

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA  
UNIDAD ENSENADA

ESCUELA DE INGENIERÍA



DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PERFILÓMETRO PARA  
LÁSERES DE CO<sub>2</sub> DE 1-200 W

TESIS

que para cubrir parcialmente los requisitos para obtener el título de  
INGENIERO EN ELECTRÓNICA presenta:

**RUBÉN LÓPEZ VILLEGAS**

ENSENADA B.C., NOVIEMBRE DE 1999.

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA  
UNIDAD ENSENADA

ESCUELA DE INGENIERÍA

TESIS

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PERFILÓMETRO PARA  
LÁSERES DE CO<sub>2</sub> DE 1-200 W

que presenta

RUBÉN LÓPEZ VILLEGAS

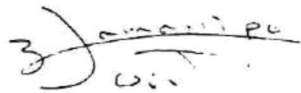
Aprobado por:



M.C. JUAN IVAN NIETO HIPOLITO



DR. RICARDO VILLAGÓMEZ TAMEZ



M.C. JOSÉ DE JESÚS ZAMARRIPA T.



M.C. RAÚL ESPEJO RODARTE



ING. ISRAEL GRADILLA MARTÍNEZ

## DEDICATORIA

A mi madre  
por su gran amor  
y  
enorme esfuerzo

## AGRADECIMIENTOS

A la UABC y a su escuela de ingeniería, en al que pude realizarme profesionalmente.

Al CICESE por las facilidades que recibí para utilizar sus instalaciones en el laboratorio de Láseres Moleculares del departamento de Óptica.

Al Dr. Ricardo Villagómez Tamez por proponerme el presente tema de tesis.

A los miembros de mi comité de tesis MC. Juan Ivan Nieto Hipolito, MC. José de Jesús Zamarripa Topete, MC. Raúl Espejo Rodarte y al Ing. Israel Gradilla Martínez por la revisión que realizaron a mi trabajo.

A mis maestros de la universidad.

Al Dr. Carlos B. Roundy gerente de SPIRICON, Inc. Por su interés en el desarrollo del presente trabajo.

A mis compañeros Ofelia Delgado, Marco Nava y Freddy Ramirez.

A los técnicos del taller de mecánica fina Javier López, Gabino García y Francisco García por la ayuda que brindaron para la fabricación de las piezas mecánicas de los perfilómetros.

# CONTENIDO

	página
DEDICATORIA.....	II
AGRADECIMIENTOS .....	III
CONTENIDO.....	IV
ÍNDICE DE FIGURAS .....	VI
RESUMEN .....	IX

## Capítulo

<b>1. INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>1</b>
1.1 <i>Objetivo .....</i>	3
1.2 <i>Requerimientos .....</i>	3
1.3 <i>Justificación.....</i>	4
<b>2. GENERALIDADES TEÓRICAS Y TÉCNICAS .....</b>	<b>5</b>
2.1 <i>Modos electromagnéticos transversales del haz.....</i>	5
2.2 <i>Importancia de visualizar el perfil. ....</i>	7
2.3 <i>Causas y consecuencias del deterioro del perfil .....</i>	8
2.4 <i>Técnicas tradicionales de visualización.....</i>	8
2.5 <i>Técnicas electrónicas de visualización.....</i>	10
2.5.1 <i>Detección. ....</i>	10
2.5.2 <i>Técnicas de atenuación. ....</i>	11
2.5.3 <i>Visualización. ....</i>	12
2.6 <i>Mediciones realizadas con perfilómetros.....</i>	13

<b>3. DETECTORES DE INFRARROJO (DIR)</b> .....	<b>14</b>
3.1 <i>Características de los DIR</i> .....	14
3.2 <i>Detectores piroeléctricos</i> .....	16
3.2.1 <i>Parámetros importantes</i> .....	16
3.2.2 <i>Teoría de operación piroeléctrica</i> .....	17
<b>4. DISEÑO DE LOS PERFILÓMETROS</b> .....	<b>18</b>
4.1 <i>Perfilómetro para alta potencia</i> .....	19
4.2 <i>Perfilómetro para probar los sistemas</i> .....	23
<b>5. RESULTADOS</b> .....	<b>29</b>
5.1 <i>Metodología experimental</i> .....	29
5.2 <i>Muestras de calibración</i> .....	30
5.3 <i>Primer conjunto de muestras</i> .....	35
5.4 <i>Segundo conjunto de muestras</i> .....	36
5.5 <i>Tercer conjunto de muestras</i> .....	40
<b>6. CONCLUSIONES</b> .....	<b>43</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA</b> .....	<b>45</b>
<b>APÉNDICE A</b> .....	<b>48</b>
¿CÓMO FUNCIONA EL LÁSER?.....	48
A.1 <i>Estructura básica de la luz</i> .....	48
A.2 <i>Composición de los láseres</i> .....	52
<b>APÉNDICE B</b> .....	<b>54</b>
<b>ESQUEMAS DE LAS PIEZAS MECÁNICAS CONSTRUIDAS</b> .....	<b>54</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura		página
1	Gráfica que representa un perfil gaussiano ideal.....	1
2	Perfiles de un láser de CO <sub>2</sub> . En a) el perfil del haz esta distorsionado y b) representa un perfil aproximado a un haz gaussiano.....	2
3	Perfil bidimensional (2D) que representa la forma de un perfil gaussiano.....	3
4	Características de un haz gaussiano. Los arcos representan los frentes de onda del haz. .	6
5	Perfiles de modos transversales TEM <sub>00</sub> y TEM <sub>01</sub> . Los puntos representan sus marcas como se verían en una pantalla.....	7
6	Marcas en papel térmico, del perfil de un láser de CO <sub>2</sub> . Las marcas son similares a las que se representaron en la figura 5.....	9
7	Formación en acrílico del perfil de un láser de CO <sub>2</sub> . La penetración del haz en el acrílico nos da una representación tridimensional.....	10
8	Esquema que muestra la técnica óptica de atenuación.....	11
9	Una técnica mecánica de atenuación. La abertura pasa por el área activa del detector de manera periódica.....	12
10	Detectividad vs. longitud de onda de los detectores de infrarrojo ver ref. [5].....	15
11	Intervalo espectral de las ventanas o filtros de entrada para detectores IR ver ref. [5].....	16
12	Efecto piroeléctrico. La radiación llega al detector cuando el obturador esta en posición abierta, ocasionando cambios de carga en la superficie del detector ver ref. [5].	17
13	Diagrama a bloques del perfilómetro.....	19
14	Graficas que muestran el perfilómetro construido para altas potencias. Los esquemáticos se muestran en el apéndice B.....	20
15	Espejo giratorio del perfilómetro que se ve en la figura 14. ....	21
16	Sistema de barrido vertical. Este sistema sostiene y traslada verticalmente al detector. ....	21
17	Pared frontal del contenedor. La abertura es por donde ingresa el haz al perfilómetro. El resto de la superficie frontal actuara como disipador de calor.....	22
18	Pared posterior del contenedor. ....	22
19	Descripción del experimento realizado con el perfilador de prueba.....	23
20	Perfilómetro de pruebas. Vista parcial de la mesa de trabajo en el laboratorio con los componentes del perfilómetro. ....	24
21	Obturador mecánico (Chopper).....	24
22	Fotografía que muestra el galvo (motor acoplado al espejo). La tarjeta abajo al centro controla al motor.....	25
23	a) Diagrama eléctrico del detector piroeléctrico y b) Detector piroeléctrico utilizado.....	26

24	Diagrama a bloques del circuito de acondicionamiento.....	27
25	Circuito para el acondicionamiento de la señal de salida del detector.....	27
26	Forma del perfil captado por un osciloscopio digital.....	28
27	Frecuencia de obturación: 500 Hz., "moduladora":57 Hz.....	31
28	Frecuencia de obturación 35Hz.....	31
29	Gráfica de intensidad (ó potencia) del láser a la salida del detector (punto de prueba A del diagrama de bloques: figura 24).....	32
30	Señal de salida del detector (punto de prueba A del diagrama de bloques: figura 24).....	33
31	Señal de salida del amplificador (punto de prueba B del diagrama de bloques: figura 24).....	33
32	Señal de salida del demodulador (punto de prueba C del diagrama de bloques: fig. 24).....	34
33	Interpretación del perfil en la pantalla del osciloscopio. El diámetro del perfil se mide en el punto donde la intensidad cae a un valor de $I_0e^{-2}$ .....	35
34	Perfil promedio obtenido del primer conjunto de perfiles.....	36
35	Representación gráfica del perfil promedio (triángulos) y un perfil del conjunto de muestras (círculos y rombos) en a y b respectivamente.....	37
36	Perfil obtenido para el segundo conjunto de muestras (láser ligeramente desalineado: ver las dos crestas en la parte superior de la gráfica).....	38
37	a) Perfiles obtenidos para diferentes potencias del láser y b) perfiles obtenidos al mover ligeramente un espejo del resonador para la misma potencia del laser.....	39
38	Perfil máximo obtenido del tercer conjunto de muestras.....	41
39	Muestras del perfil del láser marcadas en acrílico.....	41
40	Perfil distorsionado por obstrucción colocada en el camino del haz láser.....	42
41	Comparación del perfil con la máxima potencia y el distorsionado.....	42
42	Emisión.....	49
43	Absorción.....	50
44	Emisión espontánea.....	50
45	Emisión estimulada.....	51
46	Estructura básica de un láser.....	52
47	Pared frontal (disipador).....	55
48	Pared posterior.....	56
49	Piso del perfilómetro.....	57
50	Cubierta del perfilómetro.....	58
51	Brazo giratorio.....	59
52	Espejo metálico.....	60
53	Soporte para el motor del brazo.....	61
54	Pared 1 del soporte.....	62
55	Pared 2 del soporte.....	63
56	Tapa del sistema de barrido vertical.....	64

57	Soporte para el motor del sistema de barrido vertical.....	65
58	Paredes del sistema de barrido vertical.....	66
59	Tornillo sinfin.....	67
60	Brazo para el detector.....	68
61	Tornillo del galvo.....	69
62	Bisagra del tornillo.....	70

## RESUMEN

El tema principal del presente trabajo está relacionado con la visualización y caracterización del haz de un láser de bióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ). Estos tienen un intervalo de longitud de onda que va de 9.6 a  $10.6\mu\text{m}$ , y en general son de potencia alta, que va de algunos Watts hasta varios cientos de Watts. El objetivo de este trabajo es diseñar y construir un perfilómetro que nos permita ver en un osciloscopio digital la sección transversal o perfil bidimensional del haz de un láser de  $\text{CO}_2$ . El funcionamiento de estos aparatos está dividido en tres secciones: Detección, Atenuación y Visualización. El diseño inicial del perfilómetro, consiste en un espejo giratorio que desvía el haz del láser hacia un detector durante un corto período de tiempo, para reducir la potencia promedio recibida por este. El detector tiene un movimiento longitudinal en el eje vertical para recolectar la información del perfil. Este diseño presentó fallas en algunas de las partes mecánicas. Por lo que se utilizó un segundo perfilómetro construido para realizar pruebas al detector, y al circuito de acondicionamiento, así como para simular los sistemas mecánicos del perfilómetro de potencia. De éste segundo perfilómetro y del uso de un láser de baja potencia, con capacidad de variar algunos de sus parámetros, se obtuvieron los resultados que se dan en este trabajo.

El trabajo está organizado de la siguiente manera: El capítulo 1 está dedicado a la introducción. En el capítulo 2 se describen algunos tópicos sobre los perfilómetros. En el capítulo 3 se describen brevemente los detectores usados en la región del infrarojo y los criterios que se tomaron para la selección del detector piroeléctrico. En el capítulo 4 se describe el diseño electrónico y mecánico de los perfilómetros. En el capítulo 5 se dan los resultados obtenidos. Las conclusiones y alcances se dan en el capítulo 6. Y finalmente la bibliografía, así como los apéndices A y B que describen el funcionamiento de los láseres y las piezas mecánicas construidas para los perfilómetros, concluyen el escrito.

## 1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad los láseres de CO<sub>2</sub> son los más utilizados en la industria para el procesamiento de materiales<sup>1</sup>, en actividades de corte, perforación y soldadura<sup>2</sup>. Durante su operación, varios parámetros del láser deben monitorearse para obtener su máxima eficiencia de uso, pero sin duda el más importante es el perfil de su haz (sección transversal), ya que de éste, depende que se realicen correctamente estas actividades. La importancia que tiene el perfil del haz en un láser, podría ser comparada con la importancia del filo en un cuchillo o la flama puntual de un soplete.

Como se verá en el próximo capítulo, para un láser que tiene una distribución gaussiana de energía en su perfil (Modo Electromagnético Transversal TEM<sub>00</sub>), se requiere que sea lo más parecido posible a la forma ideal que se observa en la figura 1. Para que éste pueda realizar perforaciones y cortes precisos.

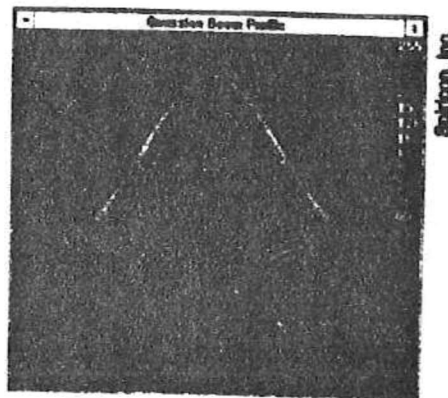


Figura 1 Gráfica que representa un perfil gaussiano ideal.

Pero por lo general el perfil se distorsiona por una o varias razones. Una de estas podría ser una mala alineación en los espejos del resonador óptico<sup>3</sup>,

- 
- 1 Por su alta potencia, eficiencia y autonomía.
  - 2 Además del templado de metales y grabado en diversos materiales.
  - 3 Que es una parte esencial del láser, descrita en el apéndice A.

produciéndose una notable disminución en la eficiencia del láser. Un ejemplo de perfil distorsionado por mala alineación del resonador puede observarse en la figura 2a, y un perfil debido a una buena alineación se aprecia en la figura 2b, ambos perfiles de intensidad tomados del mismo láser de CO<sub>2</sub><sup>4</sup>.

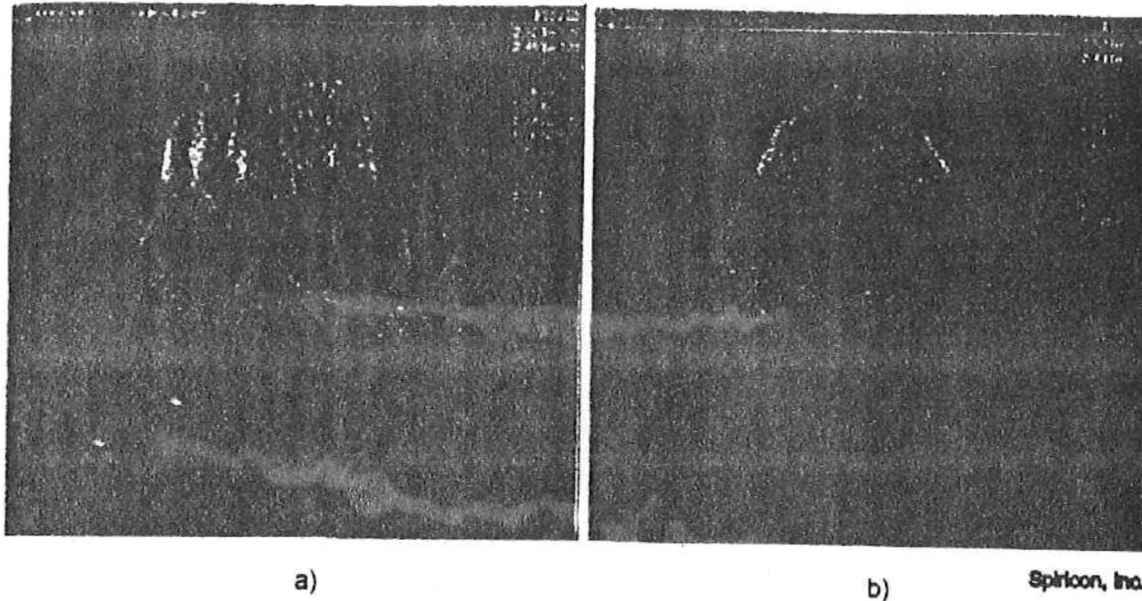


Figura 2 Perfiles de un láser de CO<sub>2</sub>. En a) el perfil del haz está distorsionado y b) representa un perfil aproximado a un haz gaussiano.

La visualización del perfil nos permite obtener información acerca del modo electromagnético transversal del láser, además de su distribución energética, intensidad y distorsión, con el fin de tomar acciones correctivas en el láser si es necesario.

Electrónicamente el perfil puede observarse, mediante el uso de aparatos llamados perfilómetros, que permiten verlo en 2D o 3D (bidimensional o tridimensionalmente). La visualización del perfil en 2D, proporciona información estimada de su forma, como se puede observar en la figura 3. Donde el eje

---

<sup>4</sup> El intervalo de longitudes de onda ( $\lambda$ ) para estos láseres se encuentra entre 9.6 y 10.6 $\mu$ m (dentro del espectro IR).

horizontal proporciona el diámetro del perfil y el eje vertical la intensidad del mismo. Mientras que en 3D, también se obtiene información relacionada con su profundidad, como lo muestra la figura 2.

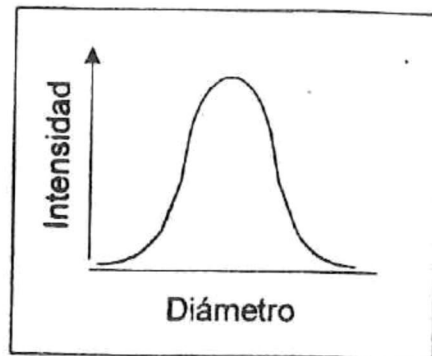


Figura 3 Perfil bidimensional (2D) que representa la forma de un perfil gaussiano.

### 1.1 Objetivo

El objetivo de este proyecto es diseñar y construir un perfilómetro (interfase) que nos permita observar con ayuda de un osciloscopio digital, el perfil 2D de un láser de  $\text{CO}_2$ .

### 1.2 Requerimientos

El sistema primordialmente debe cumplir con los siguientes requerimientos:

- Detectar el intervalo de  $\lambda$  emitido por el láser de  $\text{CO}_2$  (entre  $9.6$  y  $10.6\mu\text{m}$ ).
- Operar a temperatura ambiente.
- Soportar una potencia máxima promedio de  $P_{\text{RMS}} = 15 \text{ W}$ .
- Que el diseño electro-mecánico sea sencillo y económico.

### 1.3 Justificación

El trabajo fue realizado en el Departamento de Óptica de CICESE, dentro del proyecto de Láseres Moleculares, en el cual se trabaja con el desarrollo tecnológico de láseres de CO<sub>2</sub>, que puedan tener aplicaciones industriales. Para esto, la visualización del perfil, como se mencionó anteriormente, es una interfase para el usuario ó diseñador que le permite controlar los parámetros del láser en tiempo real, permitiendo con esto que el láser tenga su máxima eficiencia. Los perfilómetros tienen precios altos (en dólares) y CICESE no cuenta con estos equipos para realizar el análisis de los perfiles, pero se tiene la ventaja, que la base de funcionamiento de algunos perfilómetros es relativamente sencilla. Por lo que se tiene oportunidad de diseñarlos y construirlos, adquiriendo experiencia en el área.

## 2. GENERALIDADES TEÓRICAS Y TÉCNICAS

Este capítulo contiene una breve introducción de los modos de propagación en un láser, así como una descripción de qué es y cómo se genera el perfil. Las causas y consecuencias de su distorsión, técnicas para su visualización y la información que proporciona.

### 2.1 Modos electromagnéticos transversales del haz

Al oscilar los fotones dentro del resonador óptico de un láser, se genera un campo electromagnético muy intenso. La forma de este campo depende de factores como la longitud de onda  $\lambda$  de los fotones, diámetro interior del tubo láser (denominado generalmente como "tubo de descarga" en un láser de gas) y principalmente de la alineación, curvatura y distancia entre los espejos (es decir, del resonador óptico).

El campo puede presentar diferentes distribuciones de energía perpendiculares al eje óptico, que se denominan *modos electromagnéticos transversales*. La notación de estos modos es  $TEM_{mn}$  (de las siglas en inglés "Transversal Electromagnetic Mode"). Donde los subíndices  $m$  y  $n$  están relacionados a los ejes  $x, y$  de las coordenadas transversales de propagación. Estas distribuciones energéticas transversales están representadas por la siguiente ecuación (ver referencia [26]):

$$E_{m,n}(x, y, z) = E_0 \frac{W_0}{W(z)} H_m \left( \sqrt{2} \frac{x}{W(z)} \right) H_n \left( \sqrt{2} \frac{y}{W(z)} \right) e^{-\frac{(x^2+y^2)}{W^2(z)} - ikz + i(m+n+1)\eta} \quad (1)$$

donde:  $E(x,y,z)$  es la amplitud del campo eléctrico en el punto  $x,y,z$ <sup>5</sup>,  $m,n$  son los órdenes de los polinomios de Hermite ( $H_m H_n$ ),  $E_0$  es la amplitud del campo

---

<sup>5</sup> El eje  $z$  es el eje óptico perpendicular a los dos espejos.

eléctrico,  $W_0$  es el tamaño mínimo del haz, donde  $W(z)$  es el tamaño del haz en cualquier punto del eje óptico,  $R(z)$  es el radio de curvatura de la onda electromagnética,  $k$  el número de onda,  $\eta$  es el corrimiento de fase.

Por ejemplo una distribución de energía con características de perfil gaussiano  $TEM_{00}$ . Tiene una distribución de fase esférica y una distribución de amplitud gaussiana como se muestra en la figura 4, y esta representada por la siguiente ecuación (ver referencia [26]):

$$E(x, y) = e^{-(x^2 + y^2)/W^2} \quad (2)$$

donde  $W$  es el tamaño de la mancha.

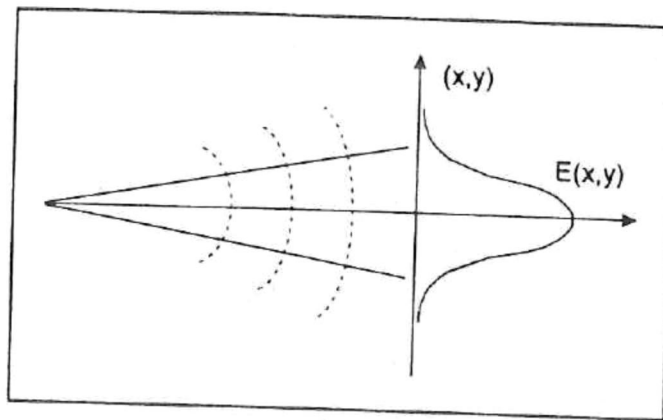


Figura 4 Características de un haz gaussiano. Los arcos representan los frentes de onda del haz.

El diseño de los resonadores ópticos actuales permite que los equipos láser operen con un solo modo transversal y que este modo pueda adaptarse para una aplicación en particular. Es aquí donde los perfilómetros juegan un papel muy importante ya que nos permiten observar el perfil para comprobar que efectivamente el láser tenga el modo TEM adecuado. El modo  $TEM_{00}$  es ideal para la mayoría de las operaciones de corte, perforación y soldadura, porque produce un haz que puede enfocarse en un punto muy pequeño, con una densidad de potencia muy alta en su centro como se vera en los resultados.

En la figura 5 se puede apreciar la diferencia que existe entre la sección transversal del modo TEM<sub>00</sub> empleado extensamente, y del modo denominado TEM<sub>10</sub> (ver también figura 7), así como la marca de sus haces. Es evidente que la distribución transversal de la energía del haz del modo TEM<sub>00</sub>, es más eficiente para cortar, ya que la distribución de potencia es más fragmentada en el modo TEM<sub>10</sub>.

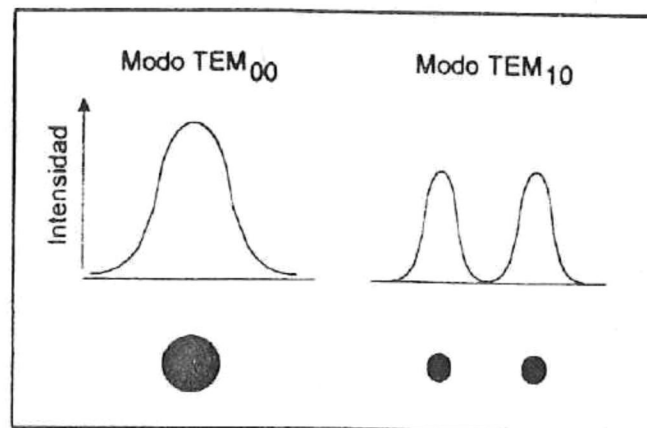


Figura 5 Perfiles de modos transversales TEM<sub>00</sub> y TEM<sub>01</sub>. Los puntos representan sus marcas como se verían en una pantalla

## 2.2 Importancia de visualizar el perfil.

La visualización del perfil se realiza durante las fases de diseño y fabricación de los láseres o continuamente durante su operación, para aumentar la eficiencia, mejorar los diseños y para proporcionar una investigación más precisa y confiable.

Por ejemplo, en aplicaciones industriales, se requiere observar el perfil, para eliminar los errores producidos en cortes o perforaciones, cuando la calidad del haz del láser se degrada (Pierde su estado TEM<sub>00</sub> y pasa a cualquier otro estado). En el caso de aplicaciones científicas, los láseres son expuestos

continuamente al límite de su capacidad de operación y el monitoreo continuo de la luz que emiten es necesario para asegurar que funcionen adecuadamente.

### 2.3 *Causas y consecuencias del deterioro del perfil*

Muchos factores contribuyen a la inestabilidad y deficiencia del perfil. Estos factores incluyen pero no están limitados al deterioro de componentes, vibraciones e impactos, suciedad o despostillamiento en los componentes ópticos, mala alineación y degradación del medio de amplificación (contaminación del gas).

Algunas fuentes de inestabilidad pueden provocar el cambio del haz a una operación multimodo o provocar su dispersión, afectando su concentración, colimación y propagación por el espacio.

Por ejemplo, un láser de CO<sub>2</sub> con doble pico en su perfil como el de la figura 7, puede causar diferentes anchos de corte, perforar con diámetros diferentes a los esperados o realizar soldaduras poco resistentes.

### 2.4 *Técnicas tradicionales de visualización*

Existen tres técnicas de visualización tradicionales (no-electrónicas) que son usadas desde que se inventó el láser, para obtener el perfil.

La primera de estas técnicas consiste en observar el haz reflejado en un muro o pantalla, cuando es el caso de láseres visibles. Para el caso de los láseres infrarojos como los de CO<sub>2</sub><sup>6</sup>, son usados varios tipos de tarjetas fluorescentes que hacen visible el haz al ojo humano. Esta técnica se usa principalmente para

---

<sup>6</sup> CO, NdYag y vapor de agua.

localizar y verificar la existencia del haz, sin cuantificar o distinguir niveles de intensidad ó potencia.

La segunda técnica consiste en marcar el haz (quemar) en papel térmico, como se muestra en la figura 6. Esta técnica tiene las desventajas de marcar incorrectamente el ancho del perfil, proporcionar pocos niveles de intensidad (quemado, casi quemado y no quemado), además de perforar rápidamente el papel. Esta técnica se usa principalmente para localizar el haz, ya que la luz IR no es visible al ojo humano.



Figura 6 Marcas en papel térmico, del perfil de un láser de CO<sub>2</sub>. Las marcas son similares a las que se representaron en la figura 5.

La técnica que proporciona una mejor representación visual del perfil, consiste en quemar material plástico (acrílico). En éste, el perfil se marca en 3D como se muestra en la figura 7. La formación del perfil dentro del acrílico no ocurre en tiempo real, por lo que es inadecuado para alinear láseres, tampoco pueden observarse las fluctuaciones que puedan producirse debido a posibles cambios en los parámetros del láser. Por último debe tomarse en consideración la toxicidad del humo liberado por el acrílico al estar marcando el perfil.

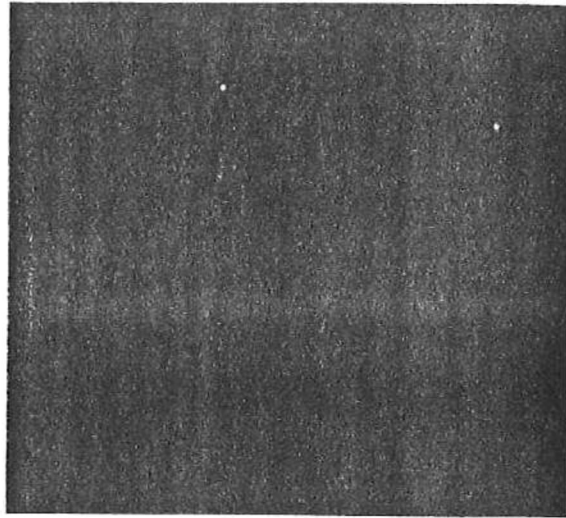


Figura 7 Formación en acrílico del perfil de un láser de CO<sub>2</sub>. La penetración del haz en el acrílico nos da una representación tridimensional.

## 2.5 Técnicas electrónicas de visualización

La visualización del perfil con técnicas electrónicas se logra con los aparatos llamados perfilómetros. La base funcional de estos aparatos, se divide en tres etapas fundamentales, la detección, la técnica de atenuación y la visualización.

### 2.5.1 Detección.

La detección consiste en la obtención de muestras de intensidad en distintas posiciones del perfil, para su posterior procesamiento y despliegue. Puede realizarse con uno o varios detectores. Usar un elemento detector tiene la ventaja económica, pero la visualización del perfil es relativamente lenta. Los arreglos de varios elementos tienen la ventaja de formar la imagen del perfil de una manera más rápida, pero su precio se incrementa. Los arreglos de detectores pueden ser en serie, paralelo y matricial. En el capítulo siguiente se mostrarán las características de los diferentes detectores de infrarrojo, con el fin de realizar una elección y aplicarla al proyecto.

## 2.5.2 Técnicas de atenuación.

Es importante que la energía del haz, tenga un cierto porcentaje de atenuación antes de llegar al detector, para protegerlo de algún daño. La selección del porcentaje de atenuación depende de dos factores, la energía del haz y la sensibilidad del detector. Algunas técnicas de atenuación son las siguientes.

**La atenuación óptica**, como se muestra en la figura 8, consiste generalmente en colocar en la trayectoria del haz, una ventana con un cierto ángulo (de Brewster), de tal manera que la mayor parte de la energía del haz pase a través de la ventana, y la parte restante se refleje hacia el detector con una atenuación considerable (para mayores detalles ver referencia [1]). Existe la opción de colocar filtros en la trayectoria del haz reflejado para especificar alguna longitud de onda en particular. Como ya se mencionó se pueden utilizar uno o varios elementos detectores para recolectar la energía, por ejemplo los arreglos matriciales tipo CCD para el visible.

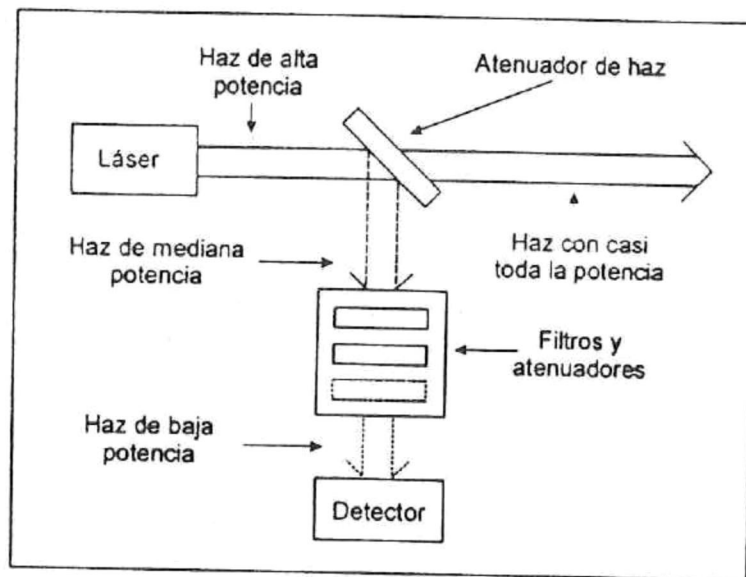


Figura 8 Esquema que muestra la técnica óptica de atenuación.

La **atenuación mecánica**, consiste en impedir la llegada del haz hacia el detector, durante un cierto período de tiempo, para reducir la potencia promedio recibida por éste. Por ejemplo, la técnica de atenuación que se observa en la figura 9 (ver referencia [1]), consiste en un tambor giratorio con una pequeña abertura por el que pasa un pulso energético de luz de corta duración. El resto del tiempo el haz es reflejado o absorbido por el tambor, reduciéndose considerablemente la potencia que colecta el detector. La abertura puede ser transversal, para colocar un elemento detector con capacidad de movimiento, o la colocación de un arreglo en serie o paralelo de elementos detectores. La principal desventaja de esta técnica es la limitación en el número de ejes que se pueden observar.

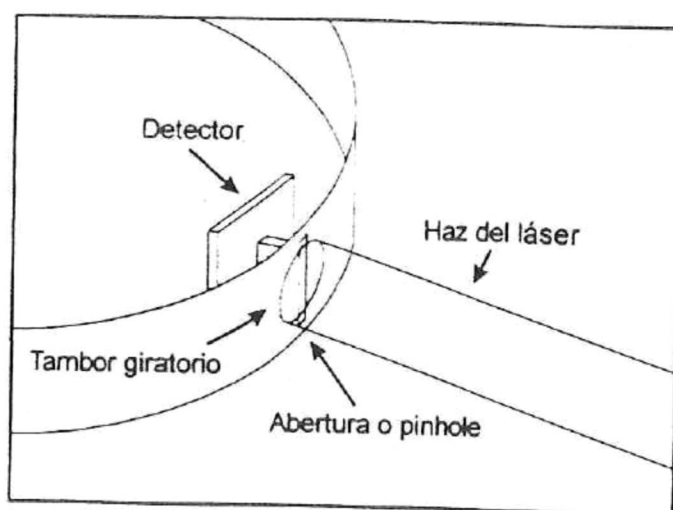


Figura 9 Una técnica mecánica de atenuación. La abertura pasa por el área activa del detector de manera periódica.

### 2.5.3 Visualización.

La visualización, consiste en desplegar en un monitor las muestras de intensidad del perfil, obtenidas en la etapa de acondicionamiento y detección. Los perfilómetros comerciales emplean generalmente el monitor de una computadora para observar la imagen. En el caso del perfilómetro diseñado en

esta tesis, se utiliza un osciloscopio digital para poder observarlo en 2D<sup>7</sup>.

Existe una gran cantidad de combinaciones posibles de técnicas de atenuación, elementos detectores y de formas de visualización, dando como resultado una enorme flexibilidad para diseñar perfilómetros.

## 2.6 Mediciones realizadas con perfilómetros

La ventaja más importante de usar perfilómetros radica en la capacidad de ver con gran detalle las características del perfil<sup>8</sup>. En el caso de los láseres de CO<sub>2</sub> probablemente las dos mediciones más importantes son el ancho y la potencia o energía total de su haz, ya que están relacionadas directamente con la operación del láser. Es importante mencionar que la medición de potencia se realiza con un medidor de potencia independiente, y calibrado al mismo tiempo con la detección del perfil.

Algunas mediciones que se pueden realizar con los perfilómetros son:

- a) potencia o energía relativa
- b) potencia o energía máxima
- c) ancho del haz en la dirección de xy
- d) divergencia
- e) repetitividad (una medición estática)
- f) forma gaussiana
- g) etc.

---

<sup>7</sup> Ya que los analógicos no pueden retener el trazo de la señal a muy bajas frecuencias.

<sup>8</sup> La medición de las características del perfil están normalizadas por el estándar ISO 11146:1999 (ISO 4D07).

### 3. DETECTORES DE INFRARROJO (DIR)

La radiación infrarroja (IR) se localiza entre los  $0.75\mu\text{m}$  y  $1000\mu\text{m}$  de longitud de onda del espectro electromagnético, es decir en el intervalo entre la luz visible y las microondas. Esta radiación es emitida por todos los cuerpos con una temperatura por encima de cero absoluto ( $0^\circ\text{K}$ ). Tiene una transmisión máxima en la atmósfera en dos bandas de su espectro, que van de  $3\mu\text{m}$  a  $5\mu\text{m}$  y de  $8\mu\text{m}$  a  $13\mu\text{m}$ . Para la detección de radiación IR se utilizan dos tipos de DIR, los térmicos y los cuánticos.

#### 3.1 Características de los DIR

Los detectores térmicos tienen una reacción eléctrica a los cambios de temperatura ocasionados por la absorción de radiación IR. Pueden operar a temperatura ambiente y su detectividad es baja e independiente de  $\lambda$ . Los detectores térmicos son clasificados en termopares, termistores, neumáticos y piroeléctricos.

Por otra parte, los detectores cuánticos tienen una alta detectividad dependiente de  $\lambda$  y normalmente requieren de enfriamiento para ser utilizados. Los detectores cuánticos son clasificados en intrínsecos y extrínsecos

En la Figura 10 pueden ser observadas las características de diferentes detectores, de ahí se puede seleccionar alguno que cumpla los requerimientos del diseñador. Las características que se pueden observar son: los límites de  $\lambda$ , temperatura de operación y detectividad (en esta última, si su magnitud es grande se requerirá menos amplificación de la señal del detector). El detector cuántico Ge ( $77^\circ\text{K}$ ) tiene la mayor detectividad, con  $10^{14} \text{ D} \cdot \lambda$ , pero su ancho de banda se encuentra fuera del intervalo requerido. Otro detector cuántico, el HgCdTe ( $77^\circ\text{K}$ ) tiene una detectividad de  $10^{10} \text{ D} \cdot \lambda$ , y su ancho de banda

incluye las  $\lambda$  requeridas, pero necesita enfriamiento para su operación. Eliminando los detectores que operan fuera del ancho de banda requerido y que necesitan enfriamiento, se tienen solamente tres opciones; las termocoplas, los termistores y los piroeléctricos, todos estos operan en el ancho de banda requerido, funcionan a temperatura ambiente y su detectividad es independiente de  $\lambda$ . El detector seleccionado para el presente trabajo es el detector piroeléctrico ya que cumple con los requisitos y se adquirió para realizar el diseño. Su detectividad es mayor al de los termistores y menor al de las termocoplas pero esta diferencia se compensa con un amplificador de señal.

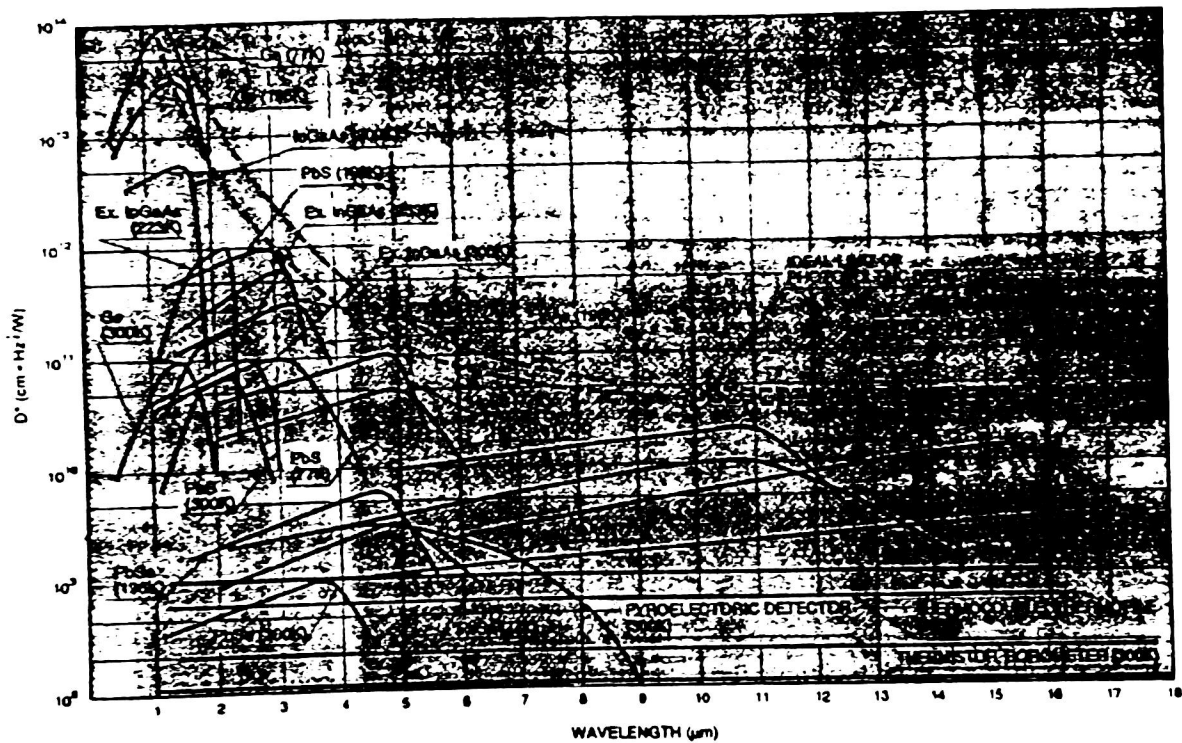


Figura 10 Detectividad vs. longitud de onda de los detectores de infrarrojo (ver referencia [5]).

### 3.2 Detectores piroeléctricos

En esta sección se hace un análisis general de estos elementos. Para posteriormente pasar al diseño y pruebas del acondicionamiento de su señal.

#### 3.2.1 Parámetros importantes

Los detectores piroeléctricos son utilizados en aplicaciones donde se requiere alta sensibilidad, buen tiempo de respuesta ( $\sim 10^{-9}$  s), operación a temperatura ambiente y un amplio ancho de banda. Para seleccionar un intervalo de  $\lambda$  de interés, se usa una ventana o filtro en la entrada del dispositivo. Hay distintos materiales con los que son construidas estas ventanas, como por ejemplo la construida con silicio que se muestra en la figura 11a, que limita la  $\lambda$  entre 1 y  $30\mu\text{m}$ , o la denominada filtro pasa banda  $4.4\mu\text{m}$  mostrada en la figura 11b, que limita la  $\lambda$  entre 4 y  $5\mu\text{m}$  aproximadamente. En el mercado estos detectores pueden obtenerse con distintas configuraciones y parámetros, fabricados básicamente con cualquiera de estos tres materiales: Tantalato de Litio ( $\text{LiTaO}_3$ ), Titano Zirconato de Plomo (PZT), y Sulfato Triglicínico Deuterado (DTGS). Para mayores detalles ver referencias [5 y 6].

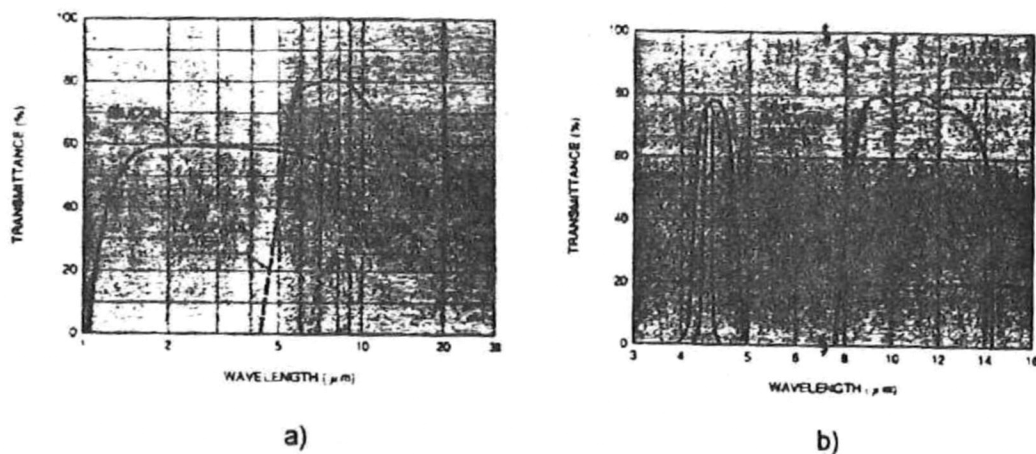


Figura 11 Intervalo espectral de las ventanas o filtros de entrada para detectores IR (ver referencia [5])

### 3.2.2 Teoría de operación piroeléctrica

La estructura básica de estos detectores, consiste en una pastilla de material piroeléctrico, en medio de dos electrodos. La reacción eléctrica producida en el material por la incidencia de radiación IR se conoce como efecto piroeléctrico y es descrito esquemáticamente en la figura 12. Inicialmente el material tiene una carga neutra. Al incidir la radiación IR sobre el dispositivo, esta es absorbida y la temperatura del material se incrementa, resultando en un cambio de polarización. La carga acumulada provee una señal de salida entre los electrodos proporcional a la intensidad de la radiación que llega sobre este ( $V \propto I$ ). El detector tiene una respuesta lineal (ver referencias [5-6]). Después de esta polarización el material vuelve a su estado inicial y permanece ahí hasta que la radiación (luz IR) se retira. Cuando la radiación IR no llega al detector, el material sufre una polarización inversa a la obtenida inicialmente, para posteriormente volver a su estado inicial, listo para repetir el ciclo. Esta despolarización del material se puede lograr obstruyendo el paso de la radiación IR con el uso de obturadores ópticos (Choppers), que consisten básicamente en un disco perforado en su circunferencia, el cual gira a una frecuencia determinada, cortando el paso del haz en forma periódica.

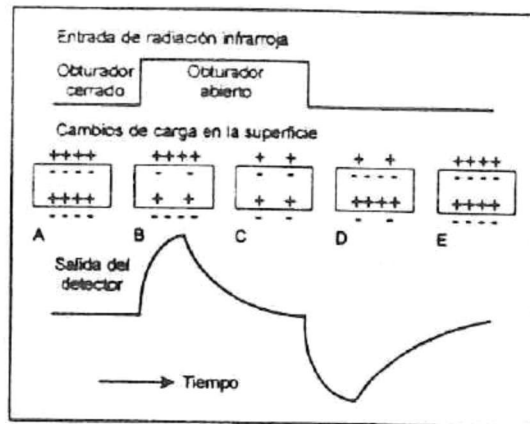


Figura 12 Efecto piroeléctrico. La radiación llega al detector cuando el obturador está en posición abierta, ocasionando cambios de carga en la superficie del detector (ver referencia [5]).

#### 4. DISEÑO DE LOS PERFILÓMETROS

Inicialmente se construyó un perfilómetro para bajas potencias ópticas preestableciendo en cierta forma el procesamiento del haz para el perfilómetro descrito en el título. Este diseño se hizo así para probar y conocer el comportamiento del detector, así como para probar el circuito de acondicionamiento de su señal. En estas pruebas fue utilizado un láser de CO<sub>2</sub> de baja potencia (5W aproximadamente). Posteriormente se diseñó y construyó el sistema mecánico para el perfilómetro de alta potencia. Este tuvo varios problemas mecánicos por lo que no se pudo utilizar. Se tiene la posibilidad de usar un láser de CO<sub>2</sub> con potencia de hasta 200W. Este láser es excitado por RF y dado que no se usó el diseño encapsulado (cajón) del perfilómetro, se observó mucho ruido en la señal. Por lo cual se optó por usar el láser de baja potencia con el perfilómetro de prueba y obtener los resultados reportados en este trabajo. El circuito de acondicionamiento tiene la misma base funcional en ambos perfilómetros y solo se deben hacer pequeñas modificaciones en sus componentes para utilizarlo en cualquiera de ellos.

A continuación se describirá el funcionamiento y las partes de ambos perfilómetros. Iniciaremos con el perfilómetro de potencia.

#### 4.1 Perfilómetro para alta potencia

El haz del láser que entra al perfilómetro, figura 13, es desviado hacia el detector mediante un espejo al que denominamos espejo giratorio. Este se encuentra sobre un brazo mecánico que gira por medio de un motor de CD. El haz cruza por el detector en un corto período de tiempo, el tiempo que el espejo pasa frente al haz y al detector. Con esto se logra que el detector sólo reciba la potencia promedio del láser y se generen los pulsos necesarios para que se polarice el detector piroeléctrico. El detector es desplazado por un sistema denominado de barrido vertical para lograr que el detector tome muestras del perfil en diferentes posiciones y sean acondicionadas para verlas en el osciloscopio.

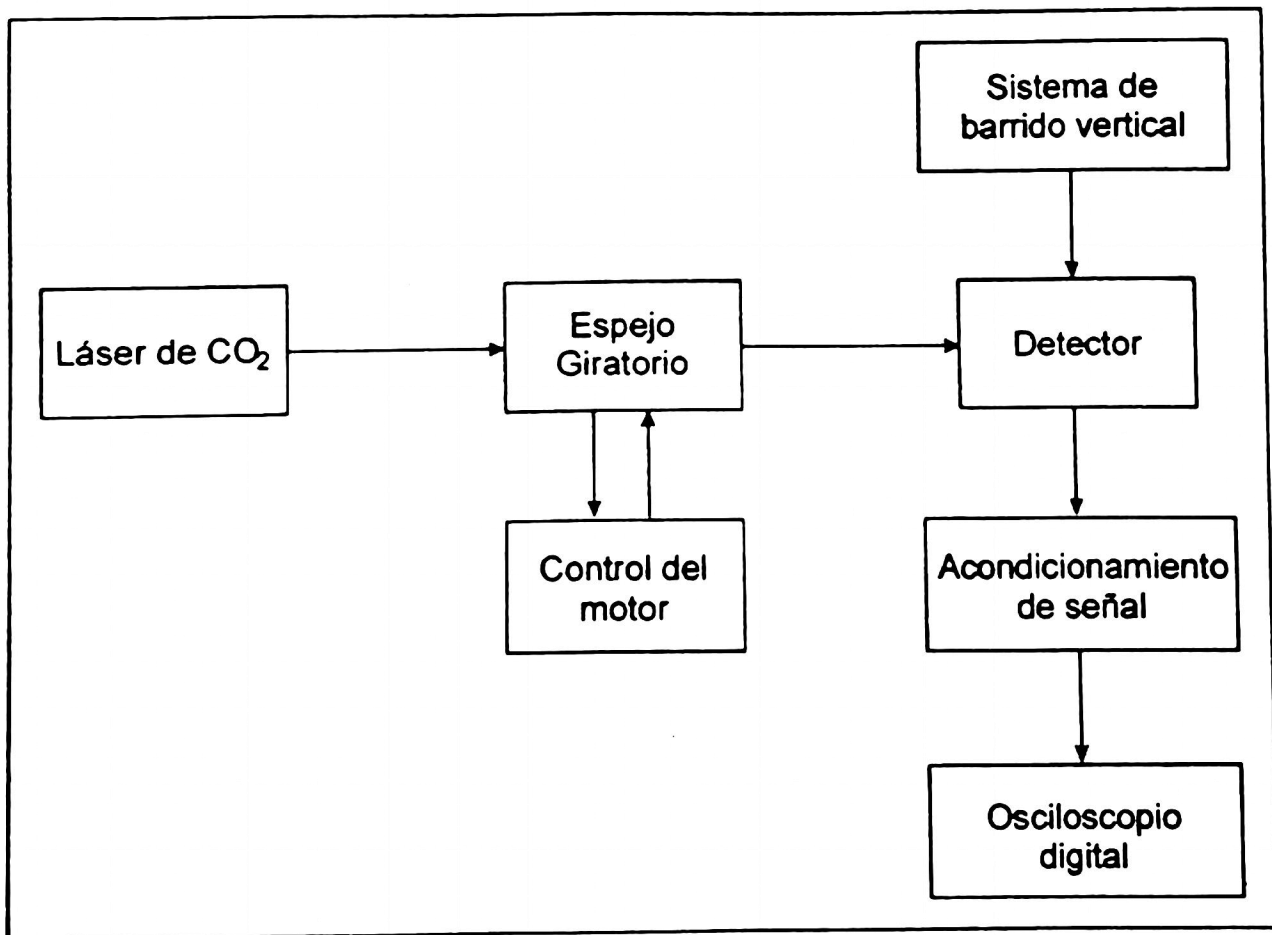


Figura 13 Diagrama a bloques del perfilómetro.

El perfilómetro fue construido casi en su totalidad en aluminio anodizado para evitar reflexiones del haz. En la figura 14 pueden verse algunas características del contenedor de los sistemas de acondicionamiento (que será descrito mas adelante), de barrido vertical y del espejo giratorio. Sus dimensiones son de 12X8X6 pulgadas.

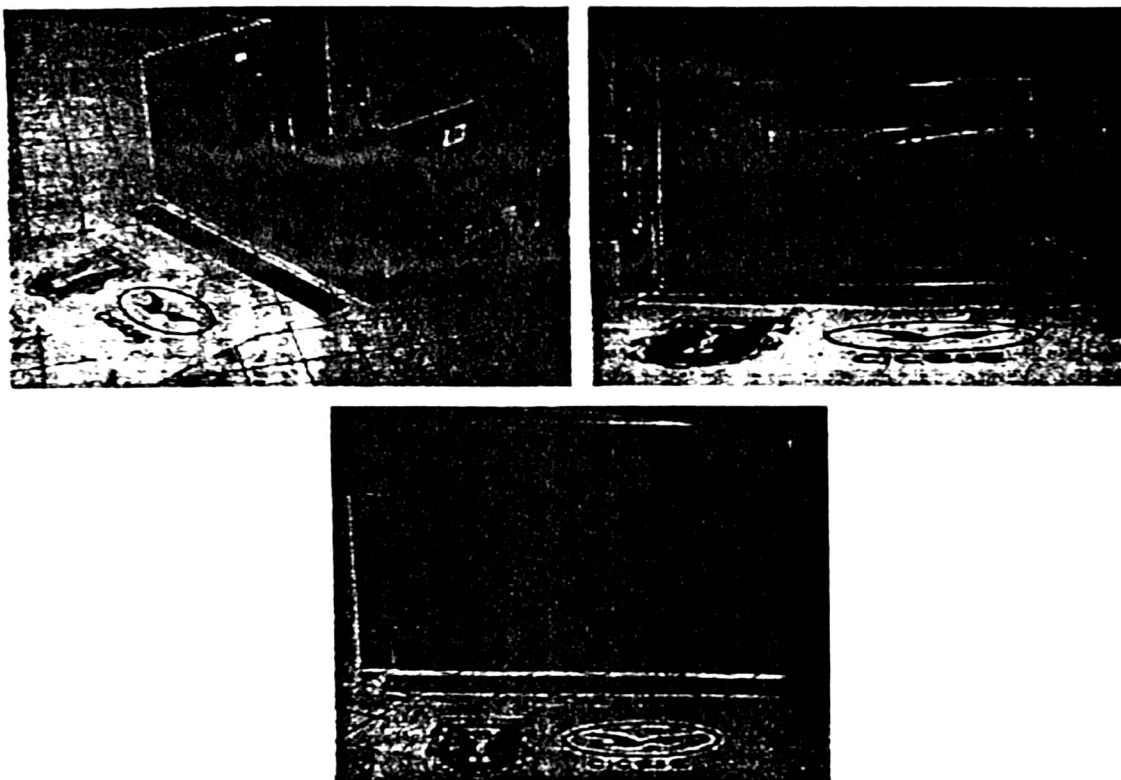


Figura 14 Graficas que muestran el perfilómetro construido para altas potencias. Los esquemáticos se muestran en el apéndice B

El espejo utilizado es de metal pulido ya que el metal refleja más de 99% de la radiación IR. La base del espejo giratorio (figura 15) tiene un cierto ángulo de inclinación, para desviar el haz hacia el detector (que se encuentra en frente de el) y no interrumpir la trayectoria del haz cuando el espejo esté en otra posición.

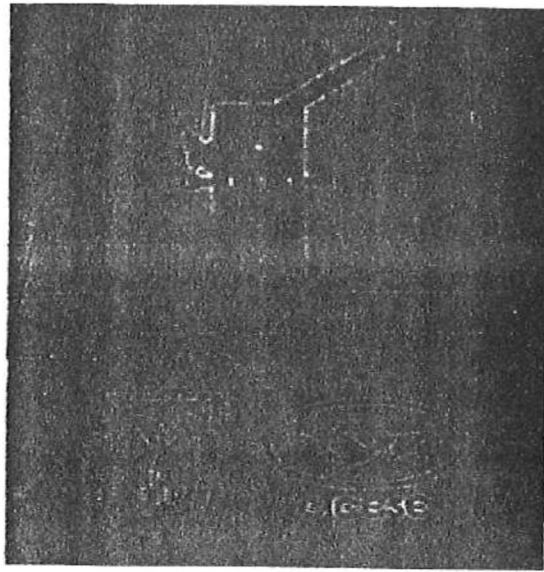


Figura 15 Espejo giratorio del perfilómetro que se ve en la figura 14.

El sistema de barrido vertical se muestra en la figura 16. Este mueve la posición del detector para que tome muestras de intensidad del perfil a diferentes alturas. Consiste de un motor a pasos dotado con un tornillo, que eleva o baja al detector que se encuentra colocado en un brazo roscado guiado por rieles. El tornillo tiene rosca de 20 hilos por pulgada lo que da una buena resolución ( $6.25 \mu\text{m}/\text{paso}$ ) en el movimiento del detector para medir el ancho del haz.

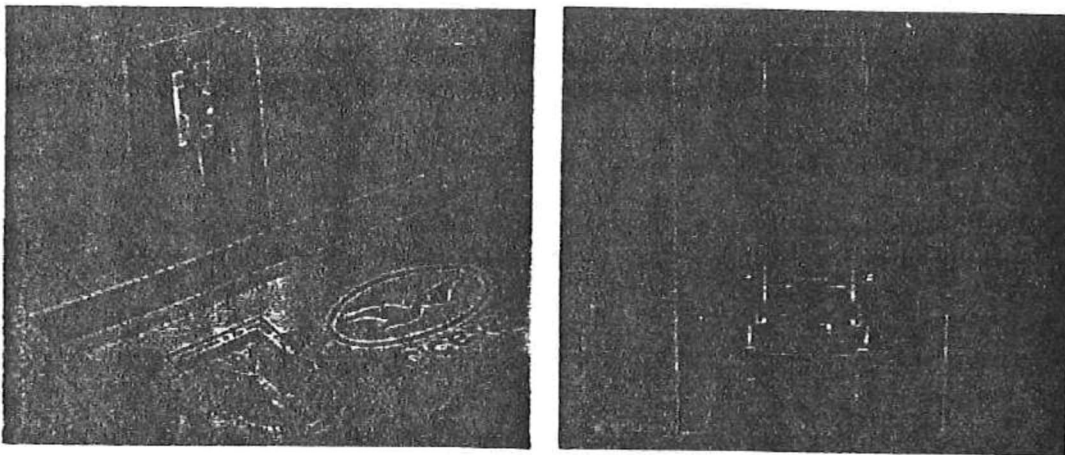


Figura 16 Sistema de barrido vertical. Este sistema sostiene y traslada verticalmente al detector.

La pared frontal tiene una abertura por donde entra el haz (figura 17), y cuenta con una serie de canales que disiparán y atraparán reflexiones no deseadas del haz de alta potencia.

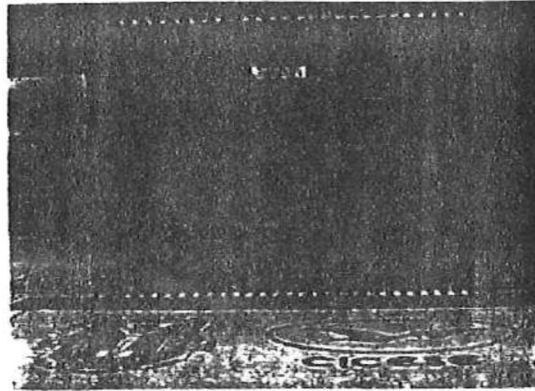


Figura 17 Pared frontal del contenedor. La abertura es por donde ingresa el haz al perfilómetro. El resto de la superficie frontal actuara como disipador de calor.

La parte posterior que se muestra en la figura 18, cuenta con una abertura en la parte superior por donde saldrá el haz cuando el espejo giratorio no este desviándolo y dos aberturas en la parte inferior para adaptar en las etapas de mejoramiento las conexiones de la fuente de alimentación y de algunos puertos para comunicar el aparato a un osciloscopio o a una computadora.

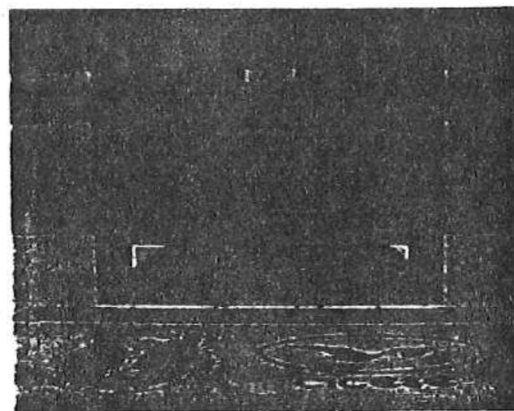


Figura 18 Pared posterior del contenedor.

## 4.2 Perfilómetro para probar los sistemas

El experimento que se realizó para obtener los resultados descritos en el capítulo 6 de este trabajo se muestra en la figura 19. El experimento consiste en lo siguiente: La trayectoria del haz del láser es interrumpida por medio de un obturador mecánico, este produce un haz pulsado para polarizar al detector piroeléctrico y atenúa la potencia a un 50%. El haz pulsado es desviado hacia el detector mediante un galvo (o espejo que gira sobre un eje) para obtener diferentes muestras de intensidad. La conjunción de estas dos partes: galvo y obturador, producen un efecto similar al que se presentaría con el espejo giratorio y el sistema de barrido vertical del perfilómetro para alta potencia. La diferencia entre estos consiste en que el porcentaje de atenuación producida por el obturador es del 50% mientras que con el espejo giratorio se obtiene una atenuación de alrededor del 95%. Con este último se tiene la capacidad de manejar altas potencias. El circuito de acondicionamiento se encarga de preparar la señal obtenida por el detector, para ser vista posteriormente en el osciloscopio digital. Al frente del detector puede ser colocado un orificio (pinhole) para aumentar la resolución espacial del detector.

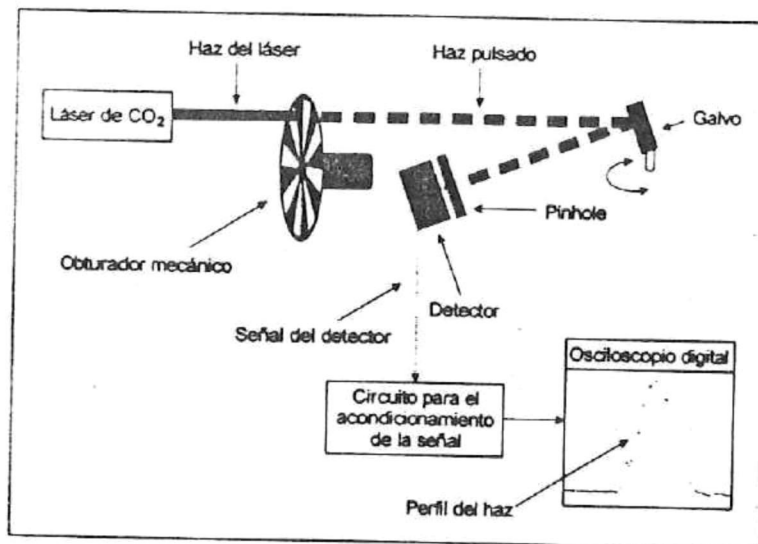


Figura 19 Descripción del experimento realizado con el perfilador de prueba.

La figura 20 muestra el experimento realizado y las partes que lo conforman.

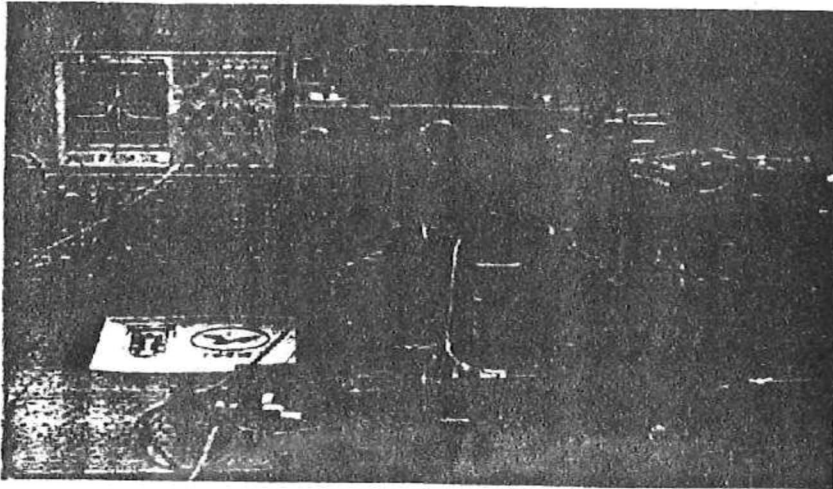


Figura 20 Perfilómetro de pruebas. Vista parcial de la mesa de trabajo en el laboratorio con los componentes del perfilómetro.

La frecuencia de obturación usada fue de 35 Hz. debido a que el disco estaba desbalanceado, introduciendo a la señal del detector frecuencias erróneas al intentar aumentar la frecuencia de obturación. El obturador que se usó es de Stanford Research Systems modelo SR540 (ver figura 21).

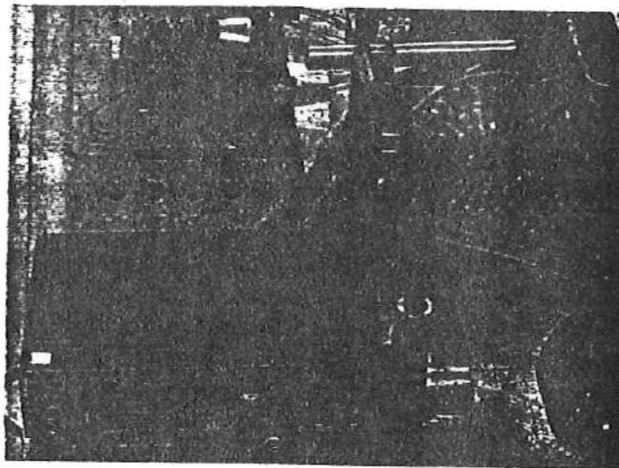


Figura 21 Obturador mecánico (Chopper).

El galvo utilizado para el experimento consiste en una montura xy que se encuentra arriba a la derecha de la figura 22. Para producir el movimiento angular del espejo, se utiliza un tornillo que desplaza la esquina inferior hacia adelante y hacia atrás, dependiendo de la dirección del motor a pasos, mientras que la otra esquina sirve como pivote. El motor es controlado con el circuito que se encuentra en la parte inferior central de la figura 22. Dado que el motor se encuentra fijo y el tornillo se desplaza en la dirección del eje del motor, se diseñó una pieza mecánica que une estas dos partes (motor y tornillo)<sup>9</sup>.

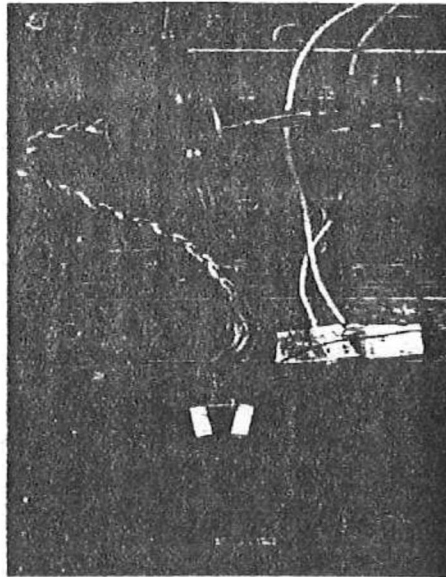


Figura 22 Fotografía que muestra el galvo (motor acoplado al espejo).  
La tarjeta abajo al centro controla al motor.

El detector seleccionado para los experimentos es el modelo 450-3 de la compañía EDO Corp. La serie 450 esta diseñada primordialmente para el monitoreo y detección de radiación láser de alta energía en el estudio del haz. El detector está fabricado de  $\text{LiTaO}_3$  que es un material cerámico capaz de soportar un alto impacto térmico y no tienen ventana por lo que detecta en todo el espectro infrarrojo. El diagrama eléctrico del detector se muestra en la figura 23a y su fotografía en la figura 23b. Sus parámetros son los siguientes:

---

<sup>9</sup> El esquema mecánico de esta pieza puede ser observado en el apéndice B.

Tamaño del elemento	3 x 3 mm <sup>2</sup>
Encapsulado	TO-5
Respuesta eléctrica	0.5 mA/W
Capacitancia	15 pF
Resistencia de carga	50 Ω
Máxima potencia	200 W/cm <sup>2</sup>
Tiempo de respuesta	2 ns
Temperatura de operación	-40 °C a +80 °C

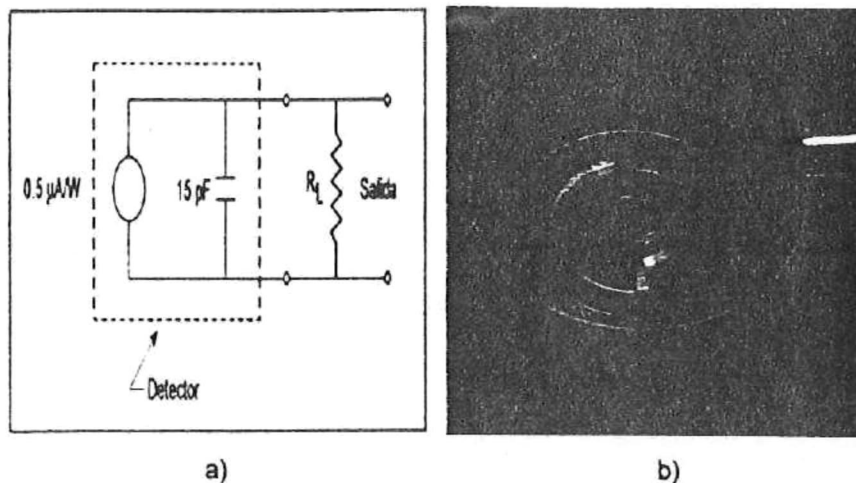


Figura 23 a) Diagrama eléctrico del detector piroeléctrico y b) Detector piroeléctrico utilizado.

El sistema de acondicionamiento es el núcleo de todo el aparato, ya que éste procesa la información para que podamos ver el perfil en el osciloscopio. En la figura 24 se observa el diagrama a bloques que describe el funcionamiento del sistema. Se recibe la señal del detector (A), para ser amplificada posteriormente (B). Debido a que la señal alterna obtenida del sensor, son pulsos con diferente magnitud, la señal es demodulada como una señal de AM para obtener la forma

del perfil (C). Finalmente se filtra y elimina de la señal las oscilaciones generadas por el demodulador. Estas señales serán mostradas más adelante.

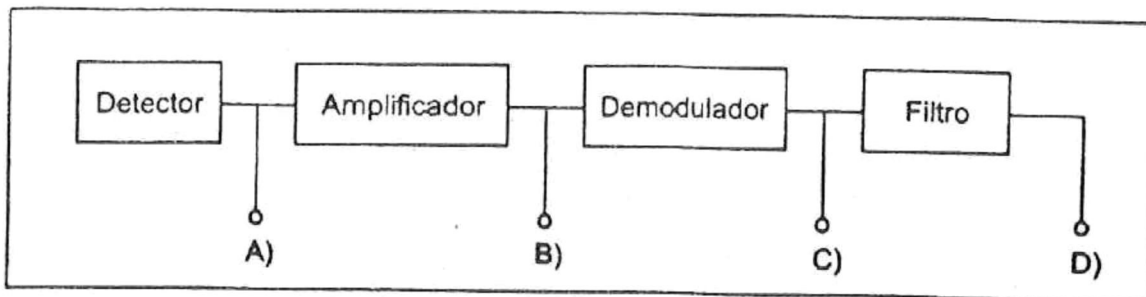


Figura 24 Diagrama a bloques del circuito de acondicionamiento.

El diseño del circuito de acondicionamiento es muy sencillo y de fácil construcción como se muestra en la figura 25. Es alimentado por una fuente de  $\pm 15\text{ V}$  y requiere de pocos componentes electrónicos. El circuito tiene la misma base funcional en ambos perfilómetros y solo se deben hacer pequeñas modificaciones en sus componentes para utilizarlo en cualquiera de ellos.

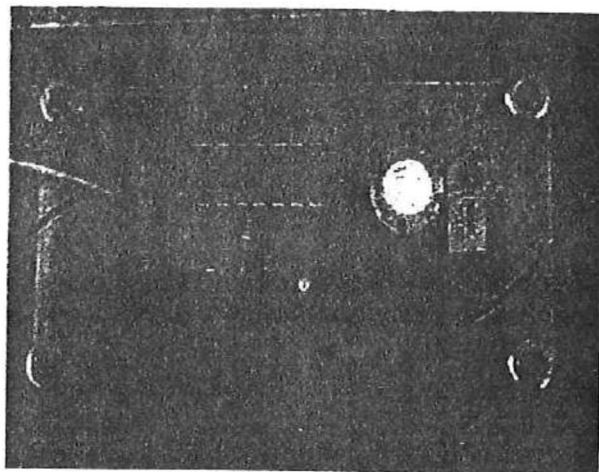


Figura 25 Circuito para el acondicionamiento de la señal de salida del detector.

Después de la etapa de acondicionamiento, el perfil puede ser observado en cualquier osciloscopio digital ya que los analógicos no retienen el trazo de la señal en la pantalla. El osciloscopio mostrado en la figura 26 es un HP 54601B de 100 MHz. La escala vertical se encuentra a 1 V/Div. y la escala horizontal a 1 S/Div.

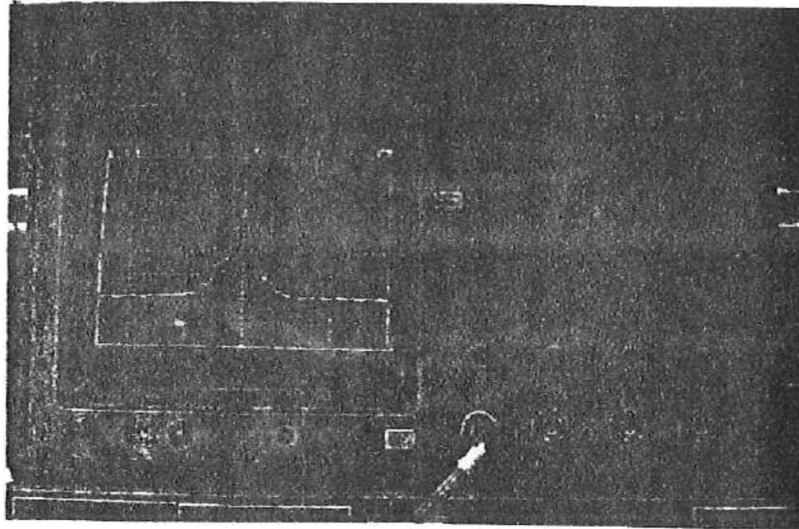


Figura 26 Forma del perfil captado por un osciloscopio digital.

## 5. RESULTADOS

Este capítulo se divide en cinco secciones. La primer sección explica la metodología experimental que se siguió para realizar todas las mediciones, la segunda sección se presentan las pruebas realizadas para la calibración de los sistemas del perfilómetro de baja potencia y las tres restantes pertenecen a los conjuntos de muestras correspondientes a los perfiles que se tomaron del láser, en diferentes condiciones de operación.

### 5.1 Metodología experimental

En secciones subsecuentes se presentaran las mediciones sistemáticas realizadas para obtener los perfiles del haz láser para diferentes condiciones de funcionamiento del láser. El láser que se usa en todos los experimentos es un láser construido en el laboratorio (referencia [25]) Este láser consta de un medio de amplificación en forma de guía de onda y funciona con un flujo lento de gas mezclado ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{N}_2$  y He). Para realizar mediciones sistemáticas procedimos en primer plano a determinar el intervalo de tiempo para el cual nuestro láser no presentaba fluctuaciones en su potencia. El gas que se hace fluir por el láser esta contenido en un tanque de bajo volumen a 55 PSI, que se agota en un tiempo de alrededor de 10 minutos. Es deseable tener un tanque de gas premezclado a presiones de 2500 PSI con el fin de tener un intervalo muy grade de tiempo para el cual el láser funcione sin cambios. En todas nuestras mediciones nos limitamos a tomar los datos del perfilómetro en periodos de 5 a 6 minutos para asegurar que todas las mediciones sean reproducibles y confiables, estableciendo para ello el intervalo de error, o error experimental.

En cada intervalo de tiempo para medir, se procedió a fijar los parámetros de operación del láser. Estos fueron: El premezclado de gases se realizo con una relación 1:1:3 para el  $\text{CO}_2$ , el  $\text{N}_2$ , y el He respectivamente a una presión de 55 PSI. Con el uso de dos válvulas de precisión (de aguja), se ajusto el flujo de gas

a una pérdida de presión de ~5 PSI/min. La ionización del medio de amplificación se lleva a cabo estableciendo un alto voltaje entre los electrodos del láser. La potencia eléctrica suministrada al láser se fija a 5KV @ 10 mA. Con este procedimiento para el láser, nos aseguramos de que la intensidad (ó potencia) del haz de salida fuera constante en cada intervalo de tiempo que fue fijado para realizar las mediciones de los perfiles.

Para establecer el error experimental en las mediciones, se colectaron al menos cinco perfiles en un intervalo de tiempo. Una vez colectados los perfiles, el error se calculo al aplicar la raíz cuadrada de la variancia para m-datos en n-perfiles (quinientos datos por perfil en cinco perfiles), es decir (ver referencia[23]):

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (3)$$

donde el  $\bar{x} = \sum_i x_i / n$  es el promedio aritmético.

Con esto, el error experimental en nuestras mediciones fue calculado menor al 6%.

## 5.2 Muestras de calibración

Primeramente se mantiene el galvo fijo en la posición donde se detecta la máxima energía del haz. Se busca cual es la frecuencia máxima de obturación que proporciona la señal de energía más estable al detector. Debido a que el disco del obturador esta desbalanceado y este desbalance induce una señal modulante a la señal que recibe el detector. Por ejemplo en la figura 27 se tiene una frecuencia de obturación de 500 Hz. y el desbalanceo produce una señal modulada en amplitud de 57 Hz.

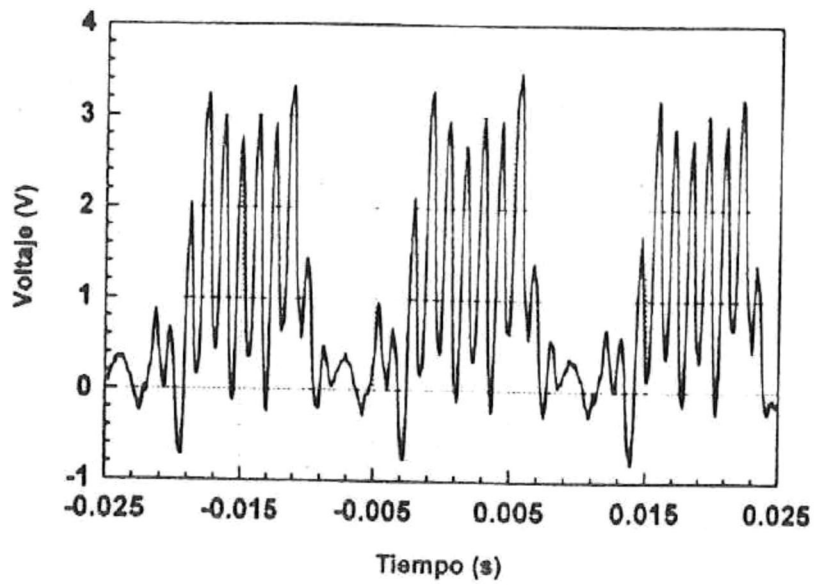


Figura 27 Frecuencia de obturación: 500 Hz., "moduladora": 57 Hz.

Después de variar la frecuencia de obturación en un intervalo de 4KHz a 1Hz se encontró que la frecuencia que permanece más estable fue de 35Hz como se muestra en la figura 28.

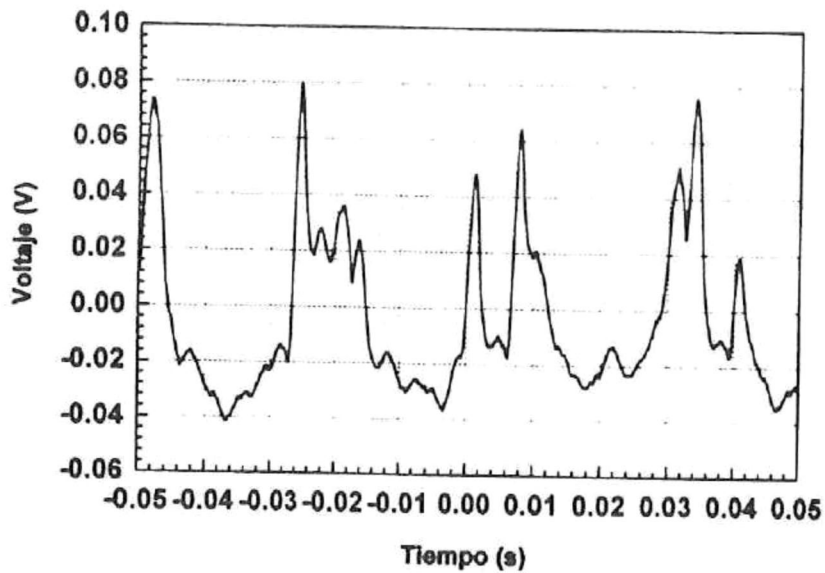


Figura 28 Frecuencia de obturación 35Hz.

Posteriormente cuando se fija la frecuencia de obturación a 35 Hz se procede a mover el galvo para ver la variación de voltaje a la salida del detector. La gráfica de la figura 29 se obtuvo cuando el láser estaba a su máxima potencia y se puede ver, claramente la polarización del detector con diferentes niveles de intensidad así como las polarizaciones inversas generadas al obturar el haz.

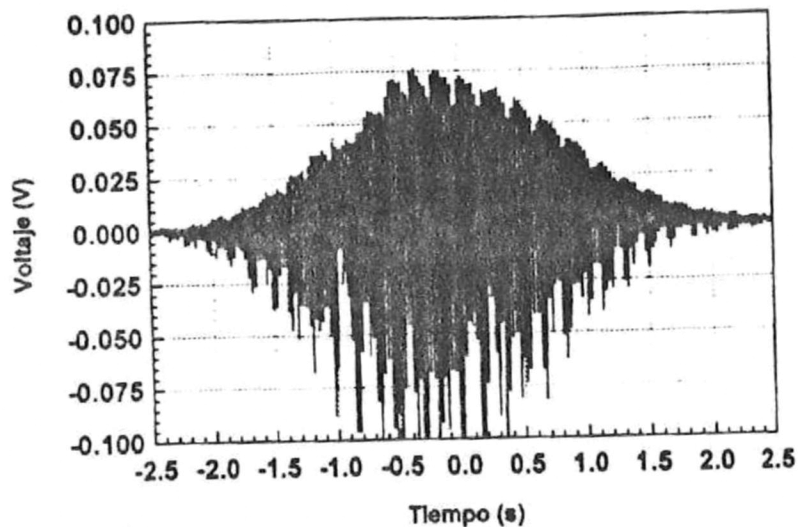


Figura 29 Gráfica de intensidad (ó potencia) del láser a la salida del detector (punto de prueba A del diagrama de bloques: figura 24).

Al obtener la señal deseada del detector. Se inicia la verificación de las distintas etapas del sistema de acondicionamiento (figura 24), con el fin de calibrar y verificar que estas funcionen adecuadamente.

Las señales que a continuación se presentan fueron tomadas de la primer serie de datos en las diversas etapas del sistema de acondicionamiento. En la figura 30 se muestra la señal adquirida a la salida del detector (punto de prueba A del diagrama de bloques: figura 24). Esta se ve con mucho ruido, debido a que la potencia que está recibiendo el detector es muy baja, por lo que su relación señal a ruido también es baja, comparada con la señal de la figura 29. Sin embargo aún se puede ver algo de la forma del perfil.

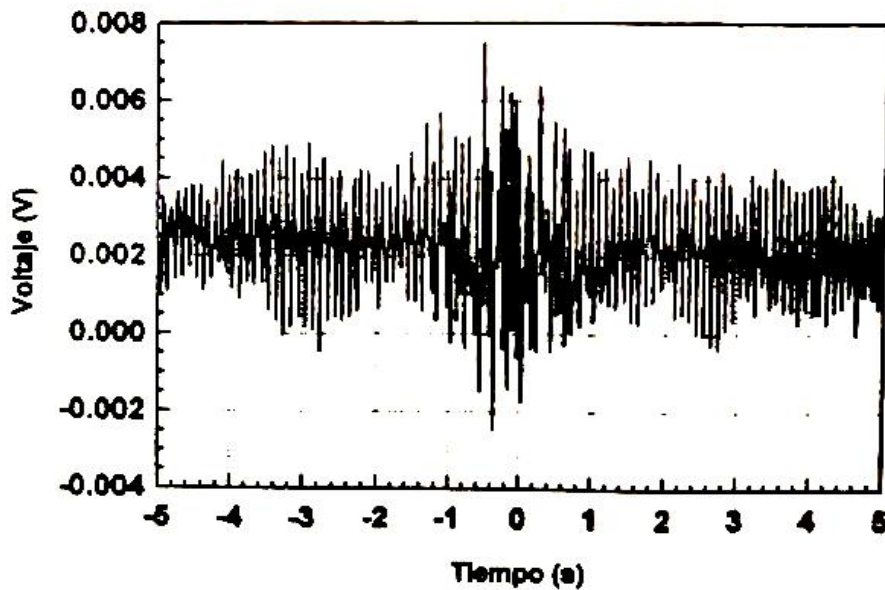


Figura 30 Señal de salida del detector (punto de prueba A del diagrama de bloques: figura 24).

La ganancia aproximada de la etapa de amplificación es de 700 (figura 31). Siendo la frecuencia de obturación de 35 Hz. este grado de ganancia puede ser fácilmente manejado por el dispositivo amplificador (punto de prueba B del diagrama de bloques: figura 24).

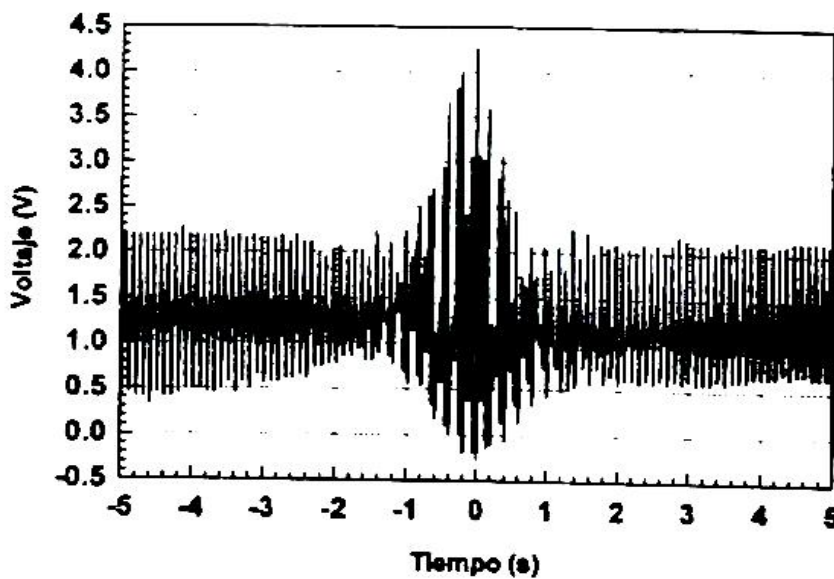


Figura 31 Señal de salida del amplificador (punto de prueba B del diagrama de bloques: figura 24).

En la etapa de demodulación de la señal (punto de prueba C del diagrama de bloques: figura 24), como se dijo anteriormente, se obtiene la envolvente con diversos picos, figura 32 que posteriormente son eliminados con el filtro de la etapa final.

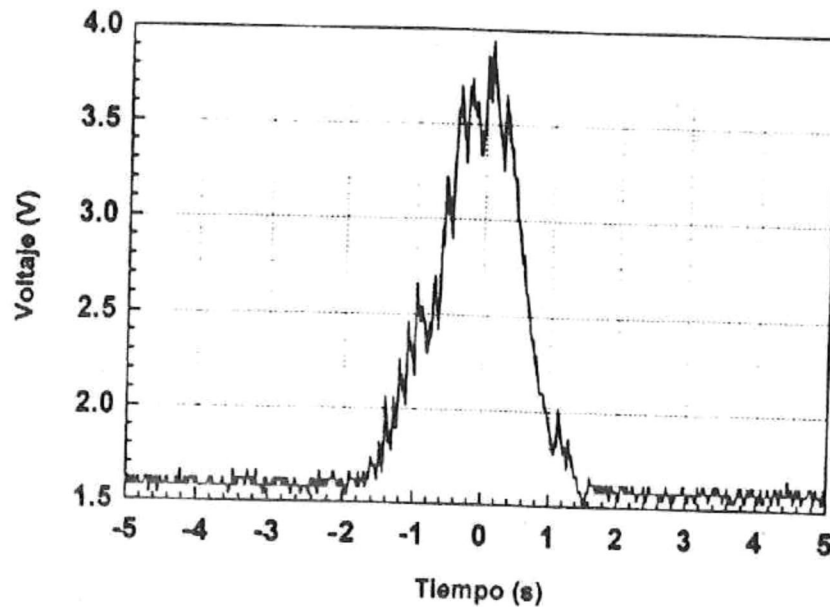


Figura 32 Señal de salida del demodulador<sup>10</sup> (punto de prueba C del diagrama de bloques: figura 24).

La interpretación del perfil observado en el osciloscopio tiene que ser como se muestra en la figura 33. El valor en la escala de voltaje del osciloscopio representa la intensidad relativa del haz en unidades arbitrarias. Mientras que la escala del tiempo representa el diámetro del perfil. Donde cada s/div equivale a ~1 mm. Y la distancia radial se mide del centro del perfil hasta el 13.5 % de la intensidad relativa ( $I_{0e^{-2}} = 0.135I_0$ , ver referencia [24]).

<sup>10</sup> Aquí empieza a observarse la forma del perfil del láser aún sin filtrar.

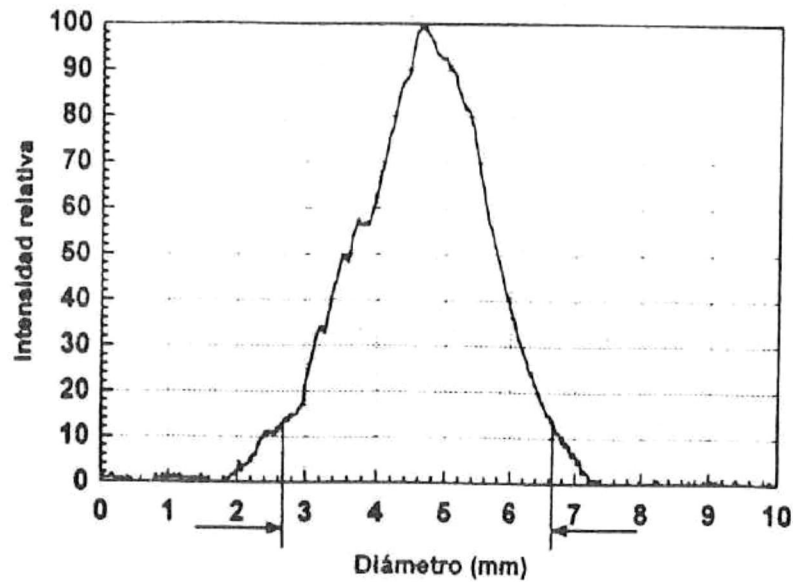


Figura 33 Interpretación del perfil en la pantalla del osciloscopio. El diámetro del perfil se mide en el punto donde la intensidad cae a un valor de  $10e^{-2}$ .

### 5.3 Primer conjunto de muestras

Los perfiles aquí presentados fueron obtenidos de manera continua y sistemática. El láser podía permanecer estable alrededor de 10 minutos, tiempo en el que pudieron realizar las mediciones. El primer conjunto de datos del perfil del láser, se tomaron en condiciones donde el flujo del gas era lento, dando como resultado una disminución en la potencia del haz. En la figura 34, se presenta la señal corresponde al perfil promedio del conjunto de perfiles obtenidos.

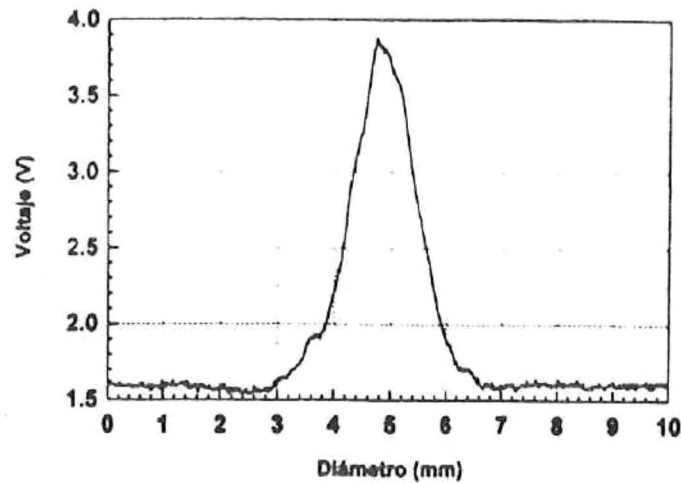
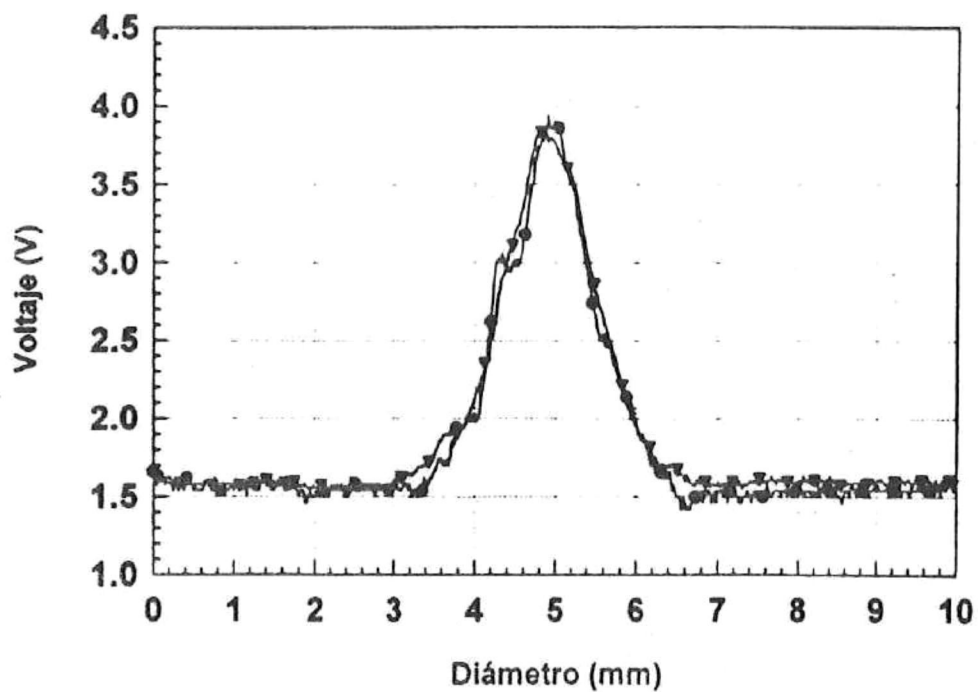


Figura 34 Perfil promedio obtenido del primer conjunto de perfiles.

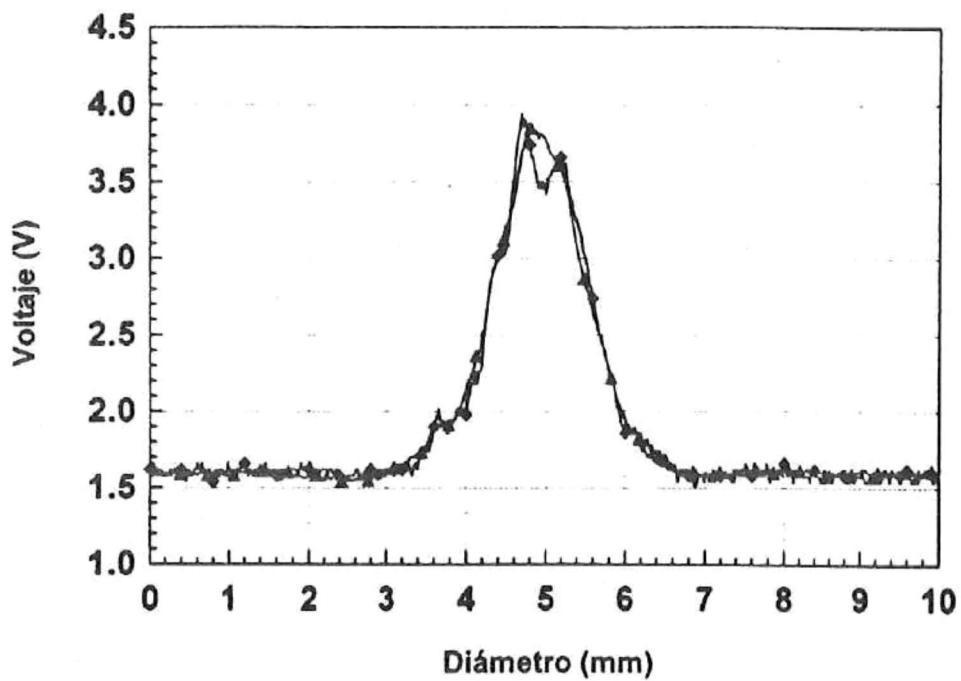
En la figura 35 a y b se pueden observar las comparaciones del perfil promedio con uno de su misma clase (ó conjunto de muestras) para ver su repetitividad. El perfil promedio esta representado por la curva con triángulos y los perfiles del conjunto de muestras están representados por la curvas con círculos y rombos. Controlando el flujo del gas en el láser su pudo obtener un perfil relativamente estable, como se puede apreciar en la figura 35. La intensidad relativa y el ancho del perfil solo presentan variaciones menores al 6% por fluctuaciones del haz.

#### 5.4 Segundo conjunto de muestras

El segundo conjunto de muestras fueron tomadas en condiciones donde se disminuye el flujo de gas en el láser, teniendo como consecuencia una disminución gradual de la potencia del haz. La disminución del flujo de gas se observa con un medidor de presión de la siguiente manera. El tanque de gas se llena a 55 PSI, el cual proporciona un flujo estable durante ~10 minutos dando una medición de presión estable. Una disminución en la presión del tanque indicará una disminución en el flujo de gas. La señal que se muestra en la figura 36 corresponde al perfil con mayor intensidad del conjunto de muestras obtenidas.



a)



b)

Figura 35 Representación gráfica del perfil promedio (triángulos) y un perfil del conjunto de muestras (círculos y rombos) en a y b respectivamente.

En este caso ya no se realizaron estadísticas ya que nuestro arreglo es estable y el error experimental ya se determinó. El objetivo aquí es ver como cambian los perfiles al variar los parámetros del láser; como por ejemplo el flujo de gas, potencia eléctrica y/o alineación del resonador óptico.

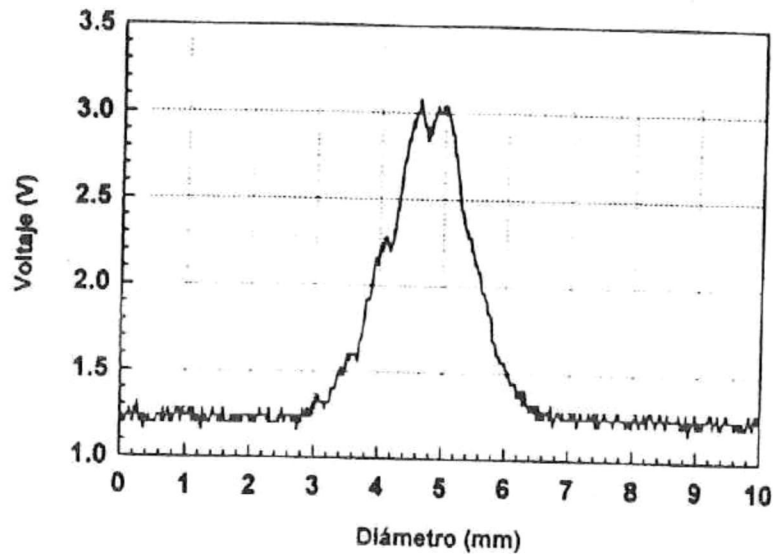
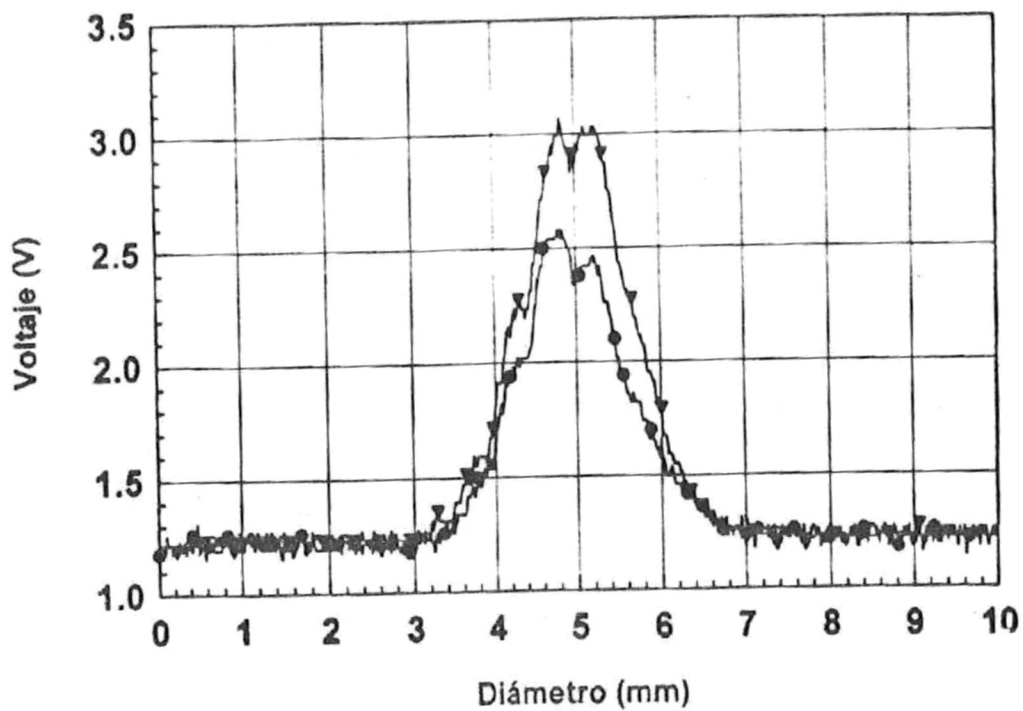
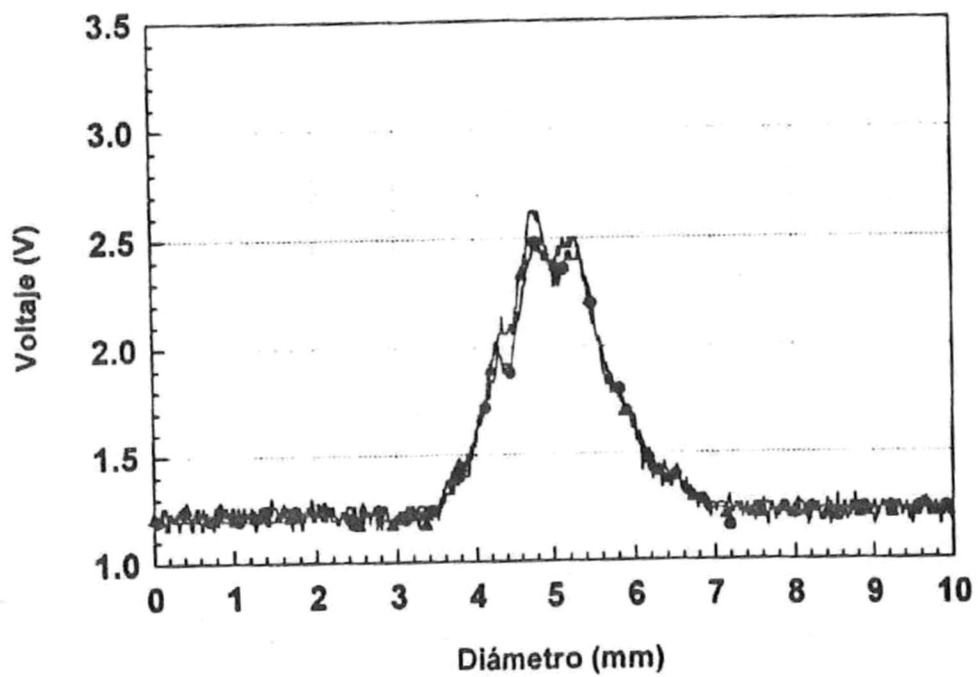


Figura 36 Perfil obtenido para el segundo conjunto de muestras (láser ligeramente desalineado: ver las dos crestas en la parte superior de la gráfica).

En la figura 37 a y b se observan distintos perfiles mostrando el cambio que sufren al ir disminuyendo gradualmente la potencia en el láser. Como se puede observar el perfil sufre mínimas variaciones en su forma mientras que, como se tenía previsto, la intensidad relativa fue disminuyendo gradualmente. Hay que hacer notar que el perfil de un láser nos da información de tres parámetros del haz; la intensidad (ó potencia) que se despliega en el eje vertical en unidades de voltaje, el diámetro del haz láser  $W_0$  que se mide en el punto  $I_{0e^{-2}}$  (ver figura 33) y la forma del perfil que depende de la alineación de los espejos del resonador. Este último parámetro, la forma, está directamente relacionado a los modos transversales de propagación  $TEM_{mn}$  (ver punto 2.1).



a)



b)

Figura 37 a) Perfiles obtenidos para diferentes potencias del láser y b) perfiles obtenidos al mover ligeramente un espejo del resonador para la misma potencia del laser.

De la figura 37b podemos apreciar que el perfilómetro tiene una alta sensibilidad a cambios locales en el perfil debido a variaciones (ó alineación) en el resonador del láser. Aquí se observa un cambio en la forma del perfil alrededor del 10 % o menor.

### 5.5 Tercer conjunto de muestras

El tercer conjunto de muestras se tomaron al mantener el láser en condiciones óptimas de operación. Es decir la máxima potencia que se pudo obtener del láser ~5W (ver referencia [25]). En este punto del experimento se cometió el error de bajar la ganancia de la etapa de amplificación, en lugar de aumentar la escala del osciloscopio, la ganancia con que se midió el perfil era de aproximadamente 100. Para proponer una ganancia adecuada para el amplificador se necesita tener un láser que tenga una potencia continua para que sirva como referencia. De las dos ganancias mencionadas, la de 750 nos proporciona un perfil de un láser de baja potencia sin mucha distorsión lo que la hace la mejor ganancia, y para el caso de potencias mayores solo se tendría que cambiar la escala del osciloscopio. La figura 38 corresponde al perfil con el láser a su máxima potencia. Esta gráfica del perfil del láser es la que resulta de todo el proceso de acondicionamiento de la señal que sale del detector ver figura 29.

Una vez ajustado el láser a su máxima potencia se utilizó un bloque de acrílico para marcar el perfil en su interior (ver figura 39) y compararlo con el observado en el osciloscopio (figura 38). Con esta prueba validamos lo obtenido con el perfilómetro.

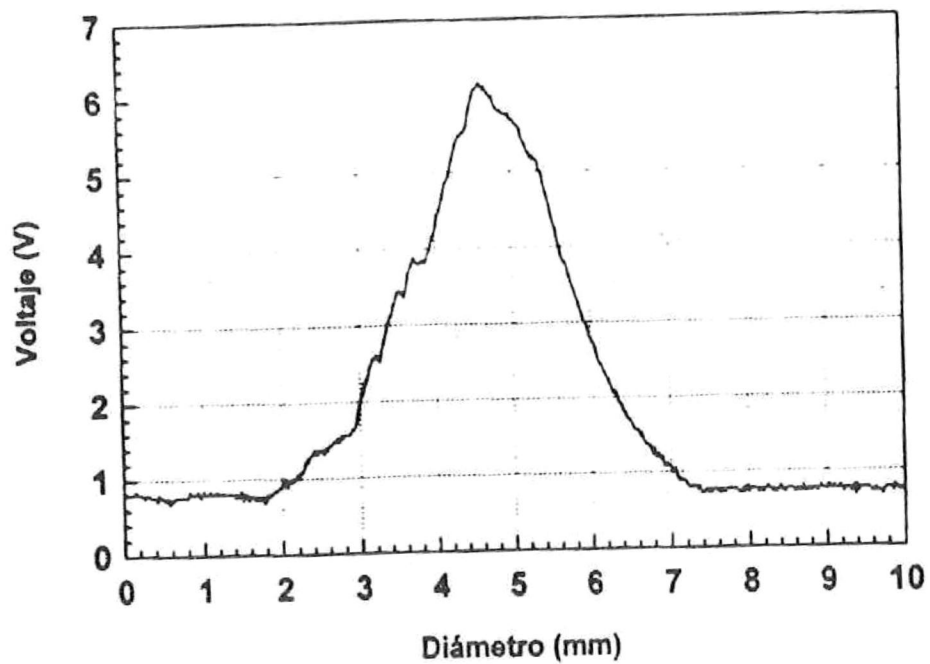


Figura 38 Perfil máximo obtenido del tercer conjunto de muestras.

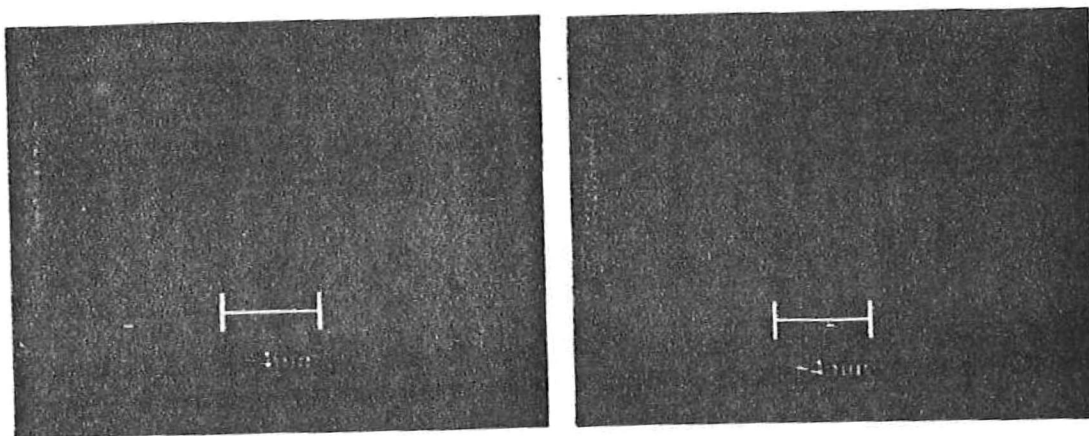


Figura 39 Muestras del perfil del láser marcadas en acrílico.

Por último se colocó una pieza delgada de cerámica para que obstruyera el haz y poder ver el efecto en el perfil, este efecto puede ser observado en la figura 40, de donde se pueden ver diferentes picos de intensidad debido al efecto de difracción de la luz al introducir la pieza cerámica en el camino del haz láser.

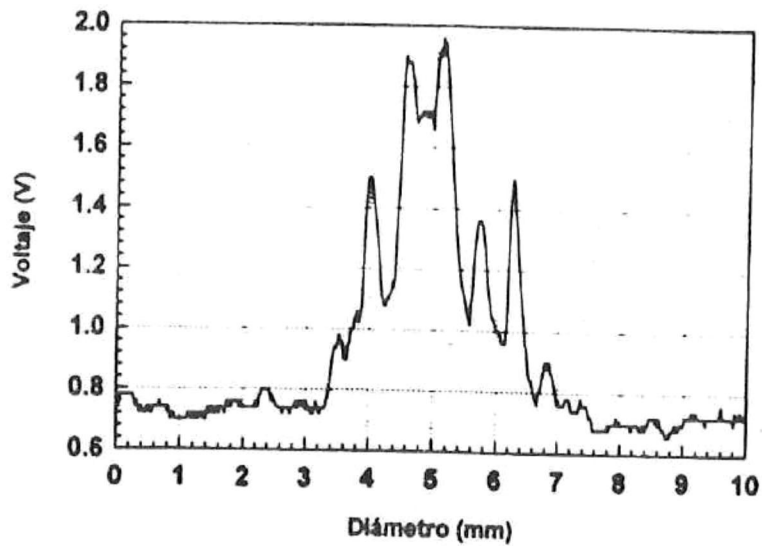


Figura 40 Perfil distorsionado por obstrucción colocada en el camino del haz láser.

Comparando la gráfica de la figura 38 con la gráfica de la figura 40 se observa una dramática atenuación en la intensidad del haz (ver figura 41) así como la presencia de varios picos ocasionados por la difracción de la luz que ocasionó el objeto al ponerlo en la trayectoria del haz.

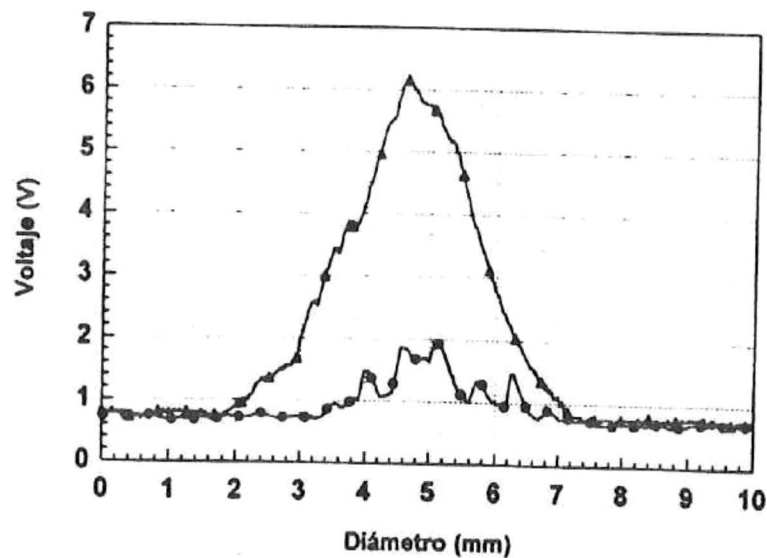


Figura 41 Comparación del perfil con la máxima potencia y el distorsionado.

## 6. CONCLUSIONES

Asta este punto, se puede decir que el objetivo de la tesis se cumplió exitosamente.

Los resultados fueron obtenidos de una manera sistemática, por lo que todas las gráficas presentan formas similares y solo varían en su ancho e intensidad.

Aunque el diseño del perfilómetro con espejo giratorio no se realizó, se han podido establecer y caracterizar en su mayoría, todos y cada uno de los parámetros de diseño para un perfilómetro óptico. El diseño basado en un espejo tipo galvo, es equivalente al diseño basado en el espejo giratorio, por lo que se puede concluir que se llegó en su totalidad a la meta trazada para este trabajo de tesis.

El diseño mecánico presentó problemas de ensamble por lo que a lo largo de todo el trabajo se uso una mesa óptica y monturas adecuadas a la mesa. Esto nos permite proponer que se continúe con este trabajo para perfeccionar dos puntos: 1) El sistema mecánico y 2) Mejorar el perfilómetro para coleccionar datos de manera automática con la ayuda de una computadora, en la modalidad 3D. Del primer punto, se tendrá la ventaja de que el perfilómetro podrá ser usado para medir la calidad del haz que provenga de un láser con potencias hasta de 200W excitado por RF y función pulsada. Una vez encapsulado en una caja el perfilómetro, evitará la interferencia electromagnética que emana del generador de RF usado en el láser, y del segundo punto, se tendrá la ventaja de poder visualizar imágenes 3D directamente en el monitor de una computadora. Cabe mencionar que existe una gran cantidad de combinaciones posibles entre las técnicas de atenuación, elementos detectores y las formas de visualización, de las que, en trabajo posterior, propondremos la mas adecuada que nos de la mejor flexibilidad de desempeño del perfilómetro.

Un valor agregado al presente trabajo de tesis radica en el interés de la compañía SPIRICON, Ltd. para el desarrollo comercial del perfilómetro. En el futuro, estaremos en la posibilidad de proponer la comercialización del perfilómetro a través de esta empresa transnacional.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] Current Technology of laser beam profile measurements. 1999. Logan, Utah: Spiricon, Inc.
- [2] What is the value of beam Diagnostic?. 1995. Logan, Utah: Spiricon, Inc.
- [3] Why do I need laser beam diagnostics?. 1995. Logan, Utah: Spiricon, Inc.
- [4] Improving laser accuracy using laser beam diagnostics. 1995. Logan, Utah: Spiricon, Inc.
- [5] Infrared detectors. 1997. Bridgewater, NJ. Hamamatsu Corp.
- [6] Infrared detectors. 1998. Shelton, CT. EDO Corp. Barnes engineering division.
- [7] Infrared detectors. 1989. London. Philips components Ltd.
- [8] National operational Amplifiers databook. 1995. USA. National semiconductor.
- [9] Roundy, C.B. & Kirkham, K. 1996. Laser beam quality characterization. Presented at CLEO LEAP. Anaheim, Ca. Spiricon, Inc.
- [10] Roundy, C.B. Diciembre 1993. Laser beam diagnostic: Technologies and performance. Laser & Optronics. Pag. 1-5.
- [11] Roundy, C.B. Abril 1996. Practical applications of laser beam profiling. Laser & Optronics. Pag. 21-22.

- [12] Roundy, C.B. Mayo 1996. Electronic beam diagnostics evaluate laser performance. *Laser Focus World*. Pag. 119–125.
- [13] Roundy, C.B. Agosto 1996. Applying beam profiling to industrial lasers. *Laser applications in metal working*. Pag. 5–6.
- [14] Melendina, P. Diciembre 1998. Infrared components: Advanced IR detectors expand designer's palette. *Electronic products*. Pag. 35-37.
- [15] Aboites, V. J. 1987. Cómo funciona: El láser. *Información científica y tecnológica*. Pag. 47-50.
- [16] Wolf, S. 1980. Guía para mediciones electrónicas y prácticas de laboratorio. México D.F. Prentice-Hall.
- [17] Coherent, E.E. 1985. Láseres operación, equipo, uso y diseño. México D.F. Limusa.
- [18] Belove, C. 1995. Enciclopedia de la electrónica, ingeniería y técnica. México D.F. Oceano.
- [19] Christiansen, D.G. 1997. *Electronics engineer's handbook*. New York. McGraw-Hill.
- [20] Williams, A.B., Taylor F.J. 1995. *Electronic filter design handbook*. New York. McGraw-Hill.
- [21] Maloney, T.J. 1997. *Electrónica industrial moderna*. México D.F. Prentice-Hall.

- [22] Hayt, W.H., Kemmerly J.E. 1993. Análisis de circuitos en ingeniería. México D.F. McGraw-Hill.
- [23] Miller, I., Freud, J. 1965. Probability and statistics for engineers. Pag 117-119. Prentice Hall.
- [24] Forrest, M. 1985. Engineer's mini-notebook: Op Amp IC circuits. Fort Worth, Texas. Radio Shack.
- [25] Ramirez, F. 1999. Diseño y construcción de un láser guía de onda de CO<sub>2</sub>. Ensenada B.C. UABC.
- [26] Rodriguez R.M., 1989. Eficiencia de los parámetros de construcción de un láser de CO<sub>2</sub> polarizado de mediana potencia. Ensenada B.C. CICESE.
- [27] Daniels, F., Alberty, R.A. 1958. Physical Chemistry. USA. Willey & Som, Inc.

## APÉNDICE A

### ¿CÓMO FUNCIONA EL LÁSER?

(Obtenido de la referencia [15])

La palabra LÁSER es el acrónimo de la expresión inglesa: "Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation" que, en el español puede traducirse como "amplificación de luz por radiación producida por emisión estimulada". Como en seguida veremos, esta expresión aparentemente criptográfica de hecho contiene ideas bastante simples.

Como es sabido, toda la materia que nos rodea está compuesta de átomos que pueden pensarse como pequeñísimos sistemas (del orden de  $10^{-10}$  metros) a su vez compuestos de un núcleo alrededor del cual giran electrones. Esto en forma similar a como los planetas giran alrededor del sol.

Uno de los descubrimientos más importantes para el desarrollo de la física moderna fue que un electrón no puede encontrarse en cualquier órbita alrededor del núcleo, sino solamente en determinadas órbitas. La órbita más cercana posible al núcleo es también aquella en la cual un electrón posee la menor energía. Por otro lado, mientras mayor sea la órbita a la que se encuentre el electrón, mayor será la energía que éste posee. Estos fenómenos son fundamentales para comprender la interacción entre la luz y la materia, que es la clave para comprender un láser.

#### *A.1 Estructura básica de la luz*

Supongamos una situación como la mostrada en la figura 42, en la que inicialmente tenemos un átomo con un electrón en una órbita intermedia cualquiera, y poco tiempo después tenemos al mismo átomo pero ahora con su electrón girando en una órbita más pequeña que la inicial.

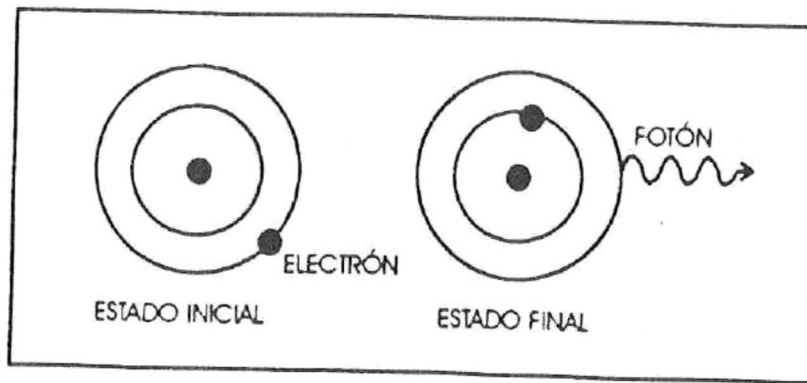


Figura 42 Emisión.

Por lo dicho en el párrafo anterior, sabemos que la energía del electrón en su estado inicial es mayor que la energía del mismo en su estado final debido a que la órbita inicial es mayor que la órbita final.

Dado que la energía total en el estado inicial y final debe ser la misma, la diferencia de energía del electrón entre esos dos estados es emitida en forma de un pequeño "paquete" de energía que llamamos "fotón".

De hecho, a la percepción de una enorme cantidad de estos "paquetes energéticos" es a la que llamamos luz; es decir, la estructura básica de la luz (como la de cualquier onda electromagnética) es el fotón. El proceso anterior es llamado emisión y se muestra gráficamente en la figura 42.

También puede ocurrir un proceso inverso al anterior. En este caso, como se muestra en la figura 43, tenemos inicialmente un átomo con un electrón en una órbita interior sobre el cual se hace incidir un fotón. El resultado de esto es que el átomo "absorbe" al fotón y utiliza la energía de este para pasar al electrón de su órbita inicial a una mayor. Cuando esto ocurre decimos que el átomo pasa a un "estado excitado". A este proceso se le llama absorción y se muestra gráficamente en la figura 43.

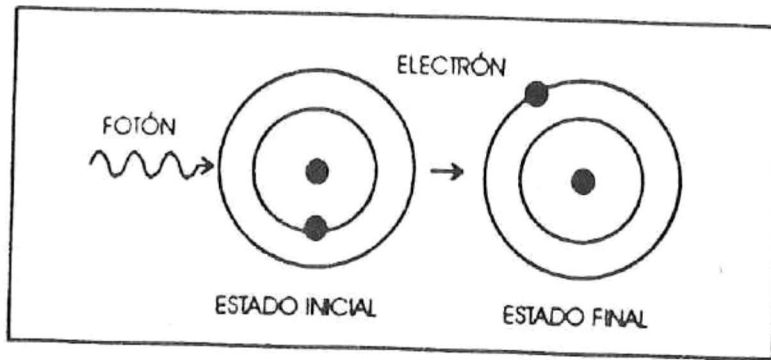


Figura 43 Absorción.

Supongamos ahora que observamos el comportamiento de varios átomos que inicialmente se encuentran en un estado excitado. Cada uno de estos átomos, después de un tiempo dado y en forma independiente uno del otro, empezará a emitir un fotón. En cada caso, cada fotón emitido no solamente es igual a los otros sino que también es emitido en diferentes direcciones. Cuando esto sucede decimos que ocurre emisión espontánea. Este fenómeno se muestra esquemáticamente en la figura 44.

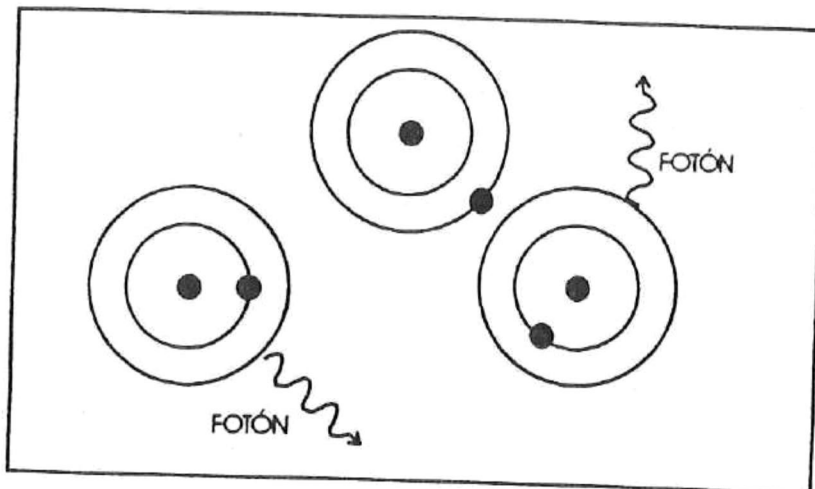


Figura 44 Emisión espontánea.

Podemos ahora preguntarnos qué es lo que ocurre cuando hacemos incidir un fotón a un átomo previamente excitado. Es decir, queremos saber que ocurre cuando con un fotón estimulamos a un átomo cuyo electrón ya se encuentra en un estado excitado. En ese caso el electrón no pasará a una órbita aún mayor, sino que, por el contrario, debido a la misma perturbación causada por el fotón incidente, pasará a una órbita menor, emitiendo en consecuencia un fotón en el proceso. Este fotón emitido por el átomo poseerá la importantísima cualidad de tener las mismas características y dirección de propagación que el fotón con el cual estimulamos al átomo. Este proceso, llamado emisión estimulada se muestra en la figura 45.

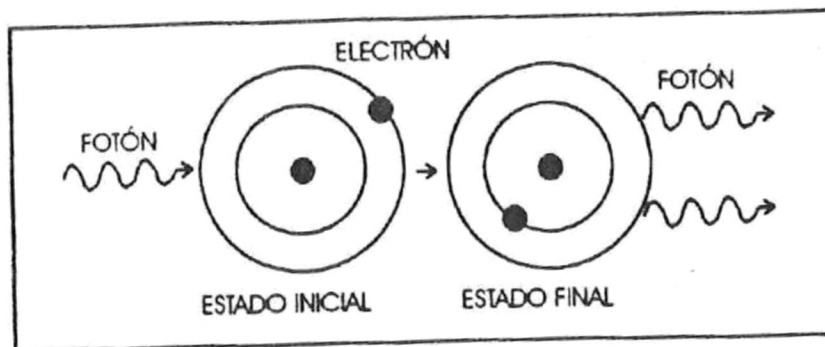


Figura 45 Emisión estimulada.

En esta figura podemos observar también la característica más importante del proceso de emisión estimulada; a saber: que en el estado inicial tenemos un solo fotón incidente en tanto que en el estado final emergen dos fotones idénticos viajando en la misma dirección. Esto es, que ocurre un proceso de amplificación. Hasta ahora hemos revisado los procesos más importantes que ocurren entre la luz y la materia, es decir entre fotones y átomos. Podemos por tanto pasar a describir cómo está construido un láser y cómo los procesos antes vistos intervienen en su funcionamiento.

## A.2 Composición de los láseres

La casi totalidad de los láseres que existen están compuestos de tres elementos fundamentales llamados medio activo, sistema de bombeo y cavidad resonante. Cada uno de ellos cumple una importante función en estrecha relación con los otros dos. Esquemáticamente se muestra en la figura 46.

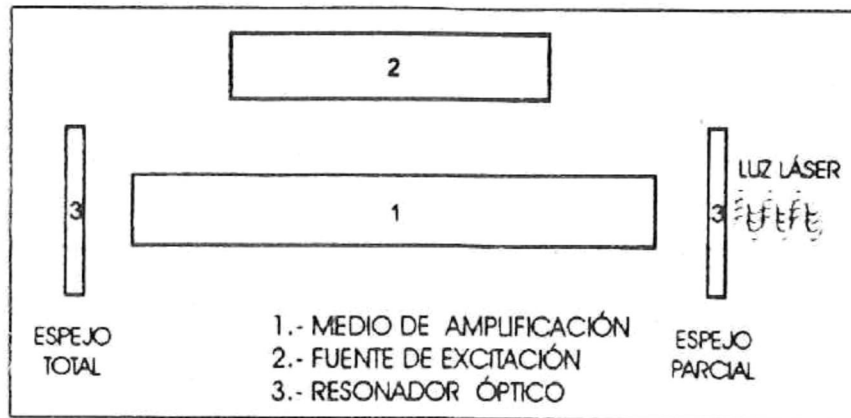


Figura 46 Estructura básica de un láser.

El objeto del medio activo es proporcionar los átomos en los cuales pueden ocurrir los procesos antes descritos como son absorción, emisión espontánea y emisión estimulada. Los átomos del medio activo pueden presentarse en cualquier estado físico: gaseoso, sólido o líquido.

El sistema de bombeo tiene la función de proporcionar un elevado flujo de energía al medio activo. En nuestro caso tal forma de energía será proporcionado por medio de un enorme flujo de electrones que viajan a lo largo de la cavidad. Generados por una fuente de alto voltaje. Debido a este flujo de electrones la gran mayoría de los átomos del medio activo sufrirán el proceso de absorción y pasaran a un estado excitado. Si en esta situación se emite un fotón (que pudo originarse por emisión espontánea) en la dirección longitudinal del láser, el proceso de emisión estimulada ocurrirá a todo lo largo de la cavidad láser. Es decir, que si inicialmente en un extremo de la cavidad había un solo

fotón , al incidir éste en un átomo excitado causará, debido al proceso de emisión estimulada, la emisión de dos fotones que, a su vez, podrán cada uno incidir en otros dos átomos excitados y, de este modo, obtener cuatro fotones que, a su vez, podrán repetir el proceso anterior y producir 8, 16, 32, 64, 128...etc, fotones.

Para darnos una idea de lo eficiente que puede ser este proceso basta decir que después de repetirlo únicamente 50 veces, obtendríamos  $1.126 \times 10^{15}$  fotones. Sin embargo, el tiempo que cada fotón permanece en el medio activo es tan pequeño (un fotón se propaga a la velocidad de la luz) que ni siquiera un proceso tan eficaz como el de emisión estimulada es capaz de extraer toda la energía depositada por el sistema de bombeo en el medio activo.

La solución a este problema está en colocar un par de espejos paralelos en los extremos longitudinales del medio activo. El nombre técnico de este par de espejos paralelos es; "resonador óptico". Debido a la presencia de la cavidad resonante cada fotón que incide en esta será reflejado y dirigido nuevamente hacia el medio activo para que, como antes, por el proceso de emisión estimulada, extraiga en forma de fotones más de la energía transferida por el sistema de bombeo del medio activo.

De hecho, en una cavidad resonante láser uno de los espejos refleja hacia el medio activo el 100% de los fotones incidentes en él, mientras que el segundo espejo refleja al medio activo sólo el 90% de los fotones incidentes, en tanto el otro 10% es transmitido a través del espejo y sale de la cavidad resonante. A este 10% de fotones que sale de la cavidad resonante es a la que llamamos luz láser.

## APÉNDICE B

### ESQUEMAS DE LAS PIEZAS MECÁNICAS CONSTRUIDAS

Contenedor del perfilómetro figuras 47 a 50

Sistema del espejo giratorio figuras 51 a 55

Sistema de barrido vertical figuras 56 a 60

Tornillo del galvo figuras 61 y 62

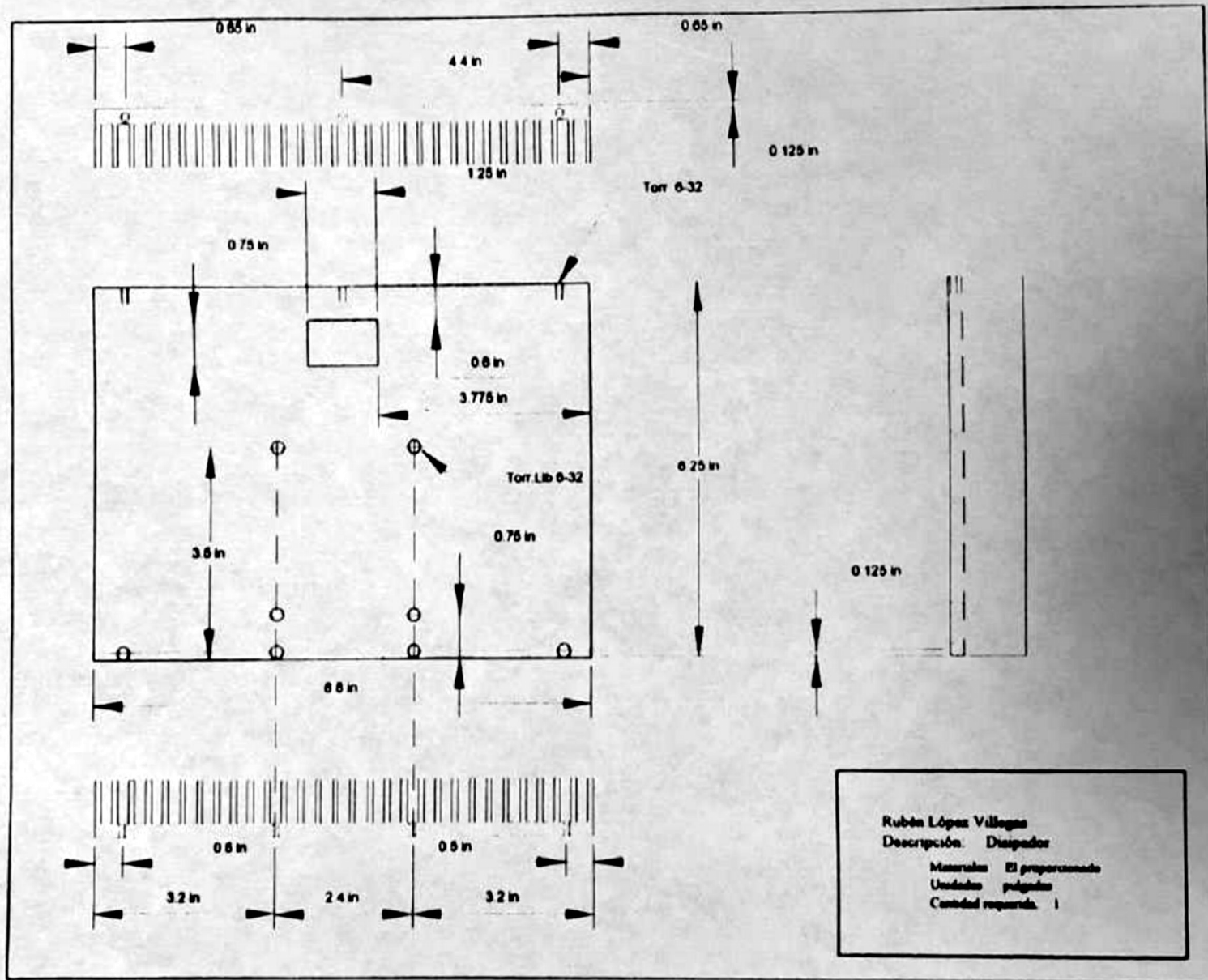


Figura 47 Pared frontal (disipador).

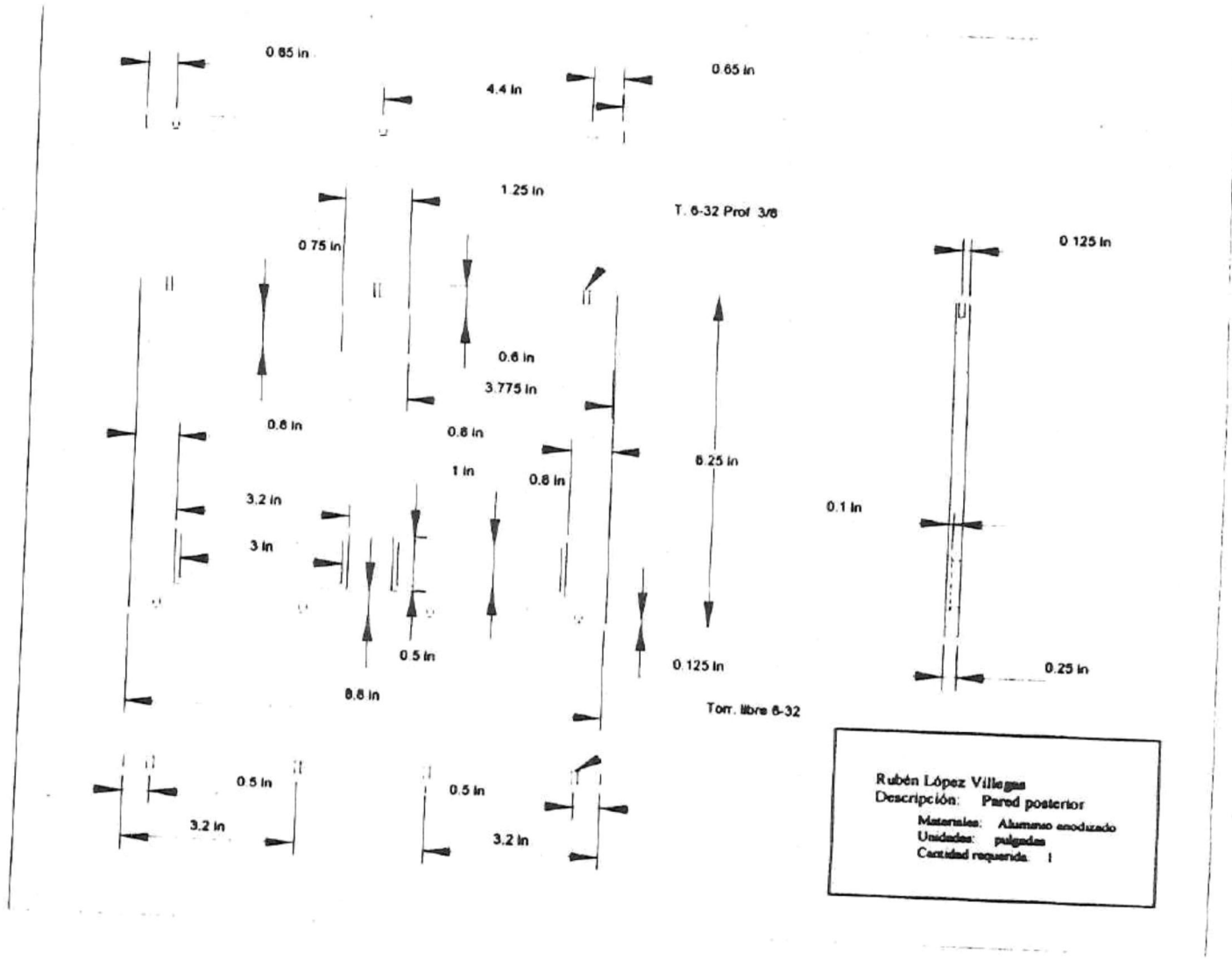


Figura 48 Pared posterior.

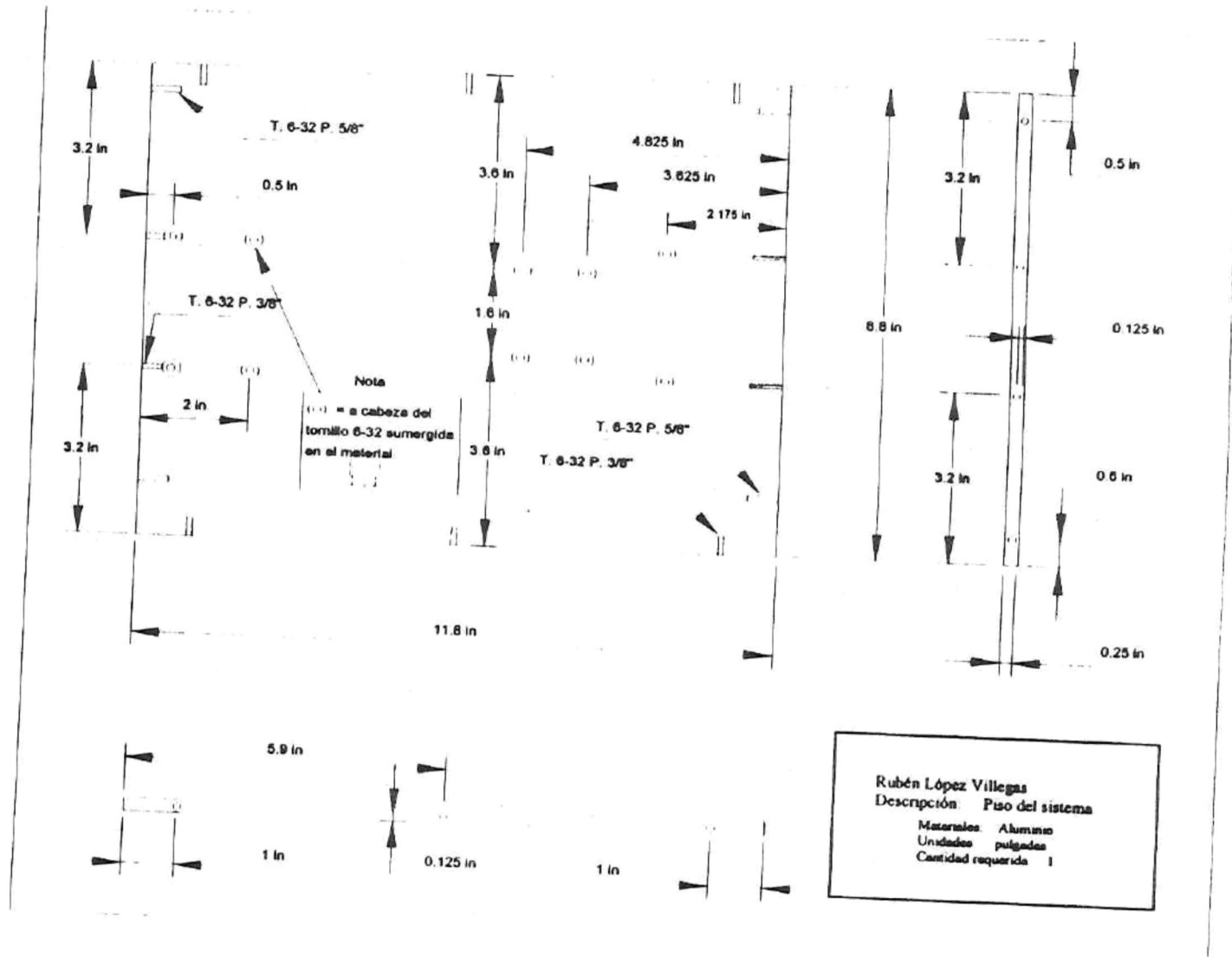
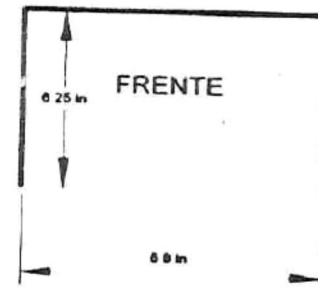
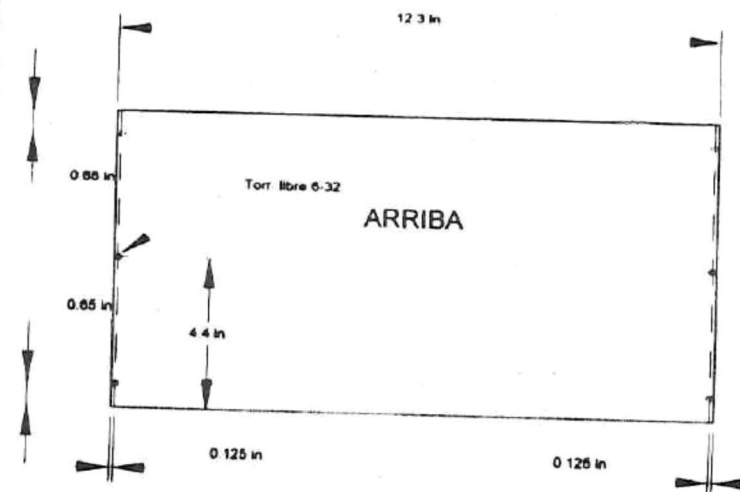
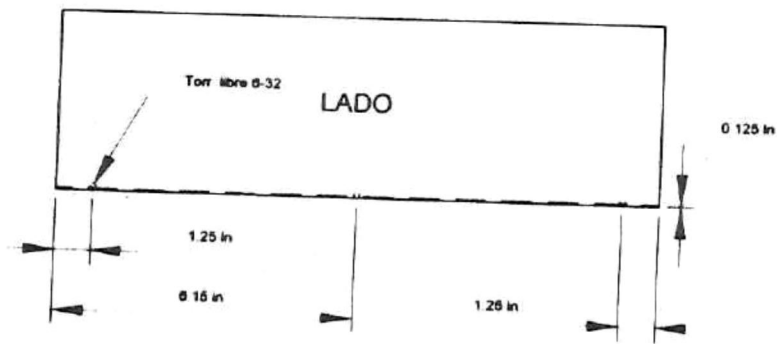


Figura 49 Piso del perfilómetro.



Nota: Las medidas son internas.



Rubén López Villegas  
 Descripción: Cubierta del perfilómetro  
 Material: Laminado de aluminio  
 Unidades: pulgadas  
 Cantidad requerida: 1

Figura 50 Cubierta del perfilómetro.

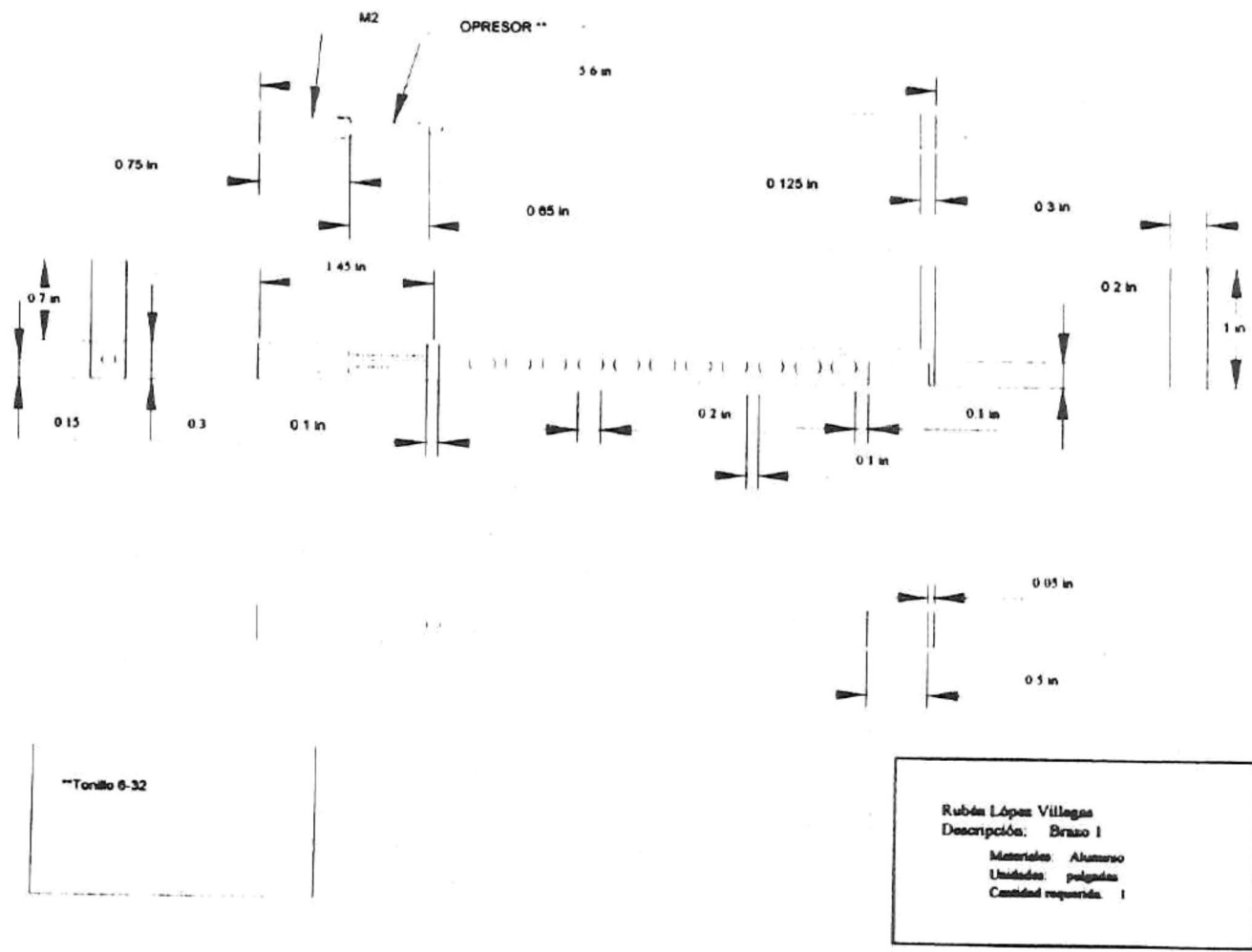


Figura 51 Brazo giratorio.

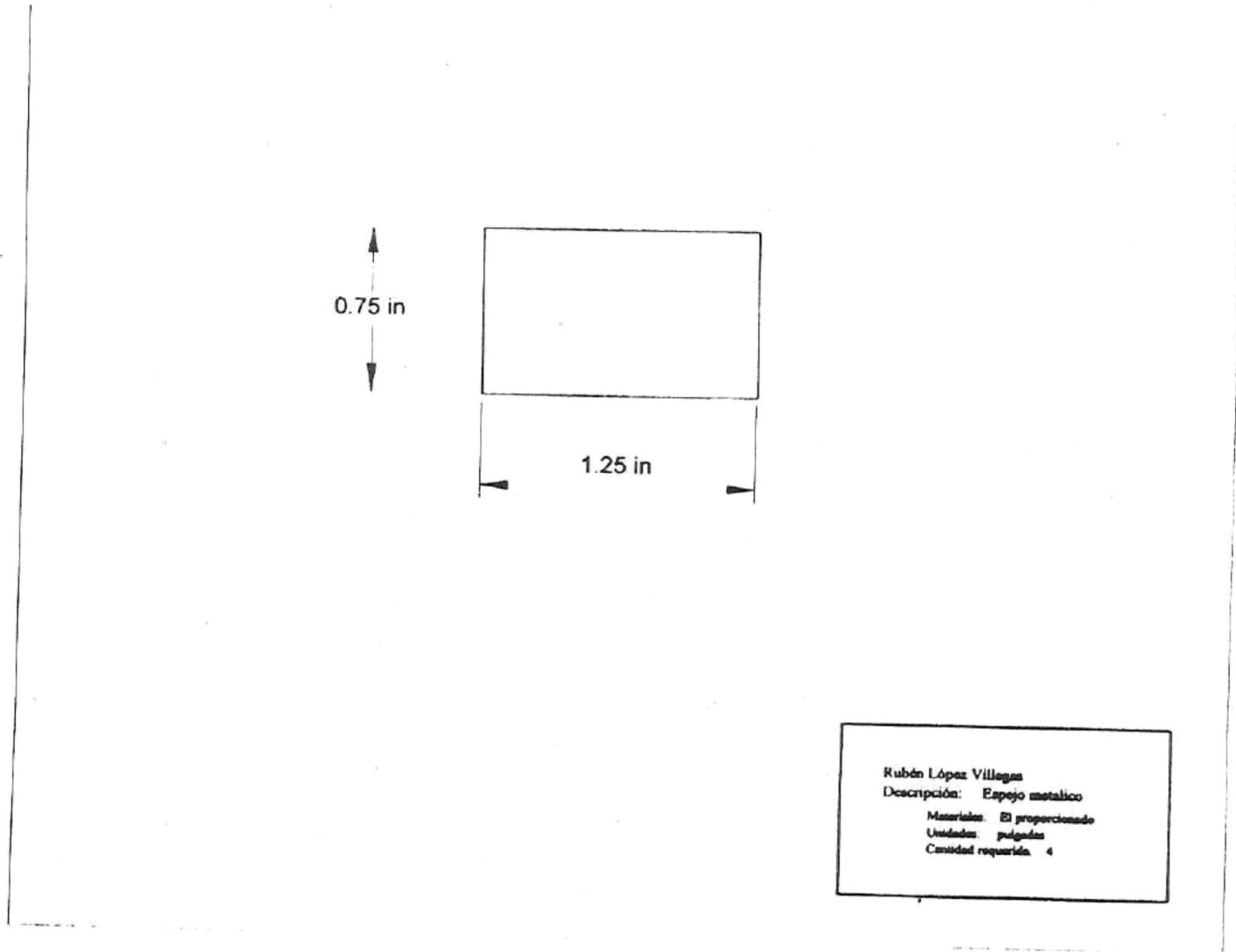


Figura 52 Espejo metálico.

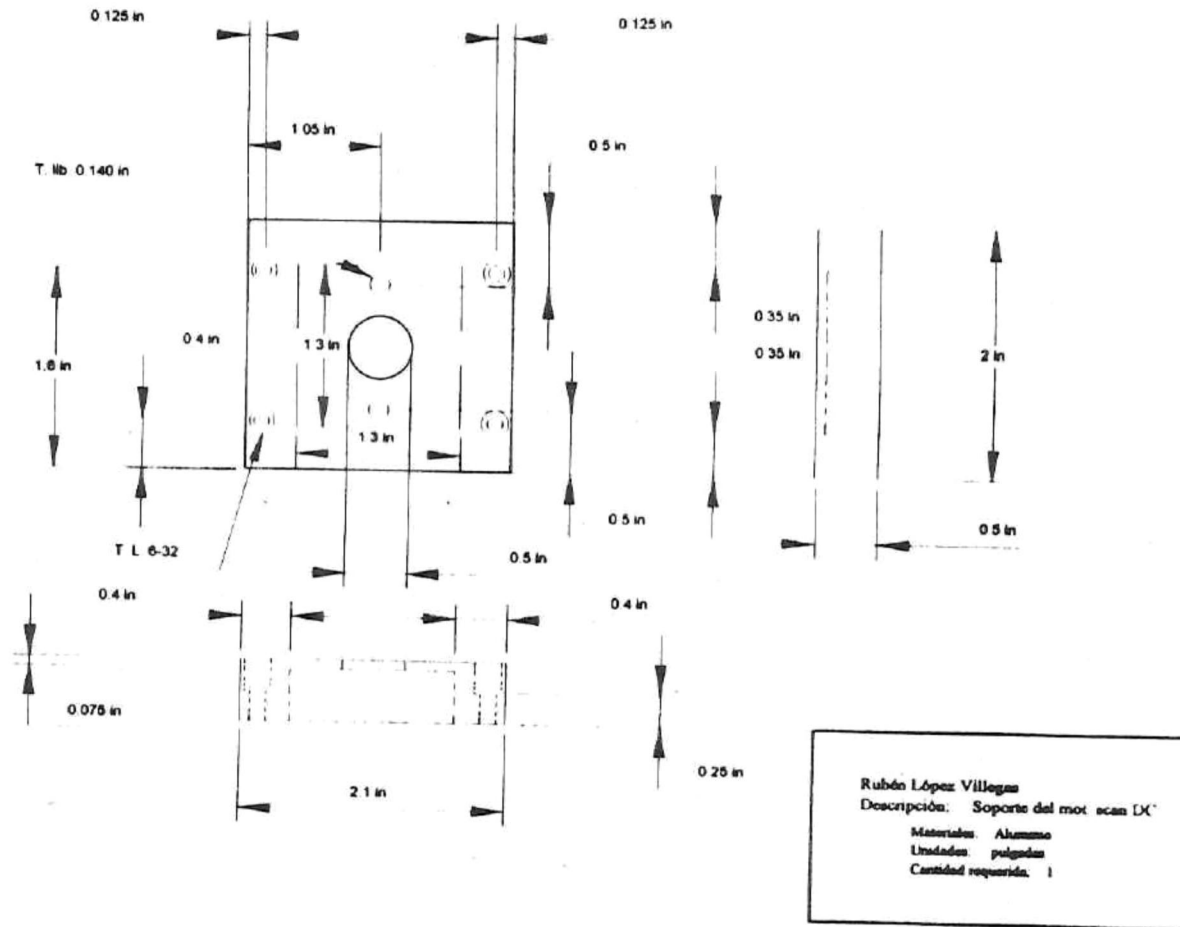


Figura 53 Soporte para el motor del brazo.

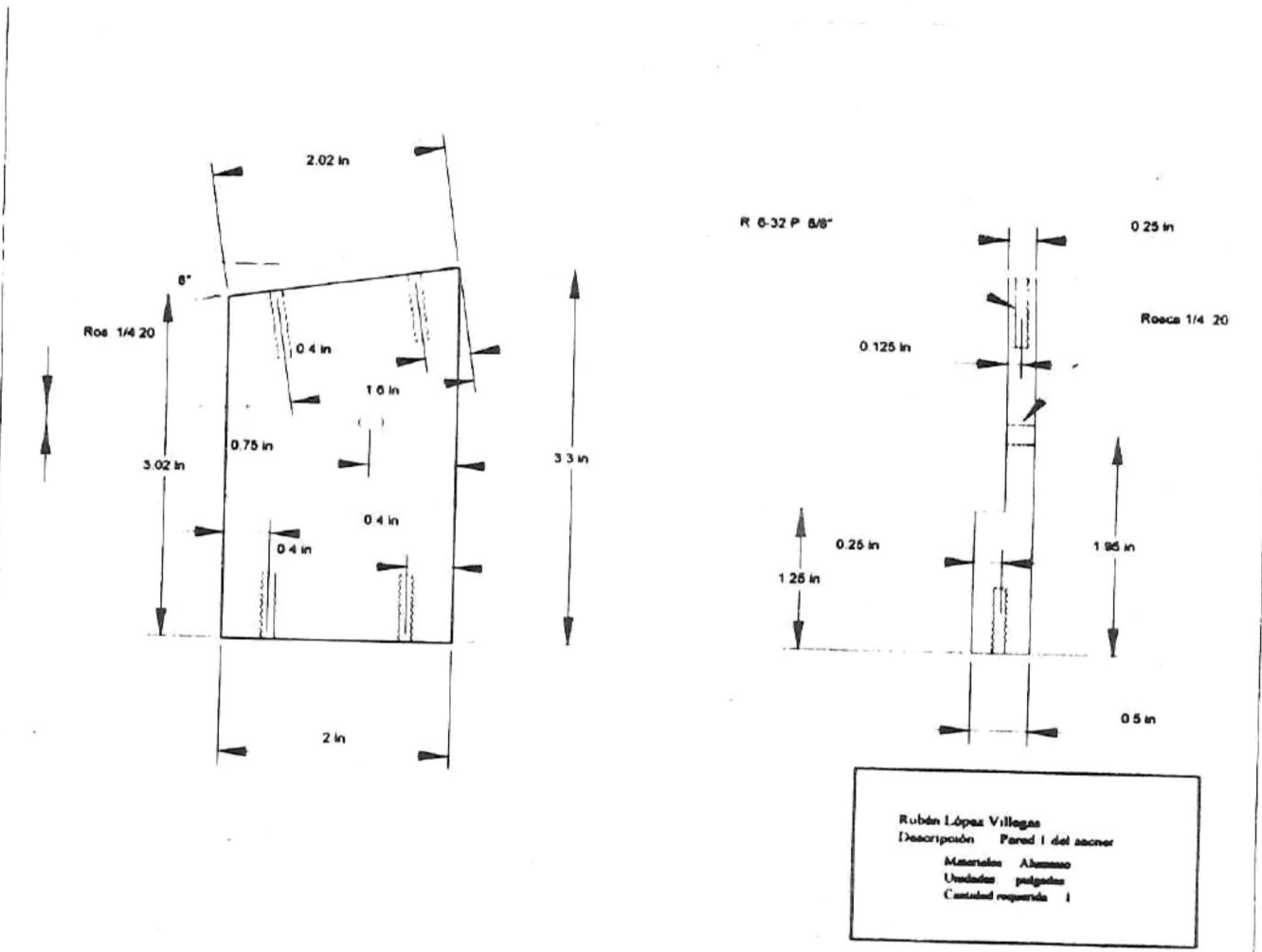
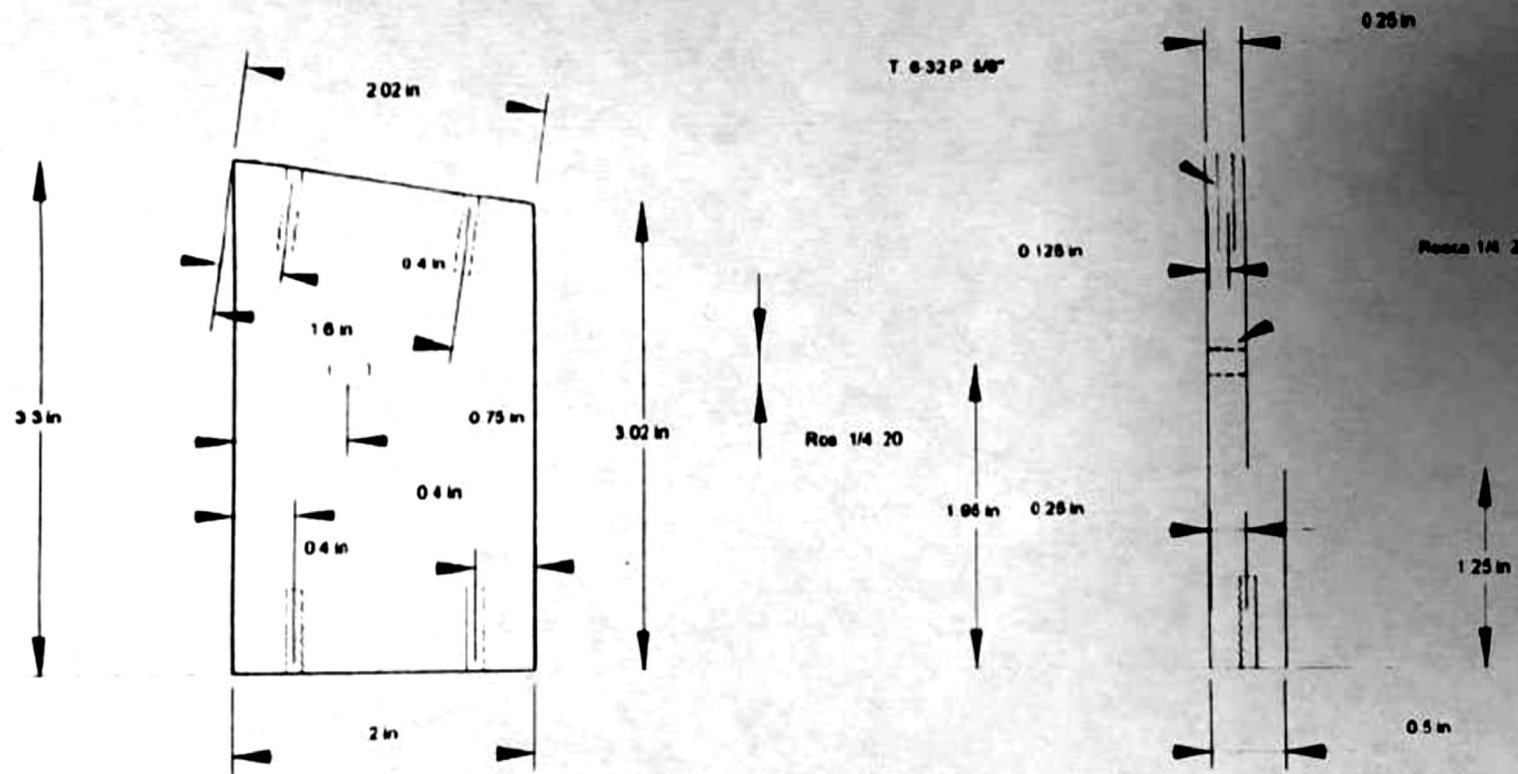


Figura 54 Pared 1 del soporte.



Rubén López Villegas	
Descripción:	Pared 2 del soporte
Materiales:	Aluminio
Unidades:	pulgadas
Cantidad requerida:	1

Figura 55 Pared 2 del soporte.

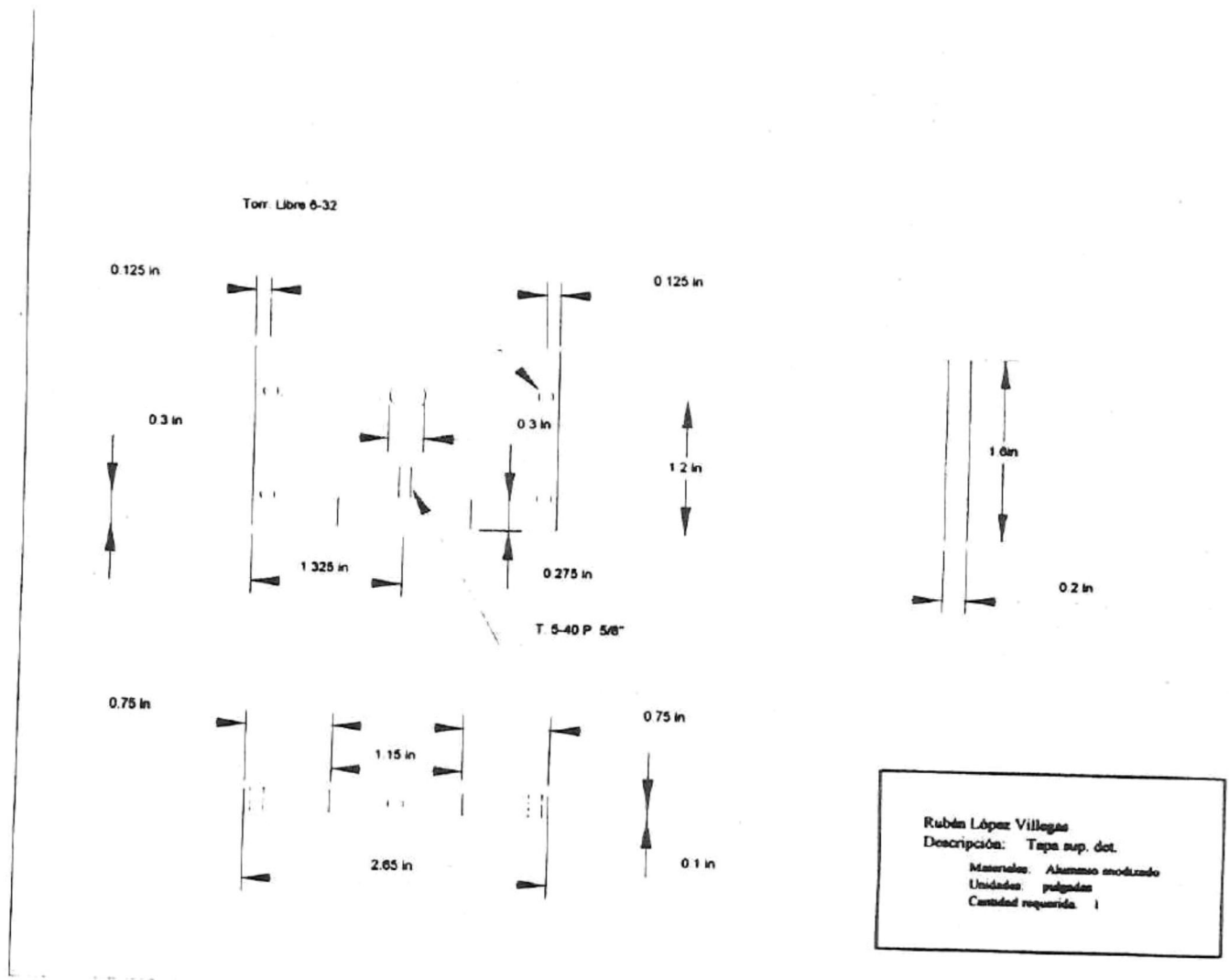


Figura 56 Tapa del sistema de barrido vertical.



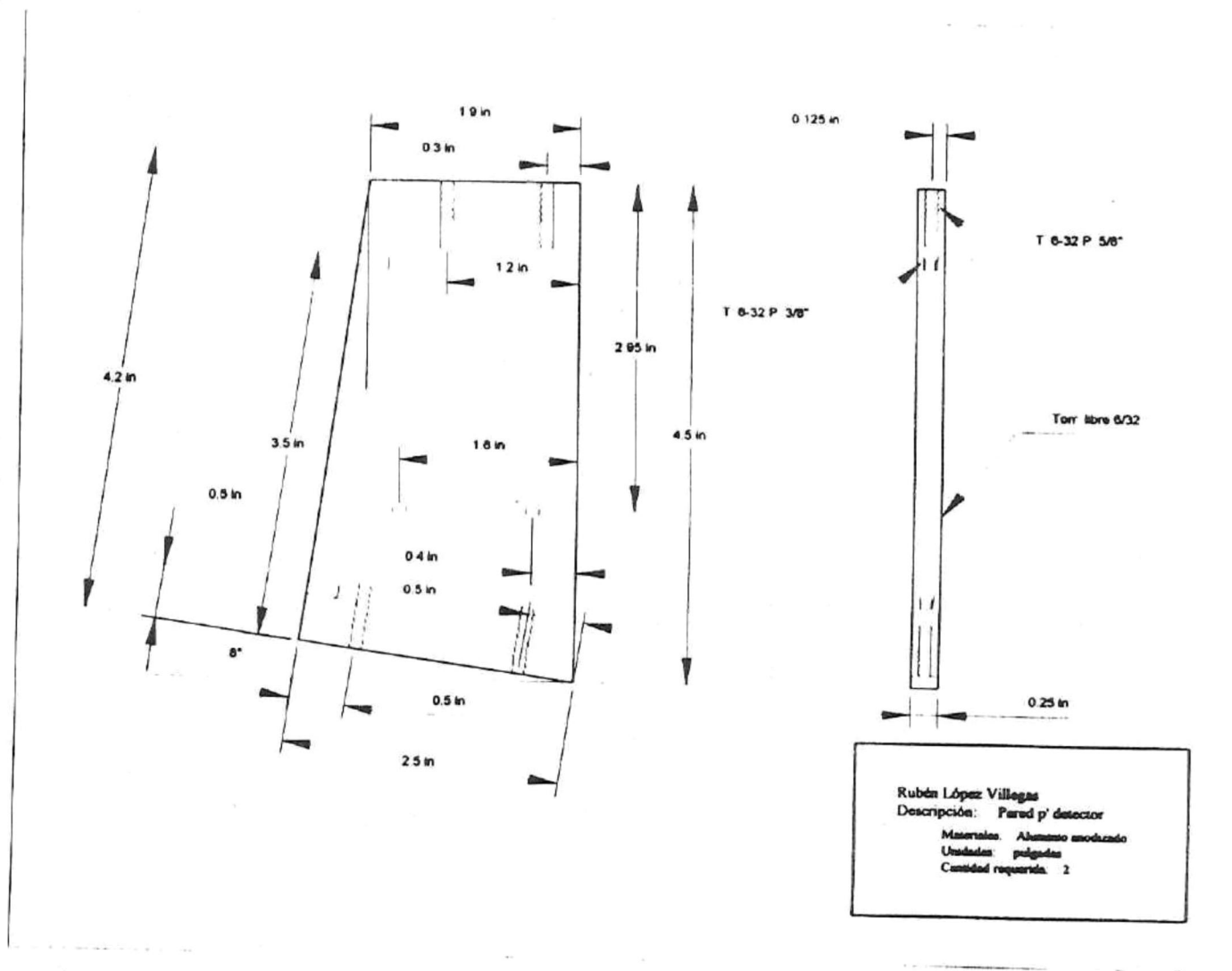
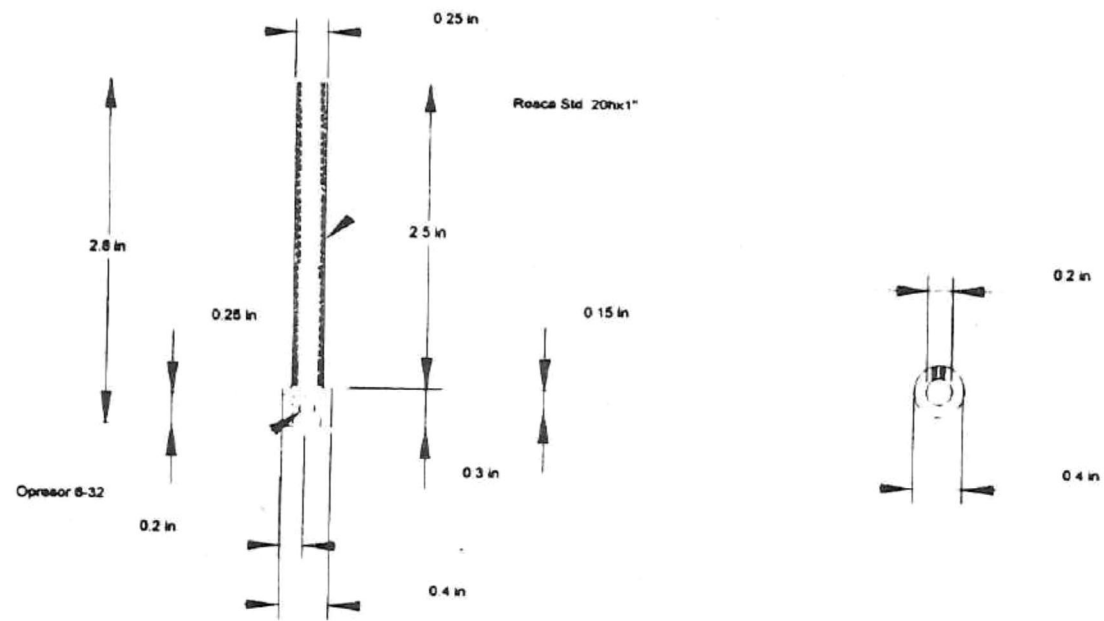


Figura 58 Paredes del sistema de barrido vertical.



Rubén López Villegas	
Descripción	Tornillo p' detector
Materiales	Bronce
Unidades	pulgadas
Cantidad requerida	1

Figura 59 Tornillo sinfn.

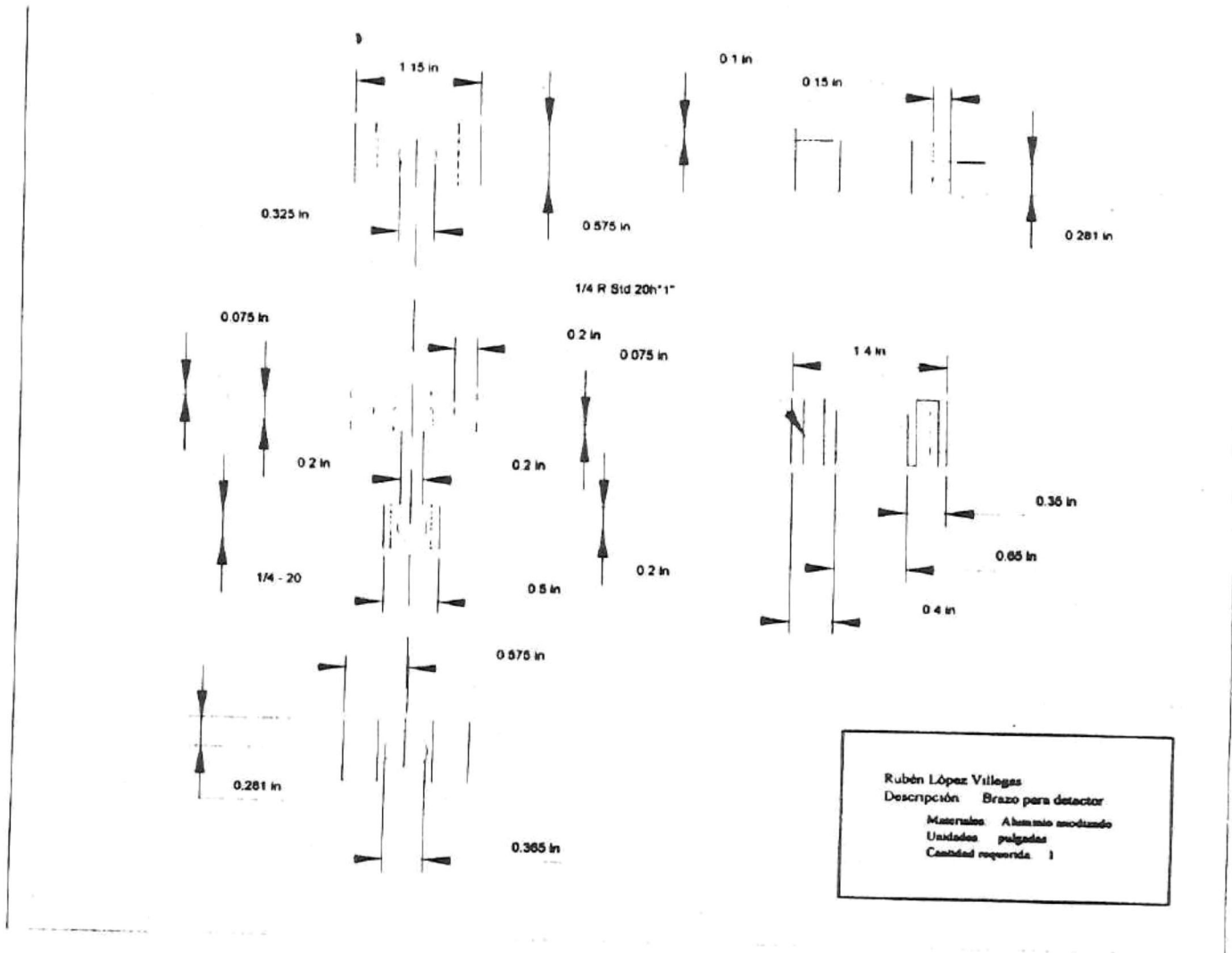
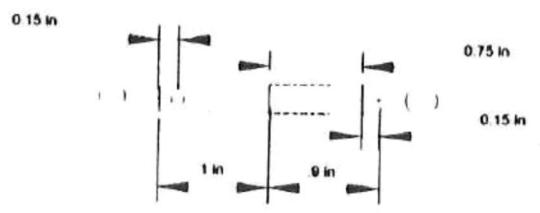
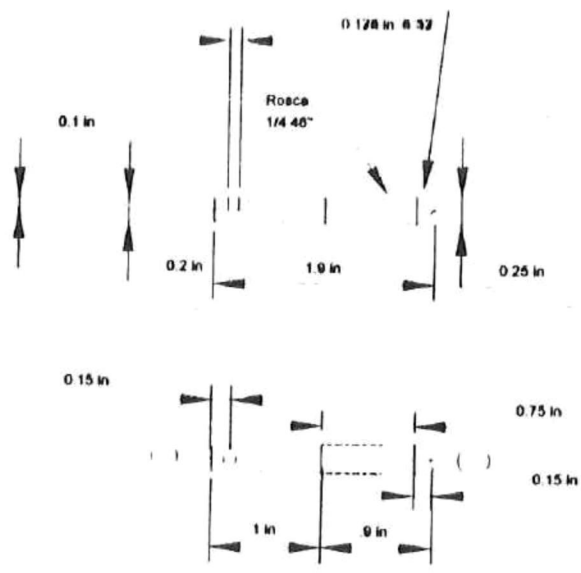


Figura 60 Brazo para el detector.



Rubén López Villegas  
 Descripción: Tornillo m  
 Material: Aluminio  
 Unidades: pulgadas  
 Cantidad requerida: 2

Figura 61 Tornillo del galvo.

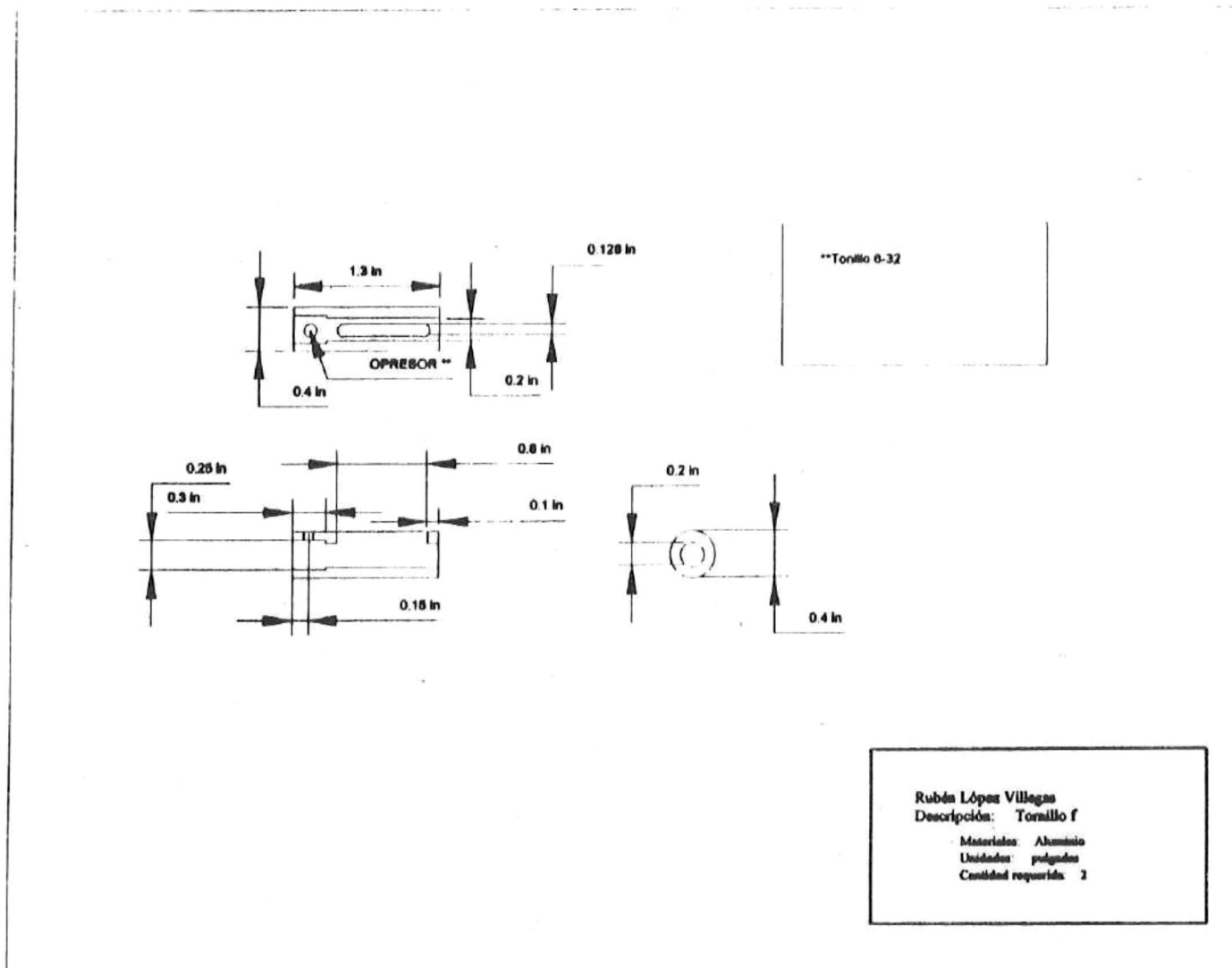


Figura 62 Bisagra del tornillo.