tiempo de exposición a una misma potencia se tiene una perforación más ancha.
- (5) En esta marca el haz de láser pasa a través del agujero sin difractarse, es decir ya se ha realizado la máxima perforación posible.
- (6) Para resaltar la perforación se colocó una lámpara por detrás de la placa

OBSERVACION: Al atacar este material, fué necesario usar un tapabocas para no inhalar el humo que espelía este material, el cual es tóxico.



(a)

(b)



(c)

(d)



(e)

(f)

Figura III.8 Imágenes de las marcas hechas por la radiación láser sobre una placa de acrílico en exposición en el foco de una lente, con potencia de 1.5 W-CW a tiempos de (a) 30 seg (50X), (b) 30 seg detalle centro de la muestra - (50X), (c) 60 seg *vista posterior* (50X) y con potencia de 2.0 W-CW, a tiempos de (d) 1 seg (50X), (e) 5 seg (50X) y (f) 10 seg (50X)

II.2.2 MADERA DE PINO

La placa de madera de pino usada es realmente un aglomerado de madera, - el cual consta de tres capas, la primera es madera de pino 2 mm de ancho, 5 - mm de aserrín prensado y 2 mm de madera de pino.

Los resultados obtenidos en exposición directa y en el foco de una lente se listan en las tablas III.6 y III.7; en la columna de figuras se menciona - la figura en que se observa el resultado.

TABLA III.6

RESULTADOS OBTENIDOS AL EXPONER UNA PLACA DE MADERA DE PINO EN EXPOSICION DIRECTA A UN LASER DE ARGON

Potencia (W-CM)	Tiempo de exposición (seg)	Resultado	Figura
0.25	1	Ninguno	
0.25	5	Marca en la primera capa poco definida(1)	III.10.a
0.25	10	Marca en la primera capa poco definida(1)	(2)
0.25	30	Marca en la primera capa poco definida(1)	(2)
0.25	60	Marca en la primera capa poco definida(1)	(2)
0.50	1	Marca pequeña en la primera capa	(2)
0.50	5	Perforación de la primera capa(1), (3)	III.10.b y c
0.50	10	Perforación de la primera capa(1)	(2)
0.50	30	Perforación de la primera capa(1)	(2)
0.50	60	Perforación de la primera capa(1)	(2)
1.00	1	Marca en la primera capa	(2)
1.00	5	Perforación de la capa superior(1), (3)	(2)
1.00	10	Perforación de la capa superior(1),	(2)
1.00	30	Perforación de la capa superior(1),	(2)
1.00	60	Perforación de la capa superior(1), (4)	(2)
1.50	1	Perforación en la primera capa (1), (3)	(2)
1.50	5	Perforación en la primera capa (1)	(2)
1.50	10	Perforación en la primera capa (1)	(2)
1.50	30	Perforación en la primera capa (1)	(2)
1.50	60	Perforación en la primera capa (1), (5)	III.10.d
2.00	(6)		

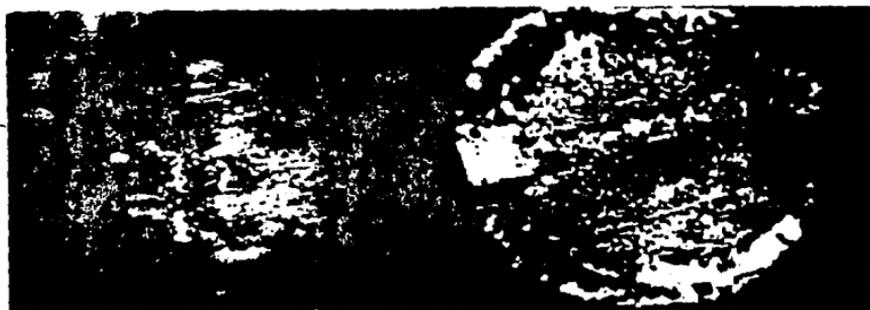
NOTAS:

- (1) A mayor tiempo de exposición a una misma potencia se tiene una perforación más ancha.
- (2) Estas imágenes son similares a las que si se muestran, por lo que solo se presentan las más significativas.
- (3) Las perforaciones con esta potencia son de mayor tamaño a las anteriores.
- (4) Al realizar esta prueba, la placa de madera se movió produciendo una doble exposición.
- (5) En esta prueba se tiene la perforación más profunda obtenida en exposición directa al láser de argón.
- (6) Al hacer las pruebas a potencias menores a 2.00 W-CM, el material producía mucho humo, por lo que no se realizó la prueba a ésta potencia.



(a)

(b)



(c)

(d)

Figura III.10 Imágenes de los efectos producido por la radiación láser sobre una placa de madera de pino aglomerada en exposición directa a un láser de argón con potencias de (a) 0.25 W-CW y 5 seg de exposición (50X), (b) 0.50 W-CW y 30 seg de exposición (50X), (c) 0.50 W-CW y 30 seg de exposición (50X) - detalle centro (notese la zona fibrosa en el fondo producida por daño en el fondo de la primera capa de madera) y (d) 1.50 W-CW y 60 seg de exposición - (50X).

TABLA III.7

RESULTADOS OBTENIDOS AL EXPONER UNA PLACA DE MADERA DE PINO A UN LASER DE ARGON EN EL FOCO DE UNALENTE

Potencia (W-CW)	Tiempo de exposición (seg)	Resultado	Figura
0.25	1	Pequeña marca en la primera placa(1)	III.11.a
0.25	5	Pequeña marca en la primera placa(1)	(2)
0.25	10	Pequeña marca en la primera placa(1)	(2)
0.25	30	Pequeña marca en la primera placa(1)	(2)
0.25	60	Pequeña marca en la primera placa(1)	(2)
0.50	1	Marca sobre la primera capa	(2)
0.50	5	Perforación de la capa superior (1),(3)	(2)
0.50	10	Perforación de la capa superior (1),(3)	(2)
0.50	30	Perforación de la capa superior (1),(3)	(2)
0.50	60	Perforación de la capa superior (1),(3)	(2)
1.00	1	Perforación de la capa superior (4),(5)	(2)
1.00	5	Perforación de la capa superior (4),(5)	(2)
1.00	10	Perforación de la capa superior (4),(5)	(2)
1.00	30	Perforación de la capa superior (4),(5)	III.11.b y c
1.00	60	Perforación de la capa superior (4),(5)	(2)
1.50	1	Perforación de la capa superior (4),(6)	III.11.d
1.50	5	Perforación de la capa superior (4),(6)	III.11.e
1.50	10	Perforación de la capa superior (4),(6)	III.11.f
1.50	30	Perforación de la capa superior (4),(6)	III.12.a
1.50	60	Perforación de la capa superior (4),(6)	III.12.b
2.00	1	Perforación de la capa superior (4),(7)	(2)
2.00	5	Perforación de la capa superior (4),(7)	(2)
2.00	10	Perforación de la capa superior (4),(7)	(2)
2.00	30	Perforación de la capa superior (4),(7)	(2)
2.00	60	Perforación de la capa superior (4),(7)	(2)

NOTAS

- (1) El tamaño de todas las marcas es aparentemente similar, para cada potencia (varía para cada potencia).
- (2) Estas imágenes son similares a las que si se muestran, por lo que solo se presentan las más significativas.
- (3) No se observa si se llega a la segunda capa ya que el diámetro del agujero es muy pequeño.
- (4) El tamaño de las marcas crece al exponer con mayor tiempo; varía para cada potencia.
- (5) Todas las marcas presentan una parte profunda perforada en el centro, a continuación un anillo brillante, lo cual no había aparecido en las pruebas anteriores, y por último un anillo más extendido de madera quemada.
- (6) En las figuras correspondientes a esta secuencia, se observa el mejor ejemplo de crecimiento del tamaño de las marcas para este material.
- (7) En estas marcas el anillo brillante mencionado en (5) se encuentra más extendido que en las secuencias con menor potencia.

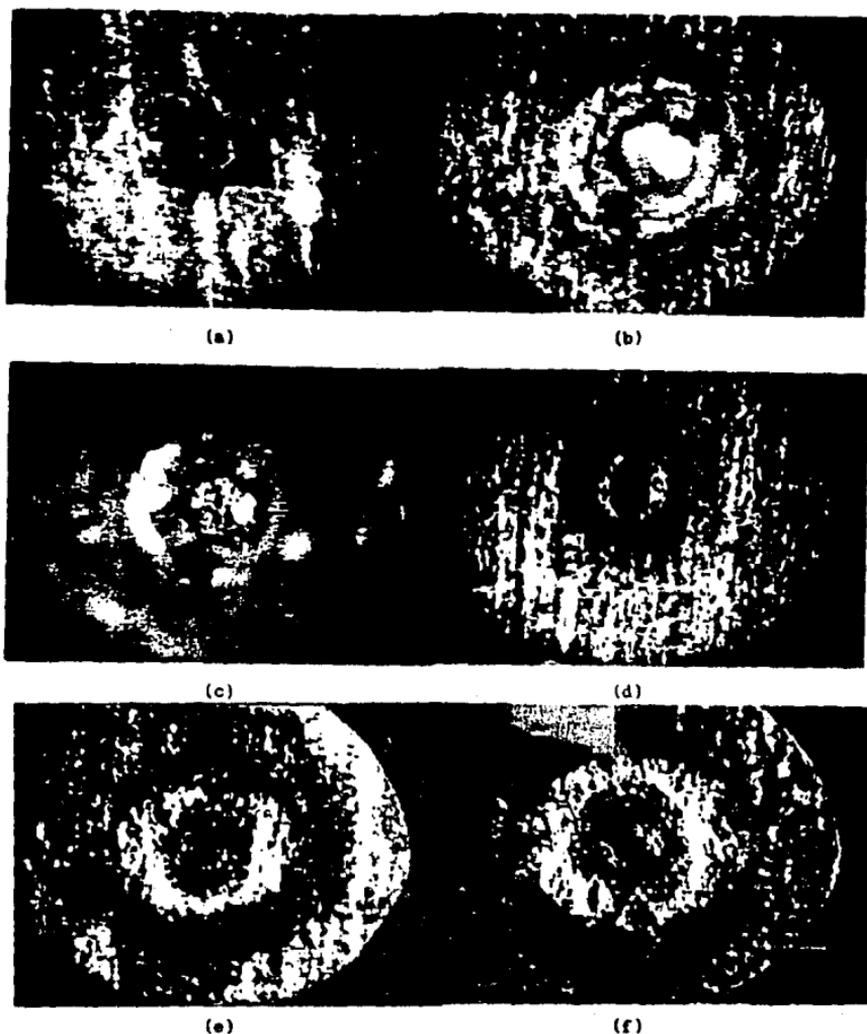


Figura III.11 Imágenes de los efectos producido por la radiación en una placa de madera de pino aglomerada al exponer en el foco de una lente con potencias y tiempos de exposición de: (a) 0.25 W-CW y 1 seg (50X), (b) 1.00 W-CW y 30 seg (50X), (c) 1.00 W-CW y 30 seg detalle centro (notese el fondo carbonizado en el fondo de la muestra), (d) 1.50 W-CW y 1 seg (50X), (e) 1.50 W-CW y 5 seg (50X) y (f) 1.50 W-CW y 10 seg (50X).

II.2.3 PAPEL ILUSTRACION

El papel ilustración está constituido de dos capas: una de papel cartulina (posterior) y otra de papel lustroso (anterior) de 0.5 mm de espesor. En estas pruebas se retiró la parte de cartulina y solo usamos la parte lustrosa. La variación que existe entre ambos tipos de papel es la cantidad de goma con la que se mezcla la celulosa.

Los resultados obtenidos en exposición directa y en el foco de una lente se listan en las tablas III.8 y III.9; en la columna de figuras se menciona la figura en que se observa el resultado.

TABLA III.8
RESULTADOS OBTENIDOS AL EXPONER UNA PLACA DE PAPEL ILUSTRACION EN EXPOSICION DIRECTA A UN LASER DE ARGON

Potencia (W-CW)	Tiempo de exposición (seg)	Resultado	Figura
0.25	(1)	Ninguno	
0.50	(1)	Ninguno	
1.00	1	Ninguno	
1.00	5	Marca en el papel	III.14.a
1.00	10	Papel perforado (2)	(3)
1.00	30	Papel perforado (2)	III.14.b
1.00	60	Papel perforado (2)	(3)
1.50	1	Ninguno	
1.50	5	Papel perforado (2)	(3)
1.50	10	Papel quemado (4)	(5)
1.50	30	Papel quemado (4)	(5)
1.50	60	Papel quemado (4)	(5)
2.00	(6)		

NOTAS:

- (1) No se observa ningún efecto en todos los tiempos de exposición: 1, 5, 10, 30 y 60 seg.
- (2) Las marcas tienen las orillas quemadas. El tamaño de las perforaciones crece al exponer con mayor tiempo, para cada potencia.
- (3) La forma de estas imágenes es similar a la de la figura III.14.b, por lo que solo se presenta ésta. Para resaltar la perforación se colocó una lámpara por detrás del papel.
- (4) El papel además de ser perforado, se quemó y dañó la parte superior de las muestras.
- (5) La imagen de estas pruebas, al haber sido quemadas, abarcan un área mayor que el campo del microscopio.
- (6) Al hacer las pruebas a potencias menores a 2.00 W-CW, el material produce mucho humo, por lo que no se realizó la prueba a esta potencia.

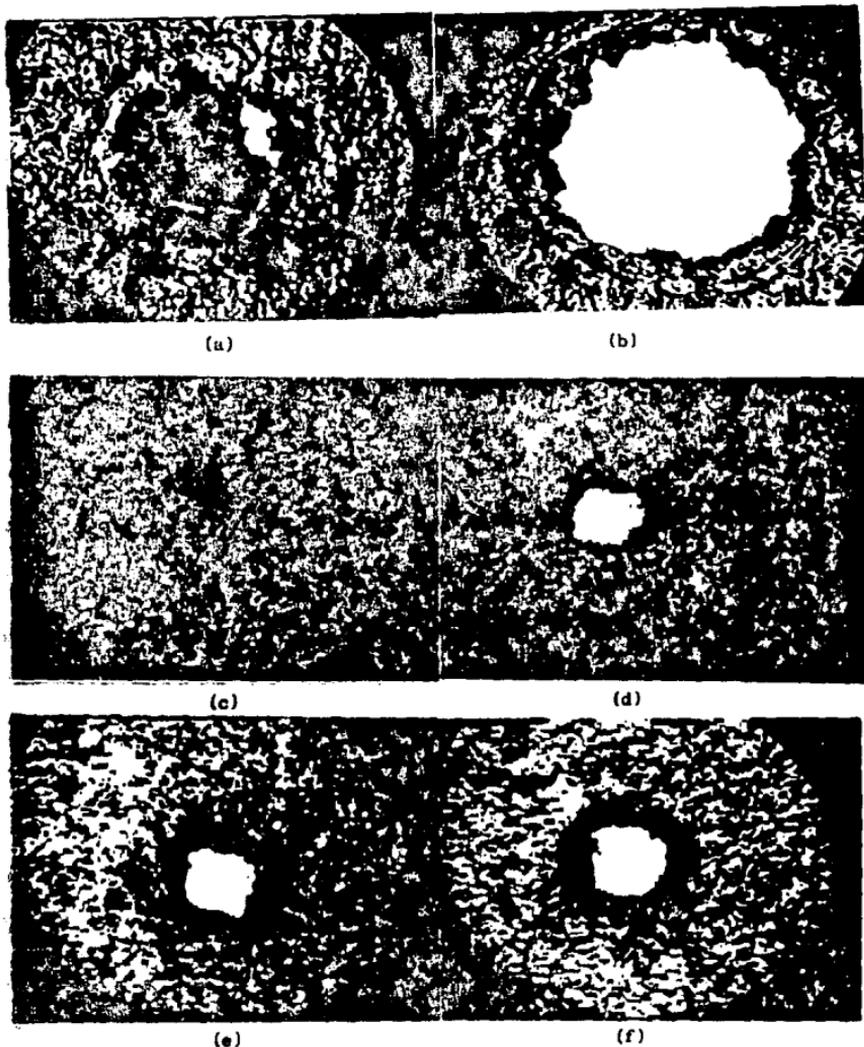


Figura III.14 Imágenes de una placa de papel ilustración irradiado en:
 Exposición directa a un láser de argón con con 0.50 W-CW y tiempos de exposición de (a) 5 seg (50X) y (b) 30 seg(50X).
 En el foco de una lente con un láser de argón con potencias de 1.50 W-CW y -
 tiempos de (c) 5 seg (50X), (d) 10 seg (50X), (e) 30 seg (50X) y (f) 60 seg -
 (50X) Comparece las Figuras (d), (e), y (f) cuyo diámetro es similar

Finalmente al irradiar el papel ilustración a la salida de una fibra óptica con una potencia de aproximadamente 0.50 W por 3 seg (Fig III.15.b), encontramos que el papel es perforado, a una combinación tiempo-potencia menor que en el foco de una lente (ver Tabla III.9).



Figura III.15 Imágenes de una placa de papel ilustración irradiado:
(a) En el foco de una lente con una potencia de 2.00 W-CW de potencia y 60 - seg de exposición. Comparece el diámetro de la perforación con el diámetro de las perforaciones mostradas en la Figura III.14.d, e y f.
(b) A través de una fibra óptica con potencia de 0.50 W-CW y 5 seg de exposición (50X). Notemos la zona quemada alrededor de la perforación, producto de radiación proveniente del recubrimiento de la fibra óptica.

III.2.4 PLACA FENOLICA CON COBRE

La placa fenólica con cobre es un compuesto de un polímero de 1 mm de espesor (placa fenólica) con una delgada capa de metal de 0.1 mm (cobre), ésta es comunmente usada en la producción de circuitos impresos. Esta muestra fue preparada dándole un terminado de espejo, esmerilandola con lija del 800 - (grano de 32 μ m) y luego puliendo con un pulidor (Brasso). Debido a esto la absorción de este material disminuyó.

Se realizaron pruebas irradiando la placa por el lado con cobre, tanto - en exposición directa al laser de argón, como en el foco de una lente a los - tiempos (1, 5, 10, 30 y 60 seg) y potencias (0.25, 0.50, 1.00, 1.50 y 2.00 W-CW) que las demás muestras, sin obtener ningún resultado positivo.

Por esta razón se realizaron pruebas adicionales sobre este material, las cuales consistieron en irradiar el material tanto en el modo todas las líneas juntas como en el modo de líneas espectrales separadas, en particular la línea de 488.0 nm. Estas pruebas se encuentran listadas en la Tabla III.10.

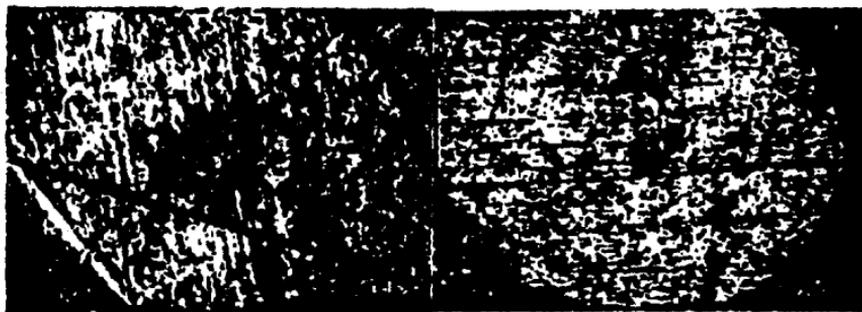
TABLA III.3
PRUEBAS REALIZADAS SOBRE PLACA FENOLICA CON COBRE (SIN PULIR)

PRUEBA	TIEMPO EXPOSICION (seg)	POTENCIA (mW-CW)	POSICION DE LA MUESTRA	RESULTADO
A	400 ± 0.5	* 300 ± 5	salida F.O.	calentamiento
B	150 ± 0.5	*1600 ± 5	exp dir láser	calentamiento
C	300 ± 0.5	*1500 ± 5	haz enfocado	calentamiento
D	150 ± 0.5	3900 ± 5	haz enfocado	calentamiento
E	150 ± 0.5	3200 ± 5	haz enfocado	ataque
F	150 ± 0.5	750 ± 5	exp dir láser	nada
G	360 ± 0.5	3150 ± 5	exp dir láser	ataque

NOTA: Las pruebas marcadas con un asterisco (*), fueron hechas con la línea de 488.0 nm y las restantes en el modo de todas las líneas juntas.

En el cuadro de posición de la muestra, se menciona la posición en que fueron realizadas: exposición directa al láser (exp dir láser), en el foco de una lente (haz enfocado) y a la salida de una fibra óptica (salida F.O.). De los resultados obtenidos, encontramos a la placa no le pasó nada (prueba F), que la placa solo calentada por la radiación láser, lo cual se detectó tocando la placa con la mano (pruebas A,B,C y D) y que se obtuvo un resultado positivo, consistente en un pequeño agujero donde el cobre fué removido (pruebas E y G) las cuales se ven en la Figura III.16.a y b.

Lo importante en estas imágenes es demostrar que en la placa fenólica con cobre utilizada para la producción de circuitos impresos es posible inducir efectos con un láser, por lo que es posible usar esta técnica para la producción de circuitos impresos.

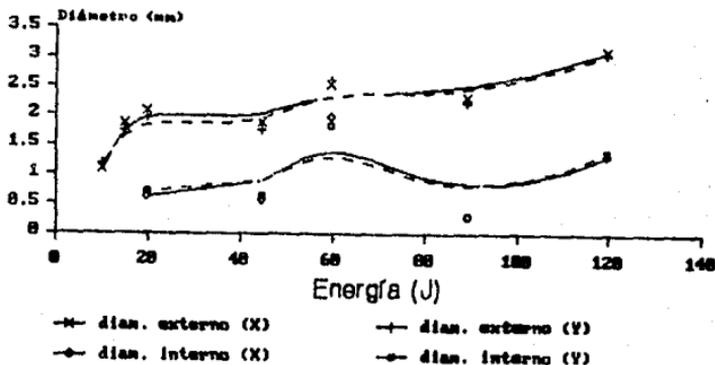


(a)

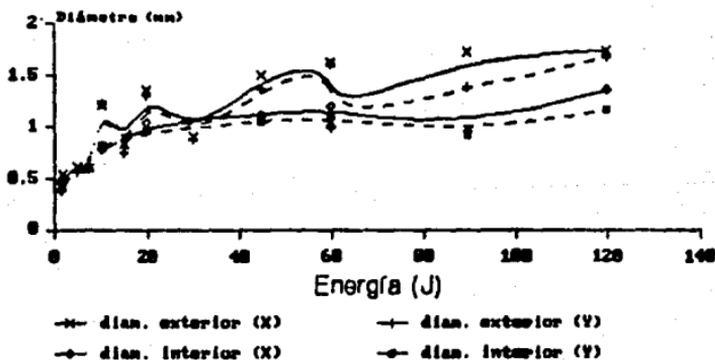
(b)

Figura III.16 Placa fenólica con cobre expuesta a radiación láser en (a) el foco de una lente a 3.90 W-CW de potencia por 150 seg (50X) y (b) exposición directa con 3.15 W-CW y 360 seg (50X). Ubíquense las marcas al centro de las figuras como las hechas por el láser de argón.

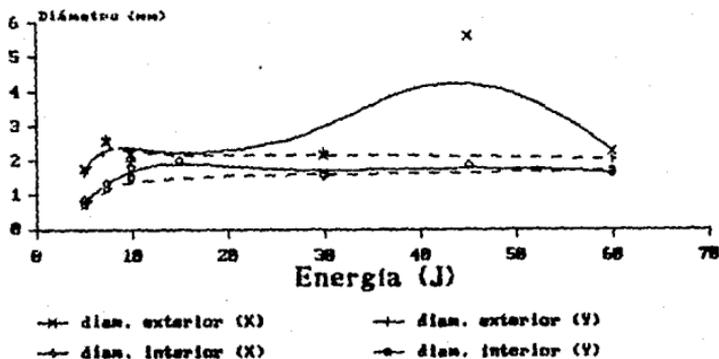
GRAFICA III.1
 DIAMETRO DE LAS PERFORACIONES HECHAS AL IRRADIAR CON UN LASER DE ARGON UNA
 PLACA DE ACRILICO MATE BLANCO DE 5 mm DE ESPESOR EN EXPOSICION DIRECTA.



GRAFICA III.2
 DIAMETRO DE LAS PERFORACIONES HECHAS AL IRRADIAR CON UN LASER DE ARGON UNA
 PLACA DE ACRILICO MATE BLANCO DE 5 mm DE ESPESOR EN EL FOCO DE UNA LENTE



GRAFICA III.5
DIAMETRO DE LAS PERFORACIONES HECHAS AL IRRADIAR CON UN LASER DE ARGON UNA PLACA DE PAPEL ILUSTRACION DE 0.4 mm DE ANCHO EN EXPOSICION DIRECTA



GRAFICA III.6
DIAMETRO DE LAS PERFORACIONES HECHAS AL IRRADIAR CON UN LASER DE ARGON UNA PLACA DE PAPEL ILUSTRACION DE 0.4 mm DE ANCHO EN EL FOCO DE UNA LENTE

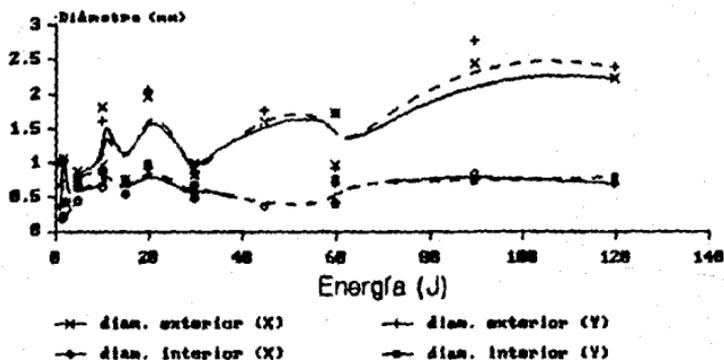


TABLA IV.2
ABERTURAS NUMERICAS DE LAS FIBRAS OPTICAS REPORTADAS

FIBRA OPTICA	ABERTURA NUMERICA REPORTADA	VARIACION PORCENTUAL (%)
CONDUMEX ($\phi = 9 \mu\text{m}$)	----- (1)	-----
CONDUMEX ($\phi = 50 \mu\text{m}$)	0.20 (2)	6.66 \pm 2.53
QUARTS ET SILICE ($\phi = 200 \mu\text{m}$)	0.091 \pm 0.010 (3)	63.24 \pm 0.04
QUARTS ET SILICE ($\phi = 600 \mu\text{m}$)	0.091 \pm 0.006 (3)	66.80 \pm 0.05

Notas: (1) El fabricante no reporta este valor
(2) Valor reportado por el fabricante
(3) Valores reportados en la ref 10. No se cuentan con los datos del fabricante.

De esta tabla encontramos que para las fibras ópticas usadas por Condumex el error entre el valor medido por el método descrito y el valor del fabricante son comparables. Para las fibras ópticas con núcleo de cuarzo donde no se tienen los valores reportados por el fabricante solo aquellos determinados por el método descrito por Carranza¹⁰, nuestros valores son tres veces más grandes.

Para entender el origen de la discrepancia entre los valores de la N.A. para las fibras ópticas con núcleos de cuarzo de las tablas IV.1 y IV.2, debemos partir del hecho de que en el método de la sección 1.4, la abertura numérica máxima que se puede determinar es de 0.4103. Al no tener los datos del fabricante y solo saber que se trabaja con fibras ópticas de tipo índice en escalón, se supuso que para la abertura numérica de la protección era mayor a la que podíamos observar[†]. Recordemos que en el criterio de máxima potencia se usan como indicadores las caídas de potencia que ocurren al variar el diámetro del diafragma colocado justo antes de la lente que enfoca la luz a la entrada de la fibra óptica; supusimos que la primera caída de potencia que observabamos corresponde a la abertura numérica del recubrimiento y la segunda caída de potencia corresponde a la abertura numérica del núcleo y ésta es la que tomamos como dato, por lo que no nos preocupamos por observar si existía una tercera caída de potencia.

[†] cuyo índice de refracción es el menor de los involucrados, ref 1

[‡] Para varillas de materiales con índice de refracción de 1.2 la abertura numérica en aire es de 0.44, ec. 1.11

IV.3 RESPUESTA DEL ACOPLADOR

De acuerdo a los requerimientos solicitados en la sección II.3.1 se desarrolló un acoplador láser-fibra óptica con las siguientes características:

1. El acoplador puede ser usado en cualquier láser cambiando solamente el módulo adaptador, esto permite realizar desarrollos en diversos láseres y aplicar éstos en otros.
2. Al no estar en exposición directa a la radiación láser se puede utilizar en láseres continuos o pulsados, de baja o alta potencia, siempre que la lente, diafragma, obturador y fibra óptica usados lo permitan.
3. Se pueden montar diversas lentes con diámetros hasta de 25.4 mm y distancias focales de 5 a 55 mm, lo que permite usar varias combinaciones de lentes, sin necesitar una montura diferente para cada tamaño de lente; e incluso con dos de éstos módulos es posible tener en el cuerpo del acoplador un sistema expansor-colimador.
4. Se puede enfocar con precisión el extremo de la fibra óptica en el foco de la lente, con un paso de 0.4 mm por vuelta en el volante de enfoque (pieza AC-4B) sin torcer a la fibra óptica, evitando de esta manera que ésta se dañe o en caso extremo se rompa.
5. Se corrigieron los problemas de descentramientos tanto en la construcción del instrumento como por la emisión fuera del eje mecánico del láser de argón. Lo anterior se logró con la incorporación de una montura de lente con centrado variable y el sistema de posicionamiento de la fibra óptica en dos ejes perpendiculares al eje del instrumento.
6. El uso del obturador electro-mecánico permite controlar con precisión los tiempos de exposición, con intervalos de tiempo variables según la electrónica que se utilice.
7. El acoplador láser-fibra óptica es estable, hasta la instalación del módulo lente (sección II.3.7), lo que se establece cualitativamente ya que una vez alineada la lente, ésta permanece alineada con el eje de emisión del láser; inclusive si se retira y vuelve a colocar el acoplador.

Pero al igual que el acoplador láser-fibra óptica cumple con las características establecidas, al construir el prototipo se detectaron las siguientes fallas en el diseño de éste:

- A. El prototipo fué elaborado por facilidad de construcción en latón, por lo que el acoplador es pesado. Tiende a deformarse ligeramente y se corre el riesgo de dañar la cuerda en la cabeza del láser de argón. El problema fué corregido con el uso de soportes mecánicos adicionales montados en la mesa de trabajo.

Esta falla se puede corregir usando para futuras versiones del instrumento materiales ligeros como el aluminio, lo cual aligera el acoplador eliminando las posibles consecuencias.

IV.4 DISCUSION DE LOS ORIFICIOS HECHOS EN LAS MUESTRAS RADIADAS

Como se mencionó en la sección III.3 se midió el diámetro de las perforaciones hechas en las diferentes muestras irradiadas con un láser de argón. Los datos de éstas mediciones se encuentran en el Apéndice 2 (Tablas 1 a 6).

Se observa en las tablas correspondientes, se realizaron mediciones en dos ejes perpendiculares (X e Y) en el borde exterior de las marcas (diámetro exterior), el diámetro de la parte más profunda del agujero (diámetro interior) y en algunos casos de la perforación completa en el material.

En éste trabajo no se discuten los procesos involucrados en la interacción de la radiación láser con los materiales ni como se producen las perforaciones, nos concretamos solamente a mencionar algunas regularidades que se observan en las gráficas correspondientes.

De las gráficas III.1 a III.6 podemos observar las siguientes regularidades:

- I. El comportamiento global de las gráficas es similar en todos los materiales, independientemente de su origen (vegetal, mineral o sintético).
- II. Los diámetros de las perforaciones presentan un comportamiento creciente con la energía, aunque varios puntos parecen no tener este comportamiento debido a errores experimentales.
- III. En las gráficas de exposición directa a la radiación láser para todos los materiales encontramos que el diámetro interior tiende a estabilizarse alrededor de los 2 mm, diámetro del haz de láser a la salida.
- IV. En las gráficas de las perforaciones hechas en el foco de una lente lo hacen alrededor de 1 mm, el cual no es el diámetro del láser enfocado.
- V. Para energías menores a los 20 Joules en todos los casos, los diámetros de las perforaciones presentan una tendencia creciente más rápida que a energías mayores.
- VI. En todas las perforaciones hechas, una de las medidas es siempre mayor a la otra (en nuestra notación X e Y respectivamente). Este efecto ocurre tanto en exposición directa al láser como en el foco de una lente.

Esta última regularidad que presentan los datos, el astigmatismo de las perforaciones, debido a que éste se produce tanto en exposición directa como en el foco de una lente, no es producto de aberraciones ópticas sino un efecto inherente a la forma en la que se coloca la muestra en la que se realizan las perforaciones (en posición vertical), donde el calentamiento que se induce con la radiación láser se propaga preferentemente en la dirección que se desplaza el humo, hacia arriba (eje X).

Los datos aquí presentados quedan como resultados experimentales de los efectos que produce un láser de argón y nos permiten afirmar que es posible utilizar un laser de argón para el trabajo industrial ligero en materiales como: acrílico, madera y papel, para producir perforaciones y realizar cortes†.

† Ya que el láser tiene un patrón de emisión gaussiano

‡ Esto ya que un corte es una sucesión de perforaciones.

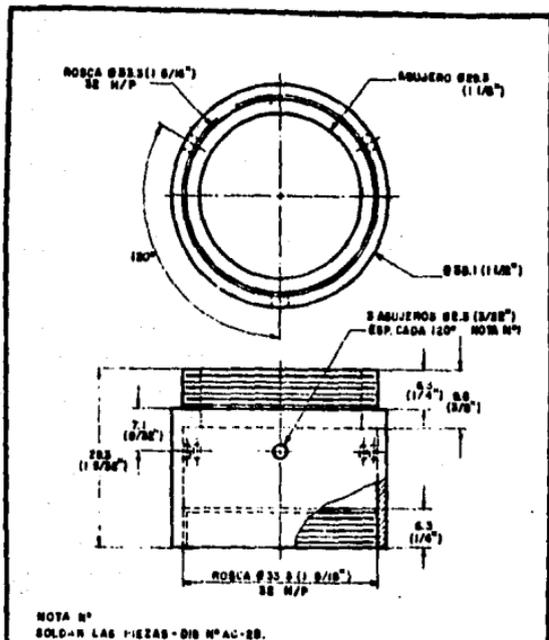
BIBLIOGRAFIA

1. Allen H. Cherin, "An Introduction to Optical Fibers", Mc.Graw Hill, 2ª Edición, 1983.
2. "Fiber Optics in Astronomy". Editor Barden, S.C., Astr. Soc. Pac. 1988.
3. H.F. Wolf, "Handbook of Fiber Optics: Theory & Applications", 1a. edición, Granada 1979.
4. Ortega, R.M. "Aplicaciones de los láseres de argón en medicina" proyecto de trabajo. Centro de Instrumentos UNAM, 1987.
5. O'Shea, Donald C., "Elements of modern optical design", John Wiley & Sons, New York, 1985
6. Hecht, E.-Zajac A, Optica, Fondo Educativo Interamericano, México, 1986, - p.377
7. Rosete M, Díaz R, Olguin G, Ortega R, Determinación de la posición de un haz gaussiano con ayuda de un fotodetector y un prisma, XXXI Congreso Nacional de Física, S.M.F., León Gto, octubre 1989
8. V. Abolites, H. Sotelo, A. Melchor, "Sistema de laser de CO₂" Inst. Des. 2, 14 (1988)
9. Duley, W.W. "Laser processing and analysis of material", Plenum Press, New York and London, 1ª edición, 1983
10. Carranza, J. "Transmisión de la radiación de un laser de argón a través de fibras ópticas para aplicaciones en medicina" Tesis de licenciatura, Facultad de Ciencias UNAM, 1990.

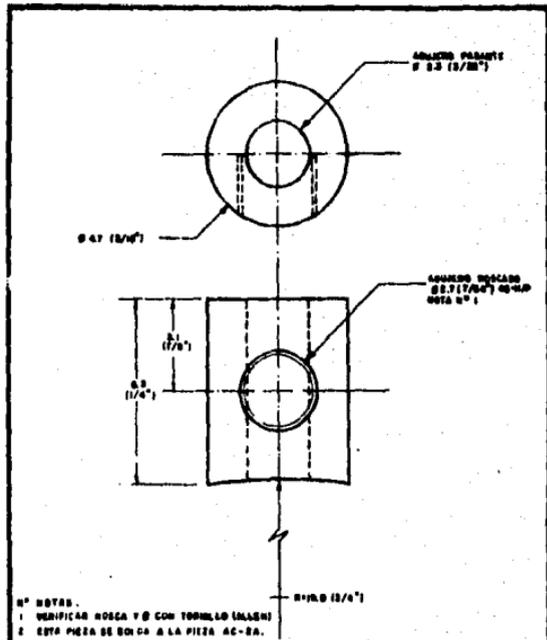
APENDICE 1

PLANOS DEL ACOPLADOR LASER-FIBRA OPTICA

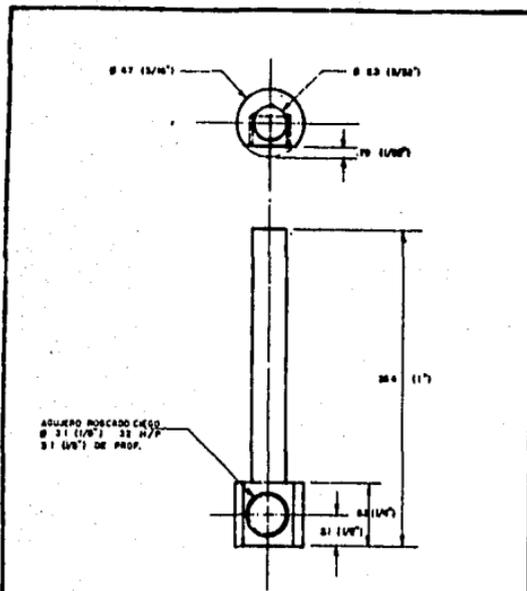
<u>PLANO</u>	<u>DESCRIPCION</u>	<u>PAGINA</u>
AC-1A	Módulo Adaptador (1)	70
AC-1B	Módulo Adaptador (2)	70
AC-2A	Módulo Lente (1)	71
AC-2B	Módulo Lente (2)	71
AC-2C	Módulo Lente (3)	72
AC-2ISO	Módulo Lente (armado)	72
AC-3A	Módulo Diafragma (1)	73
AC-3B	Módulo Diafragma (2)	73
AC-3ISO	Módulo Diafragma (armado)	74
AC-4A	Módulo Fibra-óptica (1)	74
AC-4B	Módulo Fibra-óptica (2)	75
AC-4C	Módulo Fibra-óptica (3)	75
AC-4D	Módulo Fibra-óptica (4)	76
AC-4E	Módulo Fibra-óptica (5)	76
AC-4F	Módulo Fibra-óptica (6)	77
AC-4ISO	Módulo Fibra-óptica (armado)	77
AC-5A	Módulo obturador (1)	78
AC-5B	Módulo obturador (2)	78
AC-5C	Módulo obturador (3)	79
AC-5ISO	Módulo obturador (armado)	79
AC-ISO	Armado general del acoplador	80



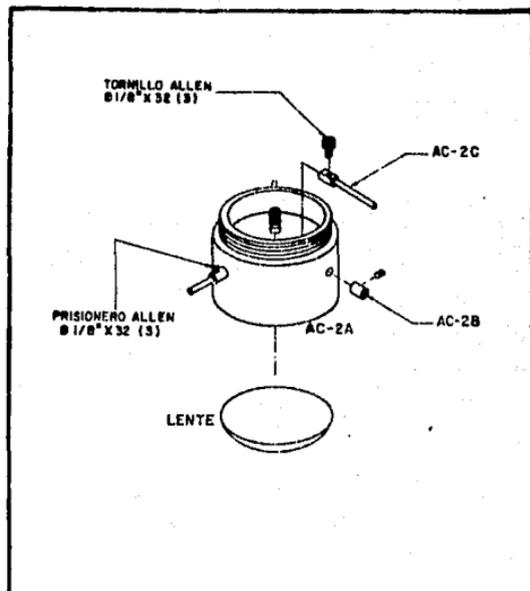
		C.I.C. : 212	
CENTRO DE INSTRUMENTOS		ACOT. : mm. (pulg.)	
NOMBRE : MÓDULO LENTE		DIB. N° : AC-28	
PROYECTO : IBI		DISEÑO : CARLOS TREVIÑO	
MATERIAL : LATÓN		REVISO :	
CANTIDAD : 1 PIEZA		DEPARTAMENTO : DISEÑO Y DESARROLLO	
DESARROLLO DE ACOPLADOR LASER-P.O.		REVISO :	



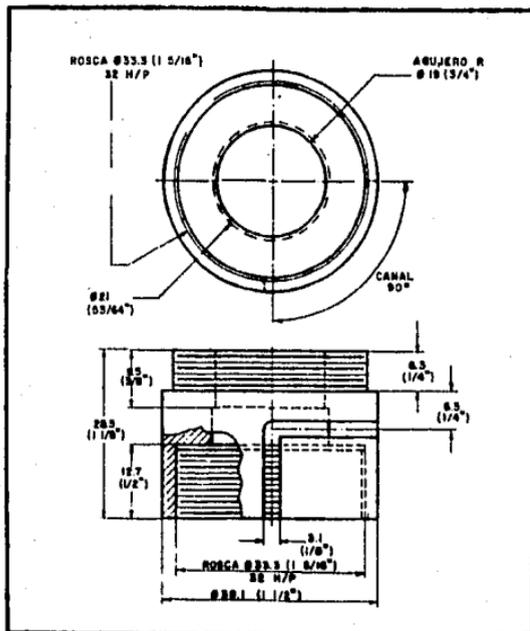
		C.I.C. : 10-1	
CENTRO DE INSTRUMENTOS		ACOT. : mm. (pulg.)	
NOMBRE : MÓDULO LENTE		DIB. N° : AC-28	
PROYECTO : IBI		DISEÑO : CARLOS TREVIÑO	
MATERIAL : LATÓN		REVISO :	
CANTIDAD : 5 PIEZAS		DEPARTAMENTO : DISEÑO Y DESARROLLO	
DESARROLLO DE ACOPLADOR LASER-P.O.		REVISO :	



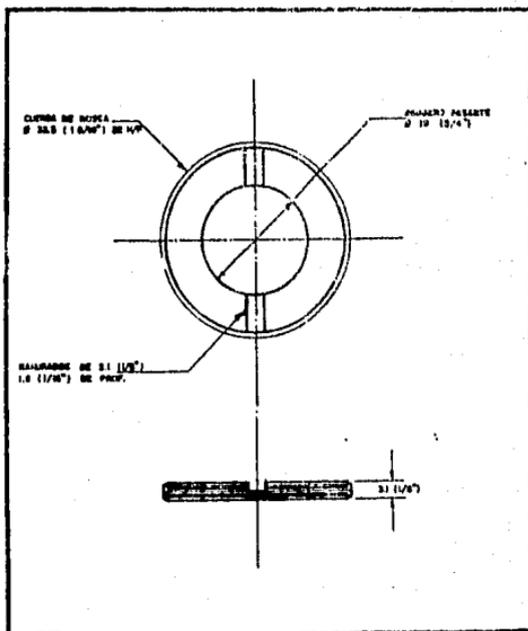
 CENTRO DE INSTRUMENTOS		 ESC: 1:1 ACOT: mm (1/16)	
NOMBRE: MODULO LENTE		FECHA: ENERO-80	
MATERIAL: LATON		DISEÑO: C. T.	
CANTIDAD: 3 PIEZA		DEPTO: CARLOS TREVIÑO	
PROYECTO: 181 DESARROLLO DE ACOPLADOR LASER-F.O.		REVISO:	
DEPTO: DISEÑO Y DESARROLLO			



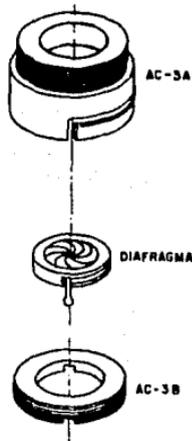
 CENTRO DE INSTRUMENTOS		 ESC: 1:1 ACOT: mm (1/16)	
NOMBRE: MODULO LENTE		FECHA: ENERO-80	
MATERIAL: LATON		DISEÑO: C. T.	
CANTIDAD: 3 PIEZA		DEPTO: CARLOS TREVIÑO	
PROYECTO: 181 DESARROLLO DE ACOPLADOR LASER-F.O.		REVISO:	
DEPTO: DISEÑO Y DESARROLLO			



				INC : 214
CENTRO DE INSTRUMENTOS		ACOT : mm (1 mm)		
NOMBRE : MÓDULO DIAFRAGMA	PROYECTO : 101	FECHA : ENERO-90	DISEÑO : AC - SA	
MATERIAL : LATÓN	DESARROLLO DE ACOPLADOR LÁSER - F.O.	DISEÑO : CARLOS TREVIÑO		
CANTIDAD : 1 PIEZA	DEPTO : DISEÑO Y DESARROLLO	REVISO :		

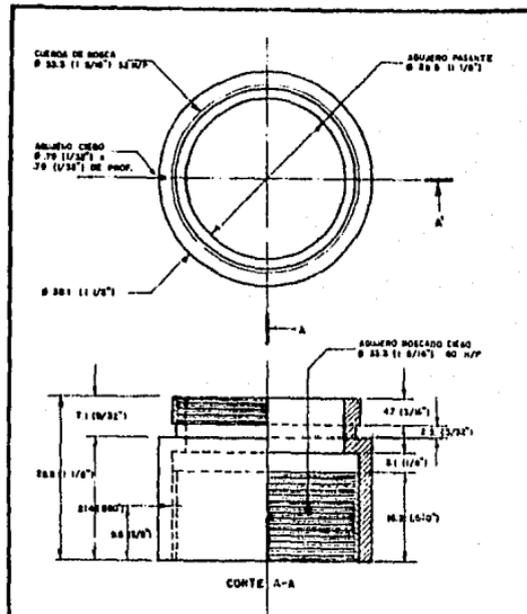


				INC : 214
CENTRO DE INSTRUMENTOS		ACOT : mm (1 mm)		
NOMBRE : MÓDULO DIAFRAGMA (FIBRA - ÓPTICA)	PROYECTO : 101	FECHA : ENERO-90	DISEÑO : AC - SA	
MATERIAL : LATÓN	DESARROLLO DE ACOPLADOR LÁSER - F.O.	DISEÑO : CARLOS TREVIÑO		
CANTIDAD : 8 PIEZAS	DEPTO : DISEÑO Y DESARROLLO	REVISO :		



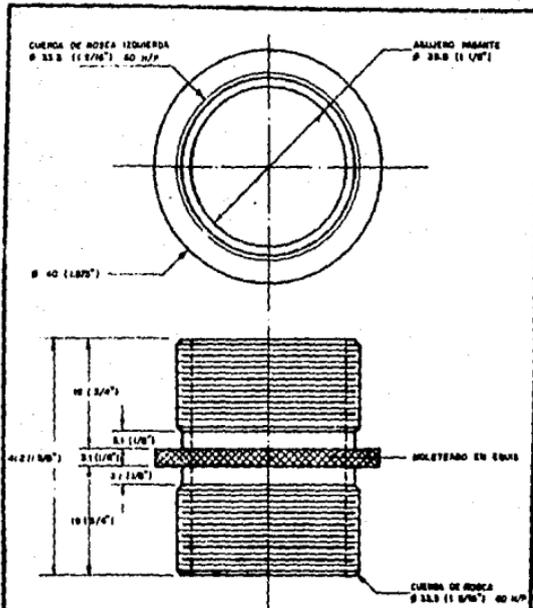
MODULO DIAFRAGMA

CENTRO DE INSTRUMENTOS		CENTRO DE INSTRUMENTOS	
NOMBRE: MODULO DIAFRAGMA	PROYECTO: ISI	FECHA: ENERO-80	DISEÑO: C.T.
MATERIAL: LATON	DESARROLLO DE ACOPLADOR LASER - F.O.	DISEÑO: C.T.	AC-3 ISO
CANTIDAD: 1 PIEZA	DEPTO: DISEÑO Y DESARROLLO	DISEÑO: CARLOS TREVIÑO	REVISO:

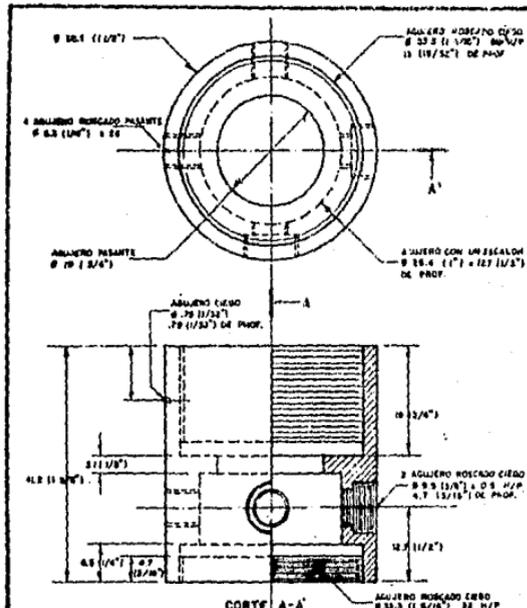


CORTE A-A

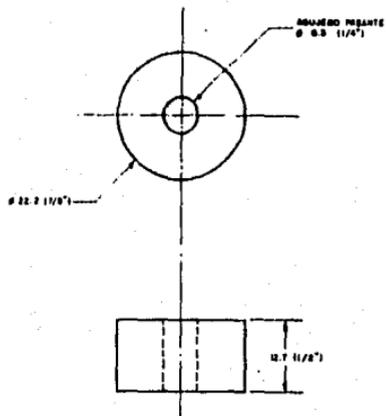
CENTRO DE INSTRUMENTOS		CENTRO DE INSTRUMENTOS	
NOMBRE: MODULO FINRA - OPTICA	PROYECTO: ISI	FECHA: ENERO-80	DISEÑO: C.T.
MATERIAL: LATON	DESARROLLO DE ACOPLADOR LASER - FO	DISEÑO: C.T.	AC-4 A
CANTIDAD: 1 PIEZA	DEPTO: DISEÑO Y DESARROLLO	DISEÑO: CARLOS TREVIÑO	REVISO:



		CENTRO DE INSTRUMENTOS		ESC : 2:1 ACOT : mm (pulg)	
NOMBRE : MÓDULO FIBRA - OPTICA		PROYECTO : IBI		ALTA ENERGIA-PO DISEÑO E.T. AC-88	
MATERIAL : LATON		DESARROLLO DE ACOPLADOR LASER-FO		DISEÑO : CARLOS TREVIÑO	
CANTIDAD : 1 PIEZA		DISEÑO Y DESARROLLO		REVISÓ :	



		CENTRO DE INSTRUMENTOS		ESC : 2:1 ACOT : mm (pulg)	
NOMBRE : MÓDULO FIBRA - OPTICA		PROYECTO : IBI		ALTA ENERGIA-PO DISEÑO E.T. AC-88	
MATERIAL : LATON		DESARROLLO DE ACOPLADOR LASER-FO		DISEÑO : CARLOS TREVIÑO	
CANTIDAD : 1 PIEZA		DISEÑO Y DESARROLLO		REVISÓ :	



		CENTRO DE INSTRUMENTOS		ESC.: 8:1	
NOMBRE: MÓDULO FIBRA - ÓPTICA		PROYECTO 181 DESARROLLO DE ACOPLADOR LASER-F.O.		ACOT.: mm. (pulg.)	
MATERIAL: LATON		DISEÑO: CARLOS TREVIÑO		FECHA: ENERO-80	
CANTIDAD: 1 PIEZA		DEPID. DISEÑO Y DESARROLLO		DIB. Nº AC - 40	
		REVISO:		DISEÑO: C. F.	

AGUJERO PASANTE
Ø 0.3 (1/8")

R=10 (5/4")

2.2 (1/4")

0.3 (1/8")

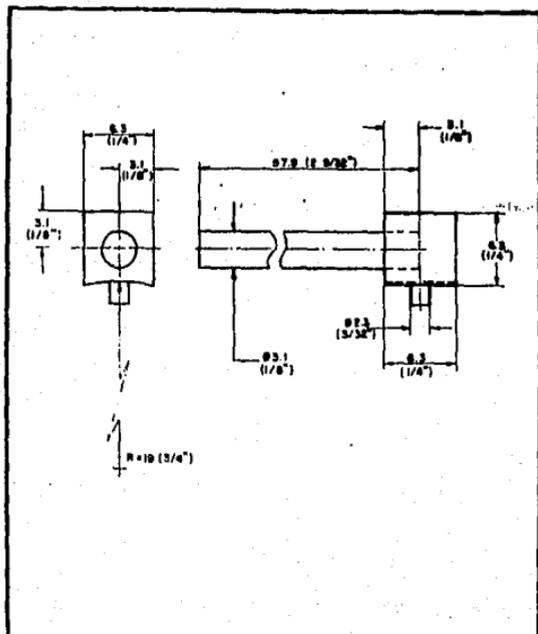
0.3 (1/8")

2.3 (13/32")

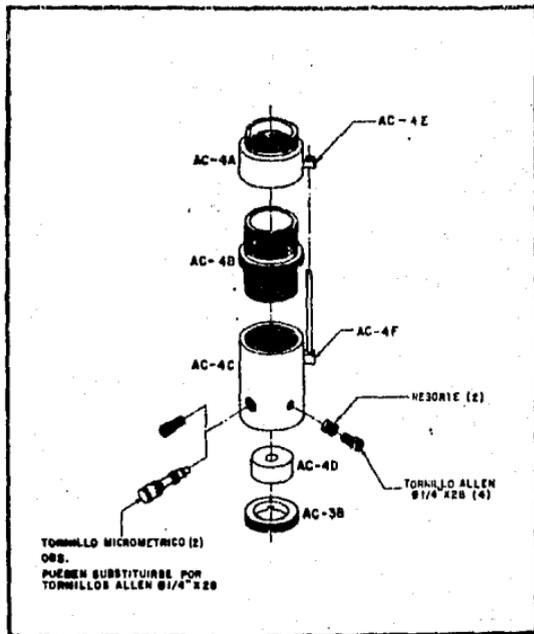
0.3 (1/8")

0.3 (1/8")

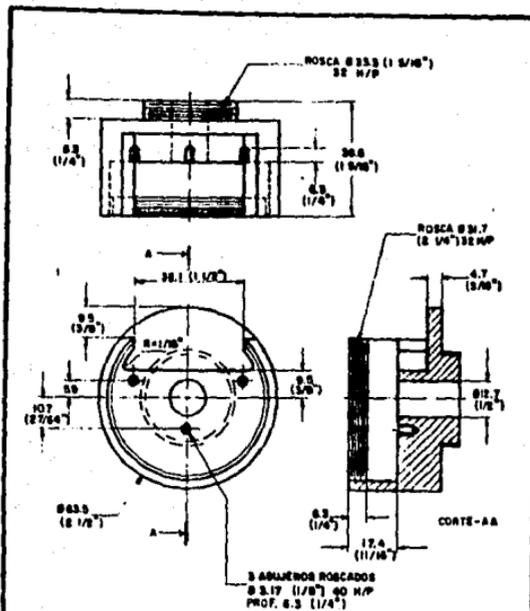
		CENTRO DE INSTRUMENTOS		ESC.: 8:1	
NOMBRE: MÓDULO FIBRA - ÓPTICA		PROYECTO 181 DESARROLLO DE ACOPLADOR LASER-F.O.		ACOT.: mm. (pulg.)	
MATERIAL: LATON		DISEÑO: CARLOS TREVIÑO		FECHA: ENERO-80	
CANTIDAD: 1 PIEZA		DEPID. DISEÑO Y DESARROLLO		DIB. Nº AC - 4E	
		REVISO:		DISEÑO: C. F.	



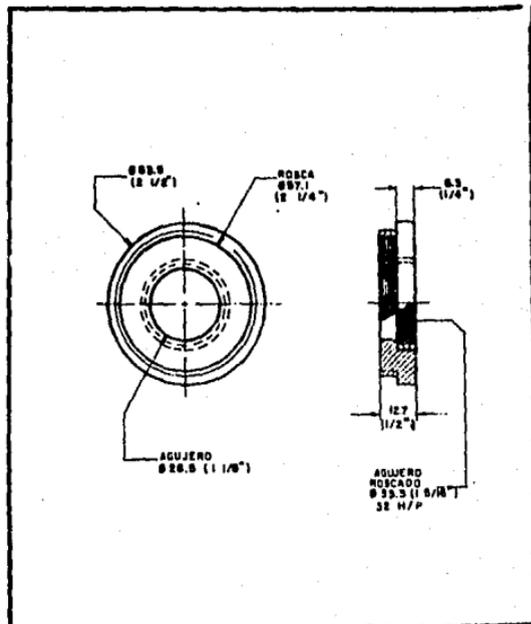
		CENTRO DE INSTRUMENTOS		ESC.: 4:1
				ACOF. mm. 1 mm.
PROYECTO: MÓDULO FIBRA - ÓPTICA	PROYECTO: 101	FECHA: ENERO - 80	DISE. Nº	AC - 4 F
MATERIAL: LATÓN	DESARROLLO DE ACOPLADOR LASER - F.O.	DISEÑO: C.T.	DISEÑO: CARLOS TREVIÑO	
CANTIDAD: 1 PIEZA	DEPTO. DISEÑO Y DESARROLLO	REVISO:		



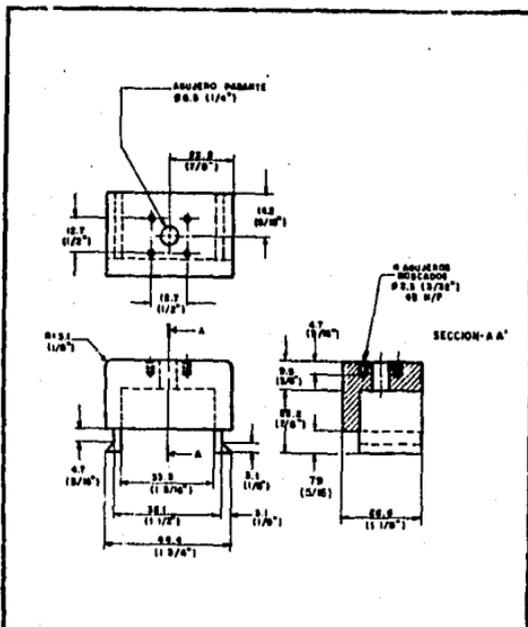
		CENTRO DE INSTRUMENTOS		ESC.: _____
				ACOF.: _____
PROYECTO: MÓDULO FIBRA - ÓPTICA	PROYECTO: 101	FECHA: ENERO - 80	DISE. Nº	AC - 4 150
MATERIAL: LATÓN	DESARROLLO DE ACOPLADOR LASER - F.O.	DISEÑO: C.T.	DISEÑO: CARLOS TREVIÑO	
CANTIDAD: 1 PIEZA	DEPTO. DISEÑO Y DESARROLLO	REVISO: _____		



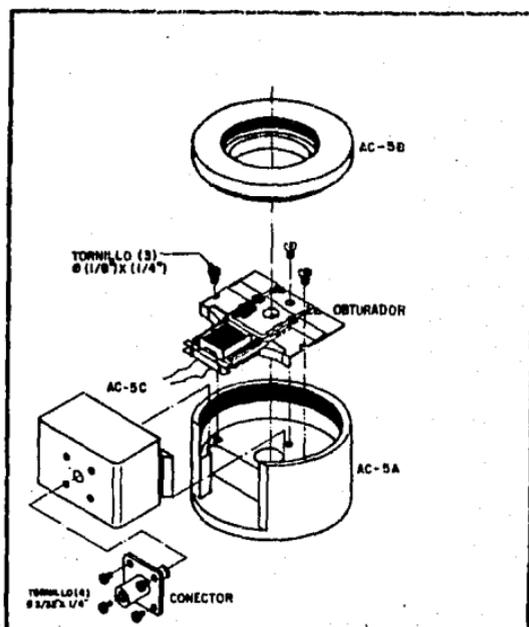
CENTRO DE INSTRUMENTOS		CENTRO DE INSTRUMENTOS	
NOMBRE: MÓDULO OBTURADOR	PROYECTO: I 81	ESCALA: EMBRO-80	ESCALA: EMBRO-80
MATERIAL: LATÓN	DESARROLLO DE ACOPLADOR LASER - F.O.	DIMEN. C.T.	AC - 5A
CANTIDAD: 1 PIEZA	DESDO. DISEÑO Y DESARROLLO	DESDO.	CARLOS TREVIÑO
		REVISO:	



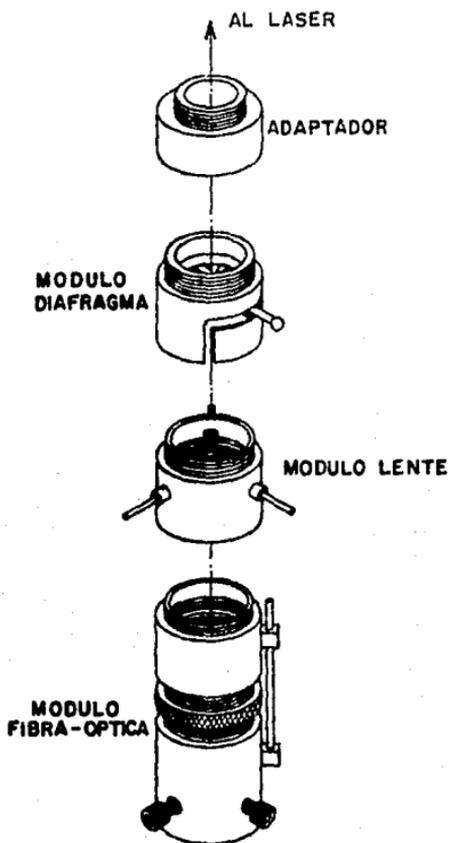
CENTRO DE INSTRUMENTOS		CENTRO DE INSTRUMENTOS	
NOMBRE: MÓDULO OBTURADOR	PROYECTO: I 81	ESCALA: EMBRO-80	ESCALA: EMBRO-80
MATERIAL: LATÓN	DESARROLLO DE ACOPLADOR LASER - F.O.	DIMEN. C.T.	AC - 5B
CANTIDAD: 1 PIEZA	DESDO. DISEÑO Y DESARROLLO	DESDO.	CARLOS TREVIÑO
		REVISO:	



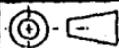
			I.M.C. : C. I. A.C.O.I. :
CENTRO DE INSTRUMENTOS		FECHA: ENERO-80	DE N°
NOMBRE: MÓDULO OBTURADOR	PROYECTO: IBI	DISEÑO: C. T.	AC-5C
MATERIAL: P. V. C.	DESARROLLO DE ACOPLADOR LASER - F.D.	DISEÑO: CARLOS TREVIÑO	
CANTIDAD: 1 PIEZA	DEPTO: DISEÑO Y DESARROLLO	REVISO:	



			I.M.C. : A.C.O.I. :
CENTRO DE INSTRUMENTOS		FECHA: ENERO-80	DE N°
NOMBRE: MÓDULO OBTURADOR	PROYECTO: IBI	DISEÑO: C. T.	AC-5 150
MATERIAL: _____	DESARROLLO DE ACOPLADOR LASER - F.D.	DISEÑO: CARLOS TREVIÑO	
CANTIDAD: 1 PIEZA	DEPTO: DISEÑO Y DESARROLLO	REVISO:	



CENTRO DE INSTRUMENTOS



ESC. : _____
ACOT. : _____

FECHA: ENERO-90

DIB. N°
AC-150

NOMBRE **MODULO GENERAL**

PROYECTO: (81)
**DESARROLLO DE ACOPLADOR
LASER - F.O.**

DIBUJO: C. T.

DISEÑO:
CARLOS TREVIÑO

MATERIAL _____

DEPTO.
DISEÑO Y DESARROLLO

REVISO: _____

CANTIDAD _____

APENDICE 2

TABLAS

	PAGINA
Tabla 1 Diámetro de las muestras irradiadas con laser de argón en exposición directa (acrílico mate)	82
Tabla 2 Diámetro de las muestras irradiadas con laser de argón en el foco de una lente (acrílico mate)	82
Tabla 3 Diámetro de las muestras irradiadas con laser de argón en exposición directa (madera)	83
Tabla 4 Diámetro de las muestras irradiadas con laser de argón en el foco de una lente (madera)	84
Tabla 5 Diámetro de las muestras irradiadas con laser de argón en exposición directa (papel ilustración)	85
Tabla 6 Diámetro de las muestras irradiadas con laser de argón en el foco de una lente (papel ilustración)	85

TABLA 1
Diámetros de las muestras atacadas con laser
ACRILICO MATE (EXPOSICION DIRECTA LASER)

Potencia(W)	Tiempo(seg)	Energ(a(J)	Diámetro exterior (µm)		Diámetro interior (µm)		Perforación (µm)	
			(X)	(Y)	(X)	(Y)	(X)	(Y)
1.00±0.04	5.0±0.012	5.0±0.21	++ ++ ++	++ ++ ++	-- -- --	-- -- --	-- -- --	-- -- --
1.00±0.04	10.0±0.022	10.0±0.42	++ ++ ++	++ ++ ++	-- -- --	-- -- --	-- -- --	-- -- --
1.00±0.04	30.0±0.062	30.0±1.26	++ ++ ++	++ ++ ++	-- -- --	-- -- --	-- -- --	-- -- --
1.00±0.04	60.0±0.122	60.0±2.52	++ ++ ++	++ ++ ++	-- -- --	-- -- --	-- -- --	-- -- --
1.50±0.06	5.0±0.012	7.5±0.32	++ ++ ++	++ ++ ++	-- -- --	-- -- --	-- -- --	-- -- --
1.50±0.06	10.0±0.022	15.0±0.93	1855 ± 3	1716 ± 3	-- -- --	-- -- --	-- -- --	-- -- --
1.50±0.06	30.0±0.062	45.0±1.89	1871 ± 3	1756 ± 3	577 ± 3	623 ± 3	-- -- --	-- -- --
1.50±0.06	60.0±0.122	90.0±3.78	2300 ± 3	2214 ± 3	289 ± 3	297 ± 3	-- -- --	-- -- --
2.00±0.08	5.0±0.012	10.0±0.42	1082 ± 3	1165 ± 3	-- -- --	-- -- --	-- -- --	-- -- --
2.00±0.08	10.0±0.022	20.0±0.84	2067 ± 3	1934 ± 3	605 ± 3	692 ± 3	-- -- --	-- -- --
2.00±0.08	30.0±0.062	60.0±2.52	2512 ± 3	2589 ± 3	1972 ± 3	1820 ± 3	-- -- --	-- -- --
2.00±0.08	60.0±0.122	120.0±5.04	3100 ± 3	3044 ± 3	-- -- --	-- -- --	1316 ± 3	1382 ± 3

TABLA 2
Diámetros de las muestras atacadas con laser
ACRILICO MATE (FOCO LENTE)

Potencia(W)	Tiempo(seg)	Energ(a(J)	Diámetro exterior (µm)		Diámetro interior (µm)		Perforación (µm)	
			(X)	(Y)	(X)	(Y)	(X)	(Y)
1.00±0.04	5.0±0.012	5.0±0.21	610 ± 3	556 ± 3	-- -- --	-- -- --	-- -- --	-- -- --
1.00±0.04	30.0±0.062	30.0±1.26	895 ± 3	870 ± 3	-- -- --	-- -- --	-- -- --	-- -- --
1.00±0.04	60.0±0.122	60.0±2.52	1040 ± 3	985 ± 3	-- -- --	-- -- --	-- -- --	-- -- --
1.50±0.06	1.0±0.004	1.5±0.07	420 ± 3	370 ± 3	-- -- --	-- -- --	-- -- --	-- -- --
1.50±0.06	5.0±0.012	7.5±0.32	596 ± 3	584 ± 3	-- -- --	-- -- --	-- -- --	-- -- --
1.50±0.06	10.0±0.022	15.0±0.93	825 ± 3	743 ± 3	-- -- --	-- -- --	-- -- --	-- -- --
1.50±0.06	30.0±0.062	45.0±1.89	1500 ± 3	1370 ± 3	1106 ± 3	1050 ± 3	-- -- --	-- -- --
1.50±0.06	60.0±0.122	90.0±3.78	1715 ± 3	1380 ± 3	950 ± 3	918 ± 3	450 ± 3	510 ± 3
2.00±0.08	1.0±0.004	2.0±0.09	530 ± 3	480 ± 3	-- -- --	-- -- --	-- -- --	-- -- --
2.00±0.08	5.0±0.012	10.0±0.42	1208 ± 3	1215 ± 3	780 ± 3	812 ± 3	-- -- --	-- -- --
2.00±0.08	10.0±0.022	20.0±0.84	1349 ± 3	1309 ± 3	1036 ± 3	960 ± 3	-- -- --	-- -- --
2.00±0.08	30.0±0.062	60.0±2.52	1620 ± 3	1607 ± 3	1190 ± 3	1095 ± 3	619 ± 3	611 ± 3
2.00±0.08	60.0±0.122	120.0±5.04	1730 ± 3	1667 ± 3	1357 ± 3	1158 ± 3	683 ± 3	668 ± 3

TABLA 3

Diámetros de las muestras atacadas con laser
MADERA (EXPOSICION DIRECTA LASER)

Potencia(W)	Tiempo(seg)	Energ(a(J)	Diámetro exterior (µm)		Diámetro interior (µm)	
			(X)	(Y)	(X)	(Y)
0.25±0.01	5.0±0.012	1.2±0.05	860 ± 3	805 ± 3	-- -- --	-- -- --
0.25±0.01	10.0±0.022	2.5±0.11	1013 ± 3	1035 ± 3	-- -- --	-- -- --
0.25±0.01	30.0±0.062	7.5±0.32	1280 ± 3	1276 ± 3	-- -- --	-- -- --
0.25±0.01	60.0±0.122	15.0±0.63	1285 ± 3	1440 ± 3	-- -- --	-- -- --
0.50±0.02	1.0±0.004	0.5±0.02	840 ± 3	947 ± 3	-- -- --	-- -- --
0.50±0.02	5.0±0.012	2.5±0.11	1479 ± 3	1579 ± 3	-- -- --	-- -- --
0.50±0.02	10.0±0.022	5.0±0.21	1920 ± 3	1749 ± 3	1439 ± 3	1422 ± 3
0.50±0.02	30.0±0.062	15.0±0.63	1907 ± 3	1832 ± 3	1659 ± 3	1538 ± 3
0.50±0.02	60.0±0.122	30.0±1.26	2039 ± 3	2101 ± 3	1421 ± 3	1479 ± 3
1.00±0.04	1.0±0.004	1.0±0.04	720 ± 3	747 ± 3	-- -- --	-- -- --
1.00±0.04	5.0±0.012	5.0±0.21	2046 ± 3	1972 ± 3	1585 ± 3	1307 ± 3
1.00±0.04	10.0±0.022	10.0±0.42	2352 ± 3	2125 ± 3	1623 ± 3	1365 ± 3
1.00±0.04	30.0±0.062	30.0±1.26	2850 ± 3	3650 ± 3	1761 ± 3	1711 ± 3
1.00±0.04	60.0±0.122	60.0±2.52	++ ++ ++	++ ++ ++	1902 ± 3	1893 ± 3
1.50±0.06	1.0±0.004	1.5±0.07	1545 ± 3	1613 ± 3	937 ± 3	593 ± 3
1.50±0.06	5.0±0.012	7.5±0.32	2346 ± 3	2119 ± 3	1505 ± 3	1222 ± 3
1.50±0.06	10.0±0.022	15.0±0.93	2623 ± 3	2370 ± 3	1406 ± 3	1320 ± 3
1.50±0.06	30.0±0.062	45.0±1.89	3255 ± 3	2889 ± 3	1807 ± 3	1790 ± 3
1.50±0.06	60.0±0.122	90.0±3.78	3945 ± 3	2949 ± 3	2176 ± 3	2264 ± 3

TABLA 4
Diámetros de las muestras atacadas con laser
MADERA (FOCO LENTE)

Potencia(W)	Tiempo(seg)	Energía(J)	Diámetro exterior (µm)		Diámetro interior (µm)	
			(X)	(Y)	(X)	(Y)
0.25±0.01	1.0±0.004	0.3±0.01	360 ± 3	378 ± 3	137 ± 3	51 ± 3
0.25±0.01	5.0±0.012	1.2±0.05	434 ± 3	393 ± 3	234 ± 3	162 ± 3
0.25±0.01	10.0±0.022	2.5±0.11	430 ± 3	370 ± 3	233 ± 3	221 ± 3
0.25±0.01	30.0±0.062	7.5±0.32	364 ± 3	410 ± 3	232 ± 3	203 ± 3
0.25±0.01	60.0±0.122	15.0±0.63	404 ± 3	377 ± 3	206 ± 3	178 ± 3
0.50±0.02	1.0±0.004	0.5±0.02	478 ± 3	515 ± 3	213 ± 3	146 ± 3
0.50±0.02	5.0±0.012	2.5±0.11	642 ± 3	719 ± 3	282 ± 3	305 ± 3
0.50±0.02	10.0±0.022	5.0±0.21	667 ± 3	685 ± 3	371 ± 3	300 ± 3
0.50±0.02	30.0±0.062	15.0±0.63	823 ± 3	880 ± 3	510 ± 3	375 ± 3
0.50±0.02	60.0±0.122	30.0±1.26	1021 ± 3	889 ± 3	480 ± 3	412 ± 3
1.00±0.04	1.0±0.004	1.0±0.04	520 ± 3	520 ± 3	260 ± 3	180 ± 3
1.00±0.04	5.0±0.012	5.0±0.21	1148 ± 3	1265 ± 3	365 ± 3	378 ± 3
1.00±0.04	10.0±0.022	10.0±0.42	1777 ± 3	1414 ± 3	553 ± 3	465 ± 3
1.00±0.04	30.0±0.062	30.0±1.26	2148 ± 3	1740 ± 3	919 ± 3	759 ± 3
1.00±0.04	60.0±0.122	60.0±2.52	2397 ± 3	1959 ± 3	986 ± 3	829 ± 3
1.50±0.06	1.0±0.004	1.5±0.07	660 ± 3	604 ± 3	331 ± 3	235 ± 3
1.50±0.06	5.0±0.012	7.5±0.32	1575 ± 3	1518 ± 3	685 ± 3	521 ± 3
1.50±0.06	10.0±0.022	15.0±0.93	1990 ± 3	2030 ± 3	826 ± 3	770 ± 3
1.50±0.06	30.0±0.062	45.0±1.89	2465 ± 3	2869 ± 3	1314 ± 3	847 ± 3
1.50±0.06	60.0±0.122	90.0±3.78	3225 ± 3	2848 ± 3	1447 ± 3	1346 ± 3
2.00±0.08	1.0±0.004	2.0±0.09	446 ± 3	390 ± 3	++ ++ ++	++ ++ ++
2.00±0.08	5.0±0.012	10.0±0.42	1915 ± 3	1728 ± 3	468 ± 3	387 ± 3
2.00±0.08	10.0±0.022	20.0±0.84	1888 ± 3	1788 ± 3	742 ± 3	674 ± 3
2.00±0.08	30.0±0.062	60.0±2.52	2427 ± 3	2081 ± 3	1156 ± 3	1073 ± 3
2.00±0.08	60.0±0.122	120.0±5.04	4173 ± 3	3426 ± 3	1852 ± 3	960 ± 3

TABLA 5
 Diámetros de las muestras atacadas con laser
 PAPEL ILUSTRACION (EXPOSICION DIRECTA LASER)

Potencia(W)	Tiempo(seg)	Energía(J)	Diámetro exterior (µm)		Diámetro interior (µm)	
			(X)	(Y)	(X)	(Y)
1.00±0.04	5.0±0.012	5.0±0.21	1783 ± 3	1687 ± 3	856 ± 3	700 ± 3
1.00±0.04	10.0±0.022	10.0±0.42	2189 ± 3	2016 ± 3	1807 ± 3	1513 ± 3
1.00±0.04	30.0±0.062	30.0±1.26	2157 ± 3	2215 ± 3	1565 ± 3	1609 ± 3
1.00±0.04	60.0±0.122	60.0±2.52	2246 ± 3	2039 ± 3	1642 ± 3	4692 ± 3
1.50±0.06	5.0±0.012	7.5±0.32	2563 ± 3	2628 ± 3	1337 ± 3	1193 ± 3
1.50±0.06	10.0±0.022	15.0±0.93	++ ++ ++	++ ++ ++	1998 ± 3	++ ++ ++
1.50±0.06	30.0±0.062	45.0±1.89	5602 ± 3	++ ++ ++	1868 ± 3	++ ++ ++

TABLA 6
 Diámetros de las muestras atacadas con laser
 PAPEL ILUSTRACION (FOCO LENTE)

Potencia(W)	Tiempo(seg)	Energía(J)	Diámetro exterior (µm)		Diámetro interior (µm)	
			(X)	(Y)	(X)	(Y)
0.50±0.02	5.0±0.012	2.5±0.11	423 ± 3	434 ± 3	-- -- --	-- -- --
0.50±0.02	10.0±0.022	5.0±0.21	726 ± 3	720 ± 3	459 ± 3	436 ± 3
0.50±0.02	30.0±0.062	15.0±0.63	749 ± 3	742 ± 3	518 ± 3	534 ± 3
0.50±0.02	60.0±0.122	30.0±1.26	815 ± 3	843 ± 3	471 ± 3	519 ± 3
1.00±0.04	1.0±0.004	1.0±0.04	666 ± 3	687 ± 3	-- -- --	-- -- --
1.00±0.04	5.0±0.012	5.0±0.21	876 ± 3	815 ± 3	630 ± 3	641 ± 3
1.00±0.04	10.0±0.022	10.0±0.42	962 ± 3	862 ± 3	639 ± 3	710 ± 3
1.00±0.04	30.0±0.062	30.0±1.26	992 ± 3	877 ± 3	671 ± 3	674 ± 3
1.00±0.04	60.0±0.122	60.0±2.52	963 ± 3	929 ± 3	717 ± 3	755 ± 3
1.50±0.06	1.0±0.004	1.5±0.07	999 ± 3	996 ± 3	176 ± 3	199 ± 3
1.50±0.06	5.0±0.012	7.5±0.32	++ ++ ++	++ ++ ++	++ ++ ++	++ ++ ++
1.50±0.06	10.0±0.022	15.0±0.93	++ ++ ++	++ ++ ++	257 ± 3	319 ± 3
1.50±0.06	30.0±0.062	45.0±1.89	1598 ± 3	1747 ± 3	356 ± 3	365 ± 3
1.50±0.06	60.0±0.122	90.0±3.78	2429 ± 3	2757 ± 3	828 ± 3	735 ± 3
2.00±0.08	1.0±0.004	2.0±0.09	1057 ± 3	1040 ± 3	216 ± 3	230 ± 3
2.00±0.08	5.0±0.012	10.0±0.42	1806 ± 3	1607 ± 3	889 ± 3	874 ± 3
2.00±0.08	10.0±0.022	20.0±0.84	1955 ± 3	2052 ± 3	930 ± 3	992 ± 3
2.00±0.08	30.0±0.062	60.0±2.52	1717 ± 3	1726 ± 3	409 ± 3	391 ± 3
2.00±0.08	60.0±0.122	120.0±5.04	2219 ± 3	2375 ± 3	687 ± 3	782 ± 3