

Universidad Autónoma de Querétaro  
 Facultad de Ingeniería  
 Doctorado en Ingeniería (Mecatrónica e Instrumentación)

**Diseño, construcción y aplicación de un posicionador óptico  
 automático bidimensional.**

**Tesis**

que como parte de los requisitos para obtener el  
 grado de Doctor en Ingeniería **presenta:**

**Alejandro Castañeda Miranda**

Dirigido por:

**Dr. Víctor Manuel Castaño Meneses**

**SINODALES**

Dr. Víctor Manuel Castaño Meneses  
 Presidente

Firma

Dr. Jesús González Hernández  
 Secretario

Firma

Dr. Gilberto Herrera Ruiz  
 Vocal

Firma

Dr. Achim Max Loske Mehling  
 Propietario

Firma

Dr. Miguel Apátiga Castro  
 Propietario

Firma

Dr. Francisco J. Espinosa Beltrán  
 Suplente

Firma

Dr. Vladimir Razch Sitar  
 Suplente

Firma

M.i. Gerardo Rene Serrano Gutierrez  
 Director de la Facultad

Dr. Sergio Quesada Aldana  
 Director de Investigación y Posgrado

Centro Universitario  
 Santiago de Querétaro, Qro.  
 Agosto, 2004  
 México

No. Adq. H69497

No. Título \_\_\_\_\_

Clas. TS

621.902

C 346d



Universidad Autónoma de Querétaro  
Facultad de Ingeniería  
Doctorado en Ingeniería (Mecatrónica e Instrumentación)

**Diseño, construcción y aplicación de un posicionador óptico  
automático bidimensional.**

**Tesis**

que como parte de los requisitos para obtener el  
grado de Doctor en Ingeniería presenta:

**Alejandro Castañeda Miranda**

Dirigido por:

**Dr. Víctor Manuel Castaño Meneses**

**SINODALES**

Dr. Víctor Manuel Castaño Meneses  
Presidente

\_\_\_\_\_  
Firma

Dr. Jesús González Hernández  
Secretario

\_\_\_\_\_  
Firma

Dr. Gilberto Herrera Ruiz  
Vocal

\_\_\_\_\_  
Firma

Dr. Achim Max Loske Mehling  
Propietario

\_\_\_\_\_  
Firma

Dr. Miguel Apátiga Castro  
Propietario

\_\_\_\_\_  
Firma

Dr. Francisco J. Espinosa Beltrán  
Suplente

\_\_\_\_\_  
Firma

Dr. Vladimir Rauch Sitar  
Suplente

\_\_\_\_\_  
Firma

\_\_\_\_\_  
M.I. Gerardo Rene Serrano Gutierrez  
Director de la Facultad

\_\_\_\_\_  
Dr. Sergio Quesada Aldana  
Director de Investigación y Posgrado

Centro Universitario  
Santiago de Querétaro, Qro.  
Agosto, 2004  
México

## RESUMEN

En el presente trabajo retoma una recopilación histórica de la alineación, motivando la creación de un sistema automático para orientar la superficie de una muestra plana, manipulándola la orientación de su normal con la ayuda de un sistema óptico.

La alineación óptica se realiza con la ayuda de un dispositivo mecánico actuado por tres motores de pasos, sujetos a tornillos micrométricos, los cuales indican siempre la inclinación de la muestra. Simultáneamente, se hace incidir un rayo láser sobre la superficie de la muestra y la reflexión se colecta con un detector generando cuatro foto corrientes, permitiendo así localizar la posición relativa del láser dentro del detector.

Cualquier desalineación se puede monitorear con este arreglo, que se retroalimenta electrónicamente con una computadora personal. Los parámetros de resolución, reproductibilidad y precisión se evaluaron en varias condiciones.

Por otra parte, se caracteriza un sensor de posición por cuadrantes con el fin de colectar la posición de haz láser reflejado por la muestra, a dicho dispositivo pasa por el filtro de la interpretación física mediante un modelo matemático que lo compara con una resistencia variable, además, se le añade un análisis en el dominio de la frecuencia para adquirir solo la señal de interés.

Para el sistema mecánico se realiza un análisis cinemático para el sistema, tomando translaciones infinitesimales, a su vez, se desarrolla un algoritmo computacional que toma en cuenta dos figuras geométricas, donde la alineación toma en cuenta la transformación de una figura a otra, la alineación se lleva a cabo mediante prueba y error de la reflexión del láser sobre la superficie de la muestra.

Cuando la reflexión del láser no genera una figura geométrica, se hace uso de un filtro digital, el cual genera posible contorno de translación para el haz, aplicando posteriormente el algoritmo de alineación.

Por último, el artefacto prueba en una técnica óptica de semiconductores muy sensible para comprobar su efectividad, desarrollando un modelo para determinar la dependencia del arreglo óptico de un espectrómetro con la alineación de la superficie bajo prueba.

**Palabras Clave:** alineación óptica, ajuste numérico, diseños ópticos.

## SUMMARY

An automatic system for orienting the surface of a flat sample by mean of an optical system was developed. The alignment is accomplished using a mechanical device, consisting of three stepping motors, which in turn drive micrometric screws. These screws allow for the tilting of the specimen. Simultaneously, a laser beam is reflected off the sample surface and the reflection is received by a detector which generates four photocurrents. That permits us to localize by the relative positioning of the laser beam. Any disalignment will be monitored by this array and the info is feed back electronically by a personal computer. The resolution, reproducibility and accuracy are evaluated under several conditions.

Under these conditions, a position detecting sensor, calibrated by quadrants is characterised in order to locate the position of the laser beam reflected by the sample. A mathematical model that compares it with a variable resistance also allows an analysis in frequency domain. A kinematical analysis of the mechanical system is made carried out for infinitesimal displacements. A computational algorithm that takes into account two geometric figures determinate the reflection of the laser from the surface of the sample by trial and error.

**Key words:** Optical alignment, numerical fitting, optical devices.

## *DEDICATORIA*

A quien me dio la vida  
mi "madre"

*María Victoria Miranda Escalera*  
quien quiero ayer, hoy, mañana,  
en un instante y en la eternidad,

A mi compañero eterno  
mi "padre"

*José Amador Castañeda García*  
por brindarme esa ruta a seguir,  
por otorgarme esa paciencia al andar,  
por su apoyo incondicional en mi,

A mis hermanos  
Rodrigo, Celina Lizeth,  
Ana Gabriela, Víctor Hugo.  
por el ánimo que manifiestan  
al querer seguir adelante,

A quienes han compartido conmigo  
un instante del espacio-tiempo  
de su vida,

Lo más hermoso de la vida es lo insondable,  
lo que esta lleno de misterio.  
Es éste sentimiento básico  
que se halla junto a la cuna del arte verdadero  
y de la verdadera ciencia.

# AGRADECIMIENTOS

Quiero mencionar a las siguientes personas por su interés y apoyo en el desarrollo del presente trabajo.

Al Dr. Víctor M. Castaño del IF-UNAM por la supervisión y revisión detallada de la tesis, con un especial agradecimiento por aceptar la dirección de este trabajo encaminado hacia una nueva línea de investigación.

Al Dr. Achim Max Loske Mehling y al Dr. Luis Miguel Apátiga del IF-UNAM por formar parte de mi comité Tutorial, así como el apoyo para la realización de esta tesis.

Al Dr. Vladimir Rauch Sitar y al Dr. Gilberto Herrera Ruíz de la UAQ por formar parte del Comité Doctoral, así como por su revisión de la tesis.

Al Dr. Jesús González Hernández y al Dr. Francisco Espinoza Beltrán del CINESTAV-Qro. por formar parte del Comité Tutorial.

Al Dr. Eusebio Ventura de la UAQ por las ideas y sugerencias que me ayudaron en diversos aspectos de la tesis.

Al Dr. Trinidad Vega del CICATA-Querétaro por las sugerencias de la tesis.

Al Dr. Manzano, al Dr. Ramírez Bond y al Dr. Martín del CINESTAV- Qro. por sus observaciones y contribución bibliográfica para la tesis.

A la Dra. Elena Bulenkova, al Dr. Carlos López Cajún, al Dr. Boris Beliaski y al Dr. Horta de la UAQ, así como al Dr. Mario Enrique Rodríguez de FATA UNAM por las ideas que me ayudaron a la elaboración de la presente tesis.

Al D.I. Luis Onésimo González, Ing. Domingo Rangel Miranda, Edgar Méndez y a Rene Preza Cortes del IF-UNAM, así como al M.I. Rodrigo Castañeda Miranda y al M.I. Daniel Alaniz Lumbreras de la UAQ por su asistencia técnica.

A CONACYT beca 116160 por la beca para la realización de mis estudios de doctorado.

Por último, un agradecimiento especial al Centro de FATA de la UNAM Campus Juriquilla, Querétaro, tanto por otorgarme el soporte tecnológico del artefacto así como por su ayuda desinteresada todo el tiempo del desarrollo de la tesis.

A la bibliotecaria del Centro FATA por la eficiencia y rapidez de obtención de material bibliográfico.

# ÍNDICE

	Página
Resumen	i
Summary	ii
Dedicatorias	iii
Agradecimientos	iv
<b>I. INTRODUCCIÓN</b>	<b>1</b>
I.1. posicionadores, estado del arte	2
I.2. transductores y sistemas de medición	2
I.2.1 sensores de posición y desplazamiento	3
I.2.2 sensores electro-ópticos	4
I.2.2.1 luz	4
I.3 características de los fotodiodos	7
I.3.1 fotodiodos de silicio	7
I.3.2 principio de operación	8
I.3.3 características eléctricas del fotodiodo	10
I.3.4 características ópticas del fotodiodo	13
I.3.5 sensores detectores de posición (PSD)	16
I.3.5.1 PSD's de segmento lateral	16
I.3.5.2 PSD's de efecto lateral	17
I.3.5.3 propiedades eléctricas de los PSD's	18
I.3.5.4 PSD's segmentados	19
I.3.5.5 PSD's de efecto lateral	20
I.3.5.6 PSD's bilaterales de dos dimensiones	21
I.3.5.7 PSD's tetralaterales	22
I.3.6 láser semiconductor	23
I.3.6.1 emisión de luz estimulada	23
I.3.6.2 características potencia-corriente	24
I.4. antecedentes históricos de la alineación	25
I.5. el posicionador automático	28
<b>II.- DISEÑO DEL POSICIONADOR</b>	<b>30</b>
II.1. sistema de alineación	30
II.2. sistema mecánico de microposicionamiento	31
II.2.1. base giratoria	31
II.2.2. etapa de potencia	33
II.3. descripción del sistema óptico	34
II.3.1. el detector de posición	34
II.3.2. adquisición de señales del detector de posición	36
II.3.3. etapa de conversión de corriente a voltaje	37
II.3.4 normalización del detector de posición	38
II.3.5 conversión analógico digital	42
II.3.6 respuesta del detector de posición por cuadrantes	43
II.4. tarjeta de control	44
II.5. caracterización del sistema	45
II.6. algoritmo para la determinación del centroide de la elipse	48
II.7. orientación de la superficie	51

II.8. convergencia al centro de la figura	53
<b>III.- MODELAMIENTO DEL POSICIONADOR</b>	<b>55</b>
III.1. modelo de un potenciómetro óptico para un detector de posición	55
III.2. modelo de bode para el detector	60
III.3. análisis cinemático del sistema de alineación	64
III.4. algoritmo para ajustar parámetros en elipses	69
III.5. convergencia durante la alineación	72
III.6. discusión	76
III.7. características del sistema de accionamiento	76
<b>IV.- PRUEBAS Y APLICACIONES</b>	<b>78</b>
IV.1. El espectrómetro de reflectancia diferencial	78
IV.2. Análisis óptico del espectrómetro de modulador fotoelástico	80
IV.3. Aplicación del posicionador en RD.	83
IV.4. Procedimiento de medición.	87
<b>V.- CONCLUSIONES</b>	<b>88</b>
<b>REFERENCIAS</b>	<b>90</b>
<b>APENDICE A.</b>	<b>93</b>
<b>APENDICE B.</b>	<b>110</b>

## Glosario

**Amplitud:** El valor absoluto máximo obtenida por la variación periódica de calor.

**Banda prohibida:** región energética comprendida entre la banda de valencia y la banda de conducción.

**Difusividad térmica:** cantidad de calor normal por unidad de área por unidad de tiempo dividido por el producto del calor específico, densidad, y gradiente de temperatura

**Fase:** Parte fraccional de una señal de temperatura periódica que varía en el tiempo.

**Imagen Termo electrónica:** Imagen térmica proveniente de la des excitación no radiactiva de portadores en semiconductores

**Radiometría:** Técnica que mide la radiación en cualquier rango del espectro electromagnético.

**Semiconductor:** Material sólido cristalino el cual conduce eléctricamente si la energía de excitación es mayor a la energía de banda prohibida.

**Tiempo de vida de portadores minoritarios:** es el tiempo promedio de vida de un portador fotoexcitado antes de sufrir una colisión o una recombinación

**Velocidad de recombinación superficial:** velocidad a la cual un portador en la superficie se recombina, después de haber viajado un tiempo característico y una longitud de difusión

**Resolución:** es el incremento más pequeño de movimiento que el sistema puede realizar y depende de la distancia del detector de la muestra, así como del grado por paso de cada motor.

**Repetibilidad:** es el error con el cual una posición puede ser reproducida.

**Exactitud:** es el parámetro que mide la precisión para determinar el parámetro a conocer, por lo que depende tanto de la resolución del CAD, así como del avance lineal del micrómetro por paso del motor.

**Exactitud:** Como se tiene una resolución de aproximadamente  $65 \mu\text{m/bit}$ , equivale al ancho del haz láser, siendo éste el límite de exactitud.

**Fotocorriente:** Cuando luz monocromática incide sobre un cátodo de material fotosensible, este emite electrones con una energía cinética que depende de la longitud de onda de la luz incidente y del tipo de material del cátodo.

## Relación de Cuadros, gráficas e ilustraciones

<b>Figura</b>		<b>Página</b>
1	Alineaciones principales de piedras al norte de Carnac.	2
2	Espectro electromagnético que muestra las regiones de interés.	4
3	Un prisma rompe la luz en sus componentes de longitud de onda (colores).	6
4	Espectro de diferentes tipos de luz.	6
5	Fotodiodo plano difuso de silicio.	8
6	Profundidad de penetración de la luz en el sustrato de silicio.	9
7	Circuito equivalente de un fotodiodo de silicio.	10
8	Comportamiento de la capacitancia al aplicar un voltaje inverso de ruptura.	11
9	Sensibilidad espectral típica de algunos tipos de fotodiodos difusos planos.	13
10	Dependencia de la temperatura con la sensibilidad.	15
11	Coefficiente de temperatura del fotodiodo de silicio.	15
12	Típico circuito para fotodiodos segmentados.	19
13	Circuito típico para fotodiodos segmentados de una dimensión.	20
14	Circuito para fotodiodos segmentados bilaterales bidimensiones.	21
15	Circuito para fotodiodos segmentados tetralaterales bidimensiones.	22
16	Inversión de la población.	24
17	Gráfica Corriente-Potencia característica de una heterounión.	24
18	Primeros artefactos para alineación.	26
21	Primeras patentes con métodos de alineación.	27
22	Sistema mecánico y óptico para la alineación automática de muestras.	29
23	Sistema de alineación mostrando sus componentes ópticos y mecánicos.	31
24	Visualización de los principales elementos del sistema de alineación.	32
25	Esquema del área activa del detector duo-lateral.	35
26	Principio del funcionamiento para dos electrodos del detector duo-lateral.	36
27	Etapa de integración de la señal.	37
28	Configuración de los amplificadores normalizadores.	38
29	Respuesta del sensor ante un régimen no lineal o no lineal.	40
30	Área del detector de posición por cuadrantes UDT SC-50D.	40

31	Circuito de adquisición y normalización del detector.	41
32	Conexión del ADC para discretizar la posición del haz.	42
33	Fracción de fotocorriente máxima normalizada correspondiente a los electrodos del eje X en función del desplazamiento horizontal del detector de cuadrantes.	43
34	Fracción de fotocorriente máxima normalizada correspondiente a los electrodos del eje Y en función del desplazamiento horizontal del detector de cuadrantes.	44
35	Trayectorias bidimensionales generadas por el haz del láser al rotar la muestra alrededor de su normal.	48
36	Escalamiento de un círculo a una elipse.	49
37	Diagrama de flujo para la determinación de los parámetros de la figura.	52
38	Diagrama de flujo para la convergencia al centroide de la figura.	54
39	Absorción del detector determinada por la ley de deBeer.	59
40	Modelo del fotodiodo y del amplificador.	61
41	Diagrama de Bode para el modelo del fotodiodo.	62
42	Resultados experimentales del modelo.	63
43	Sistema posicionador con sus respectivas bases.	64
44	Plano de incidencia formado por el láser y la superficie de la muestra.	66
45(a)	La elipse con ejes mayor y menor no paralelos con respecto a los ejes bidimensionales de referencia.	71
45(b)	La elipse con ejes mayor y menor paralelos con respecto a los ejes bidimensionales de referencia.	72
46	Patrones generados por el haz del láser incidiendo sobre la superficie del detector durante el proceso de alineación. Nótese que en todos los casos hay una convergencia de los puntos.	74
47	Convergencia de la elipse junto con el desplazamiento relativo para los ejes X y Y normalizados.	75
48	Configuración esquemática del arreglo para la medición de anisotropías ópticas utilizando un modulador fotoelástico.	79
49	Descripción de los elementos ópticos antes de la muestra.	81
50	Posibles estados de polarización a la entrada del amplificador sensible a la fase.	82
51	Procedimiento manual para alineación en sistemas de RD.	83

<b>Figura</b>	<b>Página</b>
52	Sistema de alineación con los ángulos entre las partes: óptica (láser y pantalla) y la mecánica (disco para la muestra). 84
53	Resultados obtenidos al rotar una muestra desalineada en el ASF. 86
54	Resultados obtenidos al rotar una muestra alineada en el ASF. 86
55	Trayectoria seguida por la punta del vector $E$ en un punto dado del espacio. en función del tiempo. 94
56	Configuración de la palabra de control del PPI8255. 96
57	Pines del PPI8255 y el 74LS138. 97
58	Conexión del puerto paralelo de la PC y la IPP para direccionar memoria. 98
59	Corte y ampliación del corte en el sistema mecánico para posicionamiento. 99
60	Parte posterior de la base de alineación. Los tres motores dispuestos a $120^\circ$ controlan la inclinación de la superficie de la muestra. Como se indica, el giro de la superficie es controlada por el motor de rotación. 100
61	Vista lateral del sistema del sistema mecánico. 100
62	Vista Trasera y delantera del sistema del sistema. 101
63	Formación de un carácter a través de pixeles. 105
64	Distribución de los pixeles en la pantalla. 107
65	Distribución de los pixeles en el componente TImage. 108

<b>Tabla</b>	<b>Página</b>
1	Direcciones disponibles de memoria disponibles por la Interface Periférica. 98
2	Secuencia de excitación de fases de entrada del motor de pasos. 102
3	Asignación de signo al dato adquirido por la localidad de memoria. 104
4	Relación posición calculada contra pixel en pantalla. 106

## I.-INTRODUCCIÓN

En años recientes, la Ciencia e Ingeniería para la mayoría de los instrumentos, se han enfocado por habilitar el funcionamiento de dispositivos mecánicos, especialmente aquellos que parcialmente imitan el comportamiento humano. Su funcionamiento tiene la ventaja de ser insensible a las perturbaciones externas y a las variaciones de las características mecánicas de los mecanismos. Esta fascinación parece haber prevalecido a través de los siglos. En los últimos 10 años, el posicionamiento de objetos se han convertido en una herramienta necesaria para sistemas automatizados industriales, principalmente donde se han de llevar a cabo una diversidad de tareas que sean repetitivas y con una gran precisión. Su característica clave, la programabilidad, permite también modificar su funcionamiento según la información sensorial acerca de su entorno. Sus alrededores pueden ser bien definidos, desarrollando con instrucciones explícitas tareas programadas, lo cual abre nuevos campos de aplicación. Un caso especial es la orientación de superficies denominada alineación. Históricamente, la alineación ha jugado un papel muy importante en el desarrollo de las civilizaciones, siendo esta la herramienta para la creación de la mayoría de los grandes monumentos antiguos, estos a su vez, están relacionados con la alineación de las estrellas u otros objetos celestiales, el primer antecedente se presenta al norte de Carnac (ver figura 1), donde hay tres alineaciones principales descritas por la ubicación de piedras, la primera es la piedra denominada Méneac (la dirección del complejo apunta hacia la salida del Sol en torno al 6 de Mayo y al 8 de Agosto, donde estas dos flechas son de importancia para la agricultura), la segunda piedra denominada Kermario (su orientación apunta hacia la salida del Sol en el solsticio de verano) y la última denominada Kerleskan (el eje del abanico que forma está orientado hacia donde sale el sol en los equinoccios). Posteriormente grandes civilizaciones como la Egipcia, Maya y Teotihuacana alinearon sus templos con respecto a las estrellas. Posteriormente, con la llegada de la revolución industrial, la alineación toma un papel muy importante dentro de la industria, ya que está comprobado que el desalineamiento y desbalanceo en máquinas, sobre todo de tipo rotatorias, ocasiona el 80% de los daños en sus diversos componentes como coples, rodamientos, bandas, poleas, selos y estoperos, para la solución a dichos daños aparecen varios métodos de alineación propuestos por distintos científicos contemporáneos. En la actualidad, los secretos de la alineación son llevados a cabo en patentes, ya sea para fines industriales, astronómicos o militares. Para una alineación precisa se necesita de un posicionador, el posicionador es un instrumento que puede mover objetos con una alta precisión (del orden de micrómetros), a su vez,

puede ser controlado y dirigido electrónicamente para lograr movimientos relativamente complejos. Estos dispositivos encuentran un uso cada vez mayor en las investigaciones ópticas, electrónicas, biológicas, etc., y en general forman parte de equipos y sistemas complejos. Con el uso de láseres semiconductores, es posible crear un sistema de referencia gracias a su coherencia a través de su trayectoria. Esta es la clave de la alineación, el hecho de que puede observarse indirectamente por la proyección de un haz láser que incida sobre la muestra, creando una figura geométrica conocida, he hay entonces donde la alineación se anexa a la trayectoria del haz, este procedimiento requiere de un enfoque que se divide en dos ramas: la primera consiste en el montaje y puesta en operación de un sistema de Alineación Automático de Muestras, que constituye el primer sistema de este tipo en América Latina y la segunda rama de este trabajo, esta enfocada en el estudio de las soluciones matemáticas a las ecuaciones que describen la figura por desalineación, por otra parte, se tratan las ecuaciones de difusión dentro de un sensor de posición, para describir el punto en que incide el haz sobre el y garantice una solución única desde el punto de vista físico. Mediante una simulación computacional, se manipulan los parámetros en las diversas figuras, encontrando el punto de alineación en el espacio y determinando la influencia en la señal de alineación.



Figura 1.- Alineaciones principales de piedras al norte de Carnac.

## II. SISTEMAS DE POSICIONAMIENTO

### II.1.- Transductores y sistemas de medición

Para orientar un sistema, se necesita conocer los siguientes conceptos: un *transductor* es un dispositivo que se emplea para convertir la cantidad que se quiere medir (mesurando) en una señal eléctrica medible. Los transductores son utilizados como sensores en sistemas de medición, así como en sistemas de control. El mesurando es la cantidad a medir, que después de ser censada es convertida en una señal eléctrica por el transductor. El sistema de medición es un sistema electrónico que consiste básicamente de un transductor, el cual convierte el mesurando en una señal eléctrica de salida y un acondicionador de señal, el cual convierte la salida del transductor en una señal eléctrica, de tal manera que otro dispositivo puede leer y desplegar la información requerida, misma que esta relacionada con el mesurando. Una fuente de alimentación suministra el voltaje y la corriente necesaria para el funcionamiento del sistema de medición. En este capítulo primeramente se definen el tipo de sensores que se utilizan en el sistema de alineación, en segundo lugar se mencionan sus características, en tercer lugar se describen los diferentes tipos de sensores, y por último se hace una revisión literaria de antecedentes para la alineación de objetos y se mencionan algunas metodologías.

#### II.1.1.- Sensores de posición y desplazamiento

Mediante sistemas electrónicos adecuados es posible medir distancias, que pueden ir desde miles de km (en observaciones astronómicas), a fracciones de mm (en aplicaciones industriales), por lo que en general, se utilizan distintas técnicas, según los márgenes de medición deseados. La medición de grandes distancias se efectúa midiendo el tiempo empleado por una señal emitida desde un punto, la zonda alcanza un objeto y se refleja, regresando a su lugar de origen, conociendo con suficiente precisión la velocidad de propagación de las ondas utilizadas (William W., 1987). Para esta técnica pueden utilizarse señales luminosas o microondas, cuando requiere conocerse grandes distancias y señales ultrasónicas para la medida de distancias de algunos metros.

Para la medición de distancias o desplazamientos cortos, existe una mayor cantidad de métodos. En el orden de los centímetros los transductores empleados suelen ser capacitivos o inductivos. Este tipo de transductor es de impedancia variable y forma parte de un circuito oscilante, cuya frecuencia generada es función de la magnitud medida, lo cual provee ruido en el dominio de la frecuencia (Andrea Torani,

1998). Para la medición de distancias puede utilizarse el mismo principio del radar, pero utilizando radiación visible coherente de un láser. La determinación de distancias utilizando ondas electromagnéticas visibles obliga a medir intervalos de tiempo muy cortos. Estas velocidades que dependen del medio de propagación, de sus condiciones de presión (aire) y temperatura, lo que deberá tenerse en cuenta al efectuar una medida (Boccara A. C., 1980 ). Por este procedimiento se miden profundidades, niveles, espesores del orden de la radiación incidente, a estas metodologías se le conoce como técnicas de caracterización óptica (Aspnes D.E, 1979).

## II.2.2 Sensores electro-ópticos

Los sensores electro-ópticos son componentes electrónicos que responden a ondas electromagnéticas entre las bandas de la luz visible, la respuesta del sensor es acotada por las bandas del infrarrojo y del ultravioleta. Los dispositivos sensibles a los fotones son celdas fotoemisoras, fotoresistores, celdas fotovoltaicas, fotodiodos y fototransistores.

### II.2.2.1 Luz

La luz es una forma de radiación electromagnética que es esencialmente como las ondas de radio, ondas infrarrojas (calor), ultravioleta, y rayos X. La principal diferencia entre estos varios tipos de ondas electromagnéticas (OEM) es su frecuencia  $f$  y longitud de onda  $\lambda$ . La longitud de onda de la luz visible esta entre los 400 a 800 nanómetros ( $1\text{nm} = 10^{-9}\text{m}$ ), los cuales corresponden a las frecuencia entre  $7.5 \times 10^{14}$  y  $3.75 \times 10^{14}\text{Hz}$ . La radiación infrarroja tiene longitudes de onda mayores a 800nm, y la ultravioleta tiene longitudes menores a 400nm (figura 2). De acuerdo a la velocidad de la luz ( $c = 3 \times 10^8$  m/s), la frecuencia ( $f$ ) y longitud de onda ( $\lambda$ ) en OEM son relacionadas por la ecuación 1.

$$\lambda = \frac{c}{f} \tag{1}$$

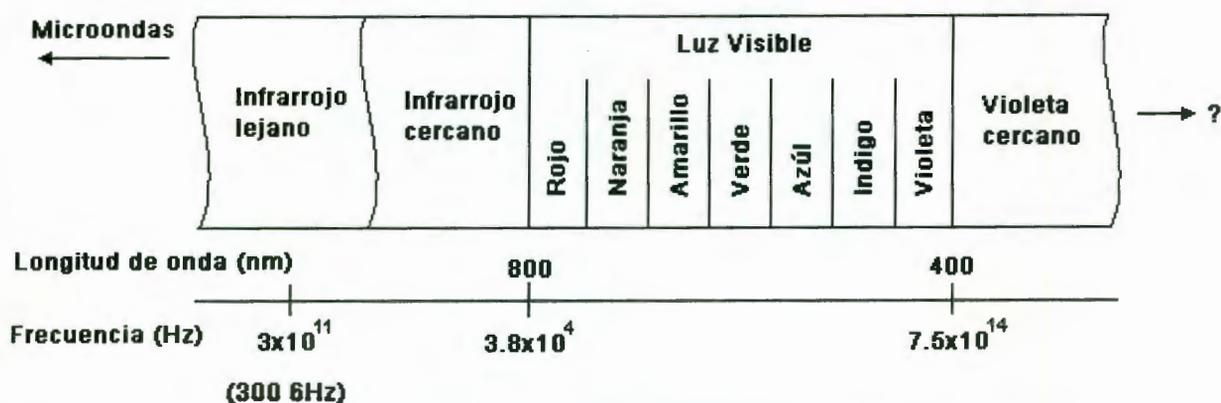


Figura 2.- Espectro electromagnético que muestra las regiones de interés para los sensores electro-ópticos: IR, visible y UV.

Debido a que los IR, UV y rayos X son similares en naturaleza y longitud de onda a la luz visible, muchos de los sensores y técnicas aplicadas a la luz visible trabajan en regiones adyacentes del espectro electromagnético. Aunque su desarrollo varía en cierta proporción, y algunos dispositivos no son útiles en algunas regiones del espectro, en la región de interés es posible medir características cualitativas y cuantitativas como cambios de intensidad para un intervalo del espectro electromagnético. En general los fotosensores dependen de efectos cuantitativos para su operación. Las ondas electromagnéticas vienen en paquetes específicos de niveles de energía; donde otros niveles de energía son excluidos. El nombre dado a esos niveles de energía fue quanta. El nombre dado a los paquetes de energía que operan en el rango de luz visible fue el de fotones. El nivel de energía de cada fotón es expresado por la ecuación:

$$E = \frac{ch}{\lambda} = h\nu \quad (2)$$

Donde  $E$  es la energía en electrón-volts,  $c$  es la velocidad de la luz ( $3 \times 10^8$  m/s),  $\lambda$  es la longitud de onda en metros,  $h$  es la constante de Planck ( $6.62 \times 10^{-34}$  J•s),  $\nu$  es la frecuencia de la luz en hertz (Hz) (La constante  $ch$  es expresada como 1240 eV/nm). El dispositivo sensor de luz opera mediante la liberación por lo menos un electrón de su átomo asociado por un fotón de luz. Materiales cuyos electrones están tan arraigados que no permiten que los fotones de luz hagan este trabajo no funcionarían bien como sensores de luz. La figura 3 muestra el efecto de los prismas y filtros sobre el rayo de luz. La luz blanca contiene todo el espectro de luz visible, desde rojo hasta el violeta. Cuando la luz blanca es pasada a través de un prisma, las longitudes de onda altas (luz roja) son menos refractadas que algunas longitudes

de onda (luz violeta). Como resultado, el espectro es expandido y los colores individuales se llegan a ser visibles. Los filtros ópticos son materiales que selectivamente bloquean o pasan longitudes de onda específicas. Por ejemplo, si un filtro verde es puesto en el camino de un rayo de luz, solamente la luz verde pasará a través del filtro. Este principio es aplicado en muchos instrumentos electrónicos usados en ciencia, medicina e industria. Los típicos filtros incluyen vidrios de colores, plásticos y otros materiales. Las películas fotográficas de color pueden ser usadas para filtrar el infrarrojo.

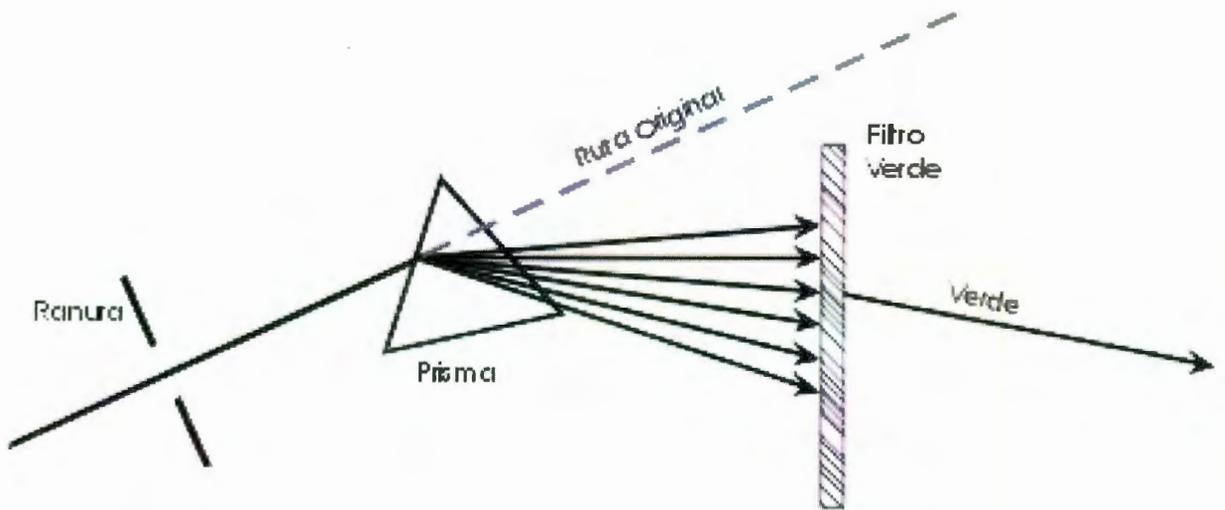


Figura 3.- Un prisma rompe la luz en sus componentes de longitud de onda (colores).

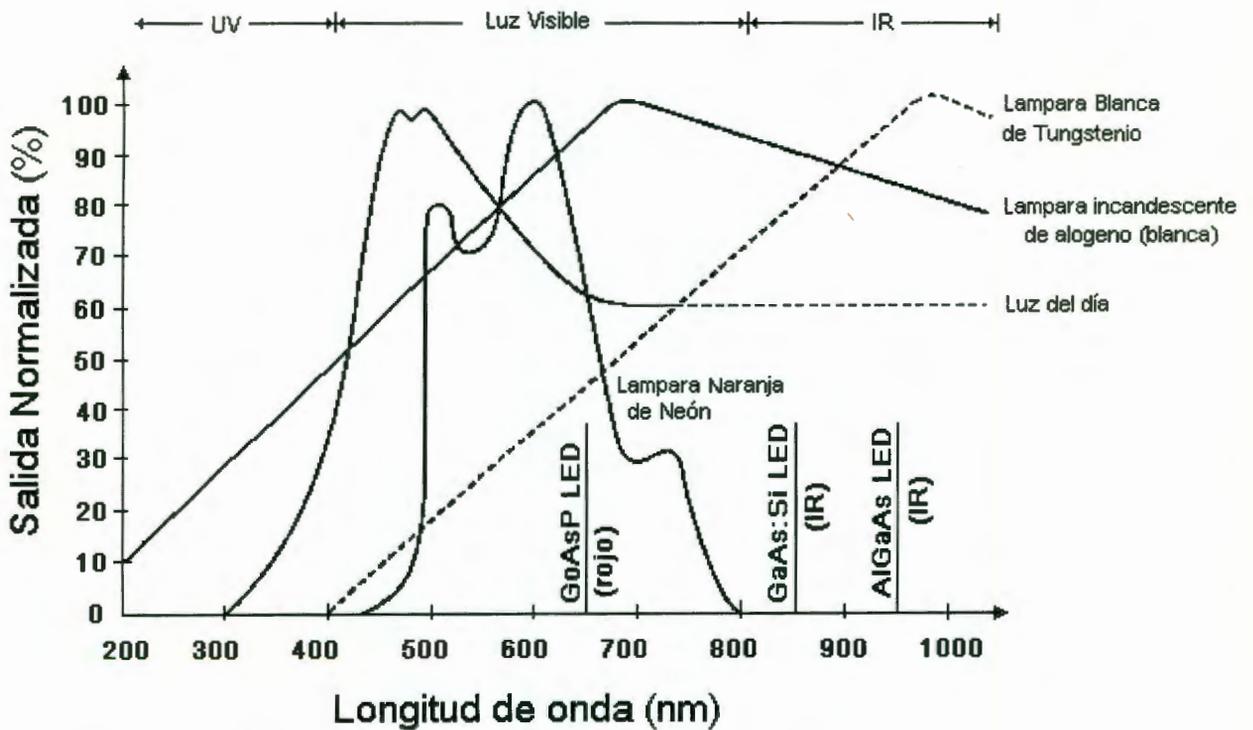


Figura 4.- Espectro de diferentes tipos de luz.

La respuesta espectral de un sensor es una medida de la habilidad de responder a la radiación electromagnética a diferentes longitudes de onda. La respuesta espectral de un sensor es generalmente dada en la forma de una gráfica relacionando la respuesta relativa a la longitud de onda. La figura 4 muestra una respuesta espectral de diferentes emisores de luz. La escala vertical es una respuesta normalizada, significando que toda la escala es arbitrariamente etiquetada como 100%. Para una referencia, las salidas espectrales monocromáticas (un solo color) de los varios tipos de LED's son graficados.

### **II.3 Características de los fotodiodos**

Los fotodiodos de silicio son dispositivos semiconductores que responden a partículas de alta energía y fotones. Los fotodiodos operan por absorción de fotones o partículas cargadas y generan un flujo de corriente en un circuito externo proporcional a la potencia incidida (William. P. Connors, 1971). Los fotodiodos pueden ser usados para detectar la presencia o ausencia de diminutas cantidades de luz y pueden ser calibrados para medir intensidades extremadamente precisas por debajo de  $1\text{pW/cm}^2$  hasta intensidades por arriba de  $100\text{mW/cm}^2$ . Los fotodiodos de silicio son utilizados en muchas aplicaciones como son: espectroscopia, fotografía, instrumentación analítica, sensores ópticos de precisión, alineación con rayos láser, caracterización de superficie, comunicaciones ópticas, e instrumentos médicos.

#### **II.3.1 Fotodiodos de silicio**

Los fotodiodos planos difusos de silicio son simples uniones P-N. Una unión P-N puede ser formada por la difusión de una impureza tipo P (ánodo), como un electrón, dentro una oblea de silicio tipo P (Lucovsky ,1960). El área de difusión define el área activa del fotodiodo. Para formar un contacto ohmico es necesaria otra difusión impura de la oblea. La impureza es tipo N para un área activa tipo P y tipo P para un área activa tipo N. La superficie de contacto, depositado en la parte activa frontal en áreas definidas, y en la parte posterior, cubren completamente el dispositivo. El área activa es entonces depositada con una capa de inflexible para reducir la reflexión de la luz para una longitud de onda definida. El área no activa es cubierta con una capa espesa de óxido de silicio. Al controlar el espesor del sustrato, se puede controlar la velocidad y respuesta del fotodiodo. Note que los fotodiodos, cuando se prefiera, pueden ser operados en el modo inverso de ruptura, o sea, se le aplica un voltaje negativo al ánodo y un positivo al cátodo (Sze S. M., 1981).

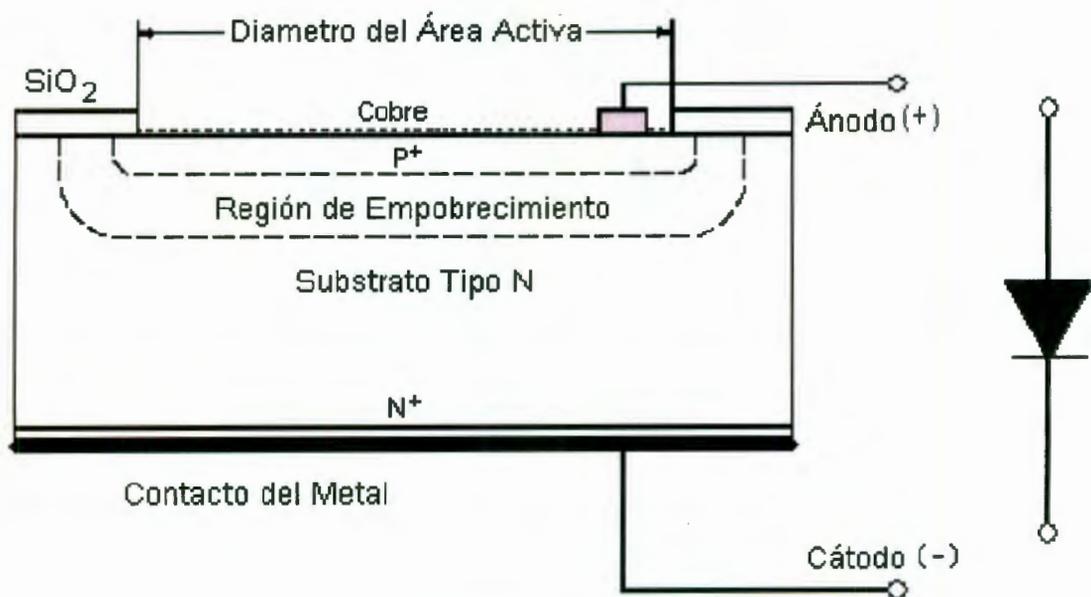


Figura 5.- Fotodiodo plano difuso de silicio.

### II.3.2 Principio de operación

El silicio es un semiconductor con una banda de energía de 1.12 eV a temperatura ambiente. Esta es la banda de energía entre la banda de valencia y la banda de conducción. Cuando la temperatura absoluta es cero, la banda de valencia se llena de electrones y la banda de conducción está vacante. Como la temperatura incrementa, los electrones se excitan y suben de la banda de valencia a la banda de conducción por energía térmica. Los electrones también pueden brincar a la banda de conducción por partículas o fotones con energías mayores a 1.12eV, que corresponden a las longitudes de onda menores a 1100nm. Los electrones que quedan en la banda de conducción están libres para conducir corriente. Debido al gradiente de concentración, la difusión de electrones desde la región tipo N a la región tipo P y la difusión de huecos desde la región tipo P a la región tipo N, desarrolla un potencial a través de la unión. La recombinación de electrones y huecos entre las regiones N y P a través de la unión resulta en una región sin portadores libres. Esta es la región de deserción. El voltaje a través de la región de deserción resulta en un máximo campo eléctrico en la unión y sin campo fuera de la región. Cualquier voltaje de ruptura inverso aplicado infiere una mayor región de deserción. Los pares de electrones huecos generados por la luz son difundidos por atracción de la región de deserción y son colectados por difusión

fuera de la región de deserción. La corriente generada es proporcional a la luz incidente o a al poder de radiación. La luz es absorbida exponencialmente con distancia y es proporcional al coeficiente de absorción. El coeficiente de absorción es muy alto para longitudes de onda menores en la región Ultravioleta (UV) y es pequeña para longitudes de onda mayores. De esta forma, los fotones de pequeña longitud de onda, como los UV, son absorbidos en una capa delgada superficial frontal, mientras el silicio se hace transparente a las longitudes de onda de luz mayores a los 1200nm, este efecto se muestra en la figura 6. Otra consideración es que los fotones con energías menores a la de banda prohibida no son absorbidos.

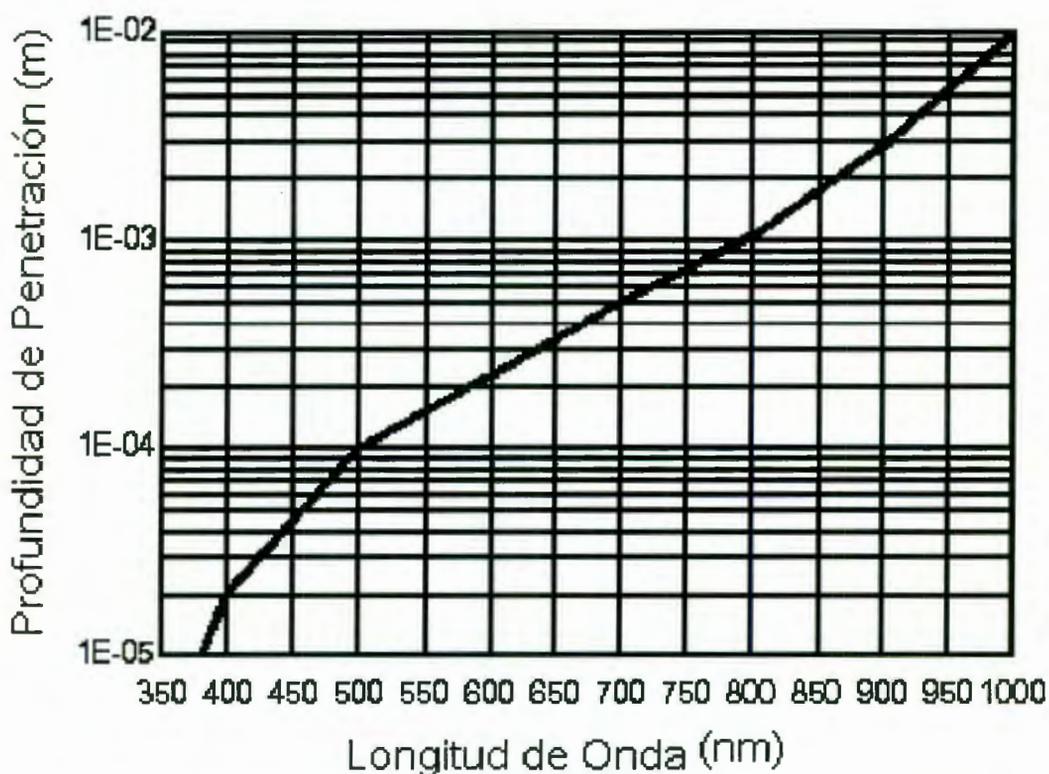


Figura 6.- Profundidad de penetración de la luz sobre el sustrato de silicio.

### II.3.3. Características eléctricas del fotodiodo

Un fotodiodo de silicio puede ser representado por una fuente de corriente en paralelo con un diodo ideal (figura 7). La fuente de corriente representa la corriente generada por la radiación incidente, y el diodo representa la unión PN. En adición, un capacitor (capacitancia de la unión  $C_j$ ) y una resistencia de polarización inversa (Shunt  $R_{SH}$ ) es conectada en serie con todos los componentes en este modelo.

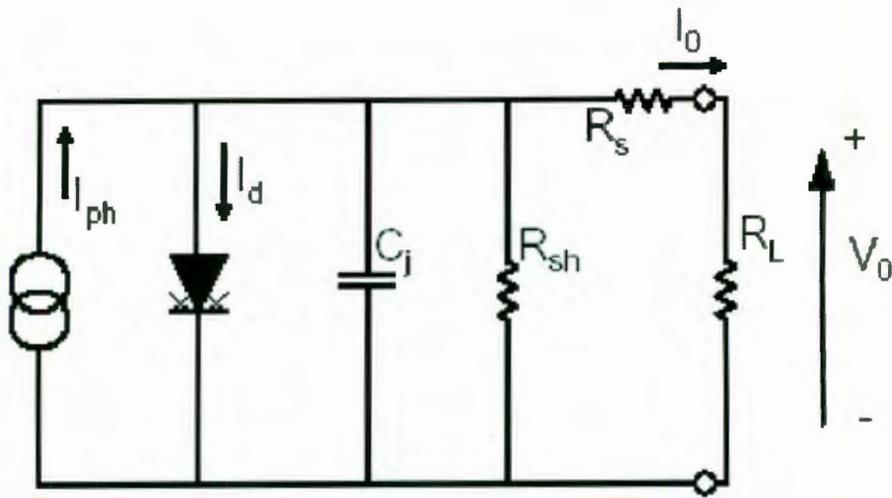


Figura 7.- Circuito equivalente de un fotodiodo de silicio.

La resistencia (Shunt  $R_{SH}$ ) es la línea con pendiente negativa de la curva de corriente contra voltaje de el fotodiodo en el origen, i.e.  $V=0$ . Aunque un fotodiodo ideal debería tener una resistencia ( $R_{SH}$ ), el rango de valores se encuentra desde los 10 a los 1000 Mega ohms ( $M\Omega$ ). Experimentalmente esto es obtenido aplicando  $\pm 10mV$ , midiendo la corriente y calculando la resistencia. La resistencia ( $R_{SH}$ ) es usada para determinar el ruido de corriente en el fotodiodo sin voltaje de ruptura (modo fotovoltaico). Para un mejor funcionamiento del fotodiodo, se necesita la resistencia (Shunt  $R_{SH}$ ) mas grande. La resistencia en serie ( $R_s$ ) de un fotodiodo aumenta la resistencia de los contactos y la resistencia del silicio en la zona de deserción. Este comportamiento lo define la ecuación 3.

$$R_s = \frac{(W_s - W_d)\rho}{A} + R_c \quad (3)$$

Donde  $W_s$  es el espesor del sustrato,  $W_d$  es anchura de la región de deserción,  $A$  es el área de difusión de la unión,  $\rho$  es la resistividad del sustrato y  $R_c$  es la resistencia de contacto. Una resistencia en serie es usada para determinar la linealidad del fotodiodo en el modo fotovoltaico (modo sin voltaje de ruptura,  $V=0$ ). Aunque un diodo ideal no debería tener resistencia en serie, los valores típicos del sensor están en el rango de 10 a 1000 ohm. La frontera de la región de deserción actúa como la capa delgada superficial de un capacitor. La capacitancia de la unión ( $C_j$ ) es directamente proporcional al área difundida e inversamente proporcional a la anchura de la capa de deserción. En adición, los sustratos con

alta resistividad tienen menor capacitancia en la unión. La capacitancia depende del voltaje de ruptura de acuerdo a la fórmula 4.

$$C_J = \frac{\epsilon_{Si}\epsilon_0 A}{\sqrt{2\epsilon_{Si}\epsilon_0 \mu \rho (V_A + V_{bi})}} \quad (4)$$

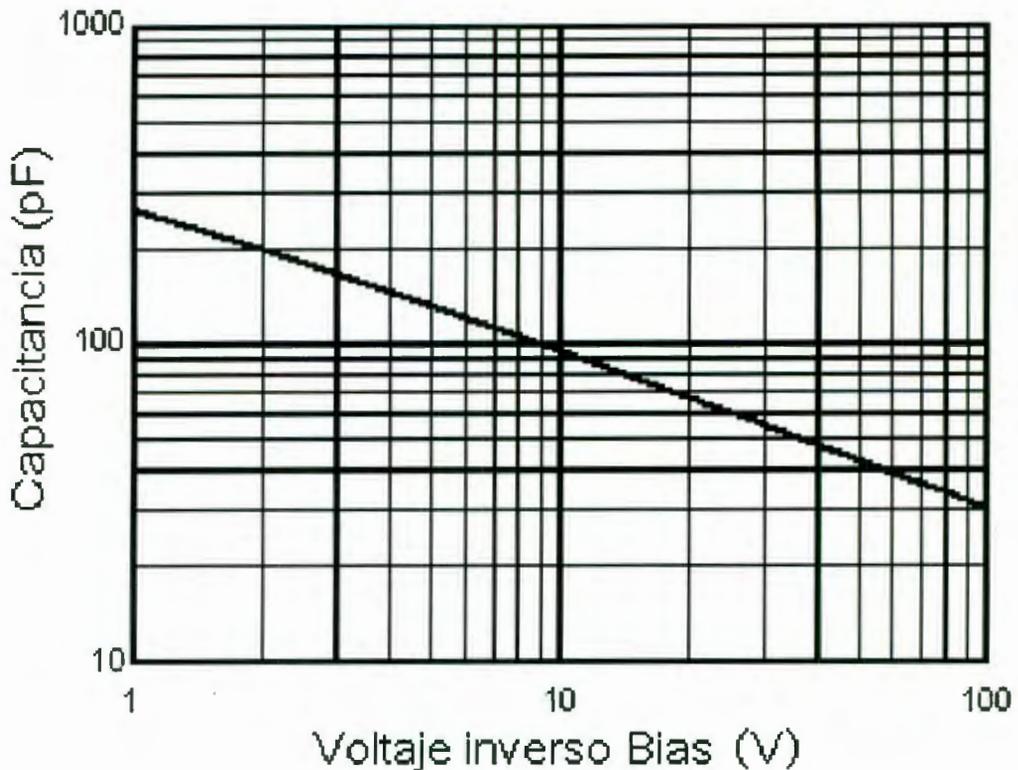


Figura 8.- Comportamiento de la capacitancia al aplicar un voltaje inverso de ruptura.

De la ecuación 4 se tiene que:  $\epsilon_0 = 9.854 \times 10^{-14} \text{F/cm}$ , es la permeabilidad del espacio libre,  $\epsilon_{Si} = 11.0$  es la constante dieléctrica del silicio,  $\mu = 1400 \text{cm}^2/\text{Vs}$  es la movilidad del electrón a  $300^\circ\text{K}$ ,  $\rho$  es la resistividad del silicio,  $V_{bi}$  es el voltaje de ruptura del silicio y  $V_A$  es el aplicado. La figura 8 muestra la dependencia de la capacitancia sobre el voltaje de ruptura inverso aplicado. La capacitancia de la unión es usada para determinar la velocidad de la respuesta del fotodiodo. El tiempo de respuesta de un fotodiodo es definido como el tiempo para que la señal suba o baje desde 10% al 90% o del 90 a 10% del valor final respectivamente. Este parámetro puede ser también expresado como la respuesta en frecuencia y corresponde a la frecuencia en la cual la salida del fotodiodo decrecimiento 3dB. Este comportamiento es aproximado por la ecuación 5.

$$t_{\text{respuesta}} = \frac{0.35}{f_{3dB}} \quad (5)$$

Hay tres factores que definen el tiempo de respuesta de un fotodiodo: el tiempo de carga de colección ( $t_{\text{DRIFT}}$ ) de los portadores en la región de deserción del fotodiodo, el tiempo de carga de colección ( $t_{\text{DIFFUSED}}$ ) de los portadores en la que no es región de deserción del fotodiodo y la constante tiempo RC de la combinación diodo-circuito ( $t_{\text{RC}}$ ) que es determinado por  $t_{\text{RC}}=2.2 RC$ , donde R, es la suma de la resistencia en serie del diodo y la resistencia de carga ( $R_S + R_L$ ), y para C se tiene la suma del unión del fotodiodo y las capacitancias parásitas ( $C_j + C_S$ ). La capacitancia de la unión ( $C_j$ ) es dependiente del área de difusión del fotodiodo y del voltaje de ruptura inverso, donde los más rápidos tiempos de respuesta corresponden a menores áreas de difusión y grandes voltajes inversos de ruptura. En adición, las capacitancias parásitas pueden ser minimizadas usando cargas pequeñas ( $R_{\text{Carga}} < R_{\text{Diodo}}$ ) y teniendo cuidado con la colocación de los componentes. El tiempo total de respuesta es determinado por la ecuación 6.

$$t_R = \sqrt{t_{\text{DRIFT}}^2 + t_{\text{DIFFUSED}}^2 + t_{\text{RC}}^2} \quad (6)$$

Generalmente, en modo fotovoltaico (sin voltaje de ruptura), el tiempo de respuesta es determinado por el tiempo de propagación en el área de difusión (menor que  $5\text{mm}^2$ ) y por la constante de tiempo generada para mayores áreas de difusión en todas las longitudes de onda. Cuando se opera en el modo fotoconductor (cuando se aplica voltaje de ruptura inverso), si el área del fotodiodo esta casi sin electrones, como en fibras ópticas, el factor dominante es el tiempo de carga de colección de portadores ( $t_{\text{DRIFT}}$ ). En los fotodiodos en que el área de deserción no es grande, hay tres factores que contribuyen a la respuesta en tiempo.

### II.3.4 Características ópticas del fotodiodo

La sensibilidad de un fotodiodo de silicio (Respuesta  $R_\lambda$ ) a la luz es definida como la relación entre la fotocorriente  $I_P$  y la potencia de luz incidente P a dada longitud de onda, se describe mediante la ecuación 9 y es una medida de la efectividad de conversión de luz a corriente eléctrica. Esta efectividad es sensible a la longitud de onda de la luz incidente (figura 9), así como también al voltaje inverso (bias) y a la temperatura.

$$R_{\lambda} = \frac{I_P}{P} \quad (7)$$

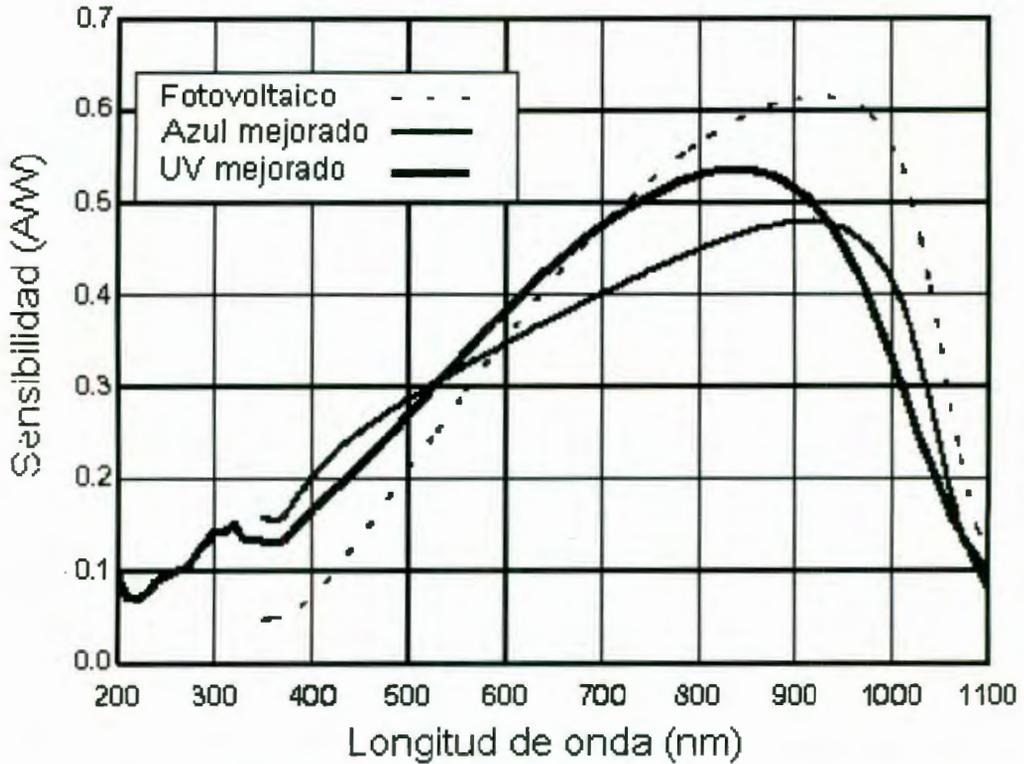


Figura 9.- Sensibilidad espectral típica de algunos tipos de fotodiodos difusos planos.

La sensibilidad se incrementa cuando se le aplica un voltaje inverso de ruptura (voltaje bias) debido al mejoramiento de la eficiencia de colección de carga en el fotodiodo. También hay variaciones de sensibilidad debido a cambios en la temperatura como se muestra en las figuras 10 y 11. Esto se debe al incremento o decremento de la banda prohibida, por el incremento o decremento de la temperatura respectivamente. La respuesta espectral puede variar dependiendo a la longitud de onda. Sin embargo, la variación relativa en respuesta puede ser reducida a menos de 1% en las longitudes seleccionadas. La eficiencia cuántica es definida como el porcentaje de los fotones incidentes que contribuyen a la generación de fotocorriente. Esto es relacionado a la sensibilidad por la ecuación 8.

$$Q.E. = \frac{R_{\lambda \text{ Observed}}}{R_{\lambda \text{ Ideal}}(100\%)} = R_t \frac{hc}{\lambda q} = 1.24 \times 10^3 \frac{R_t}{\lambda} \quad (8)$$

En la ecuación 8 se tienen las constantes:  $h = 6.63 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$ , que es la constante de Planck,  $c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$ , que es la velocidad de la luz,  $q = 1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$ , es la carga del electrón, las variables son:  $R_\lambda$  que es la sensibilidad en A/W y  $\lambda$  que es la longitud de onda en nm.

La no-uniformidad de la respuesta es definida como la variación de la sensibilidad sobre la superficie del área activa del fotodiodo con respecto al incremento de incidencia de luz. La no uniformidad es inversamente proporcional al tamaño del haz de luz que incide, esto es, mayor no-uniformidad cuando el tamaño de haz incidente es menor. Un fotodiodo de silicio es considerado lineal si la corriente fotogenerada incrementa linealmente con la incidencia de la fuente de luz.

La linealidad de la fotocorriente se determina al medir el cambio en la fotocorriente como resultado del cambio en la potencia de la luz incidente como función de la fotocorriente total del sistema o potencia de luz incidente. La no-linealidad en un fotodiodo es la variación de la proporción del cambio en la fotocorriente con respecto al cambio en potencia de luz,  $\Delta I/\Delta P$ . En otras palabras, la linealidad muestra la consistencia de la sensibilidad sobre un rango de potencia de la luz incidente.

La no-linealidad de menos de 1% sobre 6-9 décadas para fotodiodos planos difusos. El límite inferior de la linealidad de la fotocorriente es determina por el ruido de la corriente, el limite superior de la linealidad es determinado por la resistencia en serie y la resistencia de carga.

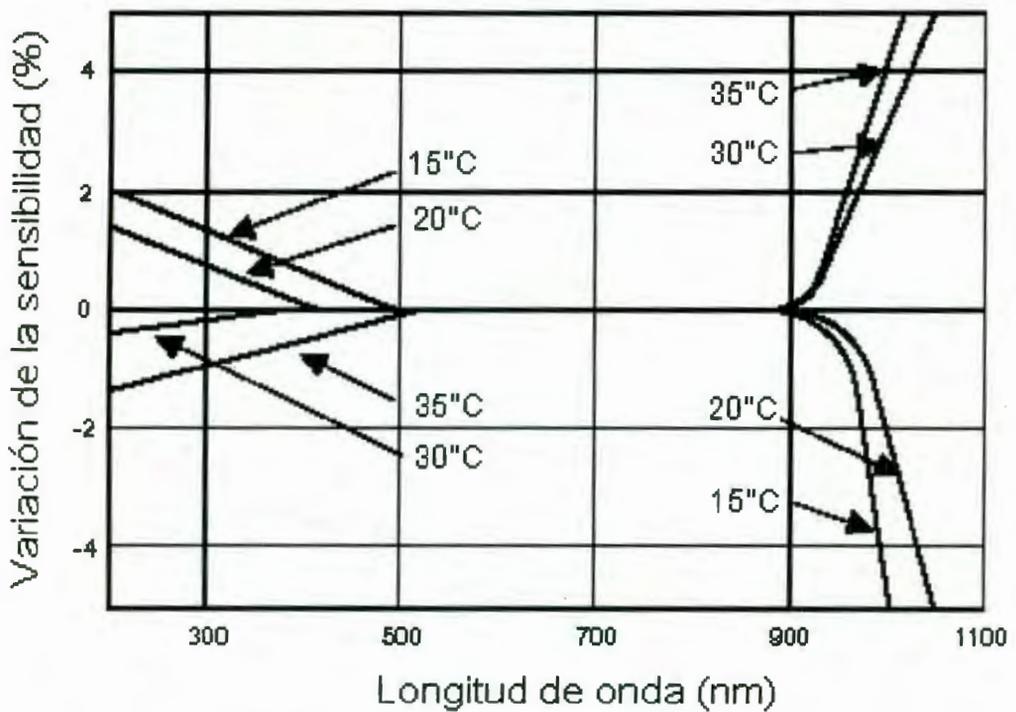


Figura 10.- Dependencia de la temperatura con la sensibilidad.

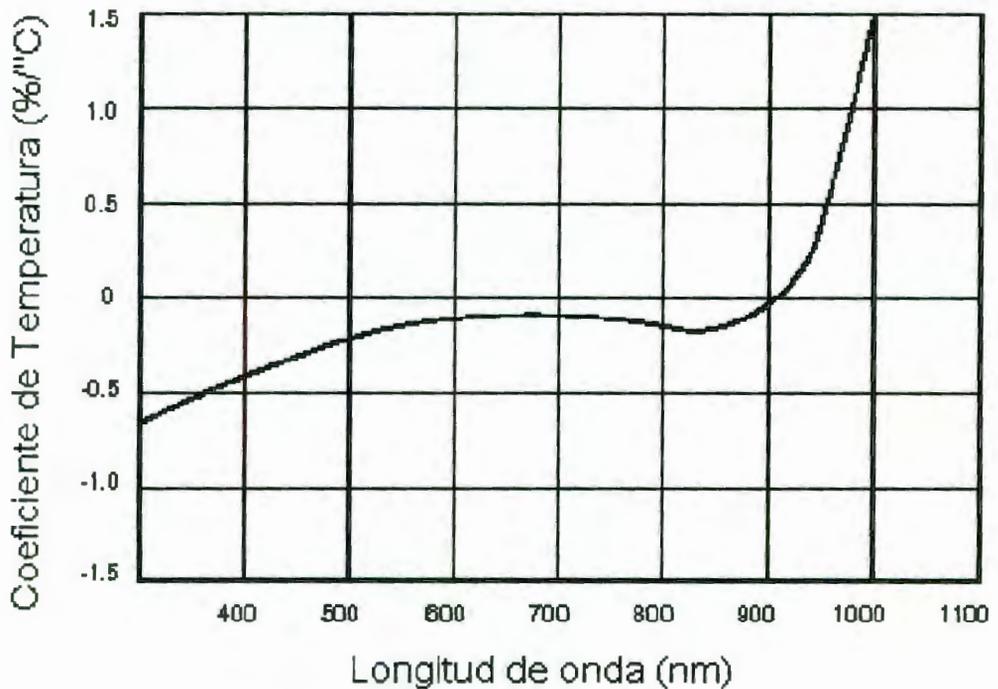


Figura 11.- Coeficiente de temperatura del fotodiodo de silicio.

Cuando la corriente empieza a incrementarse, primeramente se comienza una etapa de no-linealidad, incrementándose gradualmente cuando se incrementa la fotocorriente, y finalmente llega al nivel de saturación, la fotocorriente permanece constante cuando se incrementa la potencia de la luz incidente. En general, en el régimen de no linealidad del detector, el cambio generado en la fotocorriente por el cambio en la potencia de la luz incidente, es despreciable a altos niveles de corriente. El rango de linealidad puede ser escasamente extendido al aplicar un voltaje inverso (voltaje bias) al fotodiodo.

### **II.3.5 Sensores detectores de posición (PSD)**

Los fotodetectores de silicio son comúnmente usados para tomar medidas de la potencia de la luz en una amplia variedad de aplicaciones como son: lectores de códigos de barra, impresoras láser, imágenes para usos médicos, espectroscopia y mas. Hay otra función en la cual se utiliza los fotodetectores como sensores ópticos de posición. Estos nombrados Sensores Detectores de Posición o simplemente PSD. Las aplicaciones practicas son: el monitoreo del movimiento del ojo humano (Cornejo Rodríguez y Cordero Davila , 1980), el modelamiento tridimensional del movimiento humano con láser (Woltring Herman, 1974), el alineamiento de espejos en telescopios (Häusler Gerad y Schneider Gerhard, 1988). Son también muy utilizados en esquemas de enfoque de precisión para una gran variedad de sistemas ópticos, así como los microscopios (MacFarlene , 1991), herramientas de alineamiento (Castañeda Alejandro, 2000), análisis de vibración (Díaz Uribe Rufino, 1997). La posición de un rayo se puede obtener en el rango de los micrómetros usando PSD's (Leclerc y Ozenne, 1991). Los sensores de posición por cuadrantes son divididos en 2 familias: PSD's segmentados y PSD's de efecto lateral (Woltring Herman, 1974).

#### **II.3.5.1 PSD de segmento lateral**

Los PSD's de segmento lateral son fotodiodos de sustrato común divididos en 2 o en 4 segmentos para medidas unidimensionales o bidimensionales respectivamente, separados por una región aislante (dispositivo CMOS). Un rayo óptico simétrico genera una fotocorriente igual en todos los segmentos si este se posiciona en centro del detector (Kalbitzer y Melzer, 1967). La posición relativa es obtenida simplemente al medir la corriente en la salida de cada segmento. Estos sensores ofrecen una posición con una resolución mayor a  $0.1\mu\text{m}$  y una precisión superior al efecto lateral del PSD debido a una mejor respuesta entre los elementos. La resolución de la posición no depende de la relación señal a ruido del

sistema, y como en los PSDs de efecto lateral, la detección de luz de baja intensidad es posible. Los PSDs presentan una excelente estabilidad sobre la temperatura y a rápidos tiempos respuesta para la mayoría de las aplicaciones. Sin embargo tienen algunas limitaciones, una de ellas es que el haz de luz debe pasar sobre todos los segmentos todo el tiempo y el potencial generado no pueden ser menor que el voltaje inverso de ruptura entre los segmentos. Es importante tener una distribución de intensidad uniforme de la mancha de luz para obtener mediciones correctas. Son excelentes dispositivos para aplicaciones como alineamiento y centrado de haces luminosos (Capineri Lorenzo y Massoti Leonardo, 1999).

### **II.3.5.2 PSD de efecto lateral**

Es un solo fotodiodo, que es plano y de buena difusibilidad óptica, sin potenciales de ruptura o áreas muertas. Estos tipos de PSDs proveen una lectura directa de una mancha de luz que se desplaza a través de toda el área activa. Esto se logra al proveer una salida analógica proporcional a la posición y a la intensidad de una mancha de luz que se presenta sobre el área activa del detector. La presencia de una mancha de luz en el área activa generará una fotocorriente, la cual fluye comenzando desde el punto de incidencia del haz y fluye a través de la capa resistiva hasta llegar a los contactos (Klein y Bierig, 1974). Esta fotocorriente es inversamente proporcional a la resistencia entre la mancha de la luz incidente y el contacto. Cuando la mancha de luz es exactamente en el centro del dispositivo, las corrientes generadas son iguales. Al mover la mancha de luz sobre el área activa, la cantidad de corriente generada en los contactos, determinará la posición exacta de la mancha de la luz en cada instante de tiempo. Estas señales eléctricas son proporcionalmente relacionadas a la posición de la mancha de luz desde el centro del detector. La ventaja principal de los diodos de efecto lateral es su amplio rango dinámico. Pueden medir la posición de la luz todo el camino hasta los extremos del sensor. La señal generada puede ser independiente del perfil de la mancha de luz y de la distribución de la intensidad, dado que estos parámetros afectan a la posición de lectura en el diodo segmentado. La luz incidente puede ser de cualquier tamaño y forma, se mide desde la posición del centroide de la mancha de luz, indicando y provee señales eléctricas de salida proporcionales al desplazamiento del haz con respecto extremos del detector. El dispositivo tiene una resolución de mas de  $0.5\mu\text{m}$ . En los dispositivos duo-lateral PSD's hay dos capas resistivas, una en la cima y otra, y se ubican en la parte inferior de fotodiodo. La fotocorriente es dividida en dos partes en cada capa. Este tipo de estructura puede resolver movimientos menores a  $0.5\mu\text{m}$  y tiene un error de posición muy pequeño en casi todo el camino hasta el extremo del área activa.

También tienen una excelente linealidad sobre todo el área activa. Los tetra-lateral PSD's, tienen una sola capa resistiva, en donde la fotocorriente es dividida en dos o cuatro partes para una o dos dimensiones de sensado respectivamente. Estos dispositivos son menos lineales a largas distancias del centro, también tiene mayores errores de detección comparados con los dou-lateral. Si embargo, muestra menores corrientes de oscuridad (dark current) y mayores tiempos de respuesta comparados con los PSD's laterales.

### II.3.5.3 Propiedades eléctricas de los PSD

En primer factor es el error de detección de posición, el cual es definido como la variación geométrica entre la posición actual y la posición medida de la luz incidente. Se mide sobre el 80% de la longitud sensada para PSD's unidimensionales y 64% del área sensada para PSD's bidimensionales. Para todos los cálculos, el punto cero es definido como el centro eléctrico. Este es el punto en al cual la corriente eléctrica de dos electrodos contrarios es igual ( $I_1 = I_2$ ). El error en toda posición es calculado usando la ecuación 9.

$$PDE(\mu M) = \left( \frac{I_2 - I_1}{I_2 + I_1} \right) L - X \quad (9)$$

Donde  $I_1$  e  $I_2$  son fotocorrientes en las terminales del PSD,  $L$  es la longitud media del área de sensado, y  $X$  es el desplazamiento actual de luz desde el centro eléctrico en  $\mu m$ . El porcentaje de no-linealidad en posición es determinado dividiendo el error de detección de posición por la longitud total del área de sensado. La resistencia entre los electrodos es la resistencia entre las dos terminales de contacto en un eje, medido con iluminación, donde en este parámetro existe movimiento debido al cambio en la temperatura. El cambio en la posición es dividido entre la longitud total. El sensor es lineal dentro del 80% para PSDs unidimensionales o 64% del área para PSDs bidimensionales. La resolución es definida como el mínimo desplazamiento detectable de la mancha de la luz sobre el área activa del detector. La resolución es limitada por la señal de ruido en el sistema. Esto depende la intensidad de la luz, del filtro en frecuencia para eliminar el ruido del detector, y de la anchura de la banda prohibida. La resolución de una parte por diez millones de veces es alcanzada por fabricantes de este tipo de sensores.

### II.3.5.4 PSD segmentados

La figura 12 muestra un circuito típico, usado en sensores fotodiodos segmentados.

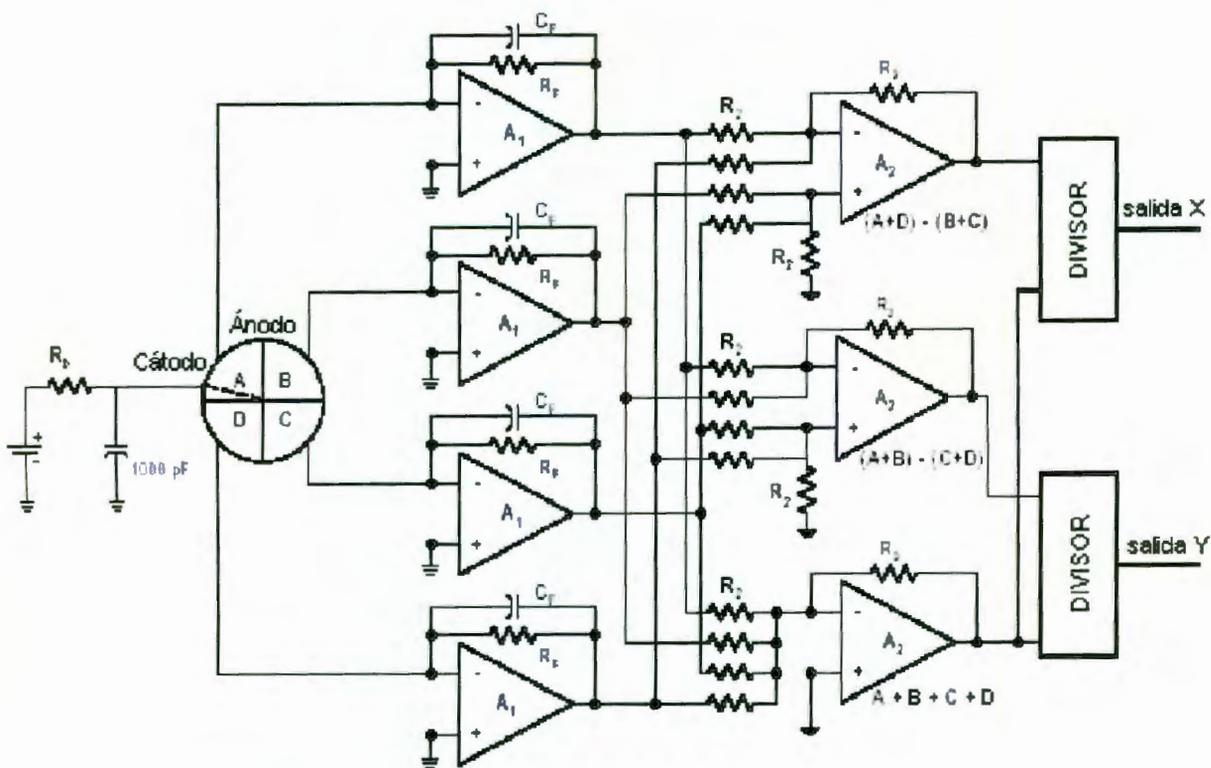


Figura 12.- Típico circuito para fotodiodos segmentados.

La posición X y Y del punto donde incide la luz respecto al centro en un cuadrante del fotodiodo se encuentra por las siguientes ecuaciones:

$$X = \frac{(A+D)-(B+C)}{A+B+C+D} \quad (10 a)$$

$$Y = \frac{(A+B)-(C+D)}{A+B+C+D} \quad (10 b)$$

Donde A, B, C y D son las fotocorrientes medidas por cada sector. Los componentes recomendados para este circuito son: los amplificadores A<sub>1</sub> y A<sub>2</sub> de bajo ruido (OP-37 o similar), divisores de señales (DIV-100 o similar), a su vez usar valores para R<sub>F</sub> y R<sub>2</sub> entre 10kΩ y 10MΩ, así como capacitores de retroalimentación C<sub>F</sub> (con frecuencia de corte 1/(2πR<sub>F</sub>f)). El mismo circuito puede ser usado para mediciones unidimensionales (bi-cell).

### II.3.5.5 Psd's de efecto lateral

Las mediciones de efecto lateral de una dimensión son las mismas para estructuras bilaterales y tetralaterales, ambos cuentan con dos contactos en una superficie, con un contacto común en la parte inferior. En los dispositivos tetralaterales, el contacto común es el ánodo con dos cátodos en la superficie, haciéndolos un generador positivo de corriente. En los dispositivos duolaterales hay dos ánodos en la superficie con un cátodo común en la parte inferior. La figura 13 muestra un circuito típico usado para PSDs de efecto lateral unidimensionales, donde las salidas son primeramente sumadas y restadas, las operaciones finalmente son divididas con un multiplicador analógico. La sumatoria, la substracción y la división pueden ser desarrolladas por software, tomando en cuenta que el multiplicador analógico es un filtro de ruido blanco. La posición resultante es definida por la ecuación 11.

$$X = \frac{A - B}{A + B} \quad (11)$$

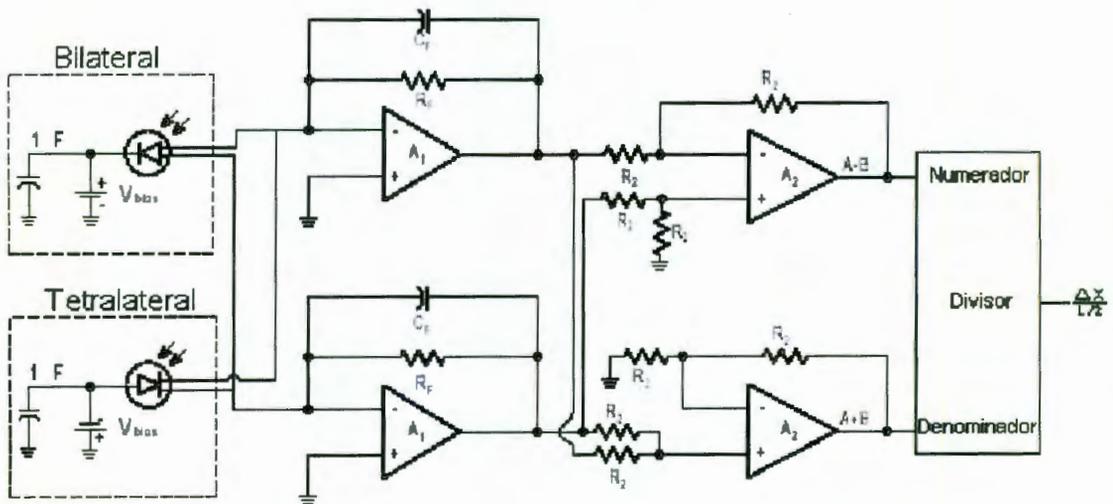


Figura 13.- Circuito típico para fotodiodos segmentados de una dimensión.

Los componentes pueden ser usados en fotodiodos segmentados, considerando  $R_2$  con un rango entre  $1k\Omega$  y  $100k\Omega$ . Para aplicaciones de alta velocidad, las corrientes pueden ser inversas con una pequeña ganancia ( $R_F$ ). Sin embargo, para aplicaciones a menores frecuencias, el fotodiodo puede ser dejado sin voltaje de ruptura inverso y la ganancia puede ser mayor ( $R_F = 100M\Omega$ ). El capacitor de retroalimentación estabiliza la dependencia de la frecuencia con la ganancia y puede variar desde  $1pF$  a  $10\mu F$ . La ganancia en primer amplificador es  $I_P \times R_F$ , y la ganancia del segundo estado es unitaria.

### II.3.5.6 PSD bilaterales de dos dimensiones

Los PSDs bilaterales de dos dimensiones contienen dos ánodos en la superficie y dos cátodos en la superficie contraria del fotodiodo, midiendo posiciones en dos direcciones diferentes respectivamente.

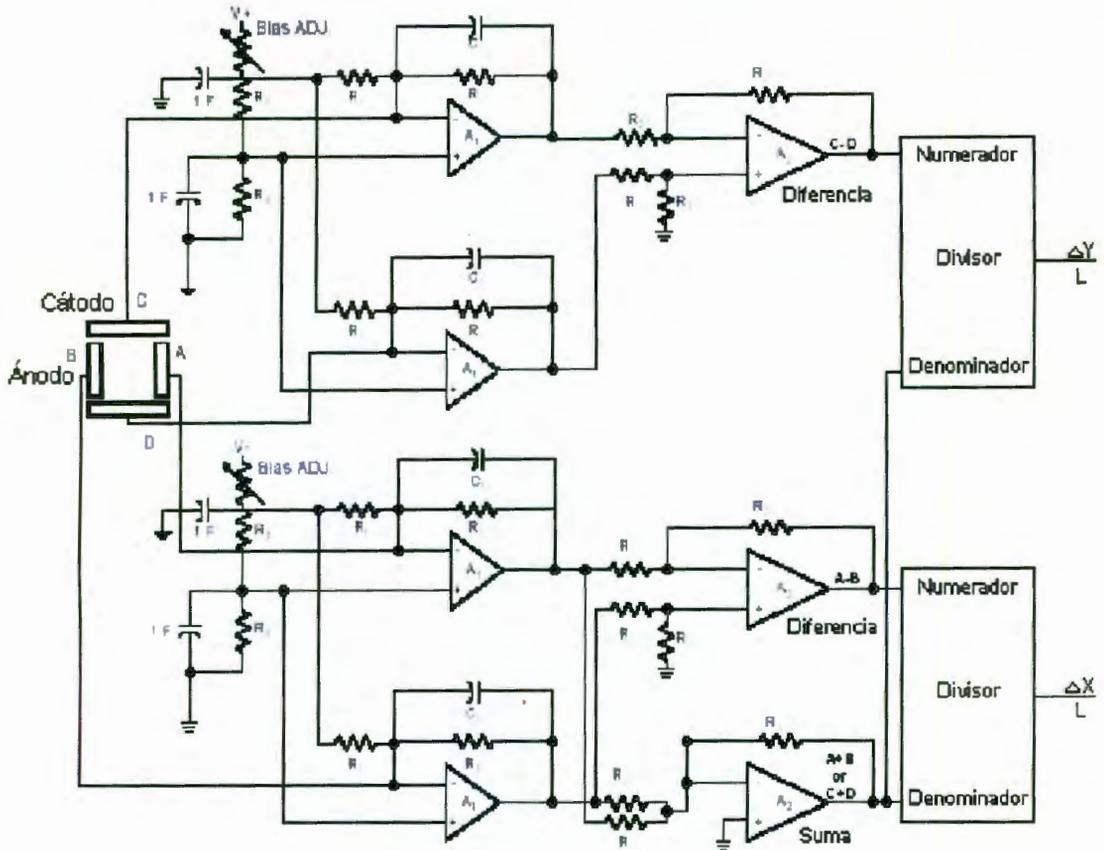


Figura 14.- Circuito para fotodiodos segmentados bilaterales bidimensiones.

Estos dispositivos entregan una lectura de la posición sobre toda el área activa, con una exactitud mas alta que los PSDs tetralaterales. La figura 14 muestra un circuito típico para PSD's de dos dimensiones bilaterales. Para aplicaciones de alta velocidad, a los cátodos se les introduce usualmente un voltaje de ruptura mientras que a los ánodos se les aplica un voltaje de ruptura inverso (bias). Esto extiende el rango del voltaje (bias) que es normalmente limitado por el voltaje inverso máximo. Se recomienda usar los mismos componentes del PSD unidimensional. Las funciones de salida son ecuaciones 12a y 12b.

$$X = \frac{A - B}{A + B} \quad (12a)$$

$$Y = \frac{C - D}{C + D} \quad (12b)$$

### II.3.5.7 PSD tetralaterales

En un PSD tetralateral de dos dimensiones hay cuatro cátodos y un ánodo común.

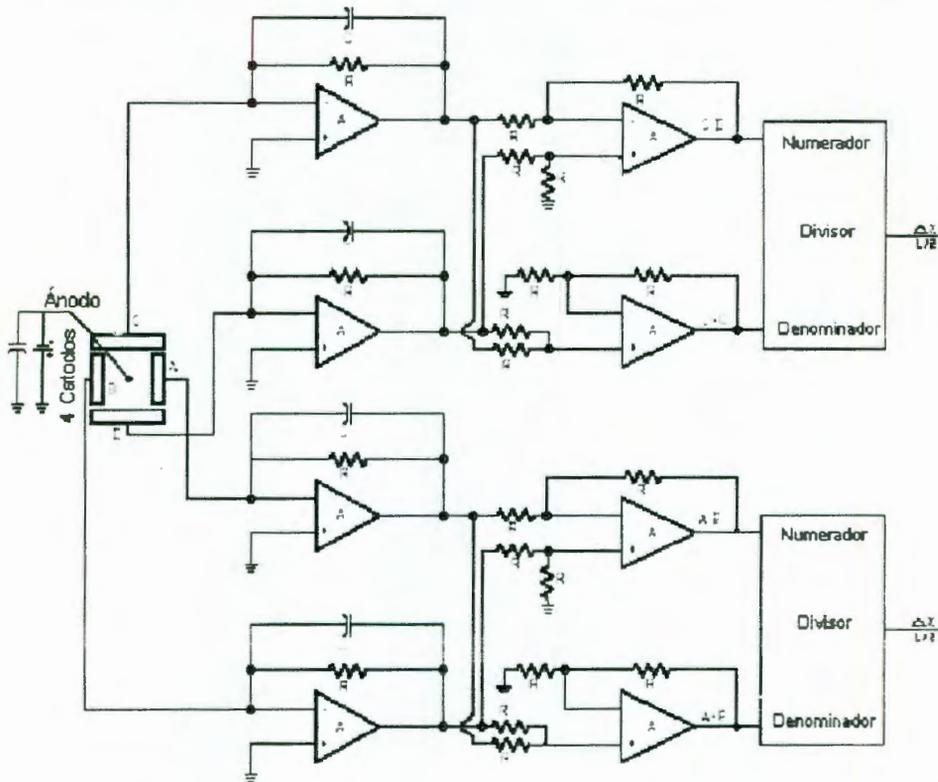


Figura 15.- Circuito para fotodiodos segmentados tetralaterales bidimensiones.

Similar a otros PSDs, las señales provenientes del detector son convertidas a voltaje en la primera etapa, en una segunda etapa son sumadas y sustraídas para finalmente ser divididas en forma analógica. Esto se muestra en la figura 15. Para aplicaciones de alta velocidad, se aplica un voltaje inverso al ánodo (voltaje bias) y se escoge una resistencia de retroalimentación pequeña. Si se desea incrementar la ganancia se deberán insertar etapas de amplificación. Los componentes recomendados y la salida son similares a dispositivos bilaterales de dos dimensiones (ecuaciones 12a y 12b).

### II.3.6. Láser semiconductor

La palabra "láser" es una abreviación de la expresión en inglés que describe a un fenómeno conocido como amplificación de la luz por emisión estimulada de radiación (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation). Los láseres son dispositivos que convierten directamente la corriente eléctrica en luz. Existe una gran variedad de láseres, que van desde los fabricados con materiales semiconductores (diodos láser) hasta de gas (p.ej. He-Ne y Argón). Los diodos láser tienen una enorme importancia tecnológica y forman parte en la elaboración de esta tesis, por que solamente se enfocara sobre estos. La emisión de radiación estimulada consiste en que, suponiendo que se tiene un sistema con  $N$  electrones en el que solamente existen dos niveles energéticos  $E_1$  y  $E_2$  con  $E_2 > E_1$ . La interacción del sistema con un campo de radiación electromagnética incidente es de dos niveles. Se empleará nombre genérico de luz para designar a la radiación electromagnética, independientemente que ésta sea visible o no. Cuando se ilumina el sistema con luz, entre  $E_2$  y  $E_1$  puede ocurrir tres procesos: en el primero la energía del fotón es absorbida por el electrón, llevándolo del nivel energético  $E_1$  al nivel  $E_2$ . En el segundo proceso es el electrón excitado liberado espontáneamente, o al azar, la energía absorbida y emitiendo así un fotón. Este proceso se conoce como emisión espontánea. En el tercero es un fotón propagándose en el medio conteniendo un electrón excitado, puede interactuar con este, obligándole a emitir un nuevo fotón. Al final de este proceso hay dos fotones, en lugar de uno, con la misma dirección de propagación e idénticas características de fase y polarización. A la radiación con estas características se le denomina coherente y al proceso de emisión se le conoce como emisión estimulada. (Figura 16). En el último caso una influencia externa a la que se le llama bombeo (corriente eléctrica, en nuestro caso), la mayoría de los electrones se llevan al nivel superior. A la distribución de electrones en este caso se le conoce como población inversa. Un medio con población inversa absorbe menos fotones y a través de la emisión estimulada, amplifica el número de fotones idénticos; es decir, aumenta la intensidad de la radiación coherente en el medio.

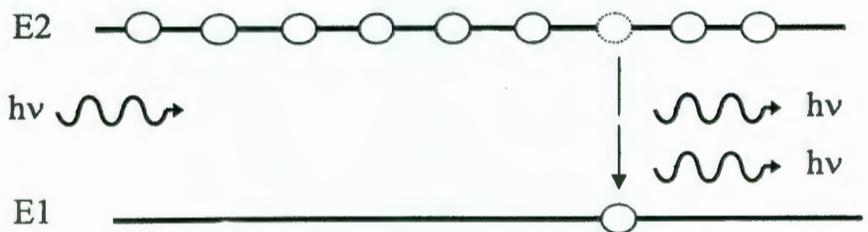


Figura 16.- Inversión de la población.

### 1.3.6.1. Característica potencia contra corriente en un láser

Existe una dependencia de la potencia óptica del láser con la corriente aplicada al mismo.

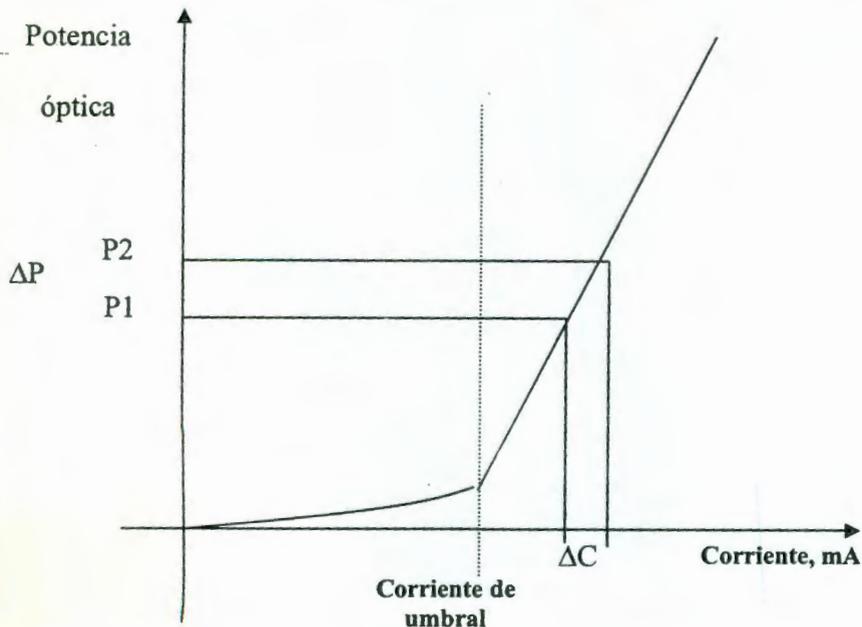


Figura 17.- Gráfica Corriente-Potencia característica de una heterounión.

Esto se puede apreciar en la figura 17 donde es posible determinar la corriente de umbral, sabiendo que antes de ésta, la generación de luz es espontánea y después el tipo de luz generada es luz estimulada; además, se puede medir tanto la máxima potencia de la luz como la efectividad diferencial óptica que viene dada bajo la siguiente relación:

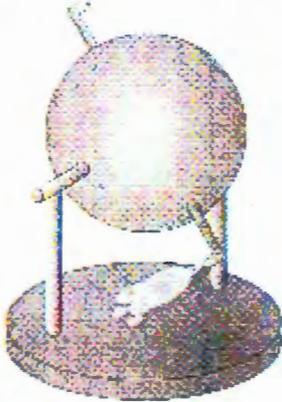
$$\eta_d = \frac{\Delta P_{opt}}{\Delta P_{elec}} \quad (13)$$

La ecuación 13 caracteriza la efectividad de la emisión de la luz láser.

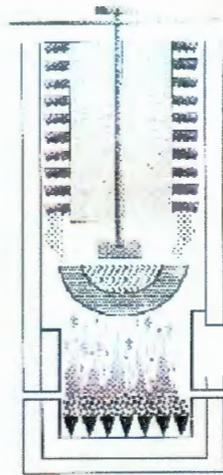
### Antecedentes históricos de la alineación

La trayectoria histórica de la alineación abarca varias disciplinas de la ingeniería, el primer precedente se presentó en el año 100, cuando Herón de Alejandria (año 100 D.C.) describe los principios de la "aeolipile" (maquina rotatoria por combustión como se muestra en la figura 18), una simple máquina de vapor en una turbina, describe palancas, engranajes, movimiento en un plano inclinado,

velocidad y efectos de fricción en un libro de mecánica. El libro de Herón "On the Dioptra" describe un tipo de teodolito y explica ordinariamente figuras geométricas sólidas, secciones cónicas, etc. Roger Bacon (1820) discute el principio de operación del telescopio con el uso de componentes ópticas como vidrios o diafragmas para enfocar objetos a mano, el procedimiento lo describe en su libro "Epistola ad Parisiensem". Leonardo da Vinci (1510) diseña un tanque de agua horizontal, este diseño es patentado por John Dumbell de Inglaterra (ver figura 18). Filde Nanez Salaciense (1540) de Portugal, desarrolla un sistema para promediar la lectura de ángulos para mapas de trabajo. William Gascoine (1639) inventa el micrómetro. La primera estación generatriz propuesta por St. Goerge Lane Fox (1878) de Inglaterra y Tomas Edison (1978) de Estados Unidos de América (EUA). Carl De Laval forma una pequeña reacción de vapor para una turbina a 4200 rpm para separadores como se muestra en la figura 19. DeLaval continuó improvisando para una turbina utilizando un diseño de aspas hiperbólicas.



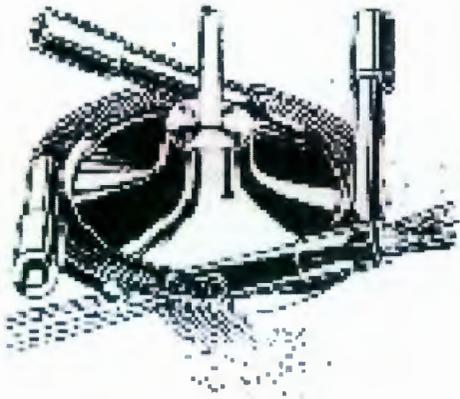
El aeolipile de Herón.



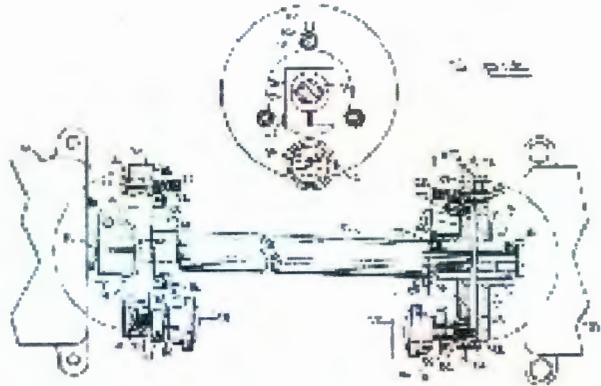
El Smokejack de Da Vincis.

Figura 18.-Primeros artefactos para alineación.

Joseph Cristian (1946) de EUA patenta un diseño de alineación usando métodos de medición fase a fase. Robert Voss (1946) de EUA patenta un diseño de alineación usando métodos de medición fase periferia (rim), posteriormente, Joseph Christian (1949) de EUA patenta un diseño de alineación utilizando un método de medición doblemente radial como se muestra en la figura 20. Malcolm Murray (1973) de EUA patenta una máquina posicionadora, Donald Bently (1975) de EUA patenta un diseño para alinear, utilizando pruebas con base en mediciones de proximidad. Malcolm Murria (1985) de EUA patenta un sistema de alineación usando un método de indicación inverso (figura 21).

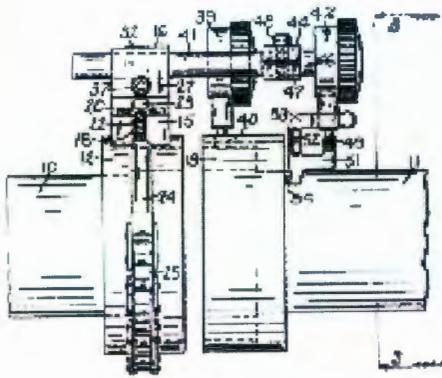


Turbina DeLaval

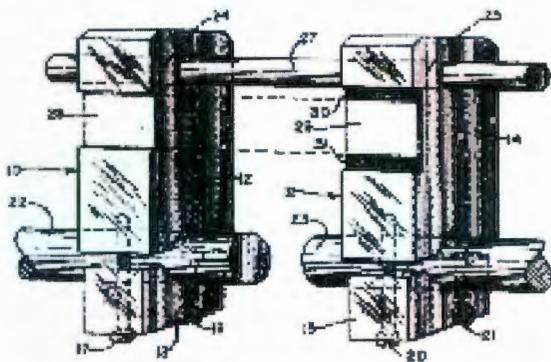


Diseño de Christian para alineación.

Figura 19.- Primeras maquinas con sistema de alineación.

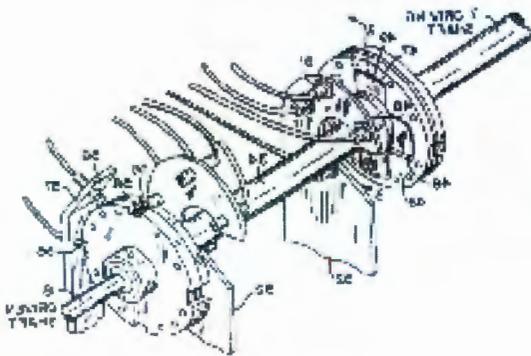


Diseño de Voss para alineación

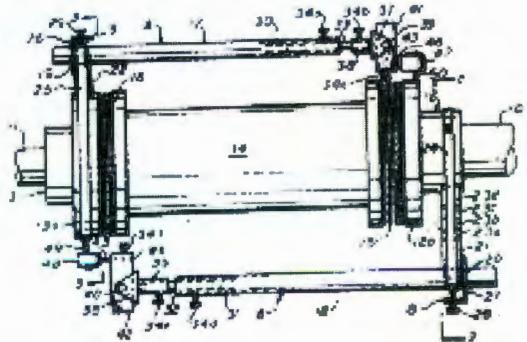


Diseño de Callahan para alineación.

Figura 20.- Primeras sistemas con métodos de alineación.



Diseño de Bently para alineación.



Diseño de Murray para alineación.

Figura 21.- Primeras patentes con métodos de alineación.

Jhon Zatezalo (1984) de EUA patenta un sistema electrónico para calcular la alineación en ejes o flechas de transmisión para movimiento, patentando dos años después su trabajo por una variedad de métodos para la alineación en ejes o flechas de transmisión.

Heinrich Lysen (1987) de EUA patenta un sistema de alineación basado en un láser, un detector y un prisma. Brian Morrisey de EUA patenta un diseño para posicionamiento horizontal, tres años después, Malcolm Murray de EUA patenta por medio de la manipulación de un vernier la medición del fin de movimiento lineal en una maquina por mediciones numéricas.

Dieter Bush (1991) de EUA patenta un sistema constituido por un láser, un detector y un prisma la medición del fin de un movimiento lineal de una máquina por método numérico. Paul Saunders de EUA patenta un sistema electrónico de alineación utilizando contadores ópticos.

## **II.5.- El posicionador automático**

El principal objetivo de este dispositivo es manipular la muestra hasta mantener la superficie del cristal lo más perpendicular posible a su eje de giro, o bien, obtener una alineación para la superficie bajo prueba, es decir, hacer coincidir el eje de giro de la muestra con la normal del plano óptico de incidencia formado por el haz incidente, el haz reflejado y la normal de la muestra. Para esto, un sistema mecánico permite el posicionamiento de un disco, sobre el cual descansa la muestra a alinear. A su vez el disco, tiene como referencia un sistema óptico, obteniendo la posición relativa de la muestra dentro de arreglo experimental. Tanto la etapa óptica como la parte mecánica están interconectadas electrónicamente y se retroalimentan por una PC. El sistema manipula la superficie de la muestra en forma automática mediante un algoritmo. Los ángulos que conforman el sistema de alineación, se muestran esquemáticamente en la figura 22.

Esta tesis está desglosada de la siguiente forma: en el capítulo III se describe el diseño, la construcción el funcionamiento del sistema de alineación, conteniendo la circuitería correspondiente a las partes: óptica y mecánica, así como la caracterización del arreglo óptico utilizado para la alineación. En el capítulo III se presenta el algoritmo el procedimiento para la alineación experimental del sistema. La evaluación del sistema de alineación con el procedimiento correspondiente al capítulo anterior se trata en el capítulo IV. Finalmente las pruebas, las aplicaciones, así como las conclusiones se dan en el capítulo IV. Algunas instrucciones de programación para el sistema, características de los dispositivos y esquemáticos se encuentran descritos en el apéndice A.

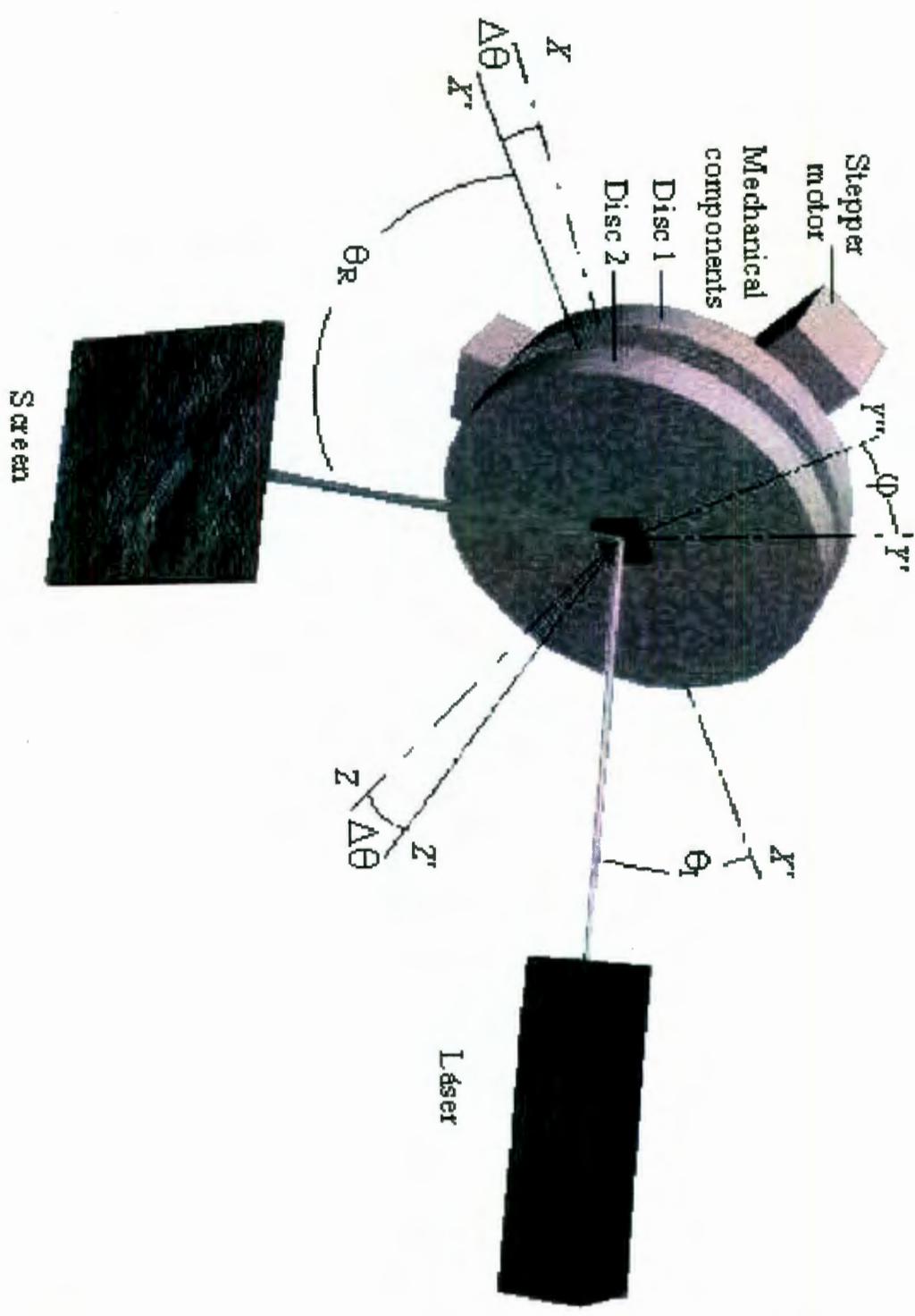


Figura 22.- Sistema mecánico y óptico para la alineación automática de muestras.

### III.- DISEÑO DEL POSICIONADOR

#### III.1.- Sistema de alineación

Para manipular la orientación de este sistema, se tiene un sistema mecánico de posicionamiento, donde los desplazamientos son controlados mediante motores de pasos acoplados a guías giratorias micrométricas, obteniendo micro pasos ( $10^{-6}$ m).

Por otra parte, el desplazamiento generado por el desplazamiento mecánico es registrado en un sistema óptico, donde se pueden detectar las desalineaciones de la muestra, mediante el uso de un detector de luz por cuadrantes en conjunto con un láser de He-Ne ( $\lambda=632$  nm), donde el láser incide en forma oblicua sobre la superficie de la muestra. El arreglo experimental permite, que la luz reflejada por la superficie de la muestra sea colectada por el detector.

El proceso de alineación consiste en manipular los desplazamientos de los motores mediante la proyección del láser sobre el detector, mismo que obtiene las coordenadas de la posición actual de la muestra. Así, al existir una desalineación y al girar la superficie de la base con respecto al sistema fijo, el haz reflejado formará un cono y por lo tanto, proyectará un patrón circular en el área activa del detector por cuadrantes, generándose así cuatro fotocorrientes.<sup>11</sup> Las foto corrientes son procesadas y digitalizadas mediante una etapa de adquisición y analizadas en una computadora personal, la cual retroalimenta a la etapa de control de los motores de paso, para posteriormente manipular la inclinación de la superficie de la muestra y de esta manera lograr que el haz que está incidiendo sobre el detector converga en un punto. En la figura 23 se muestra la interconexión del sistema de alineación con sus diversas etapas y respectivos componentes.

Nótese que en este capítulo se describen básicamente, tanto los componentes de cada tarjeta como las respectivas conexiones para el funcionamiento del sistema de alineación.

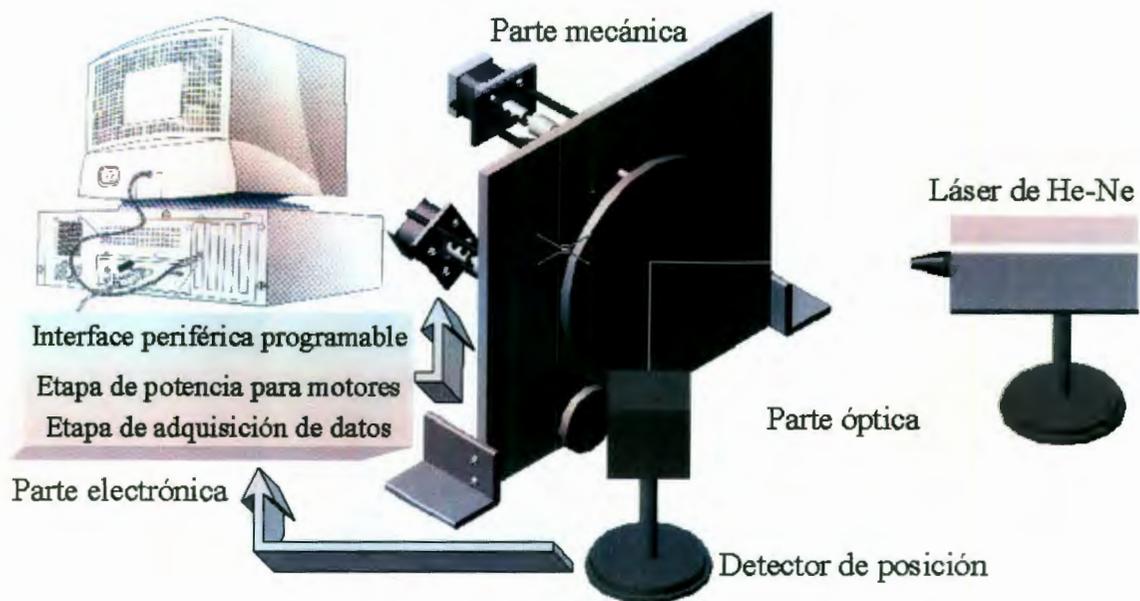


Figura 23. - Sistema de alineación mostrando sus componentes ópticos y mecánicos.

### III.2.- Sistema mecánico de microposicionamiento

En el sistema mecánico de posicionamiento para la muestra, se producen por medio de motores de pasos, pequeños desplazamientos de la orientación de la muestra ( $\theta$ ), a su vez, se manipula la rotación de la base que contiene el cristal con respecto a una base fija ( $\varphi$ ). Este sistema está constituido por cuatro motores de paso controlados electrónicamente, de los cuales tres son para alinear la base del plato y uno es para girar la muestra azimutalmente respecto al ángulo  $\varphi$  (ver figura 22).

#### III.2.1 – Base giratoria

Sobre la base giratoria se coloca la muestra que se desea alinear. Se emplean 3 tornillos micrométricos con resolución de 12 micrómetros, dispuestos a 120 grados sobre la plataforma giratoria. Cada tornillo micrométrico está acoplado a un motor de pasos. Además están fijos sobre una base metálica (ver figura 24), la cual sirve como base del sistema. El motor encargado de desplazar la base tiene un giro mínimo de 1.8 grados con respecto a su posición anterior, el cual introduce un movimiento giratorio por medio de engranes, con una relación entre el motor y la base giratoria de 2:1, necesitando así de 100 pasos para lograr una ciclo entero. Por otra parte los motores encargados de alinear la base son acoplados a guías micrométricas de 635  $\mu\text{m}$  por vuelta. El desplazamiento relativo de los motores es de

0.9 grados por paso, lo que equivale a un avance lineal con una resolución de aproximadamente  $1.1 \mu\text{m}$  por paso, siendo éste el desplazamiento mínimo de posicionamiento que se aplica a la base giratoria. La base giratoria está a su vez unida a la base fija y rota libremente con la ayudada de una rótula, la cual tiene una fricción mínima al aplicar el movimiento. Los elementos mecánicos que conforman esta parte se muestran con detalle en el apéndice A.

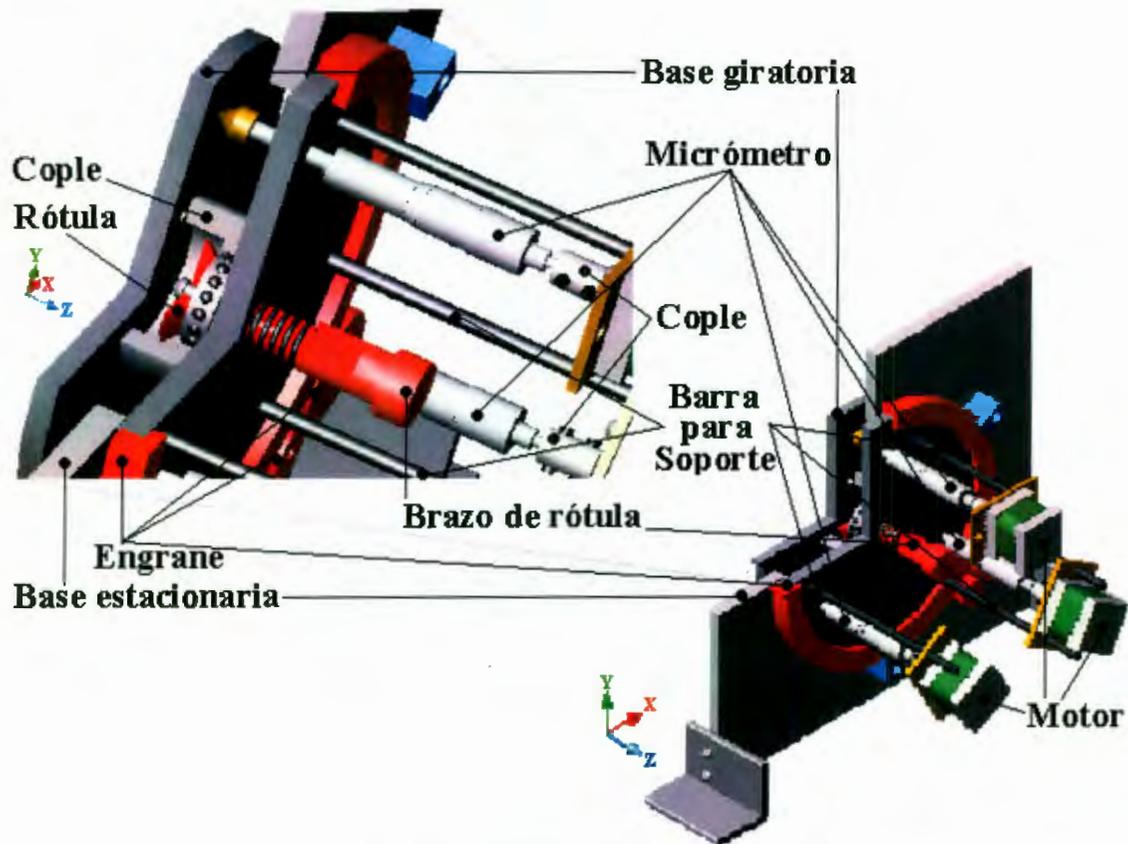


Figura 24. – Visualización de los principales elementos del sistema de alineación que conforman la parte mecánica (nótese el corte para mostrar la parte posterior).

Por otra parte, el control de los pasos, así como el tiempo de magnetización por fase y el sentido de rotación del motor se realiza por medio de programación, donde sus fases son conectadas a las líneas de los puertos de una Interface Periférica Programable (IPP), la cual a su vez es conectada a una de las ranuras del puerto paralelo de la computadora.

### III.2.2. – Etapa de potencia

La etapa de potencia es la parte analógica que se encarga de recibir las señales obtenidas por los puertos de la IPP transformándolas en señales de potencia para los 4 motores de paso. Para el excitamiento de los motores se usan dos diferentes salidas de voltaje, una de 12 Vdc correspondiente a los 3 motores para la alineación de la base y otra de 5 Vdc para el motor encargado del rotamiento. Las señales encargadas del excitamiento de las fases de los motores provenientes de la IPP son acopladas en forma óptica, esto último con el fin de aislar la tierra entre la PC (con señales del orden de los mili amperes) y la etapa de potencia (del orden de 0.5 Amperes). Unas resistencias de base ( $1\text{ K}\Omega$ ), se encargan de hacer que los transistores de potencia operen en la región de saturación. Los transistores de potencia sirven como conmutadores para el voltaje de saturación de las fases del motor a mover. En este arreglo, las fases de los motores se conectaron entre el colector de transistores y la fuente de voltaje, conectando además en paralelo con un diodo, lo cual mantienen la corriente por fase y asegura que la posición del motor quede magnetizada.<sup>13</sup>

Es conveniente considerar que como la resistencia de cada fase del motor es muy pequeña ( $\sim 2.4\Omega$ ), después de cierto tiempo de magnetización de una fase, el paso de la corriente (0.5 A) calienta esta etapa. Esto fue solucionado colocando un pequeño ventilador de 12 Vdc/15 mA en la parte superior del sistema el cual funciona mientras el sistema este conectado.

Otro aspecto importante es que la cantidad de potencia entregada a la carga depende de si la magnetización es de una o dos fases del motor a la vez, tomándose en cuenta que para obtener medios pasos se magnetizan 2 fases del motor al mismo tiempo y a pasos enteros se magnetiza únicamente una de las fases del motor, por lo que para el caso de medios pasos se consume el doble de potencia suministrada que para un paso entero. Las conexiones entre las líneas que corresponden a las fases de los motores y los transistores de potencia con sus respectivos diodos protectores, se hicieron a través de un conector de 25 pines.

### III.3. - Descripción del sistema óptico

Del conocimiento indirecto de la posición de un haz luminoso, así como de los cambios que haga éste de manera temporal y/o espacial, es posible construir sistemas de detección u corrección utilizando, por ejemplo, un láser comercial; v. gr. radios de curvatura, rugosidad superficial, ángulos internos y otros parámetros de la superficie bajo prueba. Una de las aplicaciones más interesantes y de importancia central

en este trabajo, es la de adquirir los desplazamientos espaciales de la muestra con referencia al cambio de la posición del láser, desde la observación indirecta sobre una pantalla,<sup>14</sup> para así identificar si la muestra se encuentra alineada o desalineada con respecto de la base fija. Los componentes de este sistema son: un detector de posición por cuadrantes<sup>14-15</sup> y una etapa electrónica de adquisición.

### III.3.1. – El detector de posición

En este caso es necesario, tal y como se discutió en el capítulo uno, que la posición del láser sea siempre localizada en un sistema de referencia dentro del arreglo experimental. Para lograr esto es necesario contar con un dispositivo que tenga buena precisión y que posea un área grande de detección comparada con las posibles desviaciones inducida por la desalineación primaria, siendo éste un detector de posición. El detector usado es de tipo duo-lateral, el cual contiene cuatro electrodos colocados en las fronteras del dispositivo, esto con la finalidad de captar dentro del área activa del dispositivo cualquier difusión de portadores generados por la radiación incidente, detectando así las posibles variaciones con respecto de dos ejes (X e Y). Estos a su vez, contienen dos electrodos que son opuestos uno de otro, permitiendo así dividir nuestro detector en cuatro cuadrantes, definiendo un electrodo para cada posible dirección ( $X^+$ ,  $X^-$ ,  $Y^+$ ,  $Y^-$ ) como se muestra en la figura 25.

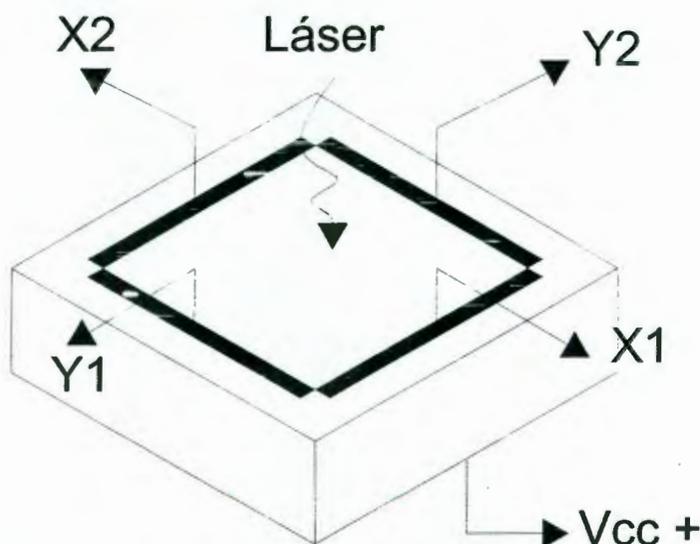


Figura 25.- Esquema del área activa del detector duo-lateral.

Este tipo de detector contiene dos regiones, una de tipo  $n$ , la cual se polariza inversamente por medio de un voltaje positivo, facilitando así la conducción, y otra de tipo  $p$ , que contiene los cuatro electrodos y la región donde incide el láser. Cuando este diodo es iluminado, genera portadores fotogenerados en la región  $p$ , éstos se difunden en el material y al cerrarse un circuito externo que conecte las regiones  $n$  y  $p$ , generan una corriente de portadores fotogenerados<sup>16</sup> sobre la región  $p$  que tiende a moverse hacia la fuente de voltaje a través del dispositivo. Este camino corresponde a los cuatro electrodos que se conectan a la fuente, siendo un proceso de reciclaje de portadores de carga. El proceso de reciclaje a través de la fuente para el caso de dos electrodos a lo largo de un eje se ilustra en la figura 10, siendo el mismo principio para los cuatro electrodos correspondientes a los dos ejes. La corriente de cortocircuito que pasa a través de los electrodos es interceptada por la resistencia interna de las entradas de un amplificador operacional (AOP),<sup>16</sup> ver siguiente sección. El detector se muestra en el apéndice B.

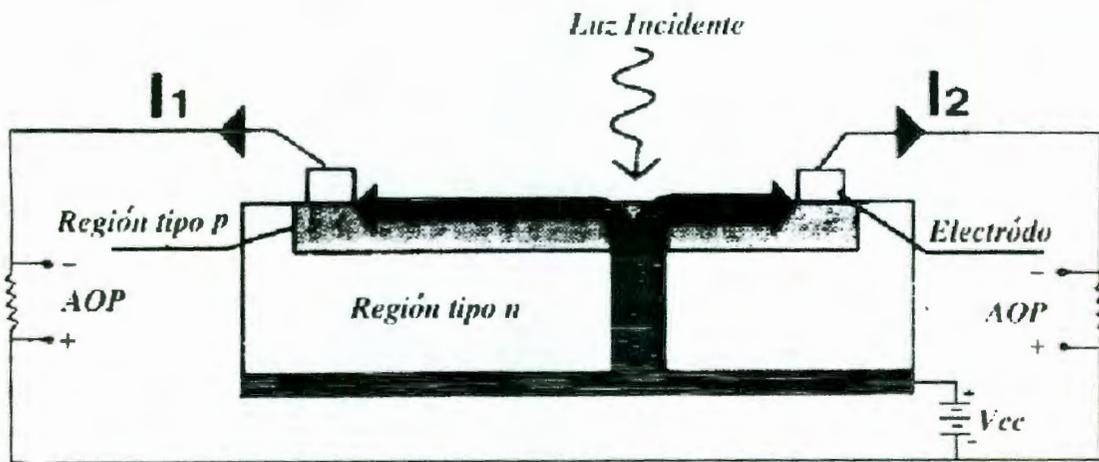


Figura 26.- Principio del funcionamiento para dos electrodos del detector duo-lateral.

Como se puede observar en la figura 26, el principio de detección en cuanto a la posición del láser sobre el detector consiste en que dependiendo de la distancia recorrida de los portadores generados hacia los electrodos, es la fracción de fotocorriente máxima por cuadrante que se entrega a cada una de las posibles direcciones. Por esto se puede definir un centro eléctrico para una dirección entre dos electrodos opuestos. Cuando sus dos fotocorrientes ( $I_1$  e  $I_2$ ) son iguales, se tiene la mitad de la distancia entre ambos electrodos. Considerando que por fluctuaciones en la intensidad del láser, el centro de nuestro detector puede ser falseado, es necesario normalizar estas fotocorrientes, multiplicándolas por un factor

de ajuste, para obtener una fotocorriente máxima por cada electrodo, permitiendo conocer la posición de la mancha luminosa mediante una fracción de esta corriente. Con lo anterior, se tiene la corriente resultante independiente de las fluctuaciones en la intensidad del láser.

### III.3.2 Adquisición de las señales del detector de posición

La etapa de adquisición es la que transforma las señales analógicas originadas por la incidencia del láser sobre el detector a señales digitales por medio de un convertidor análogo a digital (ADC), para que de esta manera puedan ser interpretadas por la computadora.

### III.3.3 Etapa de conversión de corriente a voltaje

Como el sensor trabaja como una fuente de corriente, es necesario convertir estas señales a voltajes. El arreglo que permite hacer esta conversión de señal se muestra en la figura 27. Este circuito es básicamente un convertidor de corriente a voltaje con algunas modificaciones. La resistencia de retroalimentación ( $R_F$ ) es el parámetro que establece tanto la ganancia como el ancho de banda del arreglo. Como se observa en la figura 27, se tiene un capacitor ( $C_F$ ) en paralelo a la resistencia ( $R_F$ ), este arreglo permite limitar la respuesta a bajas frecuencias y elimina picos de saturación en el detector.

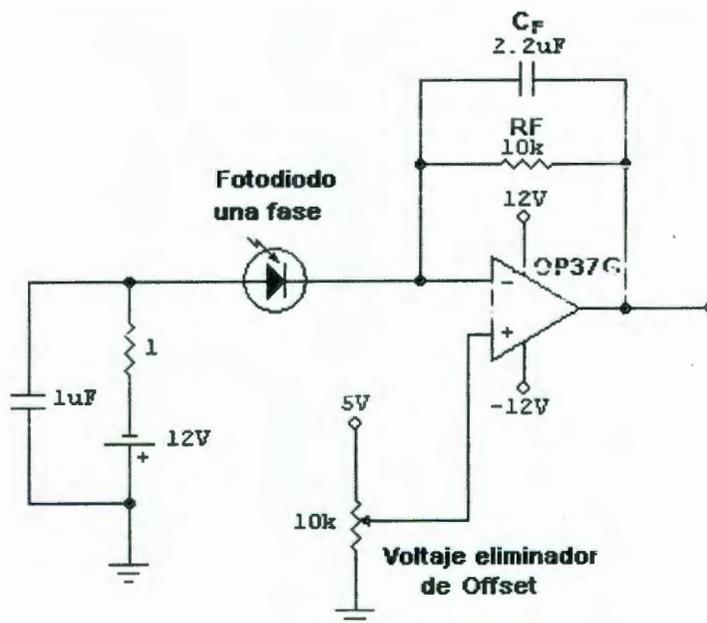
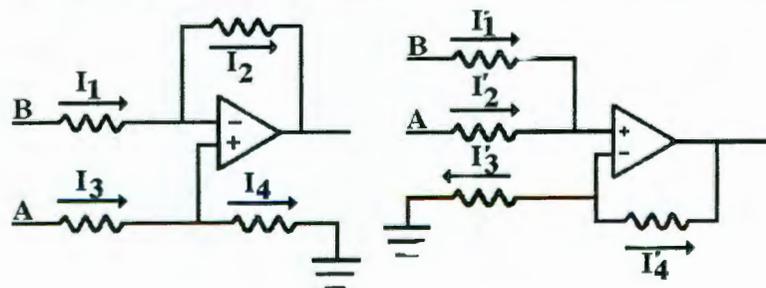


Figura 27. - Etapa de integración de la señal.

Teóricamente estos sensores no presentan un nivel de referencia (offset), pero el dispositivo presenta un nivel de voltaje diferente para cada eje. Al poner la configuración como se reporta en la literatura, la señal no resulta del todo igual a la esperada, el voltaje experimental tiene una componente negativa, la cual la mueve a la señal por debajo del cero y creando problemas para la detección del centro del sensor. Debido a esto, se optó por sumar a la señal un voltaje proporcional al error, para de esta forma tener la señal de salida con un origen desde cero volts por eje. Debido a las magnitudes en potencia luminosa que excitan el sensor ( $\sim 10\text{mW}$ ), las señales de salida del detector son del orden de microamperes, razón por la cual se utilizó un amplificador con una ganancia de lazo cerrado muy alta y con un porcentaje de ruido muy pequeño. Los amplificadores operacionales (opamps) que se usaron para la conversión de corriente a voltaje son OPA37GZ de ultrabajo ruido, cuyo ancho de frecuencias es grande, ruido intrínseco es pequeño y tiene una baja corriente de polarización ( $5\text{ pA}$ ). Además cuenta con entrada tipo FET lo que permite amplificar sin problemas de ganancia. Nótese que el fotodiodo equivale a un electrodo del detector de posición. Se utilizan voltajes de alimentación de  $\pm 12\text{ Vdc}$  para los opamps y  $5\text{Vdc}$  para alimentar tanto el detector de posición así como el ADC.

### III.3.4 Normalización del detector de posición

Es necesario normalizar las señales que nos proporciona el sensor, ya que estas por si solas presentan desproporción y ruidos en la posición. La normalización de la señal a lo largo del eje X y del eje Y, consiste en restar las dos señales adquiridas por los electrodos del eje correspondiente y dividir las entre la suma de los mismos, las ecuaciones 12a y 12b describen este comportamiento. Para implementar las ecuaciones en circuitos físicos se emplean algunos circuitos tradicionales que se muestran en la figura 28. Estas se encargan de sumar o restar voltajes de electrodos puestos a las entradas de los AOP.



Primera configuración, AOP restador. Segunda configuración, AOP sumador.

Figura 28. - Configuración de los amplificadores normalizadores.

La primera configuración de la figura 28 se resuelve de la siguiente manera:

$$I_1 = \frac{B - V_x}{R}, \quad (14)$$

$$I_2 = \frac{V_x - V_{0x}}{R}, \quad (15)$$

$$I_3 = \frac{A - V_x}{R} \quad (16)$$

e

$$I_4 = \frac{V_x - 0}{R}. \quad (17)$$

Igualando las corrientes  $I_1$  e  $I_2$ ,  $I_3$  e  $I_4$ , despejando  $V_x$  y resolviendo se obtiene:

$$V_{0x} = A - B. \quad (18)$$

Así mismo, para la segunda configuración de la figura 28 tenemos:

$$I_1' = \frac{B - V_x}{R}, \quad (19)$$

$$I_2' = \frac{A - V_x}{R}, \quad (20)$$

$$I_3' = \frac{V_x - 0}{R}, \quad (21)$$

e

$$I_4' = \frac{V_x - V_{0x}'}{R}. \quad (22)$$

Igualando las corrientes  $I_1'$  e  $I_2'$ ,  $I_3'$  e  $I_4'$ , despejando  $V_x$  y resolviendo tenemos:

$$V_{0x}' = A + B. \quad (23)$$

De igual forma, para el eje Y de los resultados de la ecuación 18 y la ecuación 23 tenemos:

$$V_{0y} = C - D. \quad (24)$$

$$V_{0y}' = C + D. \quad (25)$$

Donde A, B, C y D son las fotocorrientes medidas en cada sector. Para realizar la división se utilizó el circuito MPY634. Este circuito no solamente hace la división sino también la resta. La ecuación 26 muestra el comportamiento a la salida del divisor.

$$V_{out} = \frac{10(A - B)}{A + B} \quad (26)$$

Nótese que se tiene un factor de ganancia de 10, por lo que la señal de salida fluctúa entre -10V y 10V. Estos valores son adecuados para el convertidor analógico digital que trabaja en estos rangos. El efecto de aplicar la ecuación 26 al sensor (ver figura 29), se genera una respuesta lineal, segmentándolo como se muestra en la figura 30.

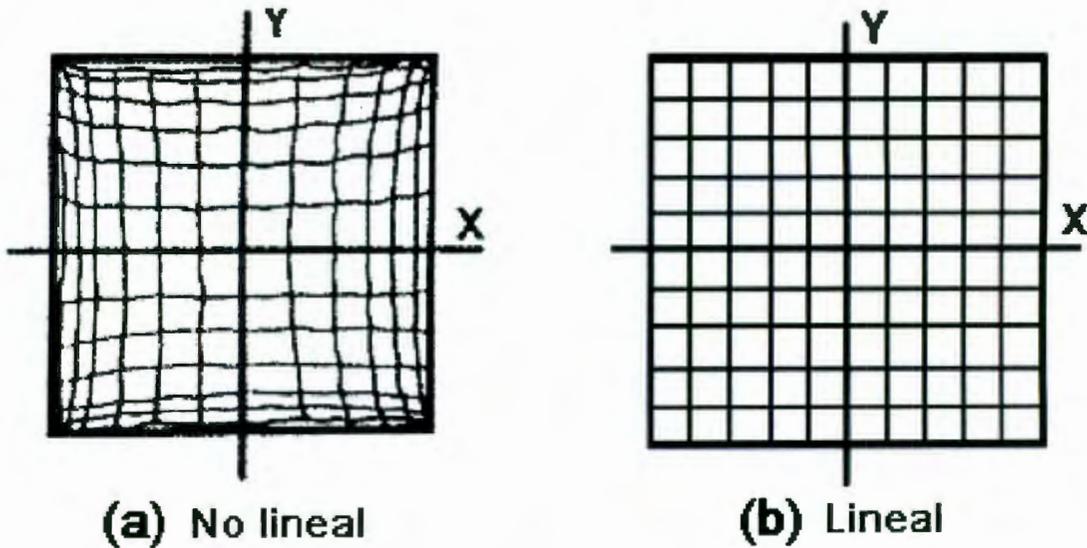


Figura 29.- Respuesta del sensor ante un régimen no lineal (a) o lineal (b).

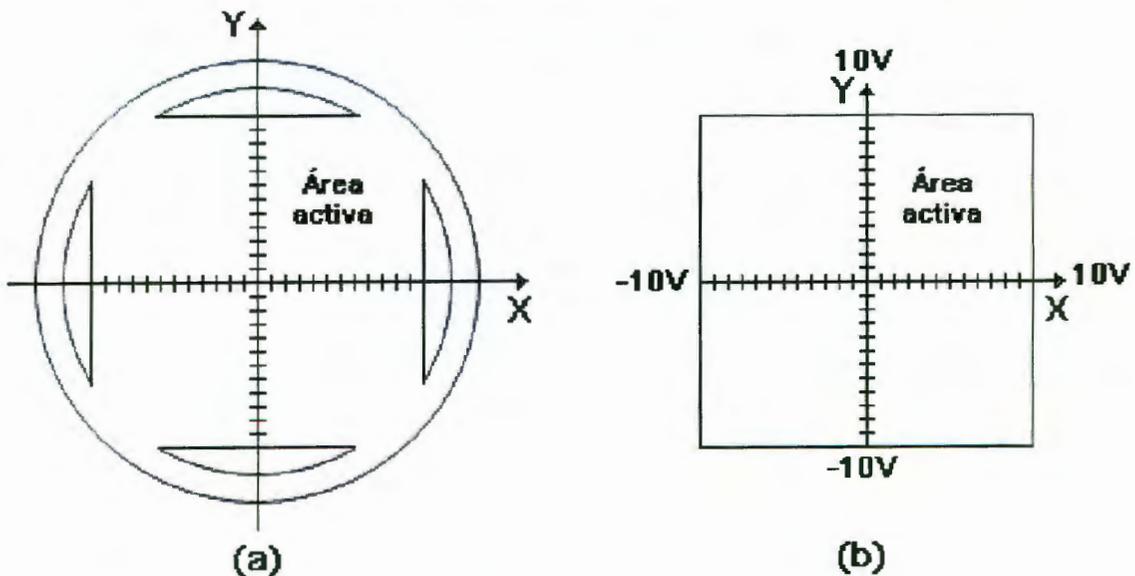


Figura 30.- Área activa del sensor de posición por cuadrantes UDT SC-50D.



### III.3.5 Conversión análoga a digital

Cuando se obtienen las señales del sensor, es necesario introducirlas a la PC. Para tal tarea se utiliza el convertidor analógico digital (ADC), que ofrece una resolución de 0.305 mV/bit. Este dispositivo tiene una resolución de 65,536 niveles (16 bits) y contiene instrucciones para: congelar datos, inicio de conversión y solicitud del byte (8 bits) bajo o alto cuando se requiera. El circuito realiza la adquisición de la posición del haz sobre la superficie de detector, transformando la señal analógica a digital. Una vez digitalizada la señal, se procede a enviar la información a la computadora en forma binaria, este proceso se muestra en la figura 32.

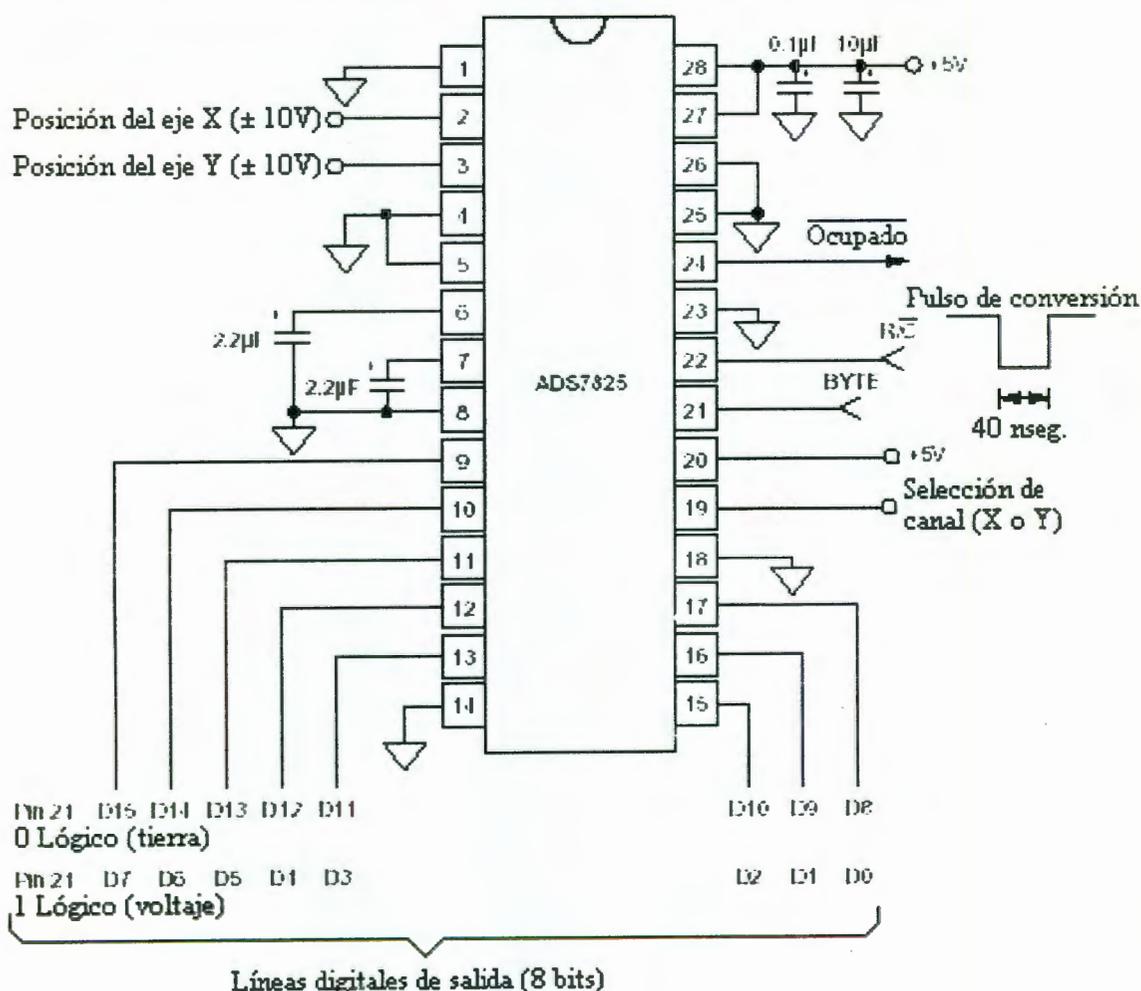


Figura 32.- Conexión del ADC para discretizar la posición del haz laser.

### III.3.6 Respuesta del detector de posición por cuadrantes.

Para obtener la respuesta del detector en función de la posición del haz que incidente en la superficie de éste, es necesario contar con una gráfica de la fracción de la fotocorriente normalizada vs posición. Esto se logra desplazando el haz a lo largo de un eje y midiendo en sus extremos correspondientes, donde para el caso de la resta se tiene una respuesta proporcional al desplazamiento sobre su eje y para la suma la respuesta al desplazamiento sobre el detector es siempre un valor constante. La fracción de fotocorriente normalizada del detector al desplazar el láser a lo largo de cada eje se muestra en las figuras 33 – 34. Nótese que estas gráficas corresponden a la ecuación de una recta.

$$\frac{\Delta I}{I} = \frac{I_X^+ - I_X^-}{I_X^+ + I_X^-} = 0.98 * X \left( \frac{\text{UA}}{\text{cm}} \right) - 1.01 \text{ (UA)} \quad (27)$$

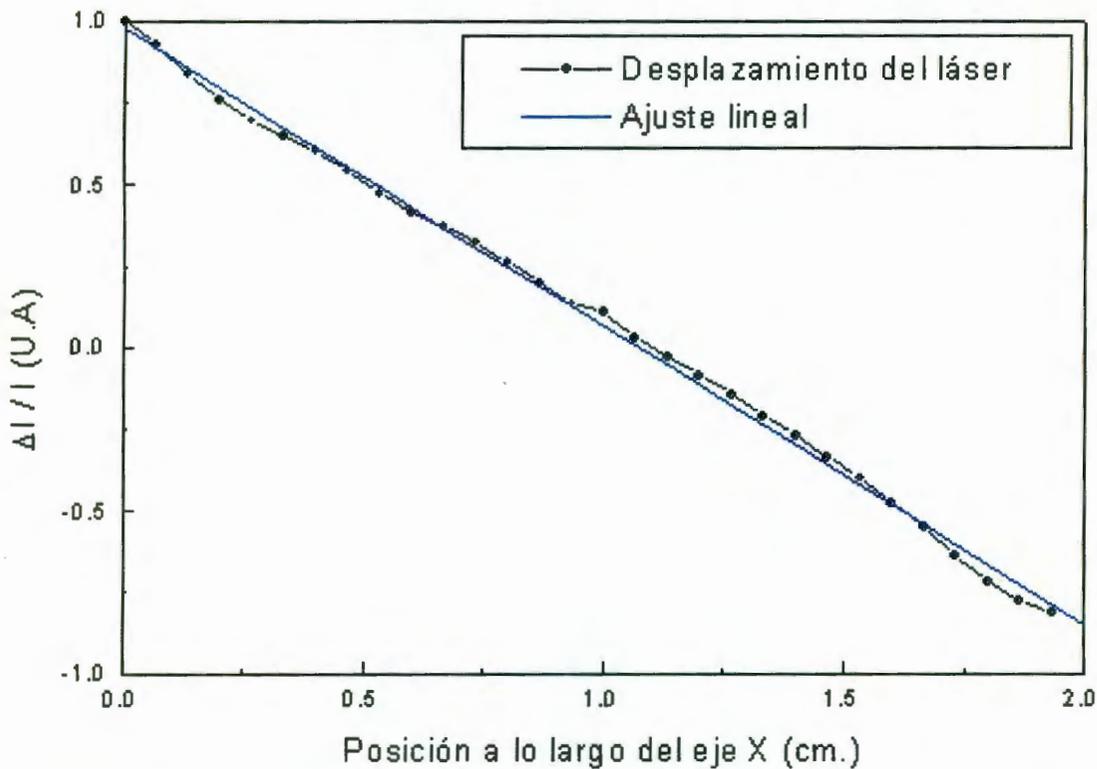


Figura 33.-

Fracción de fotocorriente máxima normalizada correspondiente a los electrodos del eje X en función del desplazamiento horizontal del detector de cuadrantes. La escala completa horizontal corresponde a la dimensión completa del detector (~2 cm).

$$\frac{\Delta I}{I} = \frac{I_Y^+ - I_Y^-}{I_Y^+ + I_Y^-} = 0.96 * X \left( \frac{\text{UA}}{\text{cm}} \right) - 0.98 \text{ (UA)} \quad (28)$$

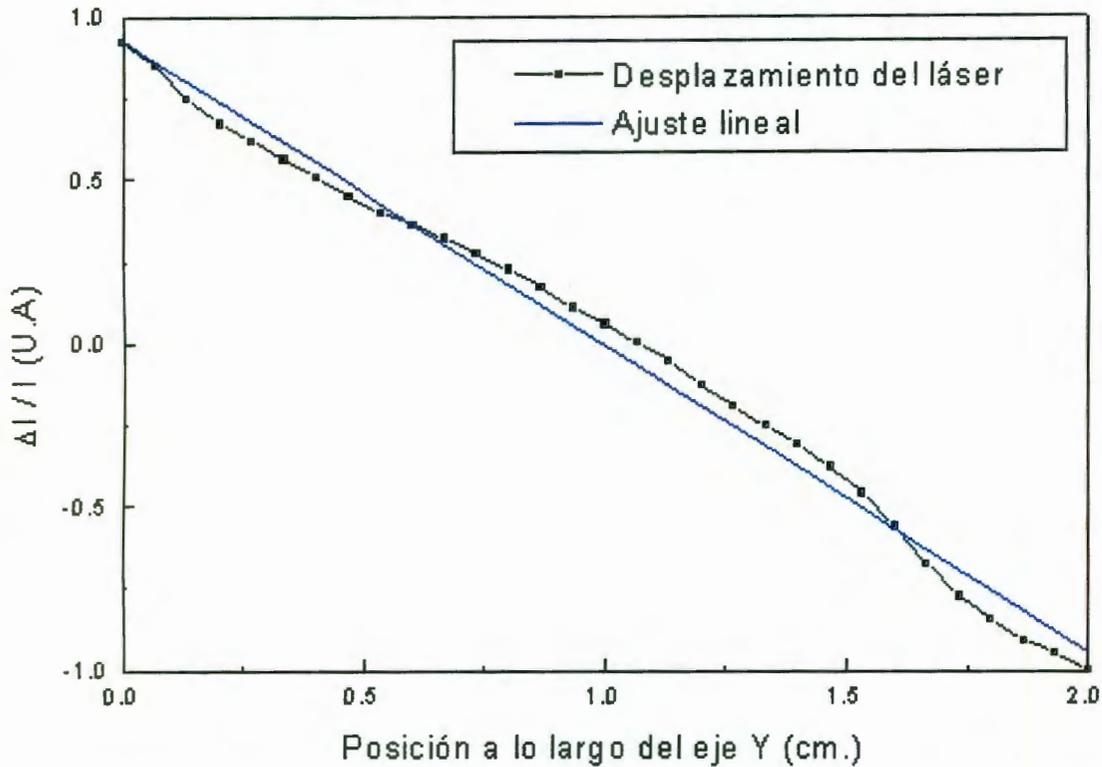


Figura 34.-

Fracción de fotocorriente máxima normalizada correspondiente a los electrodos del eje Y en función del desplazamiento vertical del detector de cuadrantes. La escala completa horizontal corresponde a la dimensión completa del detector (~2 cm).

### III.4. – Tarjeta de control

El funcionamiento del sistema lo controla una computadora personal (PC), la cual envía una serie de señales a los motores del sistema de microposicionado mecánico y adquiere la señal del CAD correspondiente a la parte óptica. Para lograr esto, utilizamos una interface de comunicación digital, la cual se conecta a una de las ranuras del puerto paralelo de la computadora, la interface Periférica Programable (PPI) controla los datos entre la PC y los dispositivos externos. Puesto que los datos que entran y salen de sus puertos son programables, se utiliza la PPI en el modo 0, ya que en este modo los

puertos trabajan de manera independiente. Se tienen dos tarjetas, una para la parte mecánica y otra para la parte óptica.

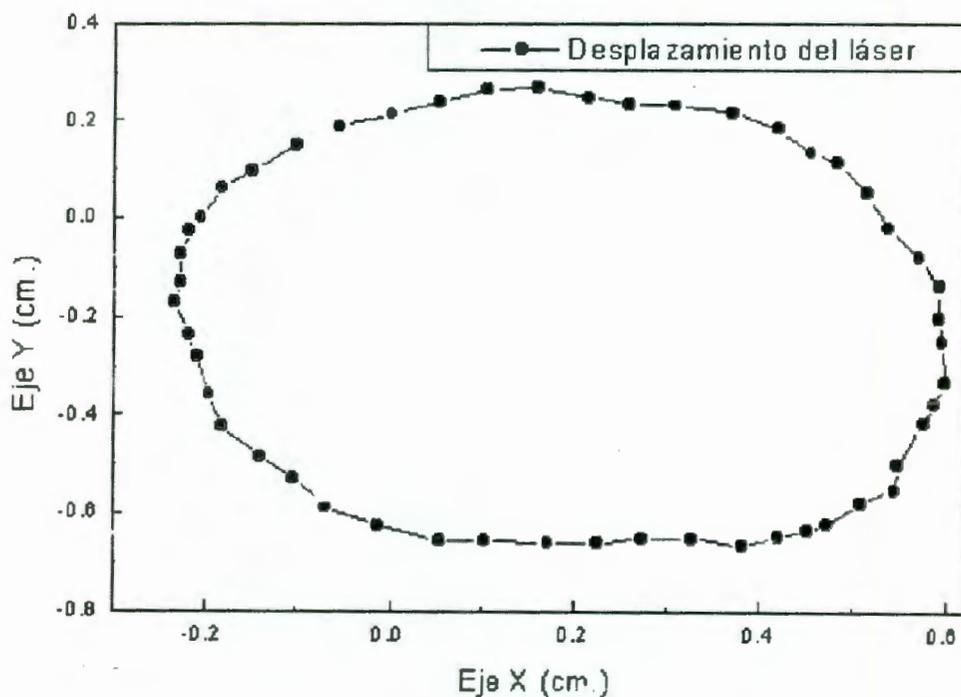
Los puertos utilizados en la parte mecánica para transmitir estas señales son los bits de salida ( $A_0 - A_7$ ) del puerto A, así como los bits de salida ( $B_0 - B_7$ ) del puerto B provenientes de la IPP, donde estos bits son posteriormente optoacoplados, con la finalidad de aislar las señales correspondientes a la PC de la corriente y del voltaje para la etapa de potencia. Las líneas provenientes de la IPP y de la etapa de potencia tienen la misma ubicación en ambos lados, usando para la intercomunicación de datos entre las dos tarjetas un conector con 50 pines, los cuales corresponden a los puertos A, B, C y tierra de la computadora. Los motores de alineación del plato de la muestra corresponden a los 4 bits menos significativos ( $B_0 - B_3$ ), los 4 bits más significativos ( $B_4 - B_7$ ) del puerto B y los 4 bits menos significativos ( $A_0 - A_3$ ) del puerto A. Para el motor de rotación de la base usamos los 4 bits más significativos ( $A_4 - A_7$ ) del puerto A.

En la parte óptica se reciben las señales provenientes del CAD, el cual funciona mediante la técnica de "half-flash" y tiene una resolución de 16 bits ( $D_0 - D_{15}$ ). Los bits generados tienen sus líneas conectadas los bits correspondientes del puerto B ( $B_0 - B_7$ ) de la IPP. El CAD también contiene la posibilidad de multiplexar cuatro canales, permitiendo así controlar la selección del canal por medio de tres bits ( $C_0 - C_2$ ) del puerto C. La señal analógica transformada a digital inicia su conversión por medio del  $\overline{RD}$ . Ésta se retiene por medio del  $\overline{WR}$  el proceso entre ambas líneas es conmutado conectando a la línea correspondiente al  $\overline{RD}$  una compuerta inversora para el  $\overline{WR}$ , la línea del  $\overline{RD}$  está conectada a la línea  $A_0$  del puerto A de la tarjeta de la IPP, permitiendo así un control programado de esta línea. En cuanto a tiempo de lectura, se tiene un tiempo de retardo por programación de 1ms, siendo el tiempo mínimo para la conversión del CAD.

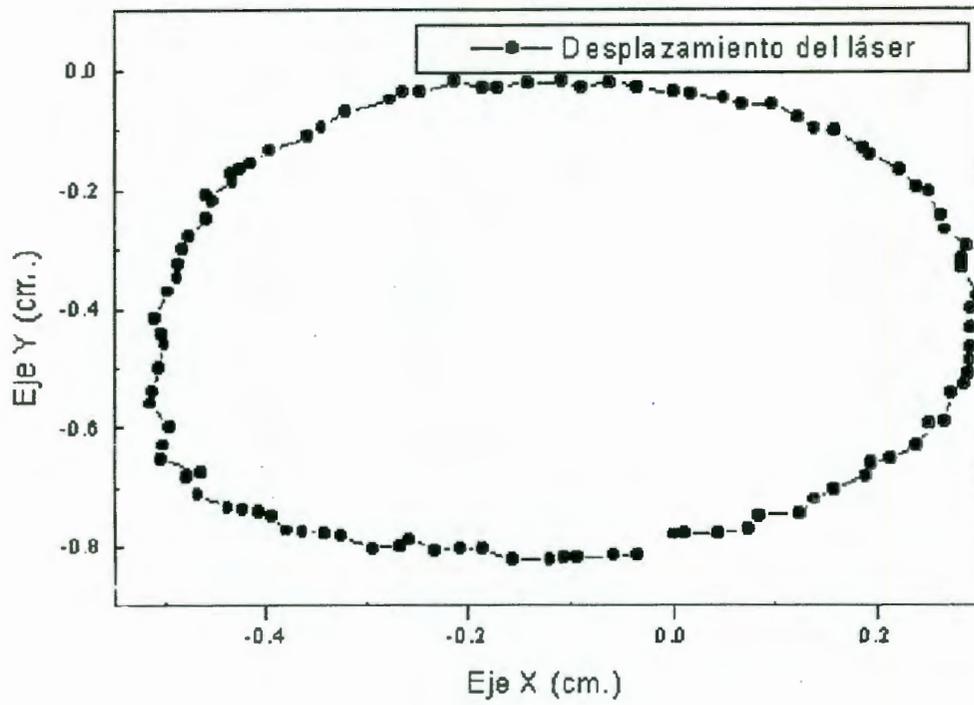
### III.5.- Caracterización del sistema

En esta sección se muestran y discuten las figuras trazadas por la reflexión del láser sobre la muestra. El láser incide en la pantalla del detector por cuadrantes, determinando así la forma de los patrones generados. Por otra parte, la suma y división para la obtención de la posición del láser se hace por medio de programación, donde la señal adquirida de cada uno de los electrodos del detector es

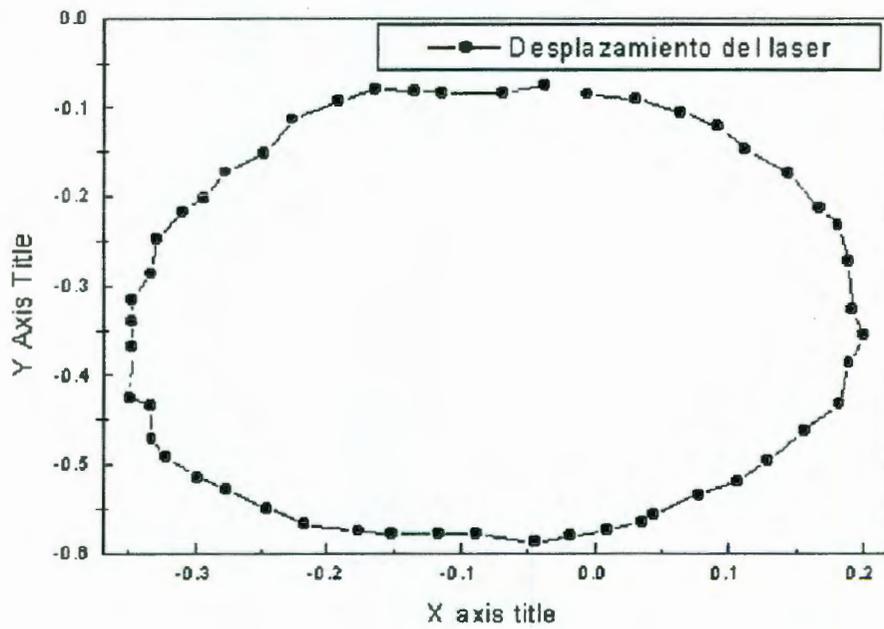
amplificada y ocupa un canal del CAD. Debido a que estas señales deben estar dentro del rango de conversión del CAD, usamos a la entrada de cada canal del CAD una etapa con un amplificador no inversor con ganancia de 5.5, donde por la resolución del CAD se tiene una sensibilidad de  $\sim 305 \mu\text{V/bit}$ , siendo ésta el límite para graficar y maniobrar resultados en la PC. Para probar el funcionamiento de la mecánica y la parte óptica del sistema, se coordinó la respuesta de dos tarjetas (potencia y adquisición), haciéndose girar controladamente la muestra en pasos alrededor de su normal y coordinándose al mismo tiempo la lectura por paso con el CAD, obteniéndose una serie de figuras, que por lo general son de tipo semielípticas. Estas son presentadas en la figura 35, en donde cada figura se asemeja a lo que se obtendría experimentalmente en el laboratorio al girar la muestra desalineada. Nótese que cada punto puesto en las gráficas corresponde a la lectura del CAD por paso del motor de rotación, siendo en general 50 pasos para lograr una vuelta.



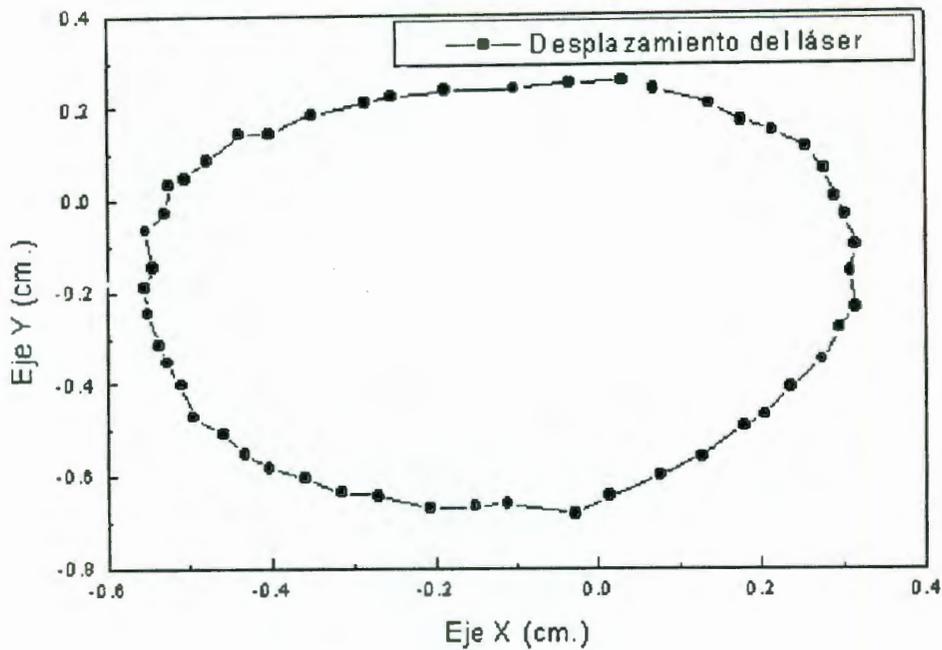
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 35.- Trayectorias bidimensionales generadas por el haz del láser al rotar la muestra alrededor de su normal.

### III.6.-Algoritmo para determinación del centroide de la elipse

En el siguiente algoritmo se propone tomar como referencia dos figuras geométricas, una elipse y un círculo, considerando que se pueden relacionar aplicando un escalamiento del radio con respecto al eje X y al eje Y de un círculo con el correspondiente semi-eje mayor y menor de la elipse.

Una vez teniendo la figura, se puede que obtener el centro de la misma, el cual conforma un punto fijo que sirve como sistema de referencia. El punto puede coincidir con el origen de las coordenadas bidimensionales (0,0). Para obtener un escalamiento de la figura generada por la trayectoria del láser se inscribe un círculo de radio unitario con centro en el origen. Enseguida se define una elipse, la cual contiene su propio radio para el eje X a partir de su centro llamado  $S_x$ , así como para el eje Y llamado  $S_y$ . Estos vectores tienen origen  $(X_0, Y_0)$  llamado en este caso, "centroide de la figura", siendo estos vectores los que se relacionan con el escalamiento del círculo con radio unitario, el cual se encuentra situado en el origen como se muestra en la figura 36.

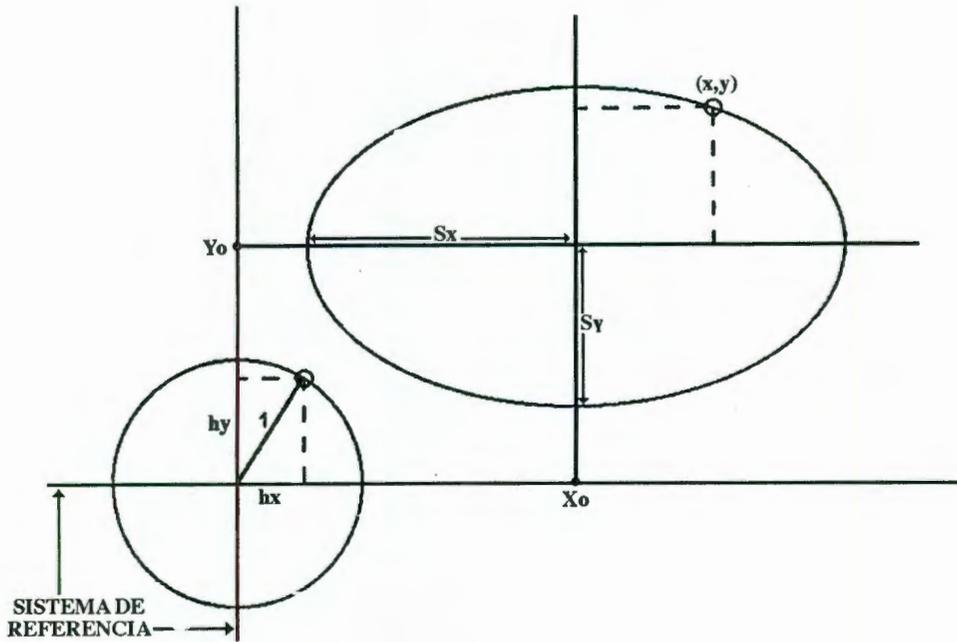


Figura 36.- Escalamiento de un círculo a una elipse.

Para la determinación del centroide se propone lo siguiente: basándose en que la ecuación del círculo unitario está dada por:

$$hx^2 + hy^2 = 1, \quad (29)$$

y considerando el escalamiento para un primer punto  $(x_1, y_1)$  de la elipse se tiene que:

$$x_1 = hx(Sx) + X_0, \quad (30)$$

$$y_1 = hy(Sy) + Y_0, \quad (31)$$

donde de las ecuaciones (30) y (31) se despeja  $Sx$  e  $Sy$  respectivamente. Sustituyendo en la ecuación (29), se obtiene finalmente:

$$\frac{(x_1 - X_0)^2}{Sx^2} + \frac{(y_1 - Y_0)^2}{Sy^2} = 1. \quad (32)$$

La propuesta de este algoritmo es tomar cuatro puntos, los cuales deben ser sucesivos y distanciados lo máximo entre ellos. De igual forma que para el primer punto, se obtienen las ecuaciones de un segundo punto  $(x_2, y_2)$ , un tercer punto  $(x_3, y_3)$  y un cuarto punto  $(x_4, y_4)$ . Estas ecuaciones son:

$$\frac{(x_2 - X_0)^2}{Sx^2} + \frac{(y_2 - Y_0)^2}{Sy^2} = 1, \quad (33)$$

$$\frac{(x_3 - X_0)^2}{Sx^2} + \frac{(y_3 - Y_0)^2}{Sy^2} = 1, \quad (34)$$

$$\frac{(x_4 - X_0)^2}{Sx^2} + \frac{(y_4 - Y_0)^2}{Sy^2} = 1. \quad (35)$$

Igualando la ecuación (32) y la ecuación (33), definiendo el parámetro  $K = Sx^2/Sy^2$ , se tiene que:

$$a_1(X_0) + b_1K(Y_0) + c_1K = d_1. \quad (36)$$

Análogamente, para la ecuación (36), se obtiene una segunda ecuación dada por la igualación de un segundo punto  $(x_2, y_2)$  con un tercer punto  $(x_3, y_3)$ , y una tercera ecuación igualando un tercer punto  $(x_3, y_3)$  con un cuarto punto  $(x_4, y_4)$ , obteniendo:

$$a_2(X_0) + b_2K(Y_0) + c_2K = d_2, \quad (37)$$

$$a_3(X_0) + b_3K(Y_0) + c_3K = d_3. \quad (38)$$

Finalmente, de la ecuación (36), ecuación (37) y ecuación (38) se obtiene un sistema de tres ecuaciones con tres incógnitas, en donde los términos  $a_i$ ,  $b_i$ ,  $c_i$  y  $d_i$  son:

$$a_i = 2(x_i - x_{i+1}). \quad (39)$$

$$b_i = 2(y_i - y_{i+1}). \quad (40)$$

$$c_i = -(y_i^2 - y_{i+1}^2). \quad (41)$$

$$d_i = (x_i^2 - x_{i+1}^2). \quad (42)$$

Donde  $i = 1, 2, 3, 4$ . Ordenando en forma matricial estas ecuaciones tenemos:

$$\begin{vmatrix} a_1 & b_1 & c_1 \\ a_2 & b_2 & c_2 \\ a_3 & b_3 & c_3 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} X_0 \\ K(Y_0) \\ K \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} d_1 \\ d_2 \\ d_3 \end{vmatrix}. \quad (43)$$

$$X_0 = \frac{d_1(b_2c_3 - b_3c_2) - b_1(d_2c_3 - d_3c_2) + c_1(d_2b_3 - d_3b_2)}{a_1(b_2c_3 - b_3c_2) - b_1(a_2c_3 - a_3c_2) + c_1(a_2b_3 - a_3b_2)}, \quad (44)$$

$$K(Y_0) = \frac{a_1(d_2c_3 - d_3c_2) - d_1(a_2c_3 - a_3c_2) + c_1(a_2d_3 - a_3d_2)}{a_1(b_2c_3 - b_3c_2) - b_1(a_2c_3 - a_3c_2) + c_1(a_2b_3 - a_3b_2)}, \quad (45)$$

$$K = \frac{a_1(b_2d_3 - b_3d_2) - b_1(a_2d_3 - a_3d_2) + d_1(a_2b_3 - a_3b_2)}{a_1(b_2c_3 - b_3c_2) - b_1(a_2c_3 - a_3c_2) + c_1(a_2b_3 - a_3b_2)} \quad (46)$$

De lo anterior se pueden obtener los parámetros de la elipse, uno de estos es el centroide de la figura. En efecto, de la ecuación (32), ecuación (33), ecuación (34) y ecuación (35), se tiene que:

$$S_x = \sqrt{(X_i - X_0)^2 + K(Y_i - Y_0)^2}, \quad (47)$$

$$S_y = \sqrt{\frac{(X_i - X_0)^2}{K} + (Y_i - Y_0)^2}, \quad (48)$$

### III.7.- Orientación de la superficie

En este caso se trata un problema en el cual se tiene un láser incidiendo sobre una muestra y en donde la reflexión del mismo pega sobre un detector de posición, como se mostró en las figuras de la sección anterior, teniendo como único movimiento del sistema el de la orientación de la muestra, tomando en cuenta que la variación en cuanto a la posición del haz reflejado por la muestra que realiza por medio de los 4 motores. Ver figuras 35.

Se utiliza álgebra vectorial y matricial para representar la localización de los elementos del sistema con respecto a un sistema de localización fijo. Como se puede ver en la figuras 29 y 30, el detector de posición equivale a una pantalla bidimensional. Puesto que al rotar la muestra sobre su propio eje se genera mediante la reflexión del láser sobre el centro de la muestra una figura geométrica, dado que no está alineada, por lo que el problema principal es converger esta figura al centro de la misma. En el presente algoritmo se considera una simplificación espacial en tres dimensiones a un plano con dos dimensiones correspondientes a lo largo de los ejes X y Y, donde el contorno de la figura aumenta o disminuye con respecto de su centroide, dependiendo de la distancia a la que esté separado el detector de la muestra, y manteniendo los motores de alineación fijos. Una posible solución al problema es tomar cuatro puntos y resolver un sistema de ecuaciones, encontrando así los parámetros necesarios de la figura. Para probar la efectividad de este procedimiento de alineación, se escribieron unas subrutinas en mediante programación para determinar estos parámetros. Este programa contiene el diagrama de flujo que se muestra en la figura 37.

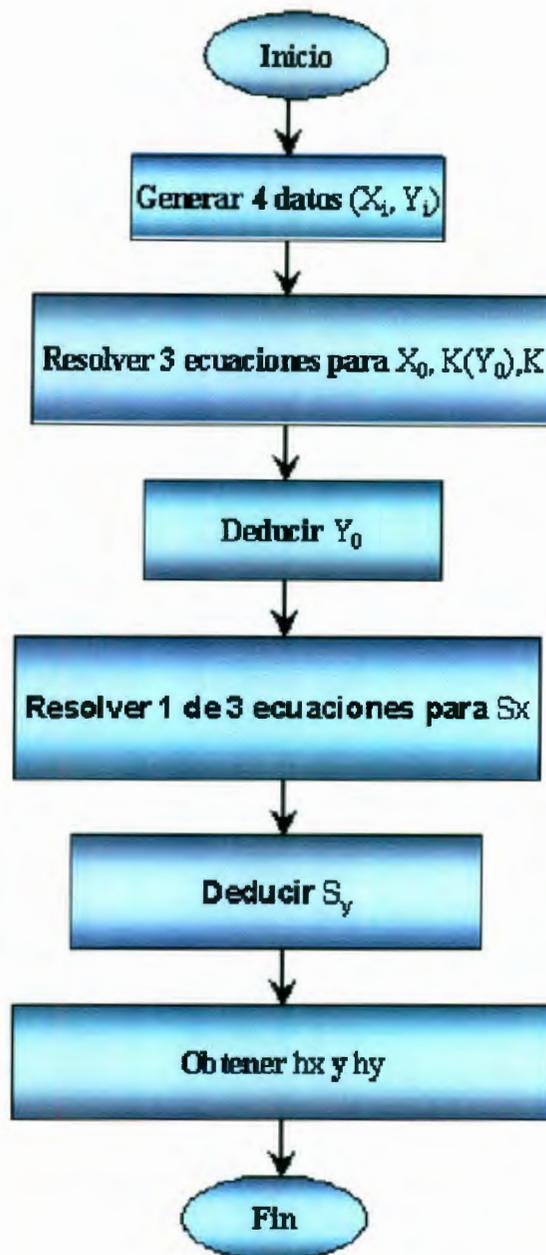


Figura 37.- Diagrama de flujo para la determinación de los parámetros de la figura.

### III.8. – Convergencia al centro de la figura

Para esta aplicación se determina la posición relativa del centro de la figura, mediante cuatro puntos medidos por la proyección del láser, usando motores de pasos. Para la convergencia al centro de la figura se propone controlar el sistema por medio de mediciones a prueba y error. Básicamente en el

algoritmo de alineación se procede como sigue. Una vez teniendo los cuatro puntos arbitrarios, se define el centro de la figura. Seguido de esto, en cada posición correspondiente a los tres motores de alineación que microposicionan la base del plato de la muestra con respecto de la base fija (ubicados cada uno a 33 pasos con respecto motor de rotamiento) se opera, un motor colocado en la parte superior de la base fija. Este motor se rota hacia delante y se calcula la distancia absoluta del punto actual del haz al centro calculado. Si esta distancia es mayor que la que existía entre el punto original y el centro de la figura, se regresa el doble de pasos hacia atrás y nuevamente se computa la distancia absoluta. Si en ambas situaciones se tiene que la distancia es mayor que la distancia original antes de hacer cualquier movimiento, el motor se regresa a su primera posición. Este procedimiento se repite para cada uno de los tres motores, hasta que el usuario visualmente considere que la figura inicial ha convergido prácticamente a un círculo a un conglomerado de puntos. El diagrama de flujo está dado por la figura 38. En el siguiente capítulo se presentarán los resultados experimentales de dicho algoritmo, los cuales validan el procedimiento propuesto.

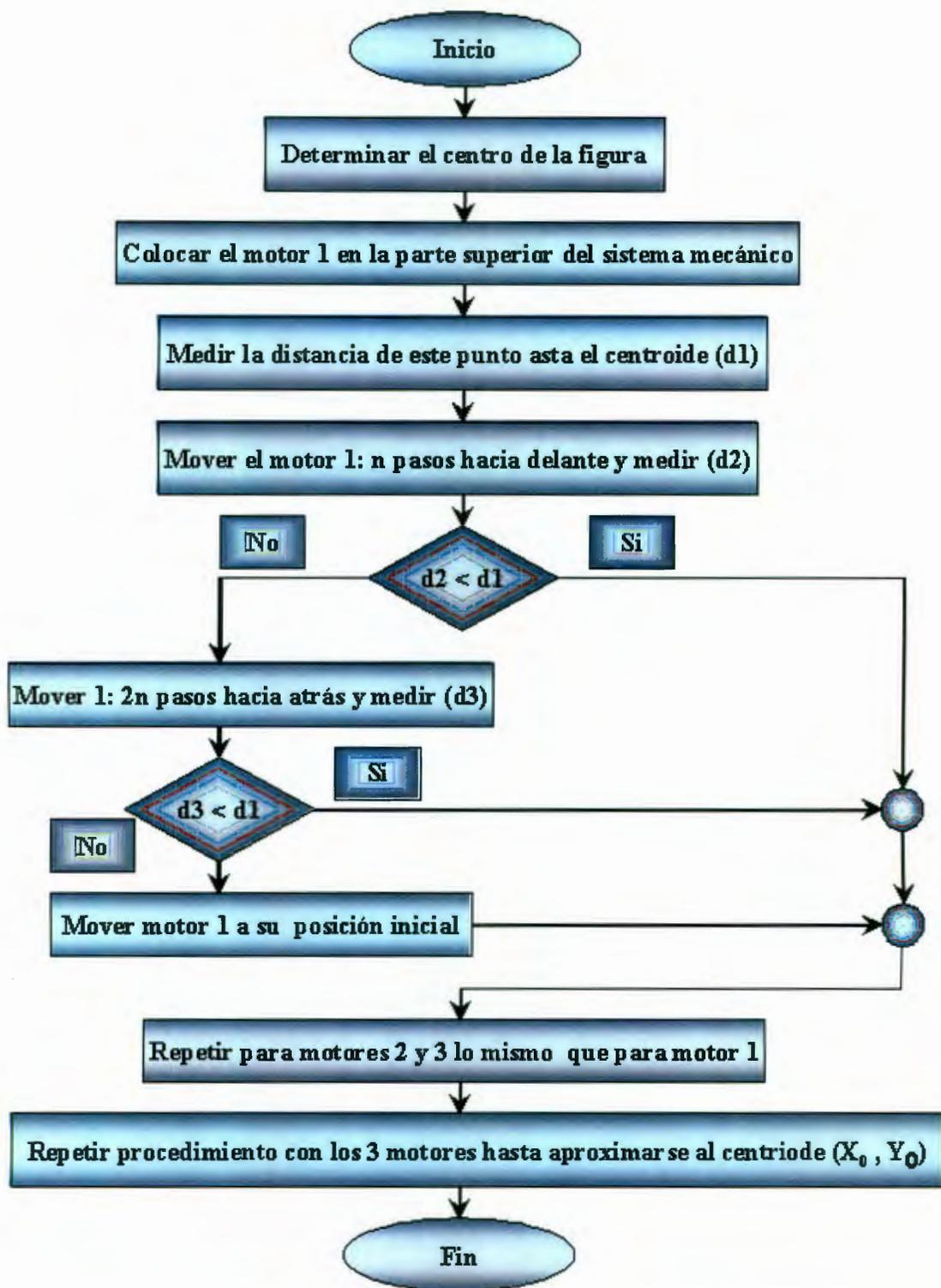


Figura 38.- Diagrama de flujo para la convergencia al centroide de la figura.

### III.9.-Modelo de un potenciómetro óptico para el detector de posición

Para un mejor aprovechamiento de las propiedades del detector es necesario entender como funciona para después caracterizarlo en cuanto al desplazamiento. El análisis desde el punto de vista físico tiene su fundamento en las ecuaciones de Maxwell (MKS). Primero se aplica la Ley de Ampere:

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J}_c + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (49)$$

Donde  $\vec{H}$  es el campo magnético (A/m),  $\vec{D}$  es el desplazamiento de la densidad de flujo eléctrico (C/cm<sup>2</sup>) y  $\vec{J}_c$  la densidad de corriente de conducción (A/m). Por otra parte  $\vec{J}_c$  está definida como:

$$\vec{J}_c = \vec{J}_p + \vec{J}_n \quad (50)$$

Donde  $\vec{J}_p$  y  $\vec{J}_n$  son las densidades de corriente para huecos y electrones, respectivamente. Ahora, aplicando la divergencia a la ecuación (49) y sustituyendo tenemos ecuación (50):

$$\nabla \cdot (\vec{J}_p + \vec{J}_n) + \frac{\partial (\nabla \cdot \vec{D})}{\partial t} = 0 \quad (51)$$

De la ley de Gauss se tiene que  $\nabla \cdot \vec{D} = \rho$ , donde la densidad de carga  $\rho$  (C/m<sup>2</sup>) esta dada como:

$$\rho = q(p - n + C_0) \quad (52)$$

Donde  $C_0 = N_D^+ - N_A^-$  y es una cantidad constante, además, se tiene que  $p$  es la concentración de huecos,  $n$  es la concentración de portadores de carga,  $N_D^+$  es la concentración de donadores ionizados,  $N_A^-$  es la concentración de donadores ionizados, y  $q$  es la magnitud de la unidad de carga ( $1.6 \times 10^{-19} C$ ), por lo tanto de la ecuación (52) nos queda:

$$\nabla \cdot (\vec{J}_p + \vec{J}_n) + q \frac{\partial (p - n)}{\partial t} = 0 \quad (53)$$

De la ecuación de continuidad que contiene el término de generación debido a la iluminación por el haz que incide sobre el área activa del detector. Se puede separar la ecuación en dos partes, una ecuación de difusión para portadores y otra para huecos:

$$\nabla \cdot \vec{J}_n - q \frac{\partial n}{\partial t} = +qR \quad (54a)$$

$$\nabla \cdot \vec{J}_p + q \frac{\partial p}{\partial t} = -qR \quad (54b)$$

Donde  $R$  es el porcentaje de recombinación ( $\text{cm}^{-3}\text{seg}^{-1}$ ) de pares electrón-hueco. Este se puede escribir en términos de un por ciento de generación ( $G_p$  y  $G_n$ ) y un por ciento de recombinación ( $R_p$  y  $R_n$ ). Explícitamente, se tiene que  $R = R_n - G_n$  para electrones y  $R = R_p - G_p$  para huecos, de donde, las ecuaciones de continuidad para los portadores son:

$$\frac{\partial n}{\partial t} = G_n - R_n + \frac{1}{q} \nabla \cdot \mathbf{J}_n \quad (55)$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} = G_p - R_p - \frac{1}{q} \nabla \cdot \mathbf{J}_p \quad (56)$$

Por lo tanto, la ecuación de continuidad para el movimiento de portadores en el fotodiodo es:

$$\frac{\partial p_n}{\partial t} = G(x,t) - \frac{\delta P_n}{\tau_p} - \frac{1}{q} \frac{\partial J_p(x)}{\partial x} \quad (57)$$

Donde  $P_n = P_{n_0} + \delta P_n$  es la concentración total de huecos en la región  $n$ ,  $P_{n_0}$  es la concentración de huecos en ausencia de cualquier inyección eléctrica y  $\delta P_n$  es el exceso de concentración de huecos debido a la inyección externa. La densidad de corriente mayoritaria (electrones) es dominada por la componente de difusión y queda definida como:

$$J_n(x) = qD_n \frac{\partial P_{np}(x)}{\partial x} \quad (58)$$

Debido a que  $P_{n_0}$  es independiente de la posición ( $x$ ) y del tiempo ( $t$ ), se puede tener un estado constante, sólo si  $G(x,t) = G_0$ , siendo el resultado la ecuación de difusión cuando se tiene portadores fotogenerados en la región  $p$ :

$$D_n \frac{\partial^2 \delta_{np}}{\partial x^2} - \frac{\delta_{np}}{\tau_n} = G_0 \quad (59)$$

La solución de esta ecuación diferencial viene dada por la concentración de portadores, es decir:

$$\delta_n(x) = Ae^{\frac{x}{L_n}} + Be^{-\frac{x}{L_n}} + Ce^{-\alpha x} \quad (60)$$

Si consideramos que para el término debido a la generación de fotoportadores ( $G_0$ ) tenemos:

$$G_0 = \frac{d}{dx} L_0' e^{-\alpha x} = -\alpha L_0' e^{-\alpha x} \quad (61)$$

Donde  $L_0'$  es el flujo de fotones a cualquier profundidad y  $\alpha$  es el coeficiente de absorción, al sustituir la ecuación (61) en la ecuación (60) con  $A=B=0$  se obtiene:

$$C = \frac{\alpha \tau L_0'}{1 - \alpha^2 L_n^2} \quad (62)$$

Sustituyendo la ecuación (62) en la ecuación (60), la solución de la ecuación de continuidad para el exceso de portadores minoritarios es:

$$\delta_n(x) = A e^{\frac{x}{L_n}} + B e^{-\frac{x}{L_n}} + \left( \frac{\alpha \tau L_0'}{1 - \alpha^2 L_n^2} \right) e^{-\alpha x} \quad (63)$$

Considerando las densidades de corriente (ecuación 44) con sus respectivas condiciones de frontera se obtiene:

$$J_0 = qD_n \left\{ \frac{d\delta_n(x)}{dx} \right\}_{x=x_0} = \frac{qD_n}{L_n} \left\{ A e^{x_0/L_n} - B e^{-x_0/L_n} + L_n K e^{-\alpha x_0} \right\} \quad (64)$$

$$J_1 = qD_n \left\{ \frac{d\delta_n(x)}{dx} \right\}_{x=0} = \frac{qD_n}{L_n} \{ A - B + L_n K \} \quad (65)$$

$$J_2 = qD_n \left\{ \frac{d\delta_n(x)}{dx} \right\}_{x=L} = \frac{qD_n}{L_n} \left\{ A e^{L/L_n} - B e^{-L/L_n} + L_n K e^{-\alpha L} \right\} \quad (66)$$

Donde  $K = \frac{\alpha^2 \tau L_0'}{1 - \alpha^2 L_n^2}$ , resolviendo las constantes A y B de las ecuaciones anteriores y

considerando que para un espesor de la capa equivalente a un 0.368 del espesor total,  $\alpha=1/L_n$ , como se muestra en la figura 38.

$$A = \left( \frac{L_n}{qD_n} \right) \left( \frac{J_2 e^{-\alpha x_0} - J_0 e^{-\alpha L}}{2 \text{Senh}[\alpha(L - x_0)]} \right) \quad (67)$$

$$B = \left( \frac{L_n}{qD_n} \right) \left( \frac{J_2 e^{-\alpha x_0} - J_0 e^{-\alpha L}}{2 \text{Senh}[\alpha(L - x_0)]} \right) + L_n K \quad (68)$$

Sustituyendo el valor de las 2 constantes A y B tenemos la fotocorriente  $J_1$ :

$$J_1 \text{Senh}[\alpha(L - x_0)] = J_0 \text{Senh}(\alpha L) - J_2 \text{Senh}(\alpha x_0). \quad (69)$$

Donde  $\alpha$  es el parámetro de decaimiento característico de la región n, L la longitud del área activa del fotodetector y  $x_0$  la posición del centroide de la mancha dentro del detector. Considerando que la magnitud de difusión de los portadores es grande, es decir, el coeficiente de absorción es muy pequeño, expandiendo en series el seno hiperbólico, se obtiene:

$$\text{Senh}(\alpha L) = \alpha L + \frac{(\alpha L)^3}{3!} + \frac{(\alpha L)^5}{5!} + \dots \quad (70)$$

Entonces, si el fotodetector tiene una alta linealidad el parámetro  $\alpha$  es muy pequeño y la expresión  $J_0$  se reduce a:

$$J_0 = \left( \frac{L - x_0}{L} \right) J_1 + \left( \frac{x_0}{L} \right) J_2 \quad (71)$$

Por el principio de conservación de energía, la energía que entra a un sistema es igual a la que sale, por lo que, modelamos el sistema como un potenciómetro óptico. Cada una de estas fotocorrientes pasa a través de distintas resistencias dependiendo del punto  $(x_0, y_0)$  al cual incide la mancha luminosa. Si el detector tiene una longitud  $\ell$ , donde la corriente para cada una de las salidas del fotodetector vienen dada por:

$$I_s = I_0 \frac{\text{Senh}[\alpha(\ell - \{x_0, y_0\})]}{\text{Senh}(\alpha \ell)}, \quad (72)$$

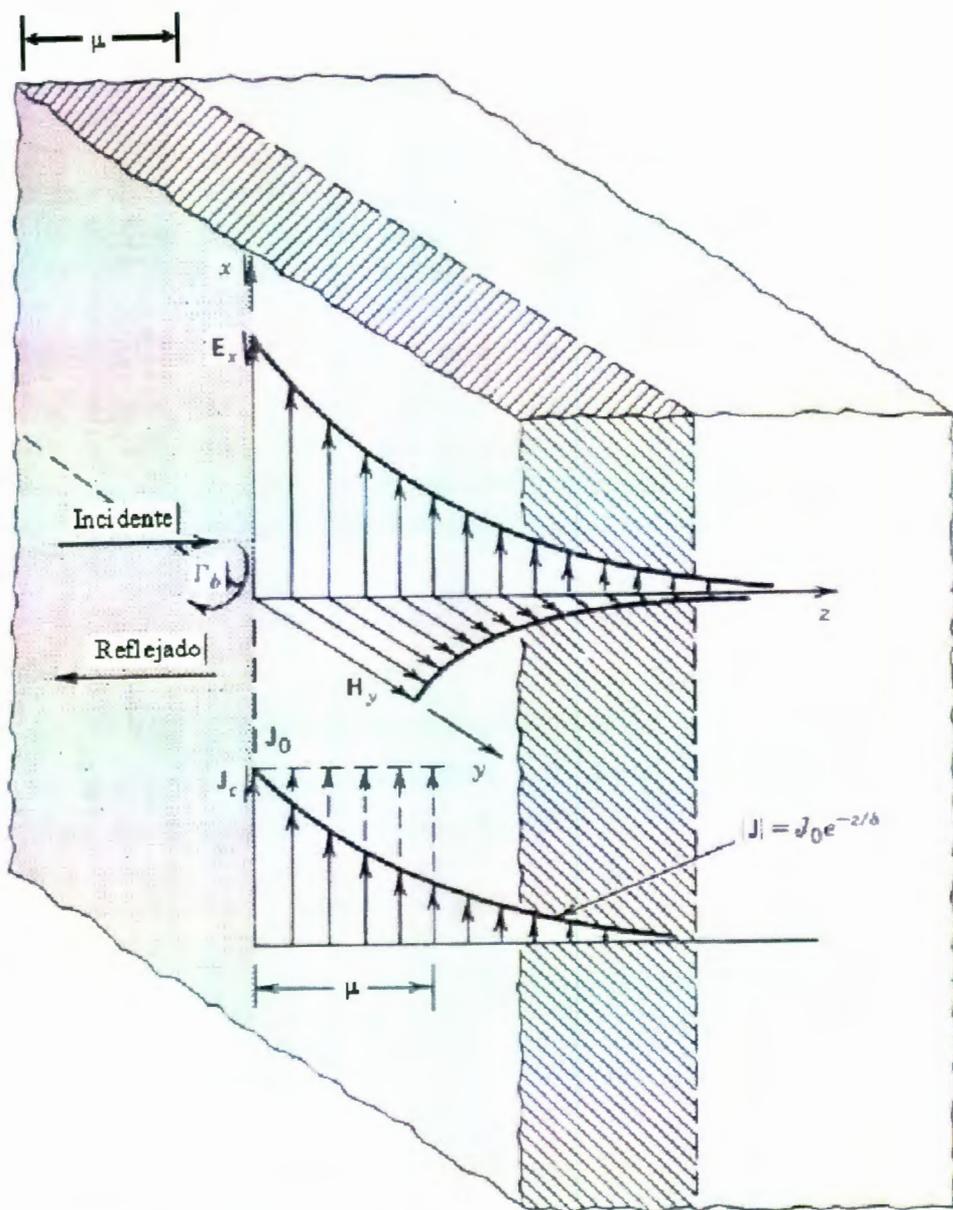


Figura 39.- Absorción del detector determinada por la ley de deBeer.

En donde  $I_0$  es la fotocorriente inducida debida al voltaje de polarización inverso,  $\alpha$  es un parámetro de decaimiento característico de la región  $n$  del diodo,  $\ell$  es la longitud de la área activa del

fotodetector y el punto  $(x_0, y_0)$  es la posición del centroide de la mancha dentro del detector. Como se tiene una alta linealidad, el parámetro  $\alpha$  es muy pequeño y la ecuación 72 se reduce a:

$$I_s = I_0 \left( 1 - \frac{(x_0, y_0)}{\ell} \right). \quad (73)$$

Dado que las magnitudes de las señales son pequeñas, estas necesitan amplificarse por lo que a cada una de estas salidas se modelara como una fuente de corriente. La forma más común de amplificar este tipo de señales es realizar una conversión de voltaje a corriente para su posterior manejo digital. Existe un parámetro inherente al detector, llamado error del detector de posición (PDE), el cual se define como la variación geométrica del haz entre la posición actual y la posición detectada, definiendo un punto cero equivalente al centro eléctrico, dado cuando  $I_1 = I_2$  en una dirección.

### III.10.-Diagramas de bode para el detector

El modelo de Bode consiste en descomponer un fotodiodo en una fuente de corriente por fotones, en una capacitancia de junta del diodo ( $C_D$ ) y en una resistencia del mismo ( $R_D$ )<sup>4</sup>, todo esto en conectado en paralelo, como se muestra en la figura 40. Posteriormente, el fotodiodo es conectado a un AOP, permitiendo hacer un análisis eléctrico por la ley de tensiones de Kirchhoff, obteniéndose, de esta forma, la impedancia total del circuito y por lo tanto, modelando el comportamiento en frecuencia mediante una función de transferencia (Diagrama de Bode). De la figura 39 se hace un análisis por ley de tensiones de Kirchhoff, se obtienen las siguientes ecuaciones:

$$I = I_1 + I_2 + I_3. \quad (74)$$

$$I_3 = I_4, \quad (75)$$

Donde  $I_1$  es la porción de corriente que fluye a través de la unión P-N del fotodiodo:

$$I_1 = V_E R_D. \quad (76)$$

Para  $I_2$  se tiene la cantidad de corriente sostenida por la capacitancia de la junta del fotodiodo:

$$I_2 = s(V_E C_D). \quad (77)$$

En  $I_3$  se desarrolla resistencia dependiente de la posición del laser sobre el detector:

$$I_3 = (V_E - V_0)/R_s. \quad (78)$$

En  $I_4$  se obtiene una corriente de retroalimentación que corriente fluye entre la terminal inversora y la salida del AOP:

$$I_3 = (V_E - V_O)/Z_F, \quad (79)$$

Donde  $Z_F$  es la impedancia de retroalimentación para el amplificador definida por la siguiente ecuación:

$$Z_F = R_F / (1 + s[R_F C_F]). \quad (80)$$

Por otra parte, la respuesta del dispositivo se modificada por la ganancia de lazo cerrado ( $\Delta V_0$ ) de nuestro AOP, recordando que:

$$\Delta V_0 = V_0 / V_E. \quad (81)$$

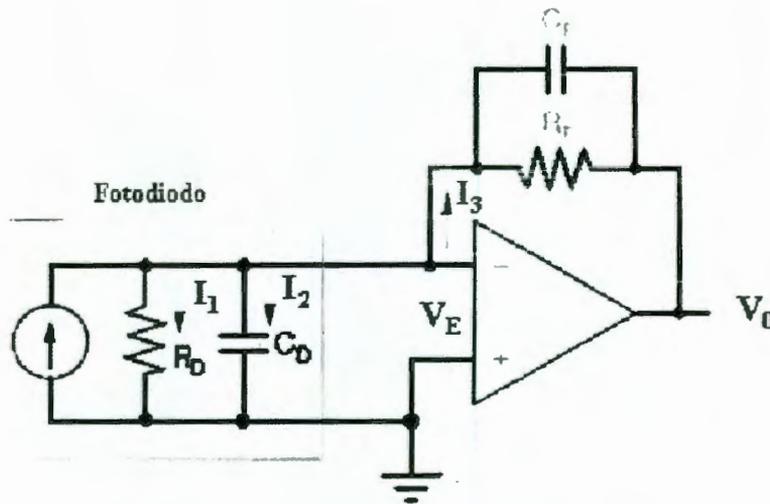


Figura 40.-Modelo del fotodiodo y del amplificador.

Combinando y acomodando las ecuaciones anteriores, tomando en cuenta que la resistencia dinámica del diodo es muy grande (en el orden de los  $M\Omega$ ), es decir  $R_D \gg 1$ , se obtiene la siguiente función de salida en forma de impedancia para el sistema:

$$\frac{V_0}{I} = \frac{R_F \Delta V_0}{(1 - \Delta V_0) [1 + s(C_F R_F + C_D R_S) + s^2(C_F R_F C_D R_S)]}. \quad (82)$$

De acuerdo con la ecuación (82) se tienen dos polos, una de las raíces depende de las características internas del fotodiodo ( $C_D R_S$ ) y el otro polo depende de los componentes externos ( $C_F R_F$ ) conectados a las terminales del AOP. Ahora, si se sustituyen algunos valores del fabricante, por ejemplo,

para el detector de posición (SC-50D UDT Sensors) se tiene una capacitancia ( $C_D = 1200 \text{ pF}$ ), y para un AOP tipo JFET de bajo ruido (OPA31GZ)<sup>10</sup> se tiene una  $\Delta_V = 90 \text{ dB}$  (en otra forma es:  $\Delta_V = 10^{90/20} \cong 10^5$ ), además, tomando en cuenta una resistencia de retroalimentación ( $R_F = 1\text{M}\Omega$ ) y un capacitor de retroalimentación ( $C_F = 1 \text{ pF}$ ).

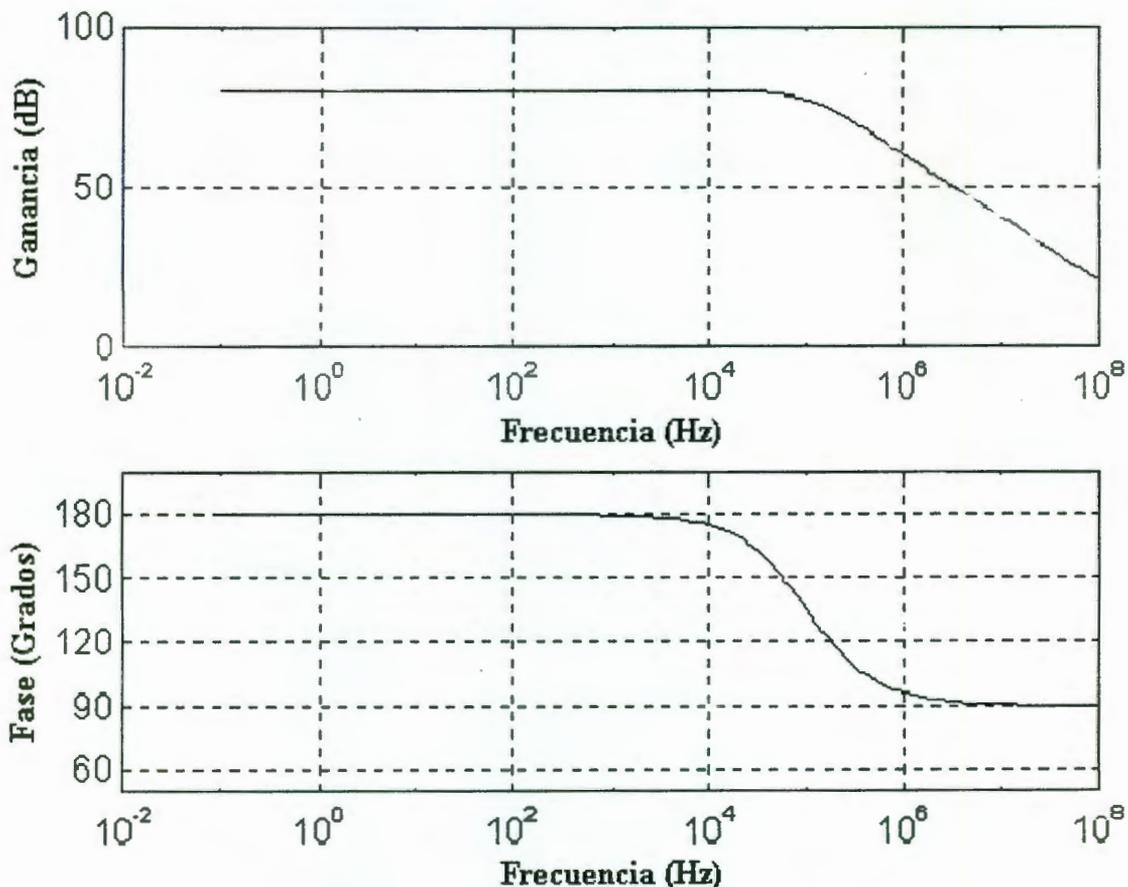


Figura 41.-Diagrama de Bode para el modelo del fotodiodo.

Para interpretar los polos y ceros de la ecuación 82 se obtiene la gráfica de bode (figura 40) tanto para la ganancia (en decibelios dB) así como la fase (en grados). Como se muestra en la figura 41, al tener un cambio de fase de  $180^\circ$  a  $90^\circ$ , se encuentra la frecuencia de corte ( $f_c$ ) del filtro (frecuencia a la que empieza a atenuarse la señal, con una razón de 20 dB por década). Para ser precisos, se encontraría que la ganancia de lazo cerrado tiene una  $f_c$  a los  $120^\circ$  de desfase. Este comportamiento de la señal es conocido como filtro pasa bajas, el cual deja pasar en forma ideal solamente frecuencias menores a su  $f_c$ .

Posteriormente, se obtuvieron resultados para comprobar la efectividad del modelo, conectando la salida del fotodiodo un amplificador sensible a la fase, calculando de esta forma la ganancia de lazo abierto del dispositivo a diferentes frecuencias. Los resultados experimentales se observan en la figura 42.

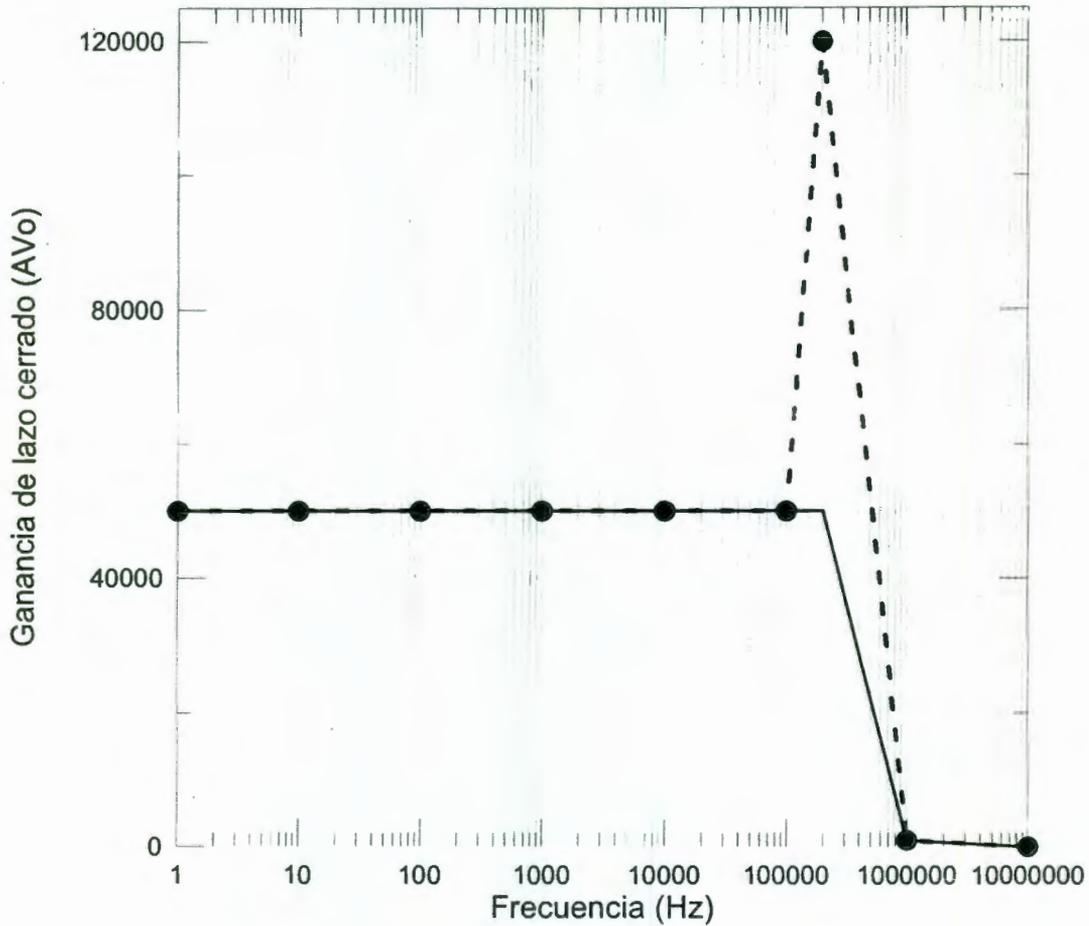


Figura 42.-Resultados experimentales del modelo.

En la figura 42 se tiene una gráfica de la ganancia de lazo cerrado contra frecuencia. La línea continua se refiere al resultado teórico del modelo. La gráfica punteada representa los valores experimentales. Se encontró que el resultado obtenido mediante el instrumento de medición, acopla el comportamiento experimental y teórico, con excepción en algunos casos cercanos a la frecuencia de corte, donde se tiene el fenómeno de resonancia. Posteriormente, se tiene que la pendiente experimental decae rápidamente contra la ganancia de lazo abierto del circuito. Esto último es debido a que hay que

considerar mas factores como, por ejemplo, la temperatura ambiente, la temperatura disipada y, sobre todo, la estabilidad de la fuente dual que suministra el voltaje con la que se alimenta el AOP, etc.

### III.11.- Análisis cinemático del sistema de alineación

Un análisis para traslaciones en el sistema se tiene al considerar los ángulos de Euler con respecto a la plataforma fija. El primer punto del sistema de alineación consta de una base fija con coordenadas (X,Y,Z) y una base con coordenadas (X',Y',Z') como se muestra en la siguiente figura:

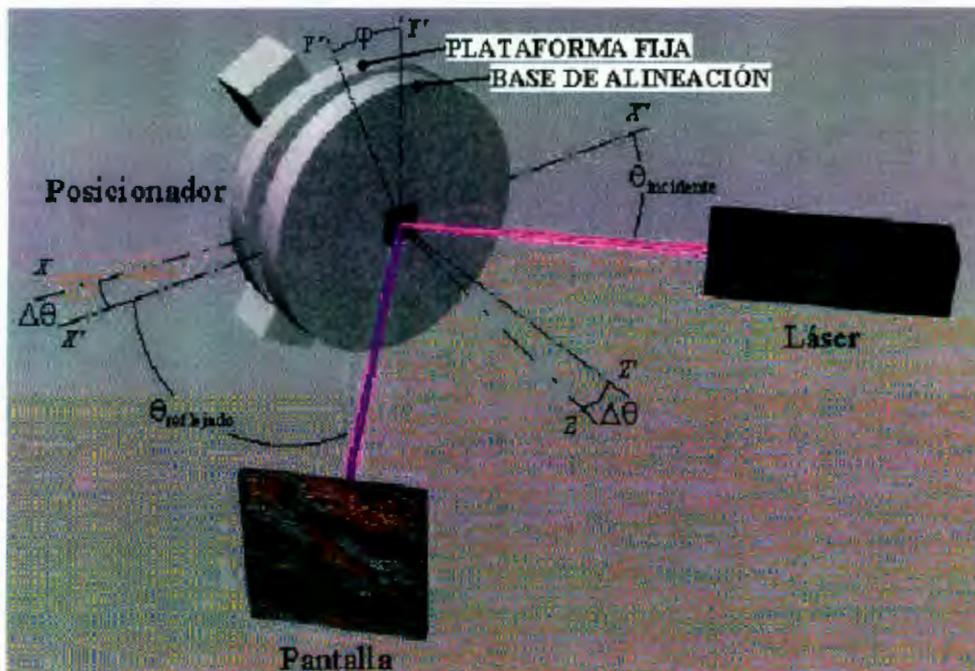


Figura 43.- Sistema posicionador con sus respectivas bases.

Las coordenadas del disco para alinear en función de la plataforma o base se expresa mediante la ec. 82.

$$\begin{bmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{Cos } \phi & 0 & \text{Sen } \phi \\ \text{Sen } \phi \text{ Sen } \alpha & \text{Cos } \alpha & -\text{Cos } \phi \text{ Sen } \alpha \\ -\text{Sen } \phi \text{ Cos } \alpha & \text{Sen } \alpha & \text{Cos } \phi \text{ Cos } \alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} \quad (83)$$

Como un segundo punto se considera que la base para alinear gira alrededor del eje Z, obteniéndose una rotación denominada ángulo  $\Psi$  y con ello la ecuación 83.

$$\begin{bmatrix} X'' \\ Y'' \\ Z'' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{Cos}\Psi & -\text{Sen}\Psi & 0 \\ \text{Sen}\Psi & \text{Cos}\Psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a & b & c \\ d & e & f \\ g & h & i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} \quad (84)$$

Donde los términos a, b, c, d, e, f, g, h, i, se muestran en la ecuación (85)

$$\begin{bmatrix} a & b & c \\ d & e & f \\ g & h & i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{Cos}\phi & 0 & \text{Sen}\phi \\ \text{Sen}\phi\text{Sen}\alpha & \text{Cos}\alpha & -\text{Cos}\phi\text{Sen}\alpha \\ -\text{Sen}\phi\text{Cos}\alpha & \text{Sen}\alpha & \text{Cos}\phi\text{Cos}\alpha \end{bmatrix} \quad (86)$$

De las ecuaciones 109 y 110 tenemos las siguientes ecuaciones:

$$X'' = aX\text{Cos}\Psi - aX\text{Sen}\Psi + cz \quad (87a)$$

$$Y'' = (dX + eY)\text{Cos}\Psi + (eY - dX)\text{Sen}\Psi + fz \quad (87b)$$

$$Z'' = (gX + hY)\text{Cos}\Psi + (hY - gX)\text{Sen}\Psi + iz \quad (87c)$$

Ahora, para una rotación infinitesimal del disco de alineación para los valores de la ecuación 86 tenemos:

$$\begin{bmatrix} a & b & c \\ d & e & f \\ g & h & i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \delta\phi \\ \delta\phi\delta\alpha & 1 & -\delta\alpha \\ -\delta\phi & \delta\alpha & 1 \end{bmatrix} \quad (88)$$

Como un tercer punto, se define un plano de incidencia para el láser, disco y detector, el cual se ubica sobre el eje Y, como se muestra en la figura 44. El vector incidente se describe mediante la ecuación 89.

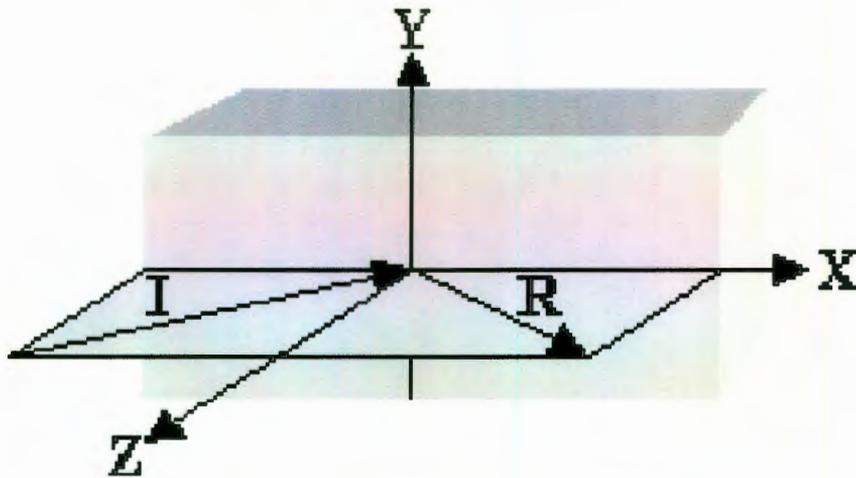


Figura 44.- Plano de incidencia formado por el láser y la superficie de la muestra.

$$\vec{I} = \frac{1}{\sqrt{2}}(\hat{i} - \hat{k}) = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ -1 \end{bmatrix} \quad (89)$$

Ahora, tomando los valores infinitesimales de las ecuaciones 87 para el haz de luz reflejado por la muestra, tenemos las ecuaciones 90:

$$X_I'' = \frac{1}{\sqrt{2}} [(Cos\Psi - Sen\Psi) - \delta\phi] \quad (90a)$$

$$Y_I'' = \frac{1}{\sqrt{2}} [\delta\phi\delta\alpha(Cos\Psi - Sen\Psi) + \delta\alpha] \quad (90b)$$

$$Z_I'' = -\frac{1}{\sqrt{2}} [\delta\phi(Cos\Psi - Sen\Psi) + 1] \quad (90c)$$

Una vez definido el vector incidente, se puede definir el vector del haz reflejado, bajo las siguientes condiciones:

La primera condición es de la Ley de Snell donde se obtiene la siguiente ecuación:

$$Z_I'' = -Z_R'' \quad (91)$$

La segunda condición es considerar que los vectores son co-planares obteniendo las ecuaciones 92.

$$Y_I'' X_I'' = X_R'' Y_R'' \quad (92a)$$

$$Y_R'' = \left[ \frac{Y_I''}{X_I''} \right] X_R'' \quad (92b)$$

La tercera condición es la normalización del vector reflejado que se describe mediante la ecuación 93.

$$(X_R'')^2 + (Y_R'')^2 = 1 - (Z_R'')^2 \quad (93)$$

De las ecuaciones 91, 92 y 93 tenemos las siguientes ecuaciones para el haz reflejado a lo largo del eje X:

$$X_R'' = \sqrt{\frac{1 - (-Z_I'')^2}{1 - \left(\frac{Y_I''}{X_I''}\right)^2}} \quad (94)$$

Por lo tanto, sustituyendo los valores de las ecuaciones 90 en la ecuación 94 se obtiene:

$$X_R'' = \sqrt{\frac{1 - \delta\varphi^2 \text{Sen}^2\Psi - \delta\varphi(\text{Cos}\Psi - \text{Sen}\Psi) - (1/2)}{1 - \left(\frac{2\delta\alpha^2 [2\delta\varphi^2 \text{Sen}^2\Psi + 2\delta\varphi^2(\text{Cos}\Psi - \text{Sen}\Psi) + 1]}{2\text{Sen}^2\Psi - 2\delta\varphi(\text{Cos}\Psi - \text{Sen}\Psi) + \delta\varphi^2}\right)}} \quad (95)$$

Mediante el análisis infinitesimal sólo se pueden mover ángulos muy pequeños (desplazamientos lineales de 1  $\mu\text{m}$ , por lo tanto  $\delta\alpha > \delta\alpha^2$  y  $\delta\varphi > \delta\varphi^2$  es decir  $\delta\alpha^2 = \delta\varphi^2 \cong 0$ ) por lo que se tienen las siguientes ecuaciones para el haz reflejado por la superficie de la muestra:

$$X_R'' = \frac{1}{\sqrt{2}} \left[ \sqrt{1 - 2\delta\varphi(\text{Cos}\Psi - \text{Sen}\Psi)} \right] \quad (96a)$$

$$Y_R'' = \frac{1}{\sqrt{2}} \left[ \frac{\delta\alpha + \sqrt{1 - 2\delta\varphi(\text{Cos}\Psi - \text{Sen}\Psi)}(\text{Cos}\Psi - \text{Sen}\Psi)}{(\text{Cos}\Psi - \text{Sen}\Psi) - \delta\varphi} \right] \quad (96b)$$

$$Z_R'' = \frac{1}{\sqrt{2}} [\delta\varphi(\text{Cos}\Psi - \text{Sen}\Psi) + 1] \quad (96c)$$

Ahora, una vez teniendo el comportamiento del haz reflejado por la superficie, se puede obtener el problema inverso para conocer la posición de la muestra con respecto al sensor:

$$\begin{bmatrix} \text{Cos}\Psi & -\text{Sen}\Psi & 0 \\ \text{Sen}\Psi & \text{Cos}\Psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}^{-1} = \begin{bmatrix} 1 & \frac{\text{Sen}\Psi}{2\text{Cos}\Psi\text{Cos}2\Psi} & 0 \\ -\frac{\text{Sen}\Psi}{\text{Cos}2\Psi} & \frac{\text{Cos}2\Psi}{\text{Cos}\Psi} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (97a)$$

$$\begin{bmatrix} a & b & c \\ d & e & f \\ g & h & i \end{bmatrix}^{-1} = \begin{bmatrix} 1 & \delta\alpha\delta\varphi & -1 \\ 0 & 1 & \delta\alpha \\ \delta\varphi & -\delta\alpha & 1 \end{bmatrix} \quad (97b)$$

Usando las ecuaciones 97, la posición de la muestra usando como referencia un láser queda con una orientación definida mediante las ecuaciones 100:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \frac{\text{Sen}\Psi}{2\text{Cos}\Psi\text{Cos}2\Psi} & 0 \\ -\frac{\text{Sen}\Psi}{\text{Cos}2\Psi} & \frac{\text{Cos}2\Psi}{\text{Cos}\Psi} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & \delta\alpha \\ \delta\varphi & -\delta\alpha & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_R'' \\ Y_R'' \\ Z_R'' \end{bmatrix} \quad (98)$$

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \frac{\text{Sen}\Psi}{2\text{Cos}\Psi\text{Cos}2\Psi} & \frac{1}{2\text{Cos}\Psi\text{Cos}2\Psi} [2\delta\alpha\text{Sen}\Psi\text{Cos}\Psi - 1] \\ -\frac{\text{Sen}\Psi}{\text{Cos}2\Psi} & \frac{\text{Cos}2\Psi}{\text{Cos}\Psi} & \frac{1}{\text{Cos}2\Psi} [\text{Sen}\Psi + \delta\alpha\text{Cos}\Psi] \\ \delta\varphi & -\delta\alpha & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_R'' \\ Y_R'' \\ Z_R'' \end{bmatrix} \quad (99)$$

$$X = \frac{1}{2\text{Cos}\Psi\text{Cos}2\Psi} X_R'' - \frac{\text{Sen}\Psi}{\text{Cos}2\Psi} Y_R'' + \delta\varphi Z_R'' \quad (100a)$$

$$Y = \frac{\text{Sen}\Psi}{\text{Cos}2\Psi} X_R'' + \frac{\text{Cos}\Psi}{\text{Cos}2\Psi} Y_R'' - \delta\alpha Z_R'' \quad (100b)$$

$$Z = \frac{1}{2\text{Cos}\Psi\text{Cos}2\Psi} [2\delta\alpha\text{Sen}\Psi\text{Cos}\Psi - 1] X_R'' + \frac{1}{\text{Cos}2\Psi} [\text{Sen}\Psi + \delta\alpha\text{Cos}\Psi] Y_R'' + Z_R'' \quad (100c)$$

En la ecuación 100c, al graficarse su trayectoria es un cono, que al incrementarse  $\delta\alpha$ , tiende a expandirse, lo cual indica que ángulo que afecta una alineación depende directamente del vector perpendicular al plano de incidencia.

### III.12. -Algoritmo para ajustar parámetros en elipses

El primer paso de adaptación de los parámetros para la elipse consiste en la detección angular del cono generado por la desalineación en una pantalla plana. Al resolverse el problema en dos dimensiones, lo siguiente es la detección del borde (horizontal y vertical). Una vez que estos procedimientos se han aplicado, se tienen dos conjuntos de datos denominados:  $G = \{(x_i, y_i^l, y_i^r)\}$  y  $G = \{(y_i, x_i^u, x_i^d)\}$ . Según lo descrito anteriormente, el  $(y_i^l, y_i^r)$  y el  $(x_i^u, x_i^d)$  son el límite izquierdo y derecho, así como el límite superior e inferior de la elipse, respectivamente. Posteriormente, se describen los siguientes estimadores para adaptar los parámetros de la elipse:

$$\xi_i^v = \frac{y_i^l + y_i^r}{2}, \xi_i^h = \frac{x_i^u + x_i^d}{2}, \quad (101)$$

$$\eta_i^v = y_i^l y_i^r, \eta_i^h = x_i^u x_i^d \quad (102)$$

Para este algoritmo se consideran dos clases de elipses. La primera clase contiene a elipses cuyos ejes no son paralelos con los ejes de referencia, obteniéndose una representación para la elipse como se indica a continuación:

$$k_1 x^2 - 2k_1 k_2 xy + k_2 y^2 - 2k_1 b_2 x - 2k_2 b_1 y = r \quad (103)$$

De esta forma se tiene la evaluación de los parámetros:  $k_1, k_2, b_1, b_2, r$ . Dejando los parámetros  $y_i^l = y_i^l + n_i^l, y_i^r = y_i^r + n_i^r, x_i^u = x_i^u + n_i^u, x_i^d = x_i^d + n_i^d$ , donde  $n_i^l, n_i^r, n_i^u, n_i^d$  son variables aleatorias independientes con cero expectativas y desviaciones para los estimadores de la ecuación (101), resultando las siguientes ecuaciones:

$$E\xi_i^v = k_1 x_i + b_1, E\xi_i^h = k_2 y_i + b_2, E\eta_i^v = \frac{k_1 x_i^2 - 2k_1 b_2 x_i - r}{k_2},$$

$$E\eta_i^h = \frac{k_2 y_i^2 - 2k_1 b_2 y_i - r}{k_1}, D\xi_i^v = D\xi_i^h = \sigma^2, \quad (104)$$

$$D\eta_i^v = \left( (2E\xi_i^v)^2 - 2E\eta_i^v \right) \sigma^2 + \sigma^4, \quad D\eta_i^h = \left( (2E\xi_i^h)^2 - 2E\eta_i^h \right) \sigma^2 + \sigma^4$$

Por otra parte, considerando la sumatoria:

$$S_1 = \frac{1}{\sigma^2} \left[ \sum_i (\xi_i^v - E\xi_i^v)^2 + \sum_i (\xi_i^h - E\xi_i^h)^2 \right] \quad (105)$$

Donde  $S_1$  es la distribución anisotrópica con la ley  $X^2$  se pueden evaluar los parámetros para resolver el problema de optimización:  $S_1$  mínimo. El problema se reduce a dos sistemas algebraicos lineales de segundo orden:

$$\begin{cases} \alpha'_{1,1}k_i + \alpha'_{1,2}b_i = \beta'_1 \\ \alpha'_{2,1}k_i + \alpha'_{2,2}b_i = \beta'_2 \end{cases}, i = 1, 2, \quad (106)$$

$$\alpha^1_{1,1} = \sum_i x_i^2, \alpha^1_{1,2} = \alpha^1_{2,1} = \sum_i x_i, \beta^1_1 = \sum_i \xi^v_i x_i, \alpha^1_{2,2} = |G^v|, \beta^1_2 = \sum_i \xi^v_i, \alpha^2_{1,1} = \sum_i y_i^2, \alpha^2_{1,2} = \alpha^2_{2,1} = \sum_i y_i,$$

$$\beta^2_1 = \sum_i \xi^h_i y_i, \alpha^2_{2,2} = |G^h|, \beta^2_2 = \sum_i \xi^h_i.$$

Sin embargo,  $S_1$  no contiene el parámetro  $r$ . Considerando ahora la segunda sumatoria:

$$S_2 = \sum_i \frac{(\eta^v_i - E\eta^v_i)^2}{D\eta^v_i} + \sum_i \frac{(\eta^h_i - E\eta^h_i)^2}{D\eta^h_i} \quad (107)$$

Donde  $S_2$  es la distribución anisotrópica con la ley  $X^2$  que contiene todos los parámetros del elipse. Pudiendo evaluar lo resolver el problema:  $S_2$  mínimo, sin embargo el problema es difícil. La propuesta consiste en evaluar los cuatro de parámetros:  $k_1, k_2, b_1, b_2$  con la ecuación (106) y de esta forma evaluar el último parámetro  $r$ , resolviendo el problema para  $S_2$  mínimo, siendo éste el último parámetro de  $r$ .

Considerando que en la elipse, los ejes mayor y menor son paralelos a los ejes del sistema de referencia, se obtiene la ecuación que se indica a continuación:

$$a(x-b)^2 + c(y-d)^2 = 1 \quad (108)$$

Evaluando de esta forma cuatro de parámetros:  $a, b, c, d$ . De la ecuación (107) se tienen las expectativas y las desviaciones para los estimadores que son:

$$E\xi^v_i = d, E\xi^h_i = b, E\eta^v_i = \frac{a(x_i - b)^2 - cd^2 - 1}{c},$$

$$E\eta^h_i = \frac{c(y_i - d)^2 - ab^2 - 1}{a}, D\xi^v_i = D\xi^h_i = \sigma^2, \quad (109)$$

$$D\eta^v_i = \left( (2E\xi^v_i)^2 - 2E\eta^v_i \right) \sigma^2 + \sigma^4, \quad D\eta^h_i = \left( (2E\xi^h_i)^2 - 2E\eta^h_i \right) \sigma^2 + \sigma^4$$

Como fue descrito anteriormente, se pueden evaluar los parámetros resolviendo primero el problema para  $S_1$  mínimo y entonces evaluar los parámetros  $b, d$ :

$$b = \frac{1}{|G^h|} \sum_i \xi_i^h, \quad d = \frac{1}{|G^v|} \sum_i \xi_i^v. \quad (110)$$

Posteriormente se resuelve el problema para  $S_2$  mínimo, evaluando de esta forma los parámetros  $a$  y  $c$ . Se propone el siguiente algoritmo:

1. Repasar horizontal y verticalmente con una detección de borde de dimensión.
2. Evaluar los parámetros:  $k_1, k_2, b_1, b_2$  con la ecuación (106).

Si  $k_1 = 0$  entonces evaluar  $d, b$  con la ecuación (109) y evaluar  $a, c$  para encontrar otro valor de  $r$ . La figura 45 muestra un ejemplo del ajuste numérico usando este algoritmo. La elipse con ejes (mayor y menor) no - paralelos con el respecto a los ejes de referencia se muestra en la figura 45(a) considerando el elipse con ejes (mayor y menor) paralelos a los ejes de referencia se muestra en la figura 45(b).

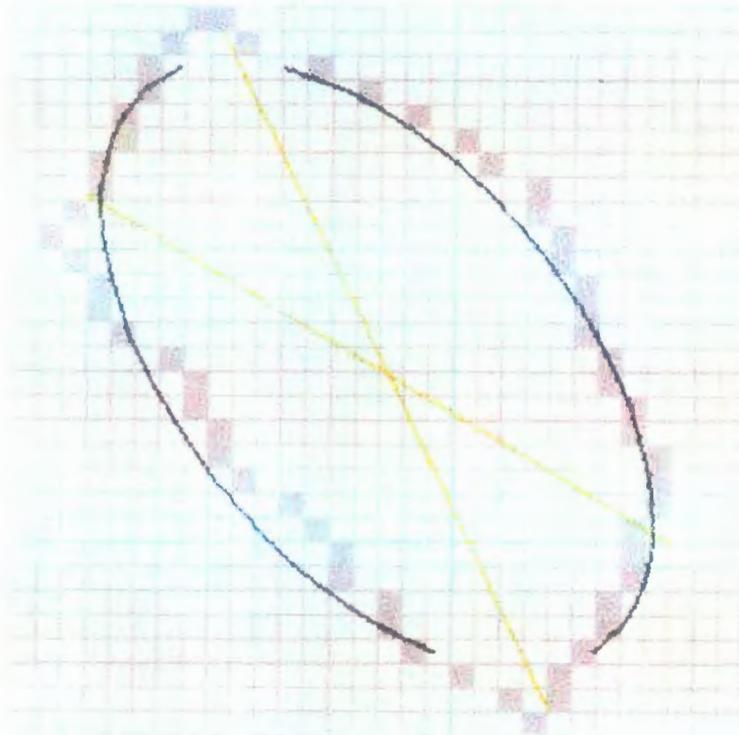


Figura 45(a).- La elipse con ejes mayor y menor no paralelos con respecto a los ejes bidimensionales de referencia.

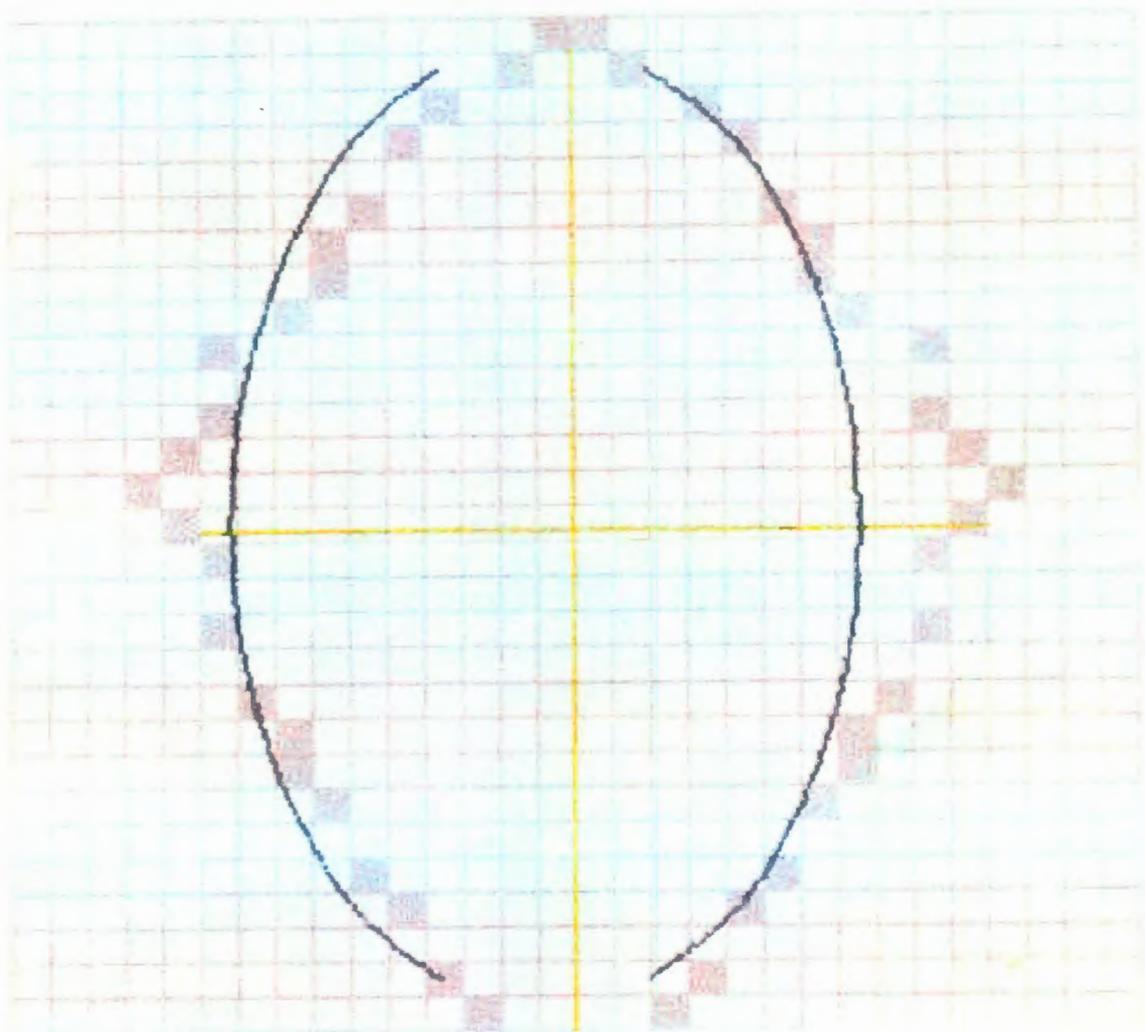
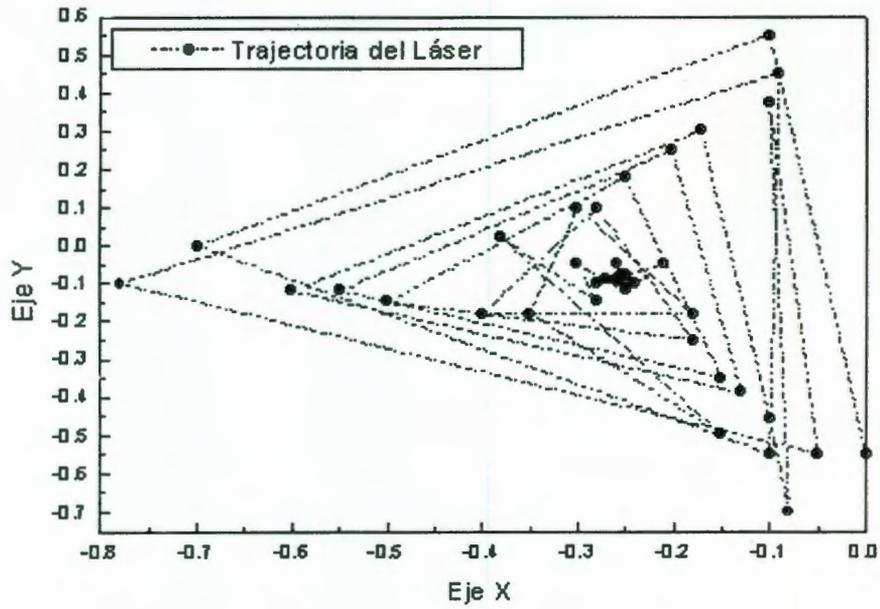


Figura 45(b).- La elipse con ejes mayor y menor paralelos con respecto a los ejes bidimensionales de referencia.

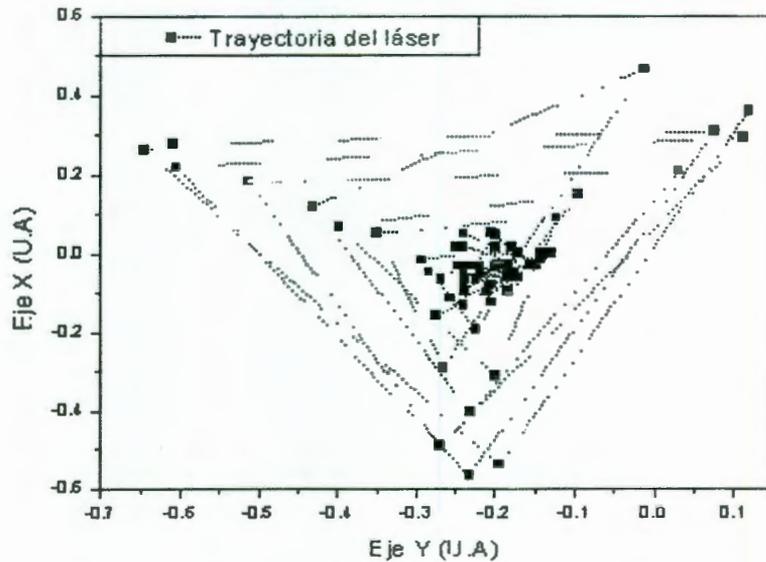
## IV RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### IV.1.- Convergencia durante la alineación

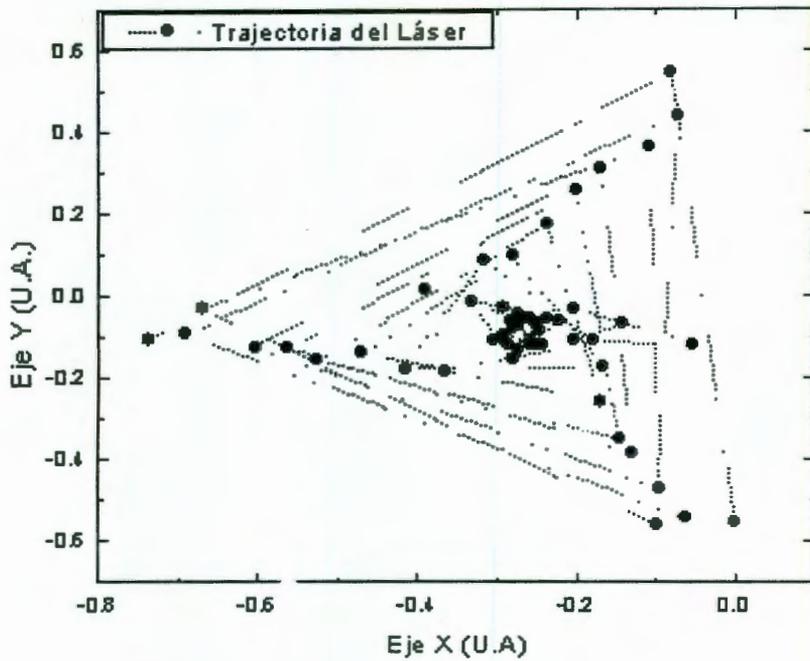
Al alinear la superficie de la muestra con el método descrito en el capítulo II se obtuvieron los siguientes patrones que se muestran en la figura 46.



(a)



(b)



(c)

Figuras 46.- Patrones generados por el haz del láser incidiendo sobre la superficie del detector durante el proceso de alineación. Nótese que en todos los casos hay una convergencia de los puntos.

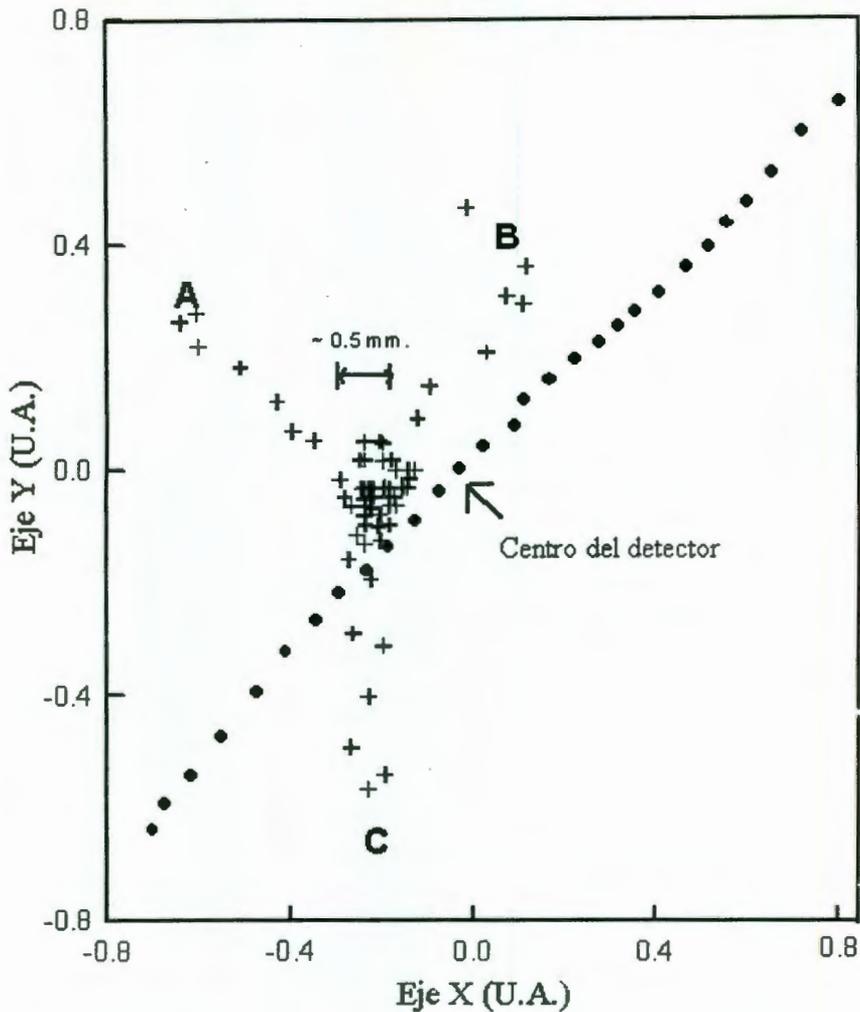


Figura 47.- Convergencia de la elipse junto con el desplazamiento relativo para los ejes X y Y normalizados.

#### IV.2.- Discusión

Considérense los resultados de la figura 46. En principio los patrones tienen una forma casi regular. Los remolinos se puede explicar porque hay un pequeño retraso en la posición de los tres motores de pasos. Sin embargo, se observa que la convergencia resulta ser repetitiva en todos los casos. Particularmente, fue buena en los patrones (a) y (c). Ahora, tomando en cuenta el tamaño del detector de posición, podemos dar una estimación del radio de convergencia en el proceso de alineación. La figura 46(c) muestra la convergencia típica de la elipse sobre el área del detector. Las tres trayectorias

corresponden al patrón de convergencia. Estas se forman a partir de puntos y siempre disminuyen su distancia hacia el centro de la figura (ver capítulo II), debido a que el motor de rotación se detiene cada  $120^\circ$ , lo cual lleva a producir una forma de remolino, donde el radio de convergencia o vértice de la figura que obtenemos es de aproximadamente 0.5 mm. Esto proporciona una alineación experimental comparable con la dispersión de la mancha del láser.

Nótese que el centro de la figura puede caer dentro de cualquier cuadrante del detector teniendo así una alineación óptima de la muestra. El tiempo relativo de alineación depende del tamaño de la figura. El programa está descrito en el Apéndice C.

### IV.3. Características del sistema de accionamiento

En esta sección se definen los parámetros generales que definen el movimiento.

- Resolución: es el incremento más pequeño de movimiento que el sistema puede realizar y depende de la distancia del detector de la muestra, así como del grado por paso de cada motor.
- Repetibilidad: es el error con el cual una posición puede ser reproducida.
- Exactitud: es el parámetro que mide la precisión para determinar el parámetro a conocer, por lo que depende tanto de la resolución del CAD, así como del avance lineal del micrómetro por paso del motor.

El sistema de microposicionado lineal automático cumple con las siguientes características:

- Longitud de recorrido: avance lineal de  $635 \mu\text{m}$  por vuelta restringido por área del detector.
- Resolución máxima:  $1.1 \mu\text{m}$  por medio paso del motor.
- Velocidad de desplazamiento: dado el retardo por programación es de aproximadamente  $1 \text{ mm/seg}$ . Este parámetro depende enteramente del tiempo para transferir datos por el puerto paralelo de la PC.
- Repetibilidad: particularmente es satisfactoria, además se lleva a cabo en cualquier lugar dentro del detector de posición.
- Exactitud: Como se tiene una resolución del ancho del haz láser de aproximadamente  $65 \mu\text{m/bit}$ , equivale al límite de exactitud para determinar la posición del haz.
- Resolución mínima variable con la posición:  $0.9^\circ$  por medio paso.

Una de las limitaciones del sistema de microposicionamiento, es que al ser manipulado mediante motores de paso, no se tiene un error acumulativo a lo largo de la trayectoria, siempre y cuando no exista pérdida de paso.

Otra de las limitaciones del sistema, es que dado el paso angular de los motores y la resolución del CAD, dependiendo de la distancia a la que se encuentre la muestra del detector, una mejor resolución.

Por otra parte, se hace notar, que antes del alineamiento automático, el usuario debe colocar una muesca de metal sobre el sistema, la cual se encuentra fija sobre el sistema giratorio. Además, el usuario tiene la libertad de poder interrumpir el programa una vez que se considera necesario.

#### **IV.4. - Aplicación de un espectrómetro de reflectancia diferencial**

La palabra espectroscopía se asocia originalmente a los espectros ópticos obtenidos cuando, con la ayuda de un prisma, se descompone la luz proveniente de una determinada fuente. A partir de 1913, este término adquirió un significado más amplio, siendo la espectroscopía un proceso mediante el cual se puede estudiar la interacción de la radiación electromagnética con la materia, obteniéndose espectros atómicos y moleculares, de los cuales se puede tener información detallada sobre la estructura (simetría, distancia y ángulos de enlace) y propiedades del material (distribución electrónica, fuerza de enlace, procesos ínter e intramoleculares).

Una técnica reciente que se usa para investigación y evaluación de superficies semiconductoras, es la espectroscopía de reflectancia diferencial (ERD), la cual se aplica en la caracterización de procesos superficiales para semiconductores con simetría cúbica. La ERD mide la diferencia en reflectividad de la muestra bajo estudio, de luz polarizada linealmente que incide a lo largo de dos ejes cristalográficos mutuamente perpendiculares del material. El principio físico de la ERD se basa en el hecho que las propiedades ópticas en un semiconductor con simetría cúbica son isotrópicas en todas las posibles direcciones dentro de su volumen, pero éstas se modifican en regiones próximas a la superficie del cristal debido a la pérdida de la simetría cúbica.

Como los posibles ejemplos de agentes físicos que inducen una pérdida en la simetría cúbica, podemos mencionar los esfuerzos piezoeléctricos introducidos por campos eléctricos superficiales, rugosidades, campos de esfuerzo debido a dislocaciones de borde, reconstrucción superficial durante el crecimiento epitaxial, absorción de impurezas, etc.

Para lograr estas mediciones es necesario llevar a cabo mediciones de ERD con gran precisión, eliminando las posibles señales parásitas que contribuyan al espectro de reflectividad. Una posible configuración para medición de ERD se muestra en la figura 48. En esta configuración, se enfoca un haz de luz monocromático sobre la superficie a estudiar. En su trayectoria hacia la muestra, el haz de la luz se polariza linealmente, enseguida, su vector de polarización se modula entre dos extremos de polarización mutuamente perpendiculares, lo cual se logra con la ayuda de un modulador fotoelástico (MF), posteriormente se hace incidir luz en forma oblicua sobre la muestra. La reflexión de luz por la muestra es colectada con un fotodiodo de silicio (FS), el cual transforma la señal óptica en una señal eléctrica. La salida eléctrica del fotodiodo alimenta a un amplificador sensible a la fase (ASF). Este último determina el desfase de la señal óptica. Nótese que el ASF se sintoniza a una frecuencia dos veces más grande que la del MF (segundo armónico en frecuencia) debido a que se quieren detectar las componentes de los dos estados extremos de polarización de la luz.

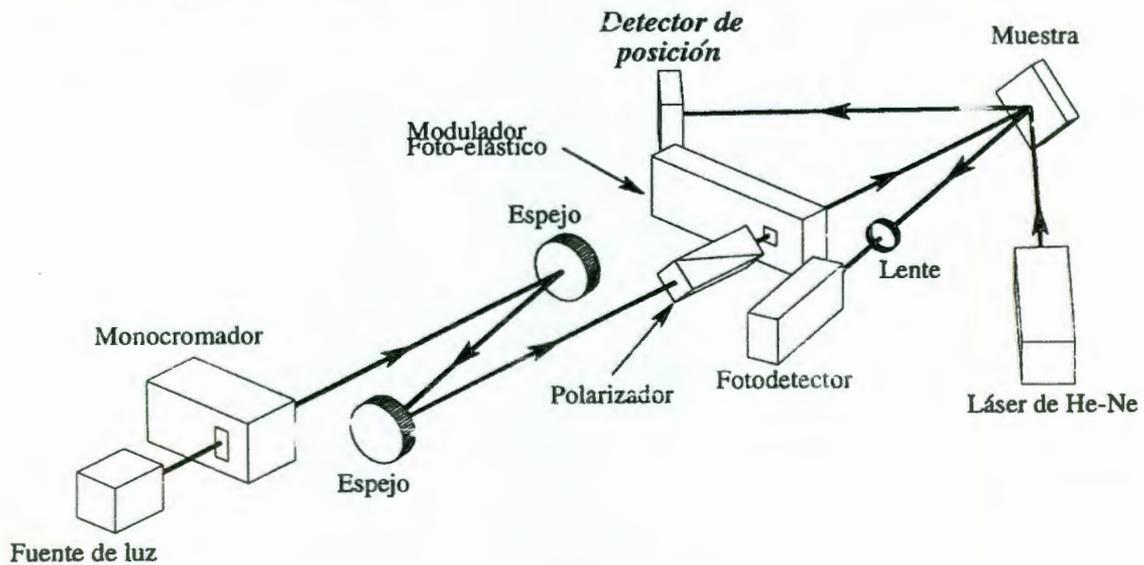


Figura 48. Configuración esquemática del arreglo para la medición de anisotropías ópticas utilizando un modulador fotoelástico.

Como se ha reportado, el orden de magnitud de los espectros obtenidos por RD está en el rango de  $10^{-3}$  –  $10^{-4}$ , por lo que, contienen señales parásitas, las cuales tienen diversos orígenes físicos, cuyos efectos deben ser tomados en cuenta. Estas señales parásitas son independientes de la anisotropía asociada a la

muestra y pueden deberse a una posible desalineación con respecto al eje de rotación de la muestra, lo que provoca que la luz polarizada incida en diferentes puntos sobre el área activa del fotodiodo. Cabe mencionar que no existe forma de eliminar las señales parásitas mas allá de alinear el espectrómetro lo mejor posible, lo que nunca se logra de manera perfecta. Como se describió anteriormente, la principal desventaja en este arreglo está relacionada con el hecho que si la superficie de la muestra no está perfectamente perpendicular a su eje de giro para cualquier orientación azimutal, se generarán distintos puntos de incidencia sobre el detector. Esto último se debe a que la luz que incide sobre la muestra pasa por un estado continuo de polarizaciones *s* y *p*. Estas componentes de polarización pueden sufrir modificación en intensidad si la incidencia es oblicua. Por lo tanto, uno de los aspectos más críticos durante los experimentos de ERD es la orientación del cristal bajo estudio.

#### IV.5.- Análisis del espectrómetro de modulador fotoelástico

El propósito principal del análisis es determinar el orden de magnitud de las componentes parásitas que aparecen en el espectro de anisotropía óptica. El análisis óptico del espectrómetro se describe con las convenciones de la figura 48 de la sección anterior. En el espectrómetro, la luz pasa a través de un monocromador y a su vez pasa a través de un polarizador, el cual se encuentra caracterizado por el vector de Jones:

$$E = |E| \begin{bmatrix} \text{sen} \beta \\ \text{cos} \beta \end{bmatrix} \quad (111)$$

Donde la dirección del vector E está dada por el ángulo  $\beta$ . La luz ya polarizada incide sobre el modulador fotoelástico (segundo elemento óptico) originando un "switchero" en la orientación del campo eléctrico, cuyo vector de Jones está dado como el cambio únicamente en la componente a lo largo de eje X:

$$E = |E| T = |E| \begin{bmatrix} e^{i\delta} \text{sen} \beta \\ \text{cos} \beta \end{bmatrix} \quad (112)$$

Donde T es la matriz de Jones de transformación, debida al polarizador y al modulador fotoelástico en la componente X del vector de polarización con respecto a Y. La respuesta óptica de la superficie de la muestra está caracterizada por la matriz de Jones:

$$M = \begin{bmatrix} r_1 \cos^2 \varphi + r_2 \sin^2 \varphi & (\Delta r) \sin \varphi \cos \varphi \\ (\Delta r) \sin \varphi \cos \varphi & r_2 \cos^2 \varphi + r_1 \sin^2 \varphi \end{bmatrix}, \quad (113)$$

Donde  $r_1$  y  $r_2$  son las reflectividades de la muestra para los vectores de polarización paralelos a los dos ejes principales de la muestra,  $\Delta r = r_1 - r_2$ , y  $\varphi$  es el ángulo de orientación del eje óptico de la muestra.

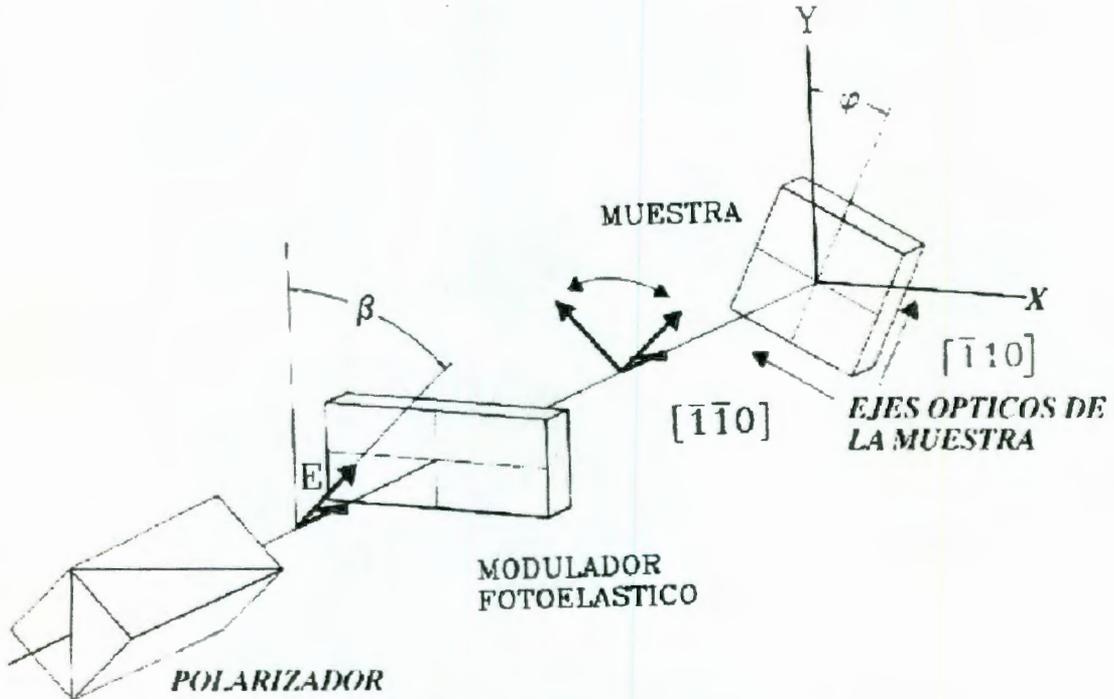


Figura 49.- Descripción de los elementos ópticos antes de la muestra.

La intensidad de la señal óptica que llega al detector está dada por

$$I(t) = C|E|^2 (MT)^* (MT), \quad (114)$$

donde  $C$  es una constante que depende de la muestra. Sustituyendo las ecuaciones (111) y (112) en la ecuación (114) y haciendo  $\beta = \pi/4$ , como se muestra en el espectrómetro, se obtiene:

$$I(t) = C|E|^2 R + \frac{1}{2} C(\Delta R)|E|^2 \sin(2\varphi) \cos(\delta), \quad (115)$$

Donde  $R = \frac{1}{2}(|r_1|^2 + |r_2|^2)$  y  $\Delta R = (|r_1|^2 + |r_2|^2)$ . Puesto que un modulador fotoelástico modula utilizando  $\delta$ , la transformada de Fourier de  $\cos(\delta)$  muestra únicamente los armónicos pares. Entonces, al sintonizar el amplificador una frecuencia  $2\omega$ , se obtiene una señal de salida producida únicamente por el segundo armónico de  $\cos(\delta)$ , ya que el amplificador utilizado tiene una respuesta armónica despreciable.

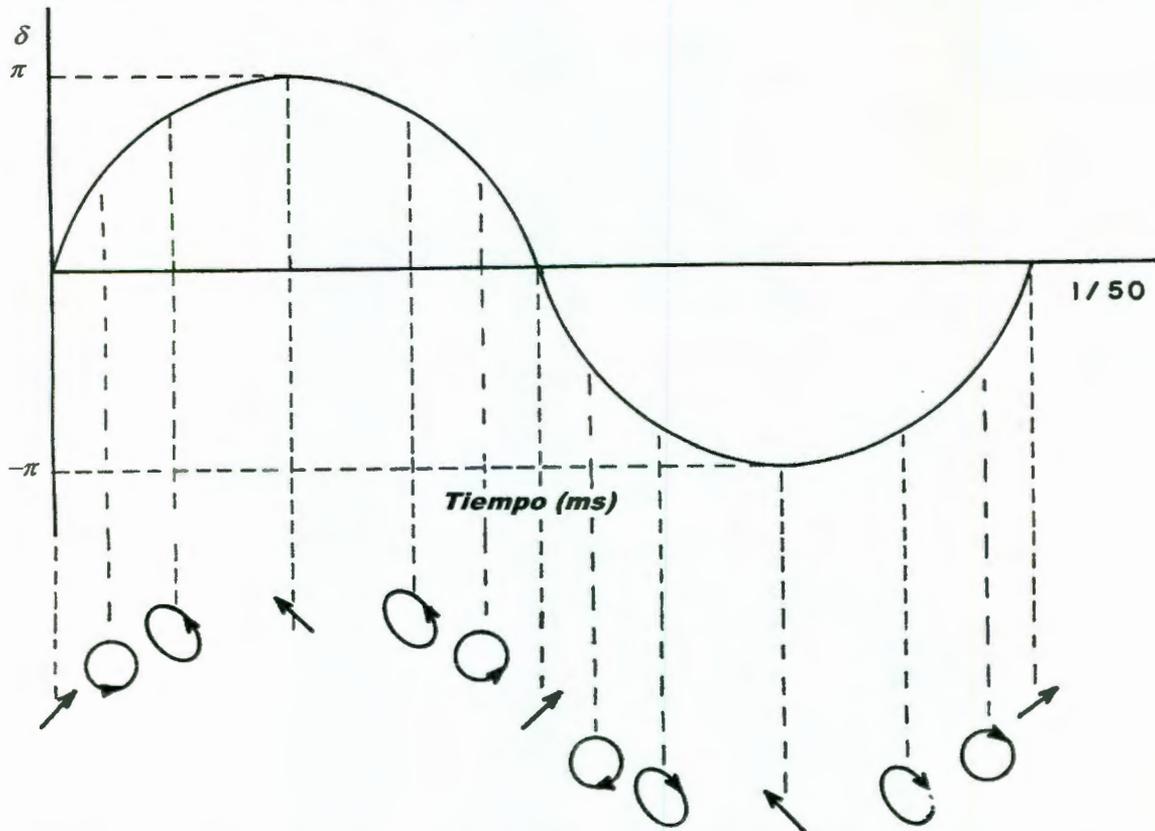


Figura 50.-Posibles estados de polarización a la entrada del amplificador sensible a la fase.

Además, como el coeficiente de Fourier del segundo armónico es cercano a uno, se consideran únicamente los términos que contribuyen a la señal que sale del amplificador, permitiéndonos escribir con la ayuda de la ecuación (116):

$$\frac{\Delta I(t)}{I} = \left[ \frac{\Delta R}{R} \right] \text{sen}(2\varphi) + I_p(t), \quad (117)$$

Donde  $(\Delta I/I)$  es la señal óptica incidente normalizada en el detector,  $(\Delta R/R)$  es la señal de reflectividad diferencial, e  $I_p$  es la señal parásita que tiene frecuencia  $2\omega$ . Es importante mencionar que la

señal parásita no depende de  $\varphi$  y que será eliminada, en gran parte, con el método de alineación utilizado. Finalmente, la señal eléctrica a la salida del amplificador está dada por:

$$\frac{\Delta S}{S} = \left( \frac{\Delta R}{R} \right) \text{sen}(2\varphi) + S_p, \quad (118)$$

donde  $S_p$  es alguna posible señal parásita.

#### IV.6.- APLICACIÓN DEL POSICIONADOR EN RD

Generalmente se tiene un procedimiento manual antes de cada experimento. El que el usuario ajusta la superficie del plato sobre el cual descansa la muestra con una montura formada por dos discos de aluminio y un resorte bajo compresión, mediante el ajuste de los tres tornillos. Esto se repite hasta lograr visualmente que el haz reflejado por la superficie de la muestra tenga un mínimo movimiento sobre la pantalla, como se muestra en la figura 51.

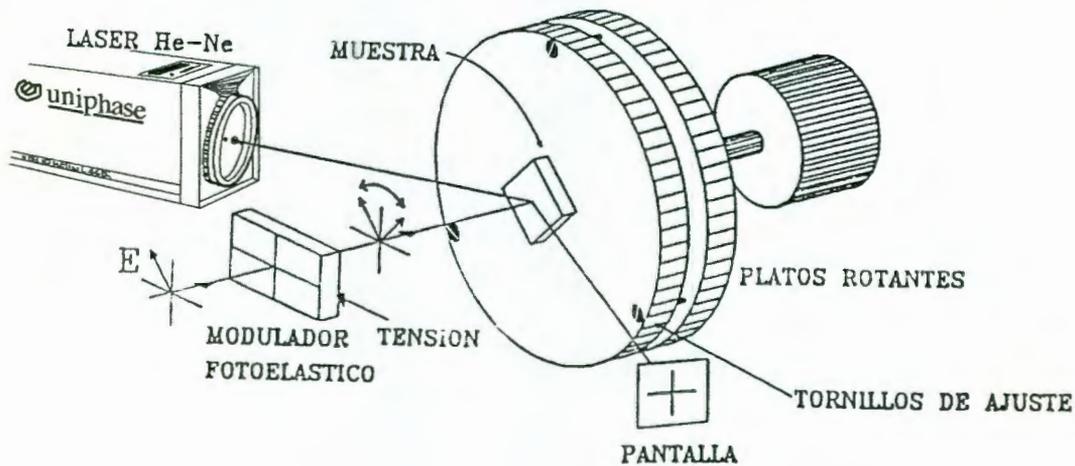


Figura 51.- Procedimiento manual para alineación en sistemas de RD.

Es claro que realizar la manipulación de la muestra no es siempre una tarea fácil y rápida, siendo además la desalineación de la muestra una de las principales fuentes de las señales parásitas generadas a la salida del detector de luz que contribuyen al espectro de ERD.

Uno de los aspectos críticos durante los experimentos de ERD, como se mencionó anteriormente, es la orientación del cristal bajo estudio. Para minimizar  $S_p$  en la ecuación (118) se tiene el arreglo de la figura 52.

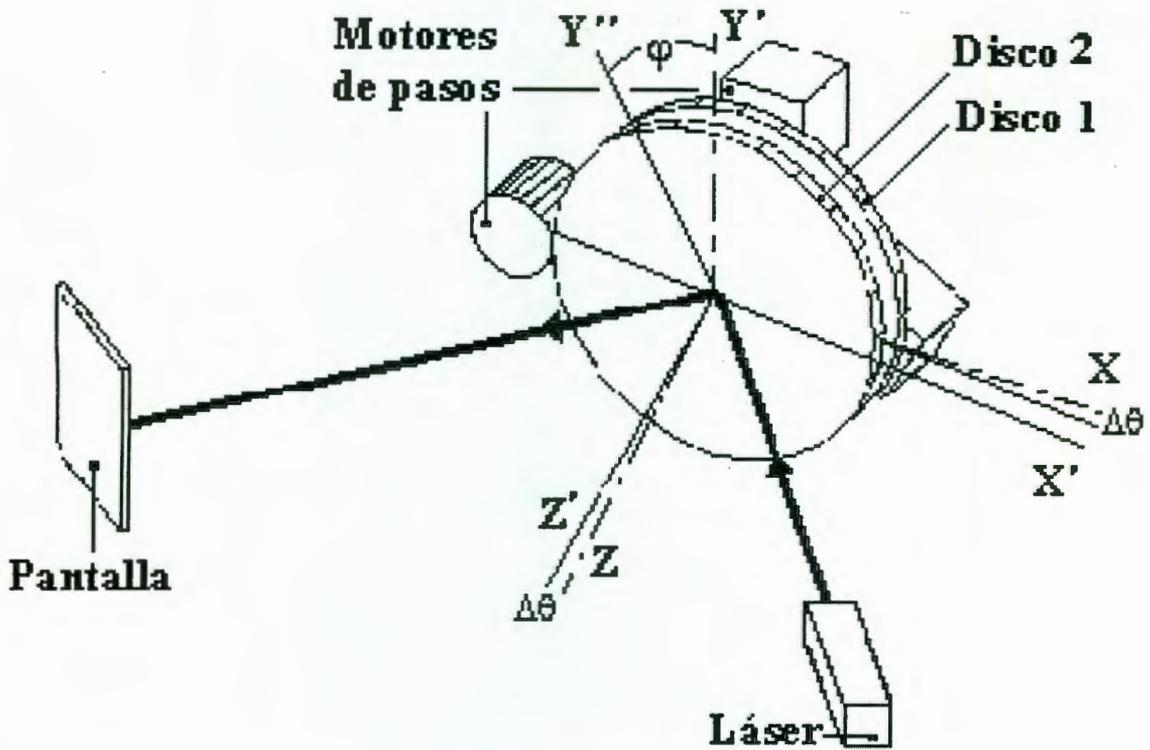


Figura 52. - Sistema de alineación con los ángulos entre las partes: óptica (láser y pantalla) y la mecánica (disco para la muestra).

Como se describe en los párrafos anteriores, de hacer mediciones de ERD la superficie de la muestra debe estar lo más alineada posible, puesto que al cristal se le aplica luz polarizada a una incidencia casi normal ( $10^\circ$ ). Para este ángulo, la componente S es equivalente a la componente P, siendo éste el límite. El haz de luz polarizada, al ser reflejado por la muestra y estar girando en forma desalineada, formará círculos a la entrada del fotodetector (círculos de radio  $\Delta\theta$ , definido por el eje de rotación o eje Z y la normal a la muestra o eje  $Z'$ ). Este proceso indirectamente desde una pantalla, con la ayuda de la reflexión por la muestra de un láser de He-Ne, procurando enfocar el láser siempre sobre el centro del plato que contiene el cristal y colectando el haz reflejado con un detector de posición. Los ángulos que forman el sistema se muestran en la figura 52, en donde además se observan las partes que

manipulan indirectamente la superficie de la muestra. Con el propósito de mantener la superficie de la muestra (ejes  $X'$  e  $Y'$ ) lo más perpendicular posible al eje de giro (eje  $Z$ ), o dicho de otra forma, que idealmente, al colocar el láser proyectando su luz al centro del disco y rotarse la muestra (eje  $Y'' = Y' \cos \varphi$ ) con un ángulo de incidencia ( $\theta_{\text{incidente}}$ ), se desea que mantenga una desviación mínima del haz reflejado ( $\theta_{\text{reflejado}} + \Delta\theta$ ) sobre una pantalla (detector de posición) antes de aplicar ERD, es decir que  $\Delta\theta$  sea lo más pequeño para cualquier orientación azimutal y así tener a la entrada del FS una variación del haz comparable con la de la pantalla, es decir, la misma desviación, apareciendo, de esta forma a la salida del amplificador sensible a la fase aproximadamente una senoide con un periodo de  $\pi$  al rotar los ejes de simetría de la muestra (ver referencia 10). Posteriormente se rota la muestra hasta que la señal sea máxima para así iniciar la medición de ERD.

Los resultados de la muestran sin alineación (figura 53) y con alineación (figura 54) describen la importancia de la alineación de la muestra en esta técnica, puesto que sin alinearse la información obtenida puede ser falsa y debida a ruido, las señales de ambas figuras son colectadas mediante un amplificador sensible a la fase (AFS).

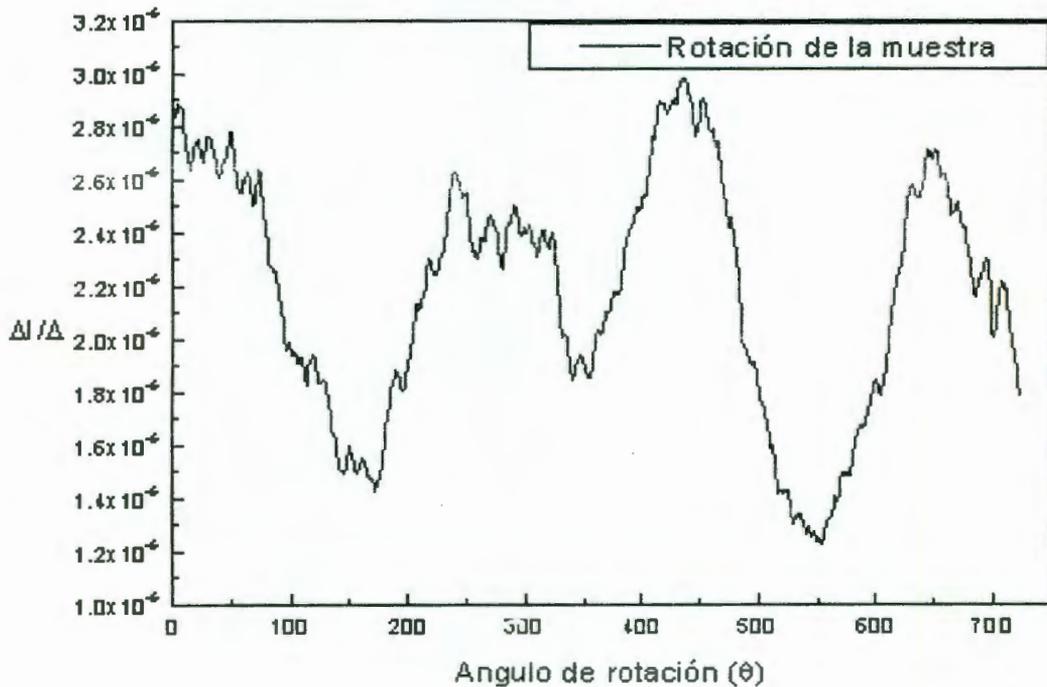


Figura 53.- Resultados obtenidos al rotar una muestra desalineada en el ASF

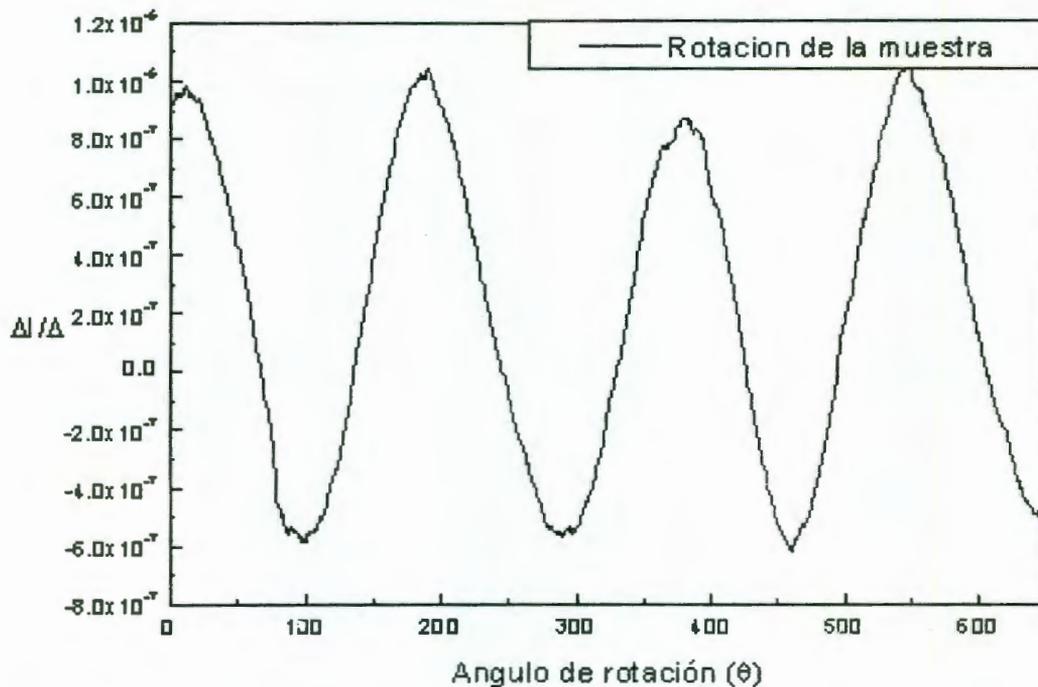


Figura 54.- Resultados obtenidos al rotar una muestra alineada en el ASF.

#### IV.7.-Procedimiento de medición

Para realizar la alineación del espectrómetro, el monocromador se coloca primeramente a una longitud de onda de 550 nm, ya que en este valor se tiene la mayor intensidad de luz proveniente de la lámpara. En seguida, la muestra se fija al plato giratorio, con pasta adhesiva. Se retira el exceso de pasta, para no tener reflejos que generen una señal parásita. Se verifica que al rotar el plato, la mancha de luz no salga de la muestra y del detector por cuadrantes. Para medir reflectividad es necesario rotar la muestra. Para evitar que el ángulo de reflexión de la luz varíe al rotar, se utiliza un láser de He-Ne para ajustar los tornillos que manipulan el plato hasta que el punto reflejado deja de proceder, manteniéndose en un punto. A continuación se pone a girar la muestra en forma continua. Esto genera una señal de periodo  $2F$  en el amplificador, donde  $F$  es la frecuencia de rotación del plato. Si el sistema está bien alineado, la diferencia de reflectividad medida por el amplificador, será una señal senoidal centrada en cero.

La señal de referencia para el amplificador sensible a la fase (lock-in) es proporcionada por el modulador fotoelástico. Después de ajustar la fase, se rota la muestra en pasos de  $0.9^\circ$  grados, hasta que

la señal en el amplificador sea máxima. En esta posición uno de los ejes ópticos de la muestra coincide con el ángulo de la luz polarizada, con lo que se considera que ha sido alineada.

#### IV.7- Conclusiones

En este trabajo se hizo una revisión bibliográfica del desarrollo histórico de la alineación como técnica científica, encontrándose que ha sido un problema a tratar desde el inicio de las civilizaciones.

En el trabajo se presenta el diseño y la construcción de un sistema automático para alineación de superficies, este artefacto es particularmente práctico para orientar cristales semiconductores, previamente a las mediciones de técnicas ópticas, como es la reflectividad diferencial. Se demostró experimentalmente que la figura trazada por el láser al estar la superficie desalineada corresponde a una elipse, teniendo que converger esa elipse a un punto para alinear la superficie de la muestra.

Para tratar la alineación se tiene una metrología y una metodología, la metrología corresponde al montaje y medición de la desalineación, la metrología el proceso de alineación orientando la muestra azimutalmente.

El sistema cuenta con un modelo teórico para determinar la posición de un láser sobre un detector de posición, por otra parte, se trata el ruido en el dominio de la frecuencia, donde se tiene un modelo en el dominio de la frecuencia para coleccionar información de la posición para el láser mediante el detector.

Dado que la información coleccionada por el detector no corresponde a una figura geométrica, se aplican filtros digitales para marcar la trayectoria por la muestra desalineada.

El sistema está controlado mediante una computadora personal, la cual es programada en un lenguaje accesible. El sistema se basa en una etapa de potencia para mover cuatro motores de pasos que cuentan con su respectiva interface, además de una etapa de adquisición para conectarse a un fotodetector tipo PIN duo-lateral.

En esta etapa de adquisición se obtiene una relación lineal entre la posición del centroide de la mancha de luz utilizada y la salida de voltaje de los amplificadores.

El proceso de alineación del sistema se basa en un algoritmo para determinar el centro de una elipse, obteniendo las coordenadas para la alineación, que al aplicarse experimentalmente, es satisfactorio para la aplicación.

En cuanto a la evaluación del sistema, se alcanzó una mejor alineación que la del usuario en un tiempo aproximadamente de 5 minutos.

El sistema de alineación innova una nueva metodología y metrología para alinear cualquier superficie con respecto a plano de referencia

Del proyecto de tesis se obtuvieron dos publicaciones internacionales y cinco publicaciones nacionales.

## REFERENCIAS

- Aguado Behar Alberto 2000, Temas de identificación y control adaptable, PALCIEN.
- Apática L. M., **A. Castañeda Miranda**, V.M. Castaño 2002, НЕОРГАНИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ, Vol. 38, No.1, pp. 1-3.
- Apática L. M., **A. Castañeda Miranda** and V.M. Castaño 2001, Coloquio sobre Ciencia e Ingeniería de Nuevos Materiales, IIMAT ITQ, Querétaro, Qro. México.
- Aspnes D.E y J.B. Theeten 1979, Investigation of effective medium models of microscopic surface roughness by spectroscopy ellipsometry, Physical Review B. 20, 3292-3302.
- Boccaro A.C. y Fournier D. 1980, Sensitive photothermal deflection technique for measuring absorption in optically thin media, Optics letters. 5. 377-379.
- Capineri Lorenzo and Masotti Leonardo 1999, A beam position sensor for low power infrared laser diodes, Rev.Sci.Inst. 70. 1341-1348.
- Castañeda Miranda A.**, L. Bulenkova, Beliasvski, V.M.Castaño 2000, Automatic optical alignment by numerical ellipse fitting, Optik, 11. 189-194.
- Castañeda Miranda A.**, L.M. Apátiga, R.Velázquez, V.M.Castaño 2001, Micropositioning device for automatic alignment of substrates for industrial scale thin films deposition , Assembly Automation. 21. 336-340.
- Castañeda Miranda A.**, F. Uribe, L.M.Apátiga y V.M.Castaño 2001, Coloquio sobre Ciencia e Ingeniería de Nuevos Materiales, IIMAT ITQ.
- Castañeda Miranda A.**, M.E. Rodríguez, L.M.Apátiga y V.M.Castaño 2001, Coloquio sobre Ciencia e Ingeniería de Nuevos Materiales IIMAT ITQ.
- Castañeda Miranda A.**, L.E. Vidal Rodríguez, L.M. Apátiga, V.M.Castaño 2001, Sociedad Mexicana de Instrumentación, SOMI XVI.
- Castañeda Miranda A.**, J.T. Vega Durán, I. Rojas Rodríguez, L.M. Apátiga, V.M. Castaño 2001, Sociedad Mexicana de Instrumentación.
- Castañeda Miranda A.**, R. Velázquez Castillo, D. Rangel Miranda, V.M. Castaño 2001, Sociedad Mexicana de Instrumentación, SOMI XVI.
- Castañeda Miranda A.**, M.E. Rodríguez 2001, Sociedad Mexicana de Instrumentación, SOMI XVI.
- Castañeda Miranda A.**, L.M. Apátiga , V.M. Castaño 2000, Sociedad Mexicana de Instrumentación,

SOMI XV.

- Castañeda Miranda A.**, Castillo Castañeda E., V.M. Castaño 2000, Sociedad Mexicana de Instrumentación, SOMI XV.
- Castañeda Miranda A.**, R. Castañeda Miranda, D. Alaniz Lumbreras, V.M. Castaño 2000, Sociedad Mexicana de Instrumentación.
- Castañeda Miranda A.**, V.M. Castaño, Sociedad Mexicana de Instrumentación 1999, SOMI XIV.
- Castañeda Miranda R, **Castañeda Miranda A.**, M.A. Bahena, A.D. Lozano, D. Alaníz, V.M. Castaño 2001, Sociedad Mexicana de Instrumentación, SOMI XVI.
- Chi Wu 1995, Fiber optic angular displacement sensor, Rev. Sci. Instrum. 66. 3672-3675.
- Cornejo Rodríguez A y Cordero Davila A. 1980, Measurement of radius of curvature of convex and concave surfaces using a nodal bench and He-Ne laser, Applied Optics. 19. 1743-1745.
- Cresini Diamano, Alessandra Flammini, Daniele Maroni y Andrea Taroni 1998, Application of an FFT based algorithm to signal processing of LVDT position sensor, IEEE Trans. on Inst. and Meas. 47. 1119-1123
- Fernández J.L., **A. Castañeda Miranda**, I. Rojas-Rodríguez, I. Campos-Canton, G. Barrios-Muñoz and M.E. Rodríguez 2001, Sociedad Mexicana de Superficies y Vacío A.C., XXI Congreso Nacional.
- García Valenzuela A. y Díaz Uribe R. 1997, Approach to improve the angle sensitivity and resolution of the optical beam deflection method using a passive interferometer and ronchi grating, Opt. Eng. 36, 1770-1778.
- Hausler BERD y Schneider Gerhard 1988, Testing optics by experimental ray tracing with a lateral effect photodiode, Applied Optics. 27. 5160-5164.
- Hecht Zajac 1974, Optica (1er Ed.), Addison Wesley.
- Hurowitz Paul 1994, The art of electronics (2da Ed.) Camb. University.
- J. García Jorge, **Castañeda Miranda A.**, Achim.M.Loske 2001, Sociedad Mexicana de Instrumentación, SOMI XVI.
- Kalbitzer S. y Melzer W. 1967, On the charge dividing mechanism in position sensitive detectors, Nuclear instruments and Methods. 56. 301-304.
- Klein Claude A. y Biering Robert W. 1974, Pulse response characteristics of position sensitive photodetectors, IEEE Transductions on E. Devices. 21. 532-537.

- Levlerc G. y Ozenne J.B. 1991, Hardware and software corrections of the spatial distortions of position sensitive detectors, Rev. Sci. Inst. 62. 2997-3003.
- Linear Products 1996, Burr-Brown IC Data Book.
- Lozano Uribe A. D., R. López Ramírez, **A. Castañeda Miranda**, V.M. Castaño 2001, Novel photoplethysmography system, Medical Physics, 2.184-192.
- Lozano Uribe A.D., **A. Castañeda Miranda**, L.M.Apátiga y V.M. Castaño 2001, Coloquio sobre Ciencia e Ingeniería de Nuevos Materiales, IIMAT ITQ.
- Lucovsky Gerad 1960, Photoeffects in nonuniformly irradiated p-n junctions, Journal. Applied physics. 31. 1088-1095.
- MacFarlane D.L. 1991, Laser beam alignment devices for ultrashort pulses, Rev. Sci. Inst. 62. 1899-1903.
- McKelvey 1996, Física del Edo. Sólido y Semiconductores (8va edición), Limusa.
- Peripheral Components Handbook 1994, Intel, 61-81.
- Reitz, Milford, Christy 1996, Fundamentos de la T.E.(4ta edición), Addison Wesley.
- Reséndiz Ruíz L., **Castañeda Miranda A.**, A.D.Lozano Uribe, D. Rangel Miranda, L.M.Apatiga, V.M. Castaño 2001, Sociedad Mexicana de Instrumentación.
- Sze S.M. 1981, Physics of semiconductors devices (2da edición), Wiley interscience.
- Vega Durán J. T., Díaz Torres L.A., Rosa Cruz E., **Castañeda Miranda A.**, Wilber Córdova M 2001, Coloquio sobre Ciencia e Ingeniería de Nuevos Materiales, IIMAT ITQ.
- William P. Connors 1971, Lateral photodetector operating in the fully reverse biased mode, IEEE Transactions on Electron Devices. 18, 591-596.
- Woltring Herman 1974, New possibilities for human motion by real time light spot position measurement, biotelemetry.1. 132-146.
- Woltring Herman 1975, Single and dual axis lateral photodetectors of rectangular shape, IEEE Transactions on Electron Devices. 16, 581-596.

## **APÉNDICE A**

## APÉNDICE A

### POLARIZACIÓN DE ONDAS

Una onda plana se define como una onda que, en un instante dado, presenta la misma fase en todos los puntos que están sobre cada plano perpendicular a alguna dirección específica, es decir, si la dirección específica es el eje  $z$ , entonces  $E$  debe tener la misma fase en todos los puntos que tienen el mismo valor de  $z$ . Consideremos una onda electromagnética plana de tipo  $E(\vec{r}, t) = \vec{E}_0 e^{-i(\omega t - \vec{\kappa} \cdot \vec{r})}$ , donde  $\vec{E}_0$  es un vector complejo constante. Se tiene que:

$$\begin{aligned} \vec{\kappa} \cdot \vec{E} &= 0 \\ \vec{\kappa} \cdot \vec{B} &= 0 \\ \vec{\kappa} \times \vec{E} &= \omega \vec{B} \end{aligned}$$



Sean  $\hat{p}$  y  $\hat{s}$  dos vectores ortogonales entre si y ortogonales con  $\hat{u}$ .

El vector de amplitud de una onda plana, en general será:  $\vec{E}_0 = E_p \hat{p} + E_s \hat{s} + E_u \hat{u}$

Puesto que  $\vec{\kappa} \cdot \vec{E} = \vec{\kappa} \cdot \vec{E}_0 e^{-i(\omega t - \vec{\kappa} \cdot \vec{r})} = 0$ , donde  $\vec{\kappa} \cdot \hat{u} = 0$ , es decir  $E_u = 0$ , tenemos:

$$\vec{E}_0 = E_p \hat{p} + E_s \hat{s} = E_p e^{i\phi_p} \hat{p} + E_s e^{i\phi_s} \hat{s}.$$

El campo eléctrico verdadero es la parte real de  $\vec{E}_0 e^{-i(\omega t - \vec{\kappa} \cdot \vec{r})}$ :

$E(\vec{r}, t) = \text{Re}(E_p e^{-i(\omega t - \vec{\kappa} \cdot \vec{r} - \phi_p)} \hat{p} + E_s e^{-i(\omega t - \vec{\kappa} \cdot \vec{r} - \phi_s)} \hat{s}) = E_p \text{Cos}(\omega t - \vec{\kappa} \cdot \vec{r} - \phi_p) \hat{p} + E_s \text{Cos}(\omega t - \vec{\kappa} \cdot \vec{r} - \phi_s) \hat{s}$ . Fijando el origen del tiempo tal que  $\phi_s = 0$  y  $\phi_p - \phi_s = \phi$  tenemos:

$$E(\vec{r}, t) = E_p \text{Cos}(\omega t - \vec{\kappa} \cdot \vec{r} - \phi) \hat{p} + E_s \text{Cos}(\omega t - \vec{\kappa} \cdot \vec{r}) \hat{s}.$$

Considerando  $\vec{r} = 0$  se obtiene:

$$E(\vec{r}, t) = E_p \text{Cos}(\omega t - \phi) \hat{p} + E_s \text{Cos}(\omega t) \hat{s}.$$

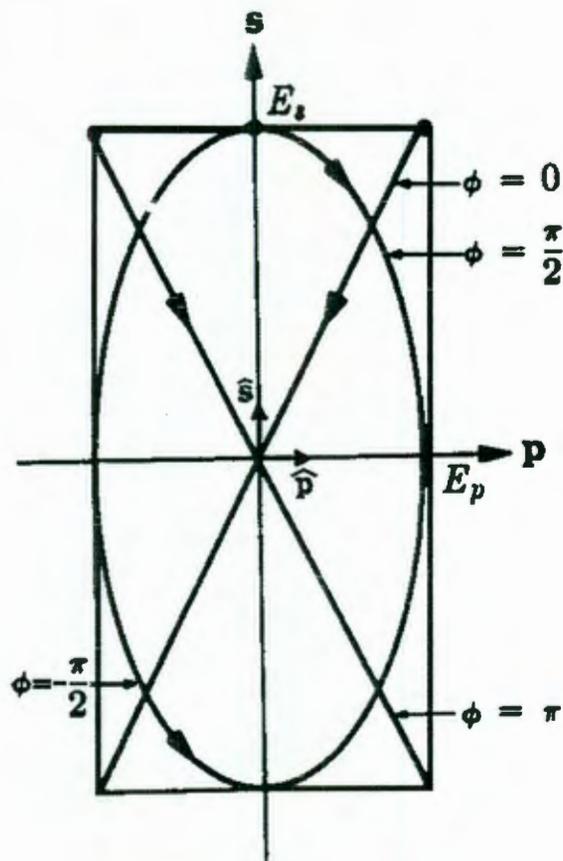


Figura 55.-Trayectoria seguida por la punta del vector  $\vec{E}$  en un punto dado del espacio en función del tiempo.

- Sea  $\varphi = 0$  entonces:

$$\vec{E}(0, t) = (E_p \hat{p} + E_s \hat{s}) \cos(\omega t). \text{ Polarización lineal.}$$

- Sea  $\varphi = \pi$  entonces:

$$\vec{E}(0, t) = (-E_p \hat{p} + E_s \hat{s}) \cos(\omega t). \text{ Polarización lineal.}$$

- Sea  $\varphi = \pi/2$  entonces:

$$\vec{E}(0, t) = E_p \sin(\omega t) \hat{p} + E_s \cos(\omega t) \hat{s}. \text{ Polarización elíptica dextrógira (derecha).}$$

- Sea  $\varphi = -\pi/2$  entonces:

$$\vec{E}(0, t) = -E_p \sin(\omega t) \hat{p} + E_s \cos(\omega t) \hat{s}. \text{ Polarización elíptica levógira (izquierda).}$$

Supóngase que tenemos dos haces de luz con una misma amplitud y frecuencia moviéndose a lo largo de una misma trayectoria, uno polarizado sobre un plano vertical y otro polarizado perpendicularmente a el plano vertical.

#### PERIFÉRICO DE ENTRADA-SALIDA PARALELO PPI8255

Este es un periférico programable de entrada y salida (E/S) de aplicación general. En este se dispone de un total de 24 líneas de E/S. Los canales se pueden agrupar en puertos, según tres modos diferentes de programación y sus características básicas son 24 líneas de E/S programables, compatible con TTL, alimentación de 5 volts y potencia de disipación 1W. Existen tres modos básicos que pueden escogerse por programación:

1. Modo 0: Modo básico de Entrada / Salida.
2. Modo 1: Modo de Entradas / Salidas con strobe.
3. Modo 2: Bus bidireccional.

Cuando el *Reset* pasa a alto, todos los puertos quedan programados en modo de entrada. Después de pasar la señal de *Reset* a estado bajo, los puertos continúan programados en modo de entrada. Durante la ejecución del proceso se puede cambiar la programación del modo en cualquier momento. Los modos del puerto A y el puerto B se puede definir separadamente; sin embargo, el puerto C queda dividido en dos mitades dependientes cada una de ellas del puerto A y el puerto B, respectivamente. Todos los registros de salida son puestos en  $\overline{Reset}$  igual que los biestables de estado, cuando se efectúa el cambio de modo. Los modos se pueden cambiar según las necesidades.

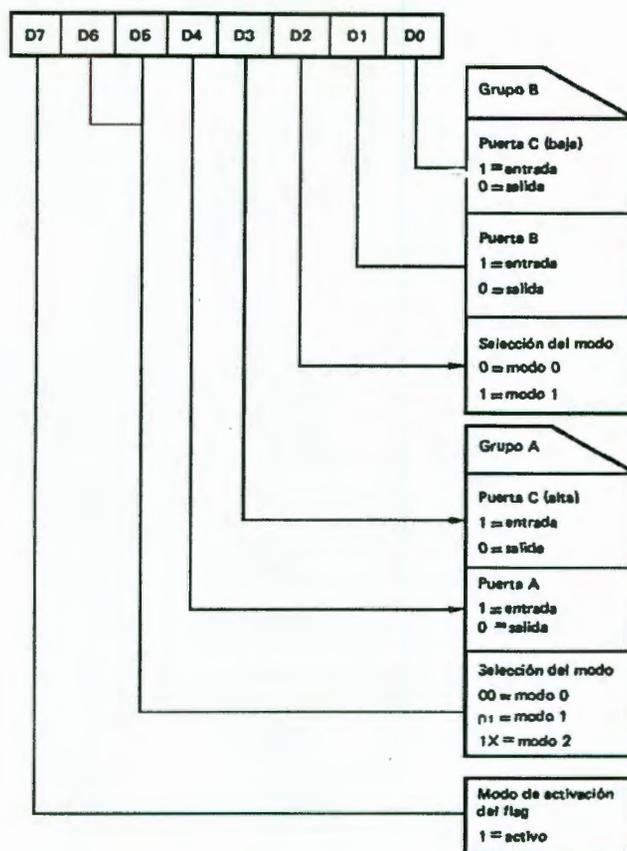


Figura 56.- Configuración de la palabra de control del PPI8255.

El Modo 0 (entradas y salidas básicas): este modo de funcionamiento permite una programación fácil de cada uno de los 3 puertos para trabajar como entrada o como salida. En este modo no se necesitan señales de control, y los datos son simplemente escritos o leídos sobre el puerto específico. En este modo de programación la configuración de las diferentes líneas son la de dos puertos de 8 bits, dos puertos de 4 bits. Las líneas de los puertos programados como salidas o como entradas son no latchedos.

**La tarjeta para el PPI8255 y la región para entrada salida de los datos de la PC**

Esta tarjeta esta formada por el PPI8255 , un integrado TTL 74LS138, un dip switch y optoacopladores con sus respectivas resistencias para el puerto A. La tarjeta se caracteriza por la utilización de un decodificador de direcciones 74LS138 que recibe las direcciones que habilitan la tarjeta. Sus entradas A, B, C,  $G_1$ ,  $G_{2A}$ ,  $G_{2B}$  se conectan respectivamente a las líneas del Bus de direcciones  $A_2$ ,  $A_3$ ,  $A_4$ ,  $A_9$ ,

$AEN$ ,  $A_5$  de la PC. La configuración de los pines del PPI8255 y del 74LS138 es mostrada en la figura 57.

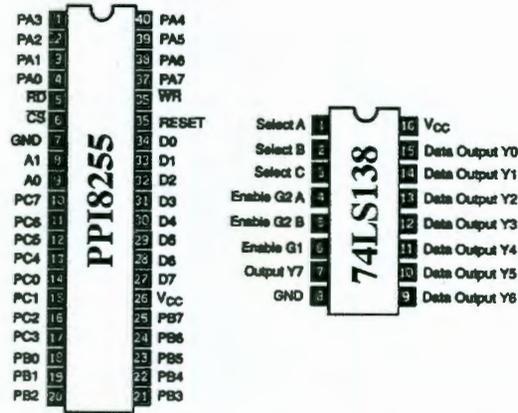


Figura 57.- Pines del PPI8255 y el 74LS138.

De acuerdo a los bits que lleguen por estas entradas, se entrega un 1 lógico por una de las salidas, teniendo así la capacidad de direccionar 8 posibles direcciones tanto para los puertos así como la palabra de control. Cada una de las salidas del 74LS138, se conecta a un extremo de un interruptor bipolar, formándose un arreglo de 8 interruptores. Los otros extremos de estos interruptores, van al  $\overline{CS}$  del PPI8255, por lo tanto habrá 8 posibles direcciones que pueden habilitar a la tarjeta. Cambiando únicamente las localidades de la memoria RAM de la computadora, donde se van a almacenar los datos que pasen por cualquiera de los tres puertos. En las computadoras IBM, se tienen 16 líneas de direccionamiento ( $AD_0 - AD_{15}$ ) para acceder a  $2^{16}$  o 64Kbytes de memoria RAM, por medio de los slots. Para la tarjeta se utilizan sólo 10 líneas de direccionamiento ( $A_0 - A_9$ ). Son decodificadas para un total de 1 Kbyte de memoria RAM, quedando 32 localidades de memoria para ocuparse por los datos que se envían a la tarjeta, dividiéndose en 8 direcciones de 4 localidades cada una. Con los 8 interruptores se selecciona una dirección con 4 localidades, asignando una localidad específica a los datos que pasen por cada uno de los 3 puertos y la palabra de control. Las localidades en memoria que son disponibles en la computadora son mostradas en la siguiente tabla:

	Puerto A	Puerto B	Puerto C	P. de Control
Dirección 1	\$200	\$201	\$202	\$203

Dirección 2	\$204	\$205	\$206	\$207
Dirección 3	\$208	\$209	\$20 <sup>a</sup>	\$20B
Dirección 4	\$20C	\$20D	\$20E	\$21F
Dirección 5	\$210	\$211	\$212	\$213
Dirección 6	\$214	\$215	\$216	\$217
Dirección 7	\$218	\$219	\$21A	\$21B
Dirección 8	\$21C	\$21D	\$21E	\$21F

Tabla 1.- Direcciones disponibles de memoria disponibles por la Interface Periférica

Las conexiones entre la ranura del puerto de la PC y la IPP se muestra en la figura 58.

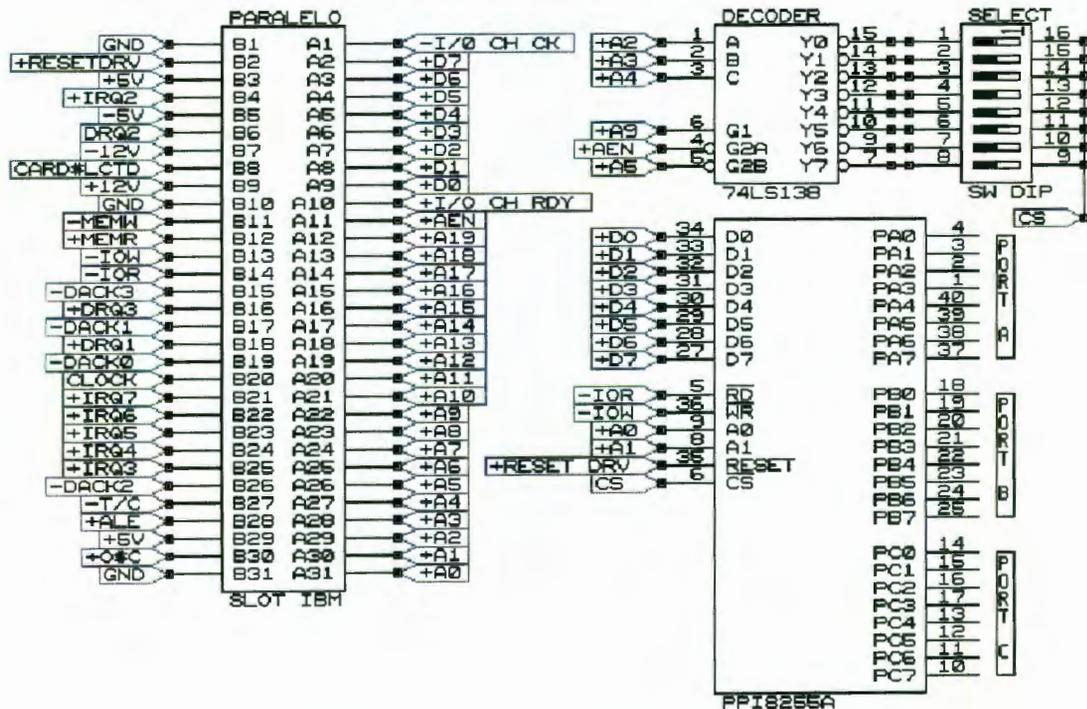


Figura 58.- Conexión del puerto paralelo de la PC y la IPP para direccionar memoria.

### EL DETECTOR DE POSICIÓN UDT SC-50D

El detector de posición es de tipo PIN de efecto duo-lateral o efecto lateral doble. Este dispositivo está constituido de 4 cátodos y un ánodo, en donde la fotocorriente se divide en 4 partes para sensar 2 dimensiones respectivamente. La fotocorriente generada es muy sensible a la posición de impacto del haz

láser sobre cada cuadrante del detector. La dimensión del área efectiva del detector es de  $4 \text{ cm}^2$ . Además presenta una gran rapidéz (desde milisegundos hasta microsegundos) con un intervalo dinámico de operación (del orden de 5 Hz a 30 KHz.) Las dimensiones del detector de posición de tipo duo-lateral (UDT494 de United Detectors Technology). Dado que las magnitudes de las señales obtenidas son pequeñas, éstas necesitan amplificarse por lo que a cada una de estas salidas se modelará como una fuente de corriente. Existe un parámetro inherente al detector, llamado error del detector de posición (PDE), el cual se define como la variación geométrica del haz entre la posición actual y la posición detectada, esta se debe a que hay una pequeña dispersión del haz láser al pegar sobre el detector, generando fluctuaciones en la señal adquirida las cuales son captadas por el CAD.

#### DIMENSIONES DEL SISTEMA MECÁNICO

La parte mecánica del sistema consiste de un plato que alinea la muestra con tres motores de pasos sostenido a una base fija. Esta contiene además un motor de pasos que se encarga del rotamiento de la muestra y a su vez a un engrane de ajuste. Por otra parte tenemos un sistema mecánico que evita el enredado del cable proveniente de la tarjeta de potencia. Se tienen tres engranes; el correspondiente para el plato giratorio que tiene 100 dientes, el engrane de ajuste que tiene 20 dientes y el del motor, de rotación tan sólo 10 dientes.

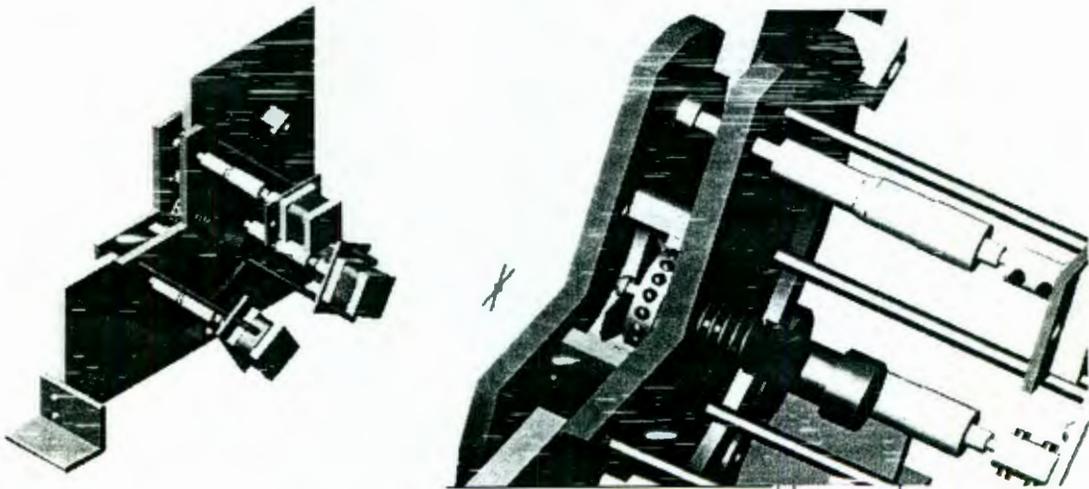


Figura 59.- Corte y ampliación del corte en el sistema mecánico para posicionamiento.

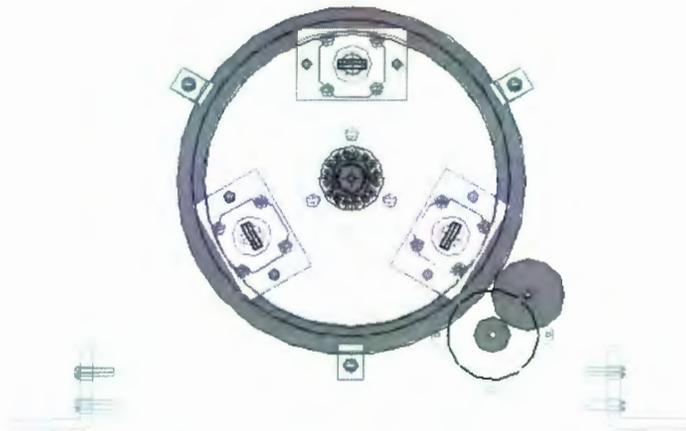


Figura 60. - Parte posterior de la base de alineación. Los tres motores dispuestos a  $120^\circ$  controlan la inclinación de la superficie de la muestra. Como se indica, el giro de la superficie es controlada por el motor de rotación.

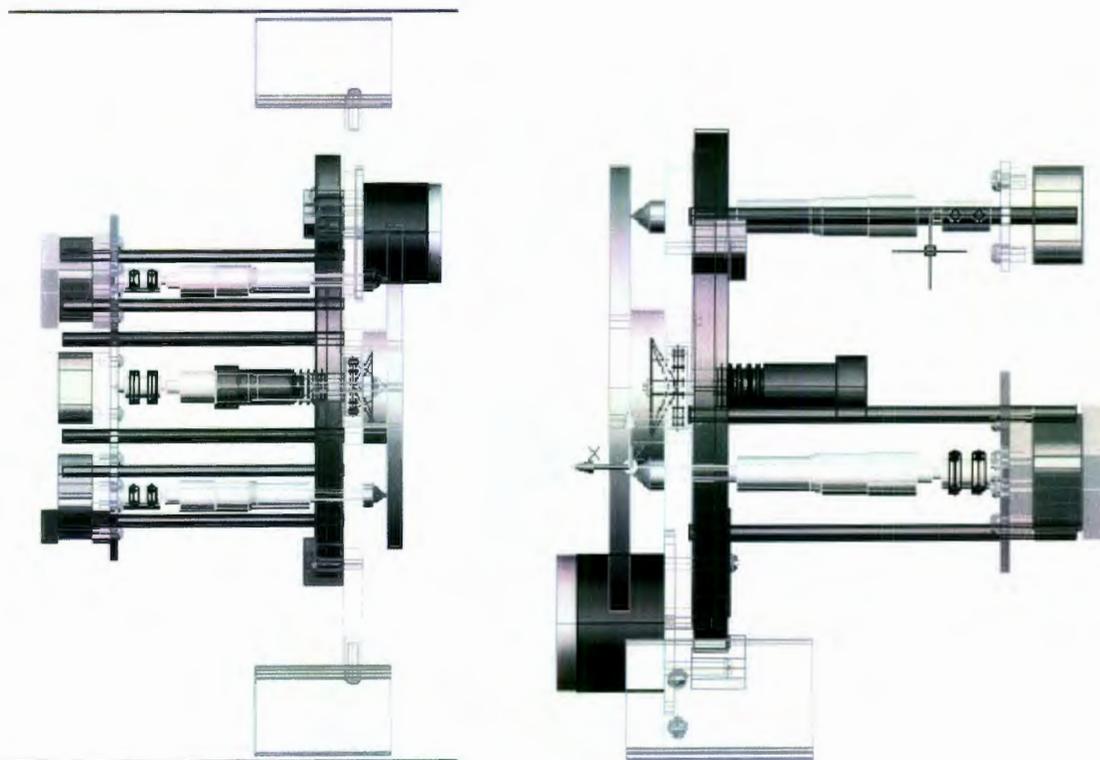


Figura 61.- Vista lateral del sistema del sistema mecánico.

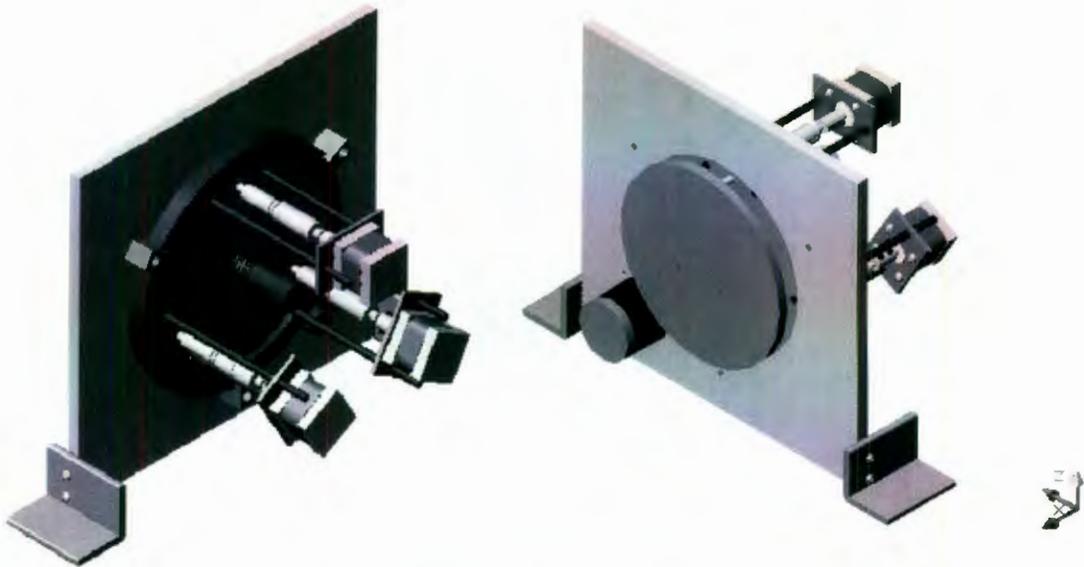


Figura 62.- Vista Trasera y delantera del sistema del sistema.

#### PROGRAMA EN PARA LA ALINEACIÓN DEL SISTEMA

En este proyecto se implementó un programa para la alineación del sistema. La forma en que se realiza la comunicación entre la PC y el PPI8255 es la instrucción PORT, la cual servirá para manejar el sistema de alineación. La sintaxis de esta instrucción para enviar o recibir un dato es la siguiente:

***PORT[DIRECCION DE MEMORIA ] := DATO;***

La dirección de la localidad de memoria de la computadora, es la asignada a cada uno de los tres puertos o a la palabra de control. La dirección de la localidad de memoria debe llevar antepuesto el signo \$, por ser hexadecimal. La secuencia de rotamiento de los motores se envía en forma de byte por cada uno de los puertos optoacoplados para dos motores de la etapa de Potencia. El byte por motor corresponde a la rutina de magnetización para medios pasos o pasos enteros de los motores. Para que el motor gire en un sólo sentido, se deben magnetizar las fases en un orden, ya sea ascendente o descendente. Este sentido corresponde a una inversión secuencial en el sentido de los pasos. La rutina de magnetización de las fases del motor para dar medios pasos se muestra en la tabla 2:

B3	B2	B1	B0	Movimiento
0	0	0	1	Derecha ½ paso
0	0	1	1	Derecha ½ paso
0	0	1	0	Derecha ½ paso
0	1	1	0	Derecha ½ paso
0	1	0	0	Derecha ½ paso
1	1	0	0	Derecha ½ paso
1	0	0	0	Derecha ½ paso
1	0	0	1	Derecha ½ paso
0	0	0	1	Izquierda ½ paso
1	0	0	1	Izquierda ½ paso
1	0	0	0	Izquierda ½ paso
1	1	0	0	Izquierda ½ paso
0	1	0	0	Izquierda ½ paso
0	1	1	0	Izquierda ½ paso
0	0	1	0	Izquierda ½ paso
0	0	1	1	Izquierda ½ paso

Tabla 2.- Secuencia de excitación de fases de entrada del motor de pasos.

Para magnetizar cada fase de cada motor son necesarios únicamente 4 bits. Para transmitir la rutina de pasos por un puerto para un motor se utilizan los bits MSB manteniendo los bits LSB en ceros y viceversa para el otro motor. Para transmitir los bits por los puertos del PPI8255 es necesario primero programar la palabra de control la cual tiene una localidad de memoria asignada. Los datos para magnetizar las fases de un motor deben enviarse por el registro correspondiente al puerto. Para seguir avanzando se repite esta secuencia de instrucciones hasta llegar al punto que se desee. Si se ejecuta la secuencia de instrucciones empezando por la última, o en sentido inverso, el motor girará en sentido inverso al anterior, la velocidad de rotación de los motores en milisegundos se controla mediante la instrucción:

## DELAY (RETRASO)

Otra etapa contenida para la alineación del sistema es la que corresponde a la etapa de adquisición que contiene el convertidor análogo - digital. Para el funcionamiento de esta etapa se ayuda de un programa para gráficos, esto con el fin de que el resultado sea visual en la pantalla, para bits capturados por un puerto se pueden definir como una variable, la instrucción es:

***PORT[ DIRECCION DE MEMORIA ] := VARIABLE;***

El paso posterior a la adquisición del dato es normalizarlo, es decir, marcar un límite máximo permisible, logrando con esto que cualquier dato que se obtenga sea convertido por medio de una relación matemática a un valor equivalente que se encuentre entre los rangos de normalización. En el caso específico del Modulo de Alineación, se tiene un plano cartesiano que va desde  $-1$  a  $1$  tanto en el eje de las ordenadas como en las abscisas. Por lo tanto, todo dato que se obtenga desde el puerto, tendrá que ser normalizado bajo estos valores. Para lograr esto, es necesario, primero, lograr que el protocolo reconozca cuando se trata de un valor negativo o positivo el que está leyendo desde la localidad de memoria. Esto es posible a través de la configuración de los amplificadores operacionales (AOP) a los cuales se encuentra conectado el fotodetector de posición. La configuración de estos AOP permite identificar cuando el láser está detectando una posición que puede ser interpretada como negativa y cuando como positiva. Lo anterior se logra tomando en cuenta el bit mas significativo del dato leído desde el puerto. Cuando el bit mas significativo es  $1$  (uno) el protocolo interpreta el dato como negativo y cuando es  $0$  (cero) como positivo. La tabla 3, da un ejemplo de cómo el protocolo diferenciaría entre dos datos, uno positivo y otro negativo, utilizando un CAD de 8 bits.

Primera lectura del puerto	Segunda lectura del puerto	Valor Total	Dato en Binario	MSB	Signo asignado
$255_{10} = 11111111_2$ Aplicando el algoritmo de desecho de bits, el valor final sería 15	$255_{10} = 11111111_2$ Aplicando el algoritmo de desecho de bits, el valor final sería 15, y aplicando el corrimiento se tendría un valor de 240	$14+240=255$	11111111	1	Negativo
$255_{10} = 11111111_2$ Aplicando el algoritmo de desecho de bits, el valor final sería 15	$191_{10} = 10111111_2$ Aplicando el algoritmo de desecho de bits, el valor final sería 7, y aplicando el corrimiento se tendría un valor de 112	$15+112=127$	01111111	0	Positivo

Tabla 3.- Asignación de signo al dato adquirido por la localidad de memoria.

Una vez que se ha obtenido el signo del valor que se ha leído desde el puerto, el siguiente paso es normalizar el dato. Este proceso está totalmente ligado a la resolución del CAD, ya que esto indicará el límite máximo permisible para los datos a manejar. Así, continuando entonces con el ejemplo de un CAD de 8 bits, se tendría que dependiendo del signo del dato, se tendrán dos valores superiores para normalizarlo. Cuando se trata de un dato negativo, el límite máximo es 255 y cuando el dato es positivo, el límite máximo es 127.

Esto se debe a que el número en binario mas grande que se puede formar con 8 bits tomando en cuenta que se desea obtener un dato positivo, siendo entonces el lsb igual a 0(cero), es el  $127_{10} = 01111111_2$ ; de igual manera, el numero mas grande que se puede formar con 8 bits siendo el msb igual a 1(uno), es  $255_{10} = 11111111_2$ .

## COORDENADAS A PÍXELES

Un píxel, en informática, es la abreviatura fonética del concepto inglés *picture element*. Se trata de un punto en una rejilla rectilínea de miles de puntos tratados individualmente, para formar una imagen en la pantalla de la computadora o en la impresora. Igual que un bit es la unidad de información más pequeña que puede procesar una computadora, un píxel es el elemento más pequeño que el *hardware* y el *software* de pantalla e impresora pueden manipular al crear cartas, números o gráficos. Por ejemplo, la letra A (fig. 63) está compuesta realmente por un conjunto de píxeles dentro de una rejilla, como la que se muestra a continuación:



Figura 63.- Formación de un carácter a través de píxeles.

Una imagen también se puede representar con más de dos colores. Si un píxel tiene sólo dos valores de color (normalmente blanco y negro), se puede codificar con un solo bit de información. Cuando se utilizan más de dos bits para representar un píxel, es posible representar un rango mayor de colores y niveles de gris. Con dos bits se representan cuatro colores o niveles de gris, con cuatro bits se representan dieciséis colores, y así sucesivamente. Borland Builder C++ necesita un tipo de dato en específico para poder colocar un objeto en la pantalla y pueda ser visto por el usuario. Todos los objetos (o componentes) como botones, cuadros de texto, etc, requieren de esta información para que el lenguaje sepa en que lugar de la pantalla colocará al objeto. Este tipo de dato es conocido como *Tpoint* el cual define una posición en píxeles en la pantalla. Por este motivo, no es posible indicarle a Borland Builder C++ que coloque un objeto en, por ejemplo, la coordenada (-1,0.4), ya que no es un tipo de dato válido. Es necesario indicarle la posición en píxeles en donde debe de colocar el objeto. Para lograr esto, se desarrollo una lista, tanto para X como para Y para poder encontrar la relación entre la coordenada y la posición que le correspondería en la pantalla. La tabla 4 muestra esta relación:

Posición X	Pixel en pantalla	Posición Y	Pixel en pantalla
-1	0	-1	398
-0.9	18	-0.9	378
-0.8	38	-0.8	358
-0.7	58	-0.7	338
-0.6	78	-0.6	318
-0.5	98	-0.5	298
-0.4	118	-0.4	278
-0.3	138	-0.3	258
-0.2	158	-0.2	238
-0.1	178	-0.1	218
0	198	0	198
0.1	218	0.1	178
0.2	238	0.2	158
0.3	258	0.3	138
0.4	278	0.4	118
0.5	298	0.5	98
0.6	318	0.6	78
0.7	338	0.7	58
0.8	358	0.8	38
0.9	378	0.9	18
1	398	1	0

Tabla 4.- Relación posición calculada contra pixel en pantalla.

Se puede notar en la tabla anterior como corresponde a cada coordenada calculada por el protocolo de comunicación una posición en la pantalla. Es importante notar que el valor en pixeles en X es inversamente proporcional al valor en pixeles en Y. Esto se debe al aumento de valor en coordenada en X aumenta de izquierda a derecha y el de Y de arriba hacia abajo. Además un punto muy importante que

hay que tomar en cuenta es que las posiciones en pixeles en la pantalla aumentan de izquierda a derecha y de arriba hacia abajo. En la figura 64 se ilustra lo antes dicho.

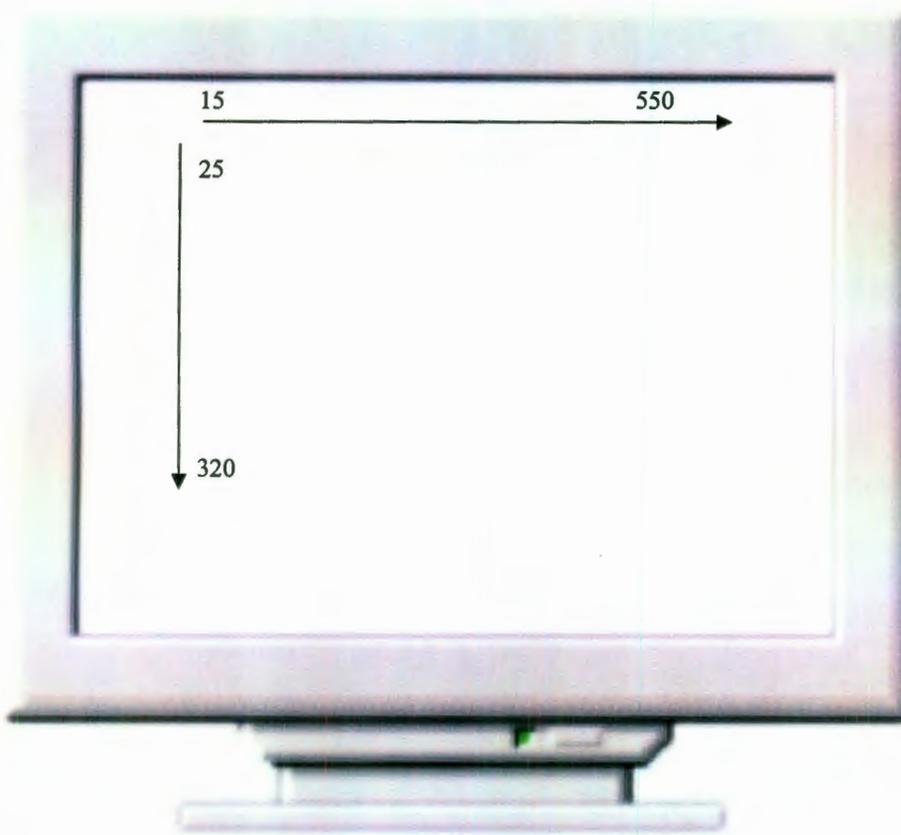


Figura 64.- Distribución de los pixeles en la pantalla.

Para poder mostrar la posición en la pantalla por donde pasa el láser, se utilizó un componente de Borland Builder C++ llamado *TImage* el cual despliega una imagen gráfica en la ventana de un programa. Con este componente es posible generar un área de dibujo en una ventana con un rango de pixeles asignado por el programador. Se utilizó un componente *TImage* en el módulo de alineación. Dicho componente tiene un ancho de 404 pixeles y una altura de 403 pixeles.

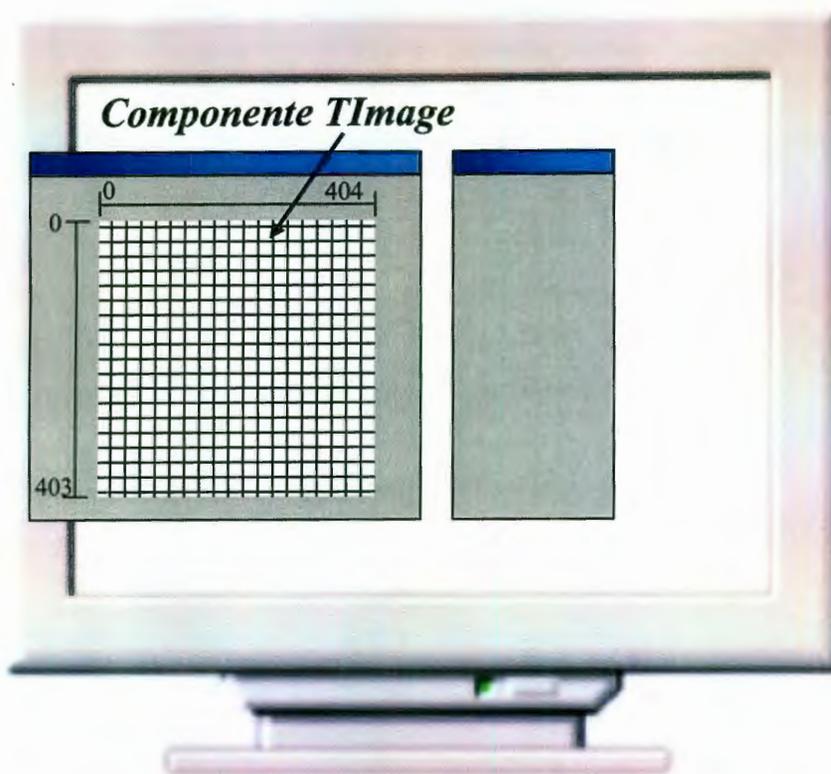


Figura 65.- Distribución de los pixeles en el componente TImage.

Como se ilustra en la figura 65, se tiene un segmento de pantalla el cual corresponderá en cada píxel a una coordenada generada por el protocolo de comunicación con el posicionador del láser. Las relaciones matemáticas que permiten generar esta posición en la pantalla, se muestran a continuación:

$$\alpha = (\mu \times 398) + ((1 - \mu) \times 198)$$

$$\beta = ((\eta \times 398) \times (-1)) + ((1 - (\eta \times (-1))) \times 198)$$

Donde se tiene que:  $\alpha$  = posición en píxeles para X con  $\mu$  = dato leído en X y por otra parte  $\beta$  = posición en píxeles para Y con  $\eta$  = dato leído en Y

Finalmente, los valores en píxeles son enviados a las funciones desarrolladas en Borland Builder C++ para que dibuje un pequeño círculo rojo en el componente TImage de 5 píxeles de diámetro que indica la posición actual del láser.

La pantalla de detección de posición del láser del sistema , se muestra en la figura 66.

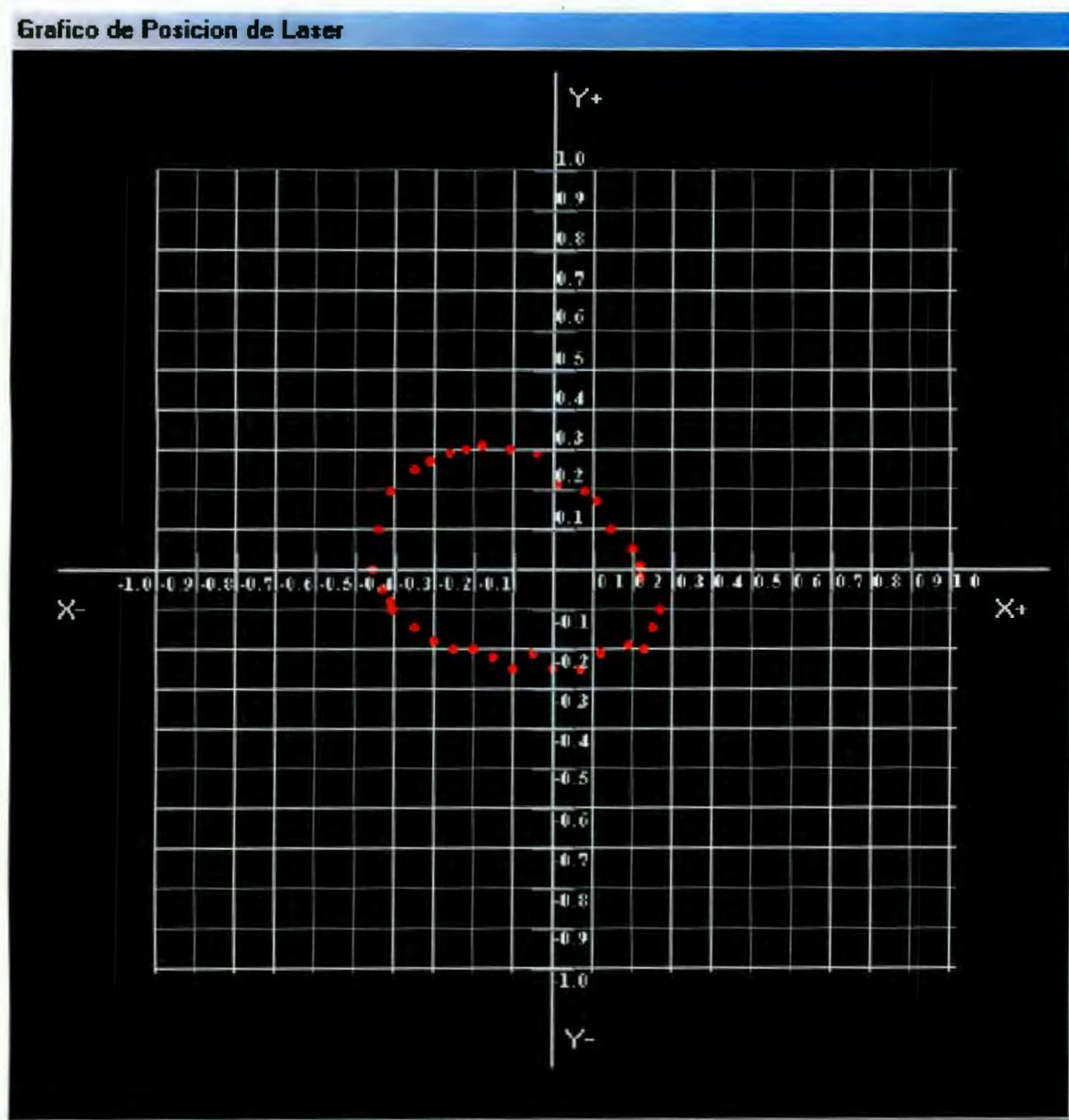


Figura 66.- Pantalla del Sistema para la detección de posición del haz láser.

## **APÉNDICE B**

# Automatic optical alignment by numerical ellipse fitting

A. Castañeda-Miranda<sup>1,2</sup>, L. Bulenkova<sup>1</sup>, G. Beliasvski<sup>1</sup>, Víctor M. Castaño<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Universidad Autónoma de Querétaro, Cerro de Campanas, Santiago de Querétaro, Qro. C.P. 76010, México

<sup>2</sup> Instituto de Física, U.N.A.M. Apartado Postal 1-1010 Santiago de Querétaro, Qro. C.P. 76000, México

**Abstract:** An automatic system for surface alignment, which can be employed for the study and optical characterization of samples in many devices, is presented. The alignment is accomplished through a mechanical device, consisting in three stepping motors driving micrometry screws, which in turn allow the tilting of the specimen. Simultaneously, a laser beam is reflected on the surface sample and the reflection is collected through a Position-Sensitive Detector (PDS), which provides four photocurrents outputs proportional to the two-dimensional center of mass of the light spot impinging the surface of the detector, allowing to locate the relative positioning of the laser. Any desalignment generates an ellipse on the detector position and will be monitored through this array, feedbacked electronically through a personal computer. The algorithm developed for finding all parameters of the ellipse are evaluated and discussed.

**Key words:** Optical alignment – numerical fitting – optical devices

## 1. Introduction

Due to the latest developments in advanced scientific instrumentation, spatial micropositioning has become a key technology for many fields, such as optical and electron microscopy, x-ray lithography, mask alignment, collimators, and electron beam lithography, where an accurate alignment of samples is very important. This problem has been addressed by various ways, for example: precision transducers, Linear Variable Differential Transformers (LVDT), parallel wire links, piezoelectric driving, etc.

The ultimate goal of any of those systems is to achieve detection with enough both spatial and time resolution. This, in principle, could be done by measuring radii of curvature, surface roughness, and some other physical parameters. For the case of spatial positioning, one popular approach utilizes a video camera to electronically register the position, along with image processing techniques. For situations requiring locating a light source on a plane, a Position-Sensitive Detector (PDS) offers good resolution at low cost, thus representing a system ideal for detecting spatial displacements of the sample with respect to the change of the laser position, as observed on a screen [1]. However, if the plane of the screen is not perfectly perpendicular to the laser beam,

since a cone is generated as the laser beam rotates, an ellipse so generated on the screen must be fully characterized in a simple, accurate and fast way, if a precise and reliable positioning is to be done. Accordingly, this present work reports the development of a especially designed hardware, consisting of both electronic and mechanical components and a novel software, based on the so-called ellipse grid method, to determine the position of the laser beam from the measured ellipse generated as a consequence of the rotation of the beam with respect to a non-perpendicular plane (screen). The details of both design and algorithm are discussed.

## 2. Position-sensing detector

The PSD is a precision semiconductor optical sensor which produces output currents related to the "center of mass" of the light impinging on the surface of the device, these devices are available from different vendors. The particular units chosen for this work were manufactured by United Detector Technology (UDT) of Hawthorne, CA.

While several design variations exist for PSD's, the basic device can be described as a large-area silicon p-i-n photodiode. The detectors are available in both single-axis and dual-axis models. This research used the dual-axis variety, which is shown in a schematical representation in fig. 1. This particular PSD is a five-terminal device bounded by four collecting surfaces; one terminal is connected to each collecting surface and one provides a common reference. The photocurrent generated by the light inciding on the active area of the PSD will be collected by these four perimeter electrodes. The amount of current flowing between each perimeter terminal and the common reference is related to the proximity of the center mass of the incident light spot to each collecting surface. The difference between the "up" current and the "down" current is proportional to the Y-axis position of the light spot. Similarly, the "right" current minus the "left" current gives an X-axis position. The designations "up", "down", "right" and "left" are arbitrary; the device may be operated in any relative spatial orientation.

The operation of the PSD is based on the lateral photoeffect. This phenomenon was first described by Schottky [2], and later elaborated by Wallmark [3] who is often credited with inventing the detector. Several other authors have discussed the differential equations which describe the nonuniform irradiation of a p-n junction [4]. In general, when a rec-

Received 25 August 1999; accepted 12 November 1999.

Correspondence to: V. M. Castaño

Fax: ++52-43381165

E-mail: meneses@servidor.unam.mx

castano@sunserver.uaq.mx

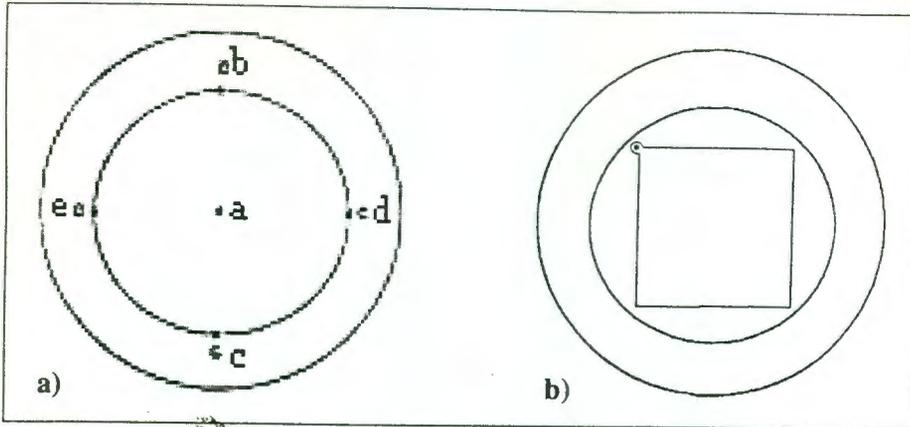


Fig. 1. A typical dual-axis PSD (electrodes: a. - common, b. - up, c. - down, d. - right, e. - left).

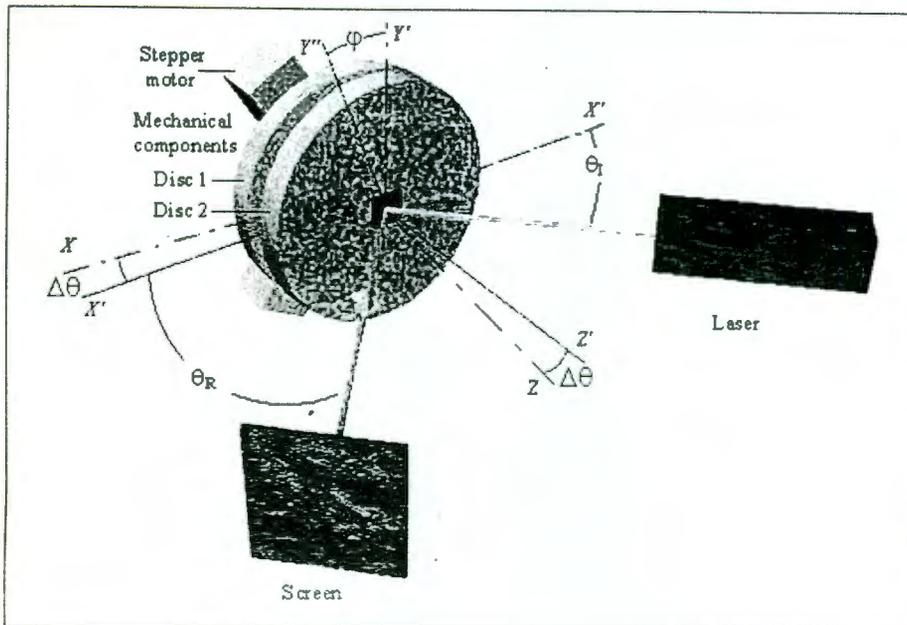


Fig. 2. Schematic alignment system showing the angle between optical (laser and screen) and mechanical (discs for the sample and screw) parts.

tifying junction is exposed to radiation of enough energy distributed in a nonuniform manner, a current is generated which diffuses across the illuminated surface. The current diffuses through the bulk resistance of the material producing a lateral electric field.

The current from each electrode can be shown to decrease exponentially as the distance from the light spot increases. Assuming that the sheet resistance of the semiconductor is given by

$$I_1 = I_T \left( \frac{\text{Sinh} [\alpha (L - S)]}{\text{Sinh} [\alpha \cdot L]} \right), \tag{1}$$

where  $I_T$  is the total photo-generated current,  $I_1$  is the current collected by electrode 1,  $S$  is the distance from the center of mass of the light spot to electrode 1 and its companion electrode on the other side of the device, and  $\alpha$  is the Lucovsky falloff parameter. For linear operation, the Lucovsky falloff parameter is minimized. In the limited as  $\alpha$  approaches zero [1] reduces to

$$\lim_{\alpha \rightarrow 0} I_T \left( \frac{\text{Sinh} [\alpha (L - S)]}{\text{Sinh} [\alpha L]} \right) = I_T \left( 1 - \frac{S}{L} \right)$$

$$I_1 \cong I_T \left( \frac{L - S}{L} \right), \tag{2}$$

This linear relation predicts the useful position sensing capability of the PSD. By applying the superposition principle, multiple light spots may be tracked using a single PSD.

### 3. Experimental setup

The basic objective is to keep the sample surface as perpendicular as possible to a given rotation edge defined by a fixed platform. The automatic positioning consists of optical components and mechanical parts, interconnected electronically. The complete system is capable of manipulating samples in an automatic form for alignment of the sample as perpendicular as possible to the pre-defined rotation axis. The schematic diagram of the whole system is depicted in fig. 2.

As observed there, the mechanical system consists of two discs, one fixed (disc 1 with  $X$  axis) with respect to the other (disc 2 with  $X'$  axis), the second disc with the sample is driven by three stepping motors driving in turn micrometric screws fixed at 120 degree with respect to the fixed disc. To obtain the laser focusing always over the center of the disc 2 and on the sample and thus to maintain the surface of the sample ( $X'$  and  $Y'$  axes) as perpendicular as possible to the rotation ( $Z$  axis), for any possible rotation of the sample ( $Y'' = Y' \cos \varphi$ ), it must take into account the angle of incidence of the beam  $\theta_j$ . The purpose is obtain minimal deviation of the beam reflected ( $\theta_R + \Delta\theta$ ). When  $\Delta\theta = 0$ , thus to obtain the beam reflected as a collection of points over the screen for any rotation of the sample.

#### 4. The ellipse fitting algorithm

The first step of the ellipse fitting algorithm consist in the angle detection. We solve this problem with two one dimensional edge detection procedures: horizontal and vertical scans. Once these procedures have been applied, we have two sets of data, namely

$$G = \{(x_i, y_i^l, y_i^r)\}, G = \{(x_i, x_i^u, x_i^d)\}.$$

According to the above, the  $(y_i^l, y_i^r)$  and the  $(x_i^u, x_i^d)$  are the left - right and upper - lower boundary points, respectively.

In the remaining of this article we will use the following estimators for the ellipse fitting:

$$\xi_i^v = \frac{y_i^l + y_i^r}{2}, \quad \xi_i^h = \frac{x_i^u + x_i^d}{2}, \quad (3)$$

$$\eta_i^v = y_i^l + y_i^r, \quad \eta_i^h = x_i^u + x_i^d. \quad (4)$$

We will consider two classes of ellipses. The first class contains the ellipses whose axes are not parallel to the coordinate axes. Let us represent the equation of the ellipse as follows:

$$k_1 x^2 - 2 k_1 k_2 x y + k_2 y^2 - 2 k_1 b_2 x - 2 k_2 b_1 y = r. \quad (5)$$

Thus, we most evaluate parameters:  $k_1, k_2, b_1, b_2, r$ .

$$y_i^l = \hat{y}_i^l + n_i^l, \quad y_i^r = \hat{y}_i^r + n_i^r, \quad x_i^u = \hat{x}_i^u + n_i^u, \quad x_i^d = \hat{x}_i^d + n_i^d.$$

here

$$n_i^l, n_i^r, n_i^u, n_i^d,$$

are the independent random variables with zero expectations and deviations of estimators from (3):

$$E \xi_i^v = k_1 x_i + b_1, \quad E \xi_i^h = k_2 y_i + b_2,$$

$$E \eta_i^v = \frac{k_1 x_i^2 - 2 k_1 b_2 x_i - r}{k_2},$$

$$E \eta_i^h = \frac{k_2 y_i^2 - 2 k_1 b_2 y_i - r}{k_1},$$

$$D \xi_i^v = D \xi_i^h = \sigma^2,$$

$$D \eta_i^v = ((2 E \xi_i^v) - 2 E \eta_i^v) \sigma^2 + \sigma^4,$$

$$D \eta_i^h = ((2 E \xi_i^h) - 2 E \eta_i^h) \sigma^2 + \sigma^4. \quad (6)$$

Consider the summations:

$$S_1 = \frac{1}{\sigma^2} \left[ \sum_i (\xi_i^v - E \xi_i^v)^2 + \sum_i (\xi_i^h - E \xi_i^h)^2 \right]. \quad (7)$$

$S_1$  is distributed asymptotically with the  $X^2$  law and we can evaluate the parameters to solve the optimization problem:  $\min S_1$ . The problem is reduced to two linear algebraic systems of second order:

$$\begin{cases} \alpha_{1,1}^i k_i + \alpha_{1,2}^i b_i = \beta_1^i \\ \alpha_{2,1}^i k_i + \alpha_{2,2}^i b_i = \beta_2^i \end{cases}, \quad i = 1, 2,$$

$$\alpha_{1,1}^1 = \sum_i x_i^2, \quad \alpha_{1,2}^1 = \alpha_{2,1}^1 = \sum_i x_i, \quad \beta_1^1 = \sum_i \xi_i^v x_i,$$

$$\alpha_{1,2}^2 = |G^v|, \quad \beta_2^1 = \sum_i \xi_i^v, \quad \alpha_{1,1}^2 = \sum_i y_i^2,$$

$$\alpha_{1,2}^2 = \alpha_{2,1}^2 = \sum_i y_i, \quad \beta_2^2 = \sum_i \xi_i^h y_i,$$

$$\alpha_{2,2}^2 = |G^h|, \quad \beta_2^2 = \sum_i \xi_i^h. \quad (8)$$

However,  $S_1$  does not contain the parameter  $r$ . Let us now consider the second summation

$$S_2 = \sum_i \frac{(\eta_i^v - E \eta_i^v)^2}{D \eta_i^v} + \sum_i \frac{(\eta_i^h - E \eta_i^h)^2}{D \eta_i^h}. \quad (9)$$

$S_2$  is distributed asymptotically with the  $X^2$  law also and contains all the parameters of the ellipse. We can evaluate it to solve the problem:  $\min S_2$ . But this problem is difficult. The proposition is then to evaluate the four parameters:  $k_1, k_2, b_1, b_2$  with eq. (8) and thus to evaluate the last parameter  $r$ , by solving the problem  $\min S_2$ , while solving only the parameter  $r$ .

Consider the ellipse with axes parallel to the coordinate axes. The equation of the ellipse can be written as follows:

$$a(x-b)^2 + c(y-d)^2 = 1, \quad (10)$$

and we must evaluate four parameters:  $a, b, c, d$ .

From eq. (9) it follows that expectations and deviations of the above considered estimators are:

$$E \xi_i^v = d, \quad E \xi_i^h = b, \quad E \eta_i^v = \frac{a(x_i - b)^2 - c d^2 - 1}{c},$$

$$E \eta_i^h = \frac{c(y_i - d)^2 - a b^2 - 1}{a}, \quad D \xi_i^v = D \xi_i^h = \sigma^2,$$

$$D \eta_i^v = ((2 E \xi_i^v) - 2 E \eta_i^v) \sigma^2 + \sigma^4,$$

$$D \eta_i^h = ((2 E \xi_i^h) - 2 E \eta_i^h) \sigma^2 + \sigma^4. \quad (11)$$

As above we can evaluate the parameters by first solving the problem  $\min S_1$  and then evaluate the parameters  $b, d$ :

$$d = \frac{1}{|G^v|} \sum_i \xi_i^v, \quad b = \frac{1}{|G^h|} \sum_i \xi_i^h. \quad (12)$$

Then we solve the problem  $\min S_2$  to evaluate the parameters  $a, c$ .

Based on previous developments we can propose the next algorithm:

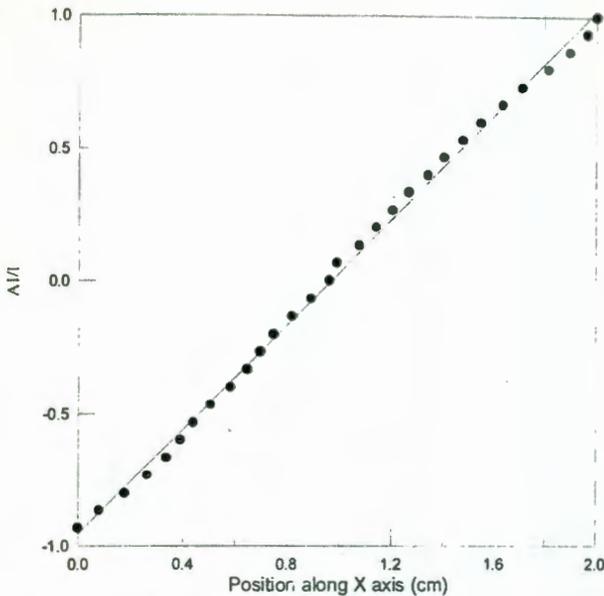


Fig. 3. Fraction of normalized maximum photocurrent corresponding to the electrodes of the axis  $X$  as a function of the horizontal displacement of the detector. The horizontal scale corresponds to the dimension of the detector ( $\sim 2$  cm).

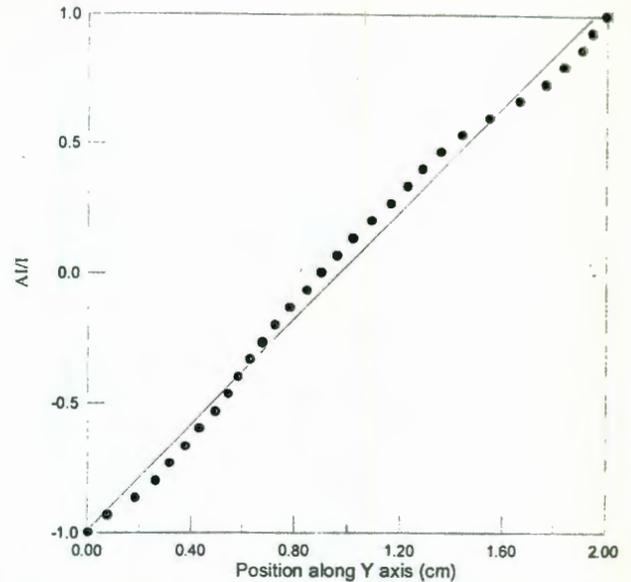


Fig. 4. Fraction of normalized maximum photocurrent corresponding to the electrodes of the axis as a function of the vertical displacement of the detector of quadrants. The horizontal scale corresponds to the dimension of the detector ( $\sim 2$  cm).

1. Horizontal and vertical scan: with one dimension edge detection.
2. Evaluate the parameters:  $k_1, k_2, b_1, b_2$  with eq. (8).
3. If  $k_1=0$  then evaluate  $d, b$  with eq. (11) and evaluate  $a$ , else evaluate  $r$ .

## 5. Results and discussion

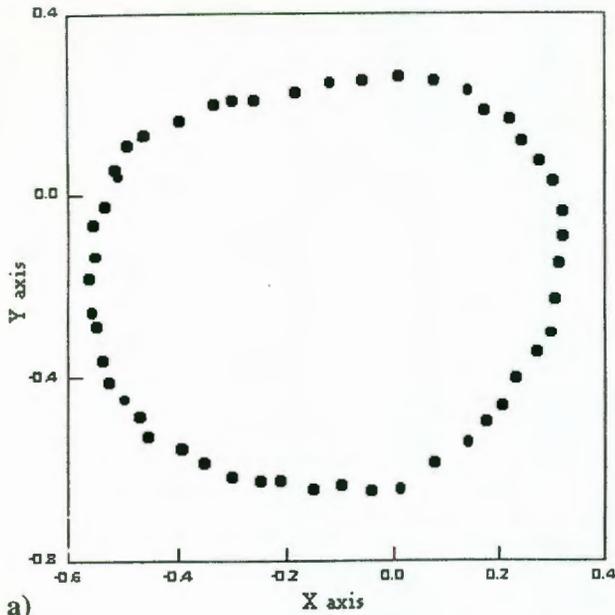
To obtain the response of the detector as a function of the position of the incident beam on the surface of the detector, it is necessary to plot the fraction of the normalized photocurrent vs. Position. This is achieved by displacing it along an arbitrary axis, and thus measuring at its corresponding ends, to obtain a response proportional to the displacement along this axis. The fraction of normalized photocurrent of the detector when displacing the laser along each axis is shown in the figs. 3 to 4. Notice that it corresponds to a straight ( $y=ax+b$ ).

The localized traced by the reflection of the laser impinging on the sample, determines the form of the generated patterns. On the other hand, for obtaining the position of the laser, computer programming is required, where the acquired sign of each one of the electrodes of the detector is amplified and stored in a channel of the ADC (Analogic-Digital Converter) prior to digitizing into the computer. Since these signs should be inside the range of conversion of the ADC, we use at the entrance of each channel of the ADC a stage with an non-inverting Amplifier, with a gain of 5.5, where for the resolution of the ADC, one has a sensibility of  $\sim 20$  mV/bit, being this the theoretical limit. To test the operation of the mechanics and the optical part of the system, two cards (power and acquisition) are synchron-

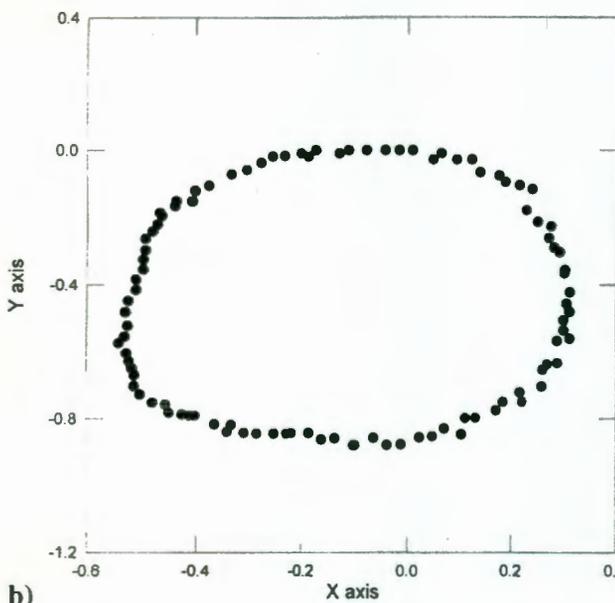
ized, allowing to rotate through the computer the sample in steps around their normal value and coordinate at the same time the reading, step by step with the ADC, obtaining a series of figures that, in general, are semi-elliptical. Typical plots are presented in fig. 5 where each figure represents an experiment in which, by rotating the sample, each point in the graphs corresponds to a reading of the ADC for each step of the rotation motor, which in general, requires 50 steps to complete achieve a whole turn.

Fig. 6 shows an example of the numerical fitting, by using the above algorithm, to verify the performance of the method. The ellipse with not non-parallel axis with respect to the coordinate axes is shown in the fig. 6a whereas the ellipse with axes parallel to the coordinate axes is displayed in fig. 6b.

By aligning the plane of the sample with the method described in the section 4 the patterns of figs. 7a and 7b were obtained. As can be noticed in fig. 7. The method developed ensures convergence of the beam towards the center. The shape of the patterns can be explained by considering that there is a small delay in the position of the three motors. However, as mentioned, it can be observed that the convergence turns out to be repetitive in all the cases. Taking into account the size of the detecting beam, we can give an estimate of the convergence radius during the alignment process. The fig. 7b, the typical convergence of the ellipse is shown within the area of the detector. The three trajectories correspond to the pattern of convergence and their distance from the center of the figure decreases monotonically during the rotation motor, which stops each  $120^\circ$ . After simple calculations, the convergence radius or vertex of the figure that we obtain are estimated to be approximately 0.5 mm, that which provides an experimental alignment



a)



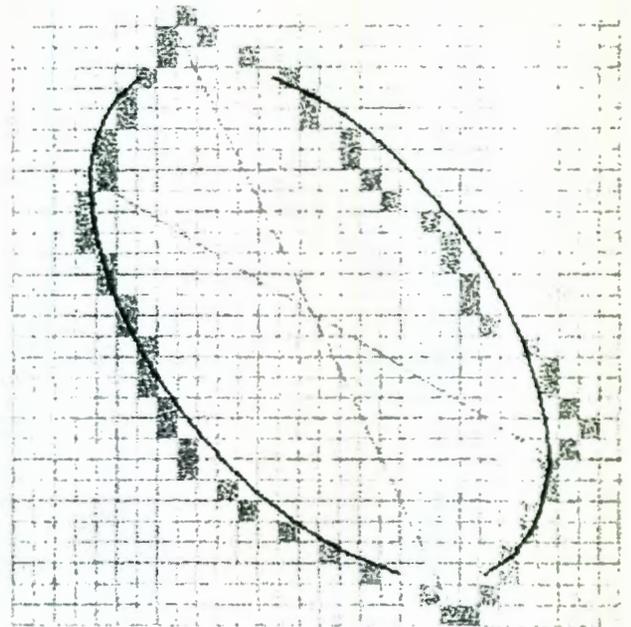
b)

Fig. 5. Typical a) through b) trajectories generated by the incident beam from the laser when rotating the sample around the axis normal to the sample.

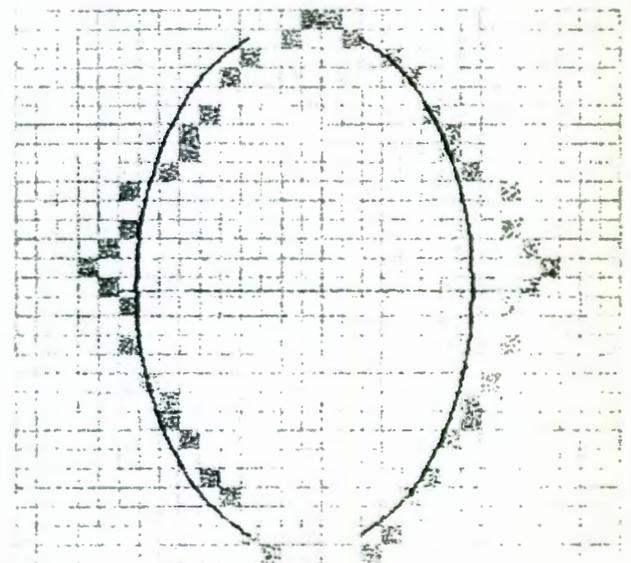
comparable to the dispersion of the laser. The micropositioning mechanical device has steps of  $635 \mu\text{m}$  per turn, which, according to our measurements, allows a maximum resolution of  $1.1 \mu\text{m}$ , at a speed of  $1 \text{ mm/sec}$ .

## 6. Conclusions

We have presented the design and construction of a mechanical and optical system controlled electronically, useful for



a)



b)

Fig. 6. Localization of the ellipse with the axes a) not parallel to coordinate axes; b) parallel to coordinate axes.

the automatic positioning or alignment of surfaces, aided by a numerical method which allows to efficiently fit an ellipse to a collection of data points.

The main advantages of the offered method consist in the following:

1. The one dimensional edge detection used.
2. The sampling is divided into two parts, this allows to offer an adequate statistical model.
3. We have a close form with four parameters, in the first case, and to two parameters, in second case.

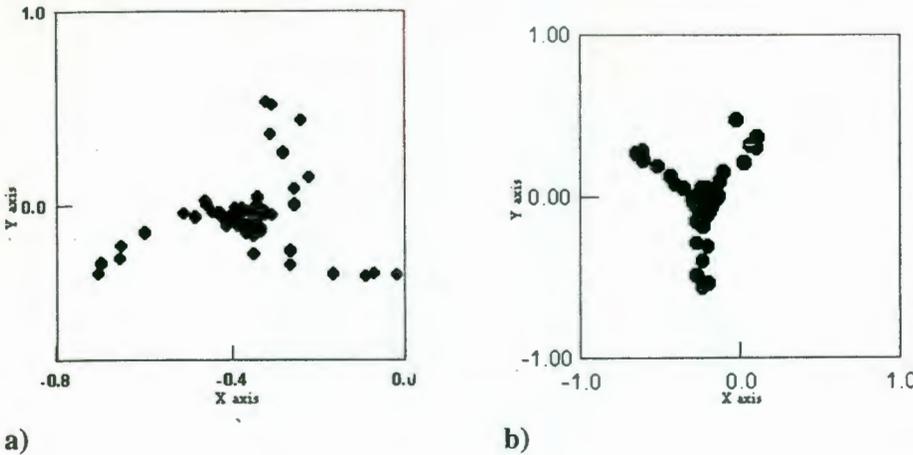


Fig. 7. Patterns generated by the incident beam of the laser impinging on the surface of the sample, as detected during the alignment process. Notice that there exists, in all cases, convergence of the points to the center.

This system is controlled by means of a personal computer and the whole alignment process of the specimen is computer-controller.

The process of alignment of the system has a resolution of 65 μm/bit.

More details on both the hardware and the software are available, upon request.

**Acknowledgements.** The author's wishes to thank to Edgar Mendez Moreno for their technical support.

**References**

- [1] Vogeley JH, Vogeley AW: Method and apparatus for interfacing with computer generated projected image. U.S. Patent 5235363, Aug. 10, 1993
- [2] Sze SM: Physics of Semiconductor Devices. pp. 250–253. John Wiley & Sons, New York 1981
- [3] Wallarmark JT, Photocell measures light direction. Electronics (July 1957) 165–167
- [4] Lucovsky G: Photoeffects in Nonuniformly Irradiated p-n junctions. J. Appl. Phys. 31, (1960) 1088–1095



## 5. Optatec – Internationale Fachmesse für Optik und Optoelektronik

– Anwendung und Technologie –  
Eine der bedeutendsten Fachmessen in Europa!

**Sie brauchen Informationen?**

Kurzproduktgruppen • Optische Materialien, Systeme, Komponenten • Optomechanische Komponenten u. Geräte • Optoelektronische Komponenten • Faseroptik • Optische Übertragungstechnik • Software • Lichtquellen + Laser • Infrarottechnik • Anwendungen und Verfahren zur Herstellung von Optik • Anwendungen und Verfahren zur optischen Mess- und Prüftechnik • Dienstleistungen, Organisationen, Verlage • Neue Technologien

### 27.-30. Juni 2000

Messegelände Frankfurt/M.

**Zeitgleich (27.-30. Juni) finden statt:**

 <b>TechMed</b> 3. TechMed/MDT Intern. Fachmesse für Entwicklungs- und Fertigungstechnologie in der Medizintechnik	 <b>LEAN ROOMS</b> 3. CLEANROOMS Europe Intern. Fachmesse für Produktion unter reinen Bedingungen / Contamination Control Technology	 <b>Clean</b> 2. CleanTech Europe Intern. Fachmesse für Reinigungstechnologie
---	---	--

**...weitere Infos:**  
**Tel. ++49/70 25/92 06-0**  
**Fax ++49/70 25/92 06-620**  
 E-Mail: optatec@schall-messen.de  
 www.schall-messen.de

Veranstalter:  
**P.E. Schall GmbH**  
 Messeunternehmen  
 Gustav-Werner-Str. 6  
 D-72636 Frickenhausen





**Optatec**

**Einladung zu Messteilnahme/ und -besuch!**

**Optatec – wichtige Informationen für den Fachmann!**

**Daten und Fakten der Optatec 1998:**

- 308 Aussteller
- 142 zus. betr. Firmen
- 6300 Besucher (zus. mit z. Begleitmessen)
- Ausstfl. 10541qm brutto



## Literati Club

19<sup>th</sup> April 2002

Dear Highly Commended Award Winner

### Literati Awards for Excellence 2002

I am writing to congratulate you on being selected as a highly commended award winner. Please find enclosed your certificate awarded to you as a highly commended award winner. During the 2001 volume your paper, as shown on the enclosed certificate, was selected as one of the best papers published in your chosen field.

Each Emerald invites all Editors to choose one best paper and up to three highly commended papers from the previous year's volume.

The criteria for selection includes:

- Reflection of the journal's purpose to ensure the readers' needs are being met
- New and useful information which will benefit readers
- Appropriate presentation and style which allows easy access to concepts and data

On the 11<sup>th</sup> April 2002 an Awards ceremony was held at Lord's cricket ground, which was attended by Best Paper winners and the Editors of many of the journals published by Emerald. With so many winners, we are unable to invite everyone we would wish to this event, however, if you would like to know more about the Awards for Excellence 2002 please visit <http://www.emeraldinsight.com/literaticlub/whatsnew/awards.htm>. Watch out for a post event report to be posted here soon.

MCB University Press is continually striving to ensure that the quality of articles published in our journals remains at the highest level of excellence. We would therefore be very pleased to receive any future papers you may wish to submit to any of the 140 journals in our Portfolio.

Once again, many congratulations on your success.

Yours sincerely

*C. E. R. Parker*

Charles E. R. Parker  
Literati Copyright and Research Executive

Encs.



Literati Club

2002

## Highly Commended Award

Presented to:

**Victor Manuel Castano  
Alejandro Castaneda  
Luis Miguel Apatiga  
and  
Rodrigo Valazquez**

for

'Micropositioning device for automatic alignment of  
substrates for industrial-scale thin films deposition'

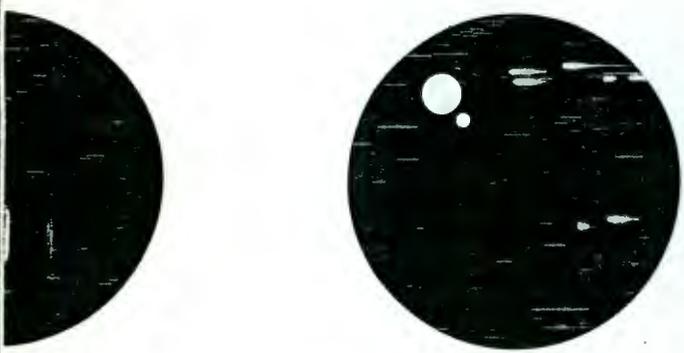
*Assembly Automation*

Vol. 21 No. 4, 2001

# ASSEMBLY AUTOMATION

The international journal of assembly  
technology and management

VOLUME 21 NUMBER 4 2001



## Research article

# Micropositioning device for automatic alignment of substrates for industrial-scale thin films deposition

A. Castañeda  
L.M. Apátiga  
R. Velázquez and  
V.M. Castaño

### The authors

A. Castañeda is based at UAQ, Querétaro, Mexico.  
L.M. Apátiga is based at the Instituto de Física, UNAM, Querétaro, Mexico.  
R. Velázquez is based at UNAM, Querétaro, Mexico.  
V.M. Castaño is based at the Instituto de Física, UNAM, Querétaro, Mexico.

### Keywords

Microfabrication, Thin film

### Abstract

A spatial micropositioning device for the alignment of substrates employed in thin films synthesis by the so-called combustion flame technique, utilized for producing thin diamond films, was designed and built. A combination of mechanical, electronic and optical components allowed, with high accuracy, the alignment of the substrate during the film deposition process. The system always kept the substrate surface perpendicular to the oxy-acetylene flame produced by the torch, in such a way that each deposited film consists of a circular disk, approximately 4mm in diameter and 20 $\mu$ m thick, over the region of the substrate that intersects the inner acetylene-rich flame. The films obtained under these conditions showed low nitrogen content, as confirmed by the Fourier-transform infrared spectrum (FTIR), which is also presented. Accordingly, the present work represents the first step towards a complete automation of the combustion diamond deposition technique, aiming to design an operating industrial-level technology.

### Electronic access

The research register for this journal is available at [http://www.mcbup.com/research\\_registers](http://www.mcbup.com/research_registers)

The current issue and full text archive of this journal is available at <http://www.emerald-library.com/ft>

## Introduction

Since the experimental demonstration of the feasibility of synthesizing diamond films by the use of an oxy-acetylene combustion flame in open atmosphere, the so-called combustion flame (CF) technique (Hirose and Kondo, 1988), a number of interesting results related to the improvement of the diamond film quality have been published. The production of high quality diamond films is considered essential for future industrial applications, ranging from coatings for bearings and cutting tools to free-standing windows and lens coatings for visible and infrared transmission, to thin films for high-temperature, high-power semiconductor devices (Spear, 1989). However, it is well known that combustion deposited diamond film quality depends strongly on certain experimental parameters such as: oxy-acetylene ratio and flow, substrate, temperature, substrate conditions, flame-substrate distance and flame turbulence, and thus the appropriate control of these parameters during the synthesis is key if a reliable working system is to be constructed. Moreover, recent photoluminescence experiments performed in diamond films deposited under turbulent flame conditions reveal an extremely low level of nitrogen impurities, while the diamond films obtained by laminar flame conditions are characterized by a high degree of incorporation of nitrogen impurities (Freitas *et al.*, 1992). Diamond films with low levels of nitrogen (<120 ppm) (Freitas *et al.*, 1992) show an improvement in their optoelectronic properties, leading to near ideal detector characteristics. In this paper, special attention was given to the typical geometric conditions used regularly to grow diamond films by a turbulent flame, which requires, for a given flow, to keep the substrate surface as perpendicular as possible to the flame axis. At the present time, a disadvantage in the determination of this perpendicularity condition is the human factor. Therefore, the experimental set up employed regularly in diamond films synthesis by the CF technique has been improved. The improvement consists of the

The authors would like to thank Dr G. Hernández, for useful discussions and M. en C.J. Cañetas for the SEM micrographs. The authors would also like to thank Ing. L. Onésimo and Mr R. Preza for their technical assistance.

incorporation of a spatial micropositioning system, which allows, with high accuracy, the optical alignment of the substrate surface during the diamond synthesis, obtaining high perpendicularity of the substrate with respect to the flame axis. A detailed description of the experimental set-up necessary for the diamond film's deposition and its connection with the optical alignment system are given in detail. The results of an automated diamond films deposition device obtained by using this set-up are also presented, as well as their characterization by using scanning electron microscopy (SEM) and Fourier-transform infrared (FTIR) spectroscopy.

### Experimental details

A schematic overview of the experimental set-up used in the diamond film deposition, including the spatial micropositioning, is shown in Figure 1. The diamond deposition system employs a commercially-available oxy-acetylene welding torch to generate the flame. The gas source was premixed just before the flame torch and supplied at  $C_2H_2/O_2$  ratio near to 1, with a flow of  $100 \text{ scm}^3/\text{min}$ . Square  $1.0 (1.0\text{cm}^2)$  molybdenum plates and  $0.5\text{mm}$  thick were used as substrates. Prior to deposition they were scratched with  $0.5\mu\text{m}$  size diamond powder to enhance diamond nucleation, then cleaned with acetone and distilled water, using an ultrasonic bath. In order to ensure good thermal contact, the substrates were placed on the top of the water-cooled cooper holder and each corner

fixed with screws. The substrate temperature was controlled by the water flow and measured by a thermocouple placed just at the bottom of the substrate (Apátiga *et al.*, 1999). The holder was fixed on top of an aluminum support and set along the flame axis, as shown in Figure 1. Once the substrate is prepared and placed in front to the torch, the next step is its alignment through the spatial micropositioning system, which was interconnected to the deposition apparatus, as shown in Figure 1.

The spatial micropositioning system consists of both electronic and mechanical components, allowing the manipulation of the substrates through a personal computer, keeping its surface as perpendicular as possible to the flame axis all the time. This perpendicularity is also monitored during the diamond growth process, which typically lasts around an hour. The mechanical components consist of a circular disk assembled onto a platform (aluminum support), which is fixed with respect to the disk (Castañeda-Miranda *et al.*, 2000), as shown in Figure 1. The platform is aligned along the Z-axis and the disk, which contains the sample, is aligned along the Z-axis and it is driven by three stepping motors driving, in turn, micrometric screws fixed at  $120$  degrees to the platform.

On the other hand, the detection system consists of a laser beam that impinges over the substrate surface, since the reflected beam is collected by a position-sensitive detector (PSD), allowing the relative positioning location of this reflected beam, as shown in Figure 2. In this way the spatial displacements of the substrate with respect to the change of the reflected laser beam position can be

Figure 1 Schematic diagram of the experimental set-up used in the diamond film deposition

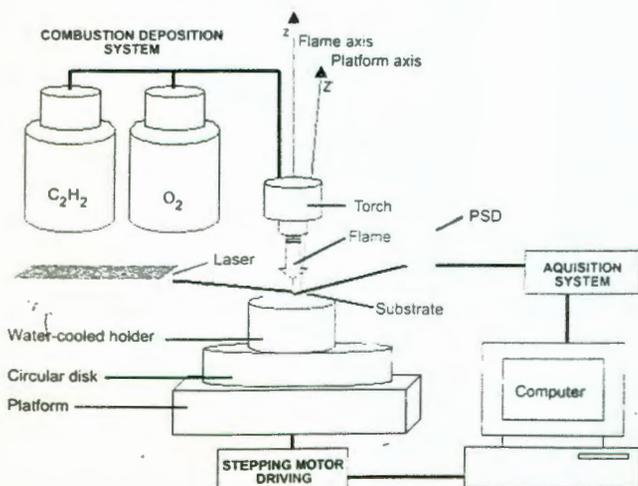
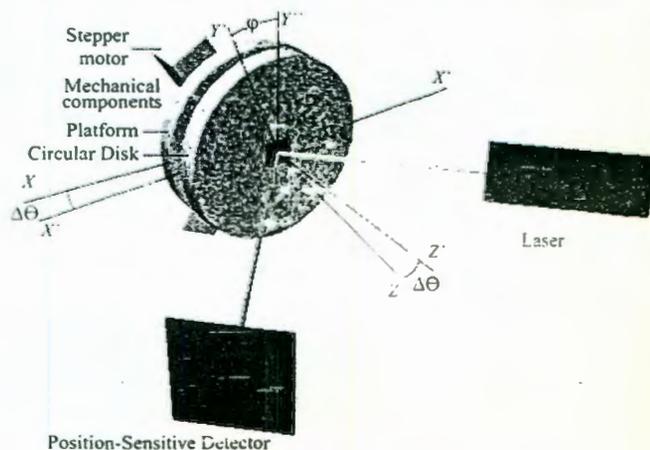


Figure 2 Three-dimensional view of the laser beam trajectory



observed on a screen. The PSD system provides four photocurrent outputs proportional to the two-dimensional center of mass of the light spot impinging on the detector, allowing the location of the relative positioning of the laser. However, if the plane of the screen is not perfectly perpendicular to the reflected laser beam, a cone is generated as laser beam rotates, and the ellipse so generated on the screen must be fully characterized. A novel computer software, based on the so-called ellipse grid method, was used to determine the position of the reflected laser beam from the measured ellipse generated as a consequence of the rotation of the beam with respect to a non-perpendicular plane formed by the screen. The details of both design and algorithm were published elsewhere and are available on request (Castañeda-Miranda *et al.*, 2000).

## Results and discussion

### Alignment and substrate control

In order to direct the laser towards the center of the substrate surface and keep it as perpendicular as possible to the flame axis (Z-axis), as shown in Figure 2, we must take into account, for any possible rotation of the substrate ( $Y'' = Y \cos \varphi$ ), the angle of incidence of the beam  $\theta_1$ . Since the aim of this work is to obtain the minimum deviation for the reflected beam ( $\theta_R + \Delta\theta$ ), then when ( $\Delta\theta = 0$ ), the beam reflected must be obtained as a collection of points over the screen. Any disalignment generates an ellipse on the detector, which is monitored through a personal computer. To determine the position of the laser beam from the measured ellipse, which is generated as a consequence of the rotation of the beam with respect to a non-perpendicular plane (screen), the software mentioned previously, based on the so-called ellipse grid method, was used. The algorithm consists of the angle detection through horizontal and vertical scans with one dimension edge detection.

On the other hand, the response of the detector as a function of the position of the incident beam on the surface of the PSD system was obtained by plotting the fraction of the normalized photocurrent vs position. Figure 3 shows two plots obtained when the laser is displaced along each axis. The locus traced by the reflection of the laser impinging on the

Figure 3 Plots obtained when the laser beam is displaced along the X-axis and Y-axis

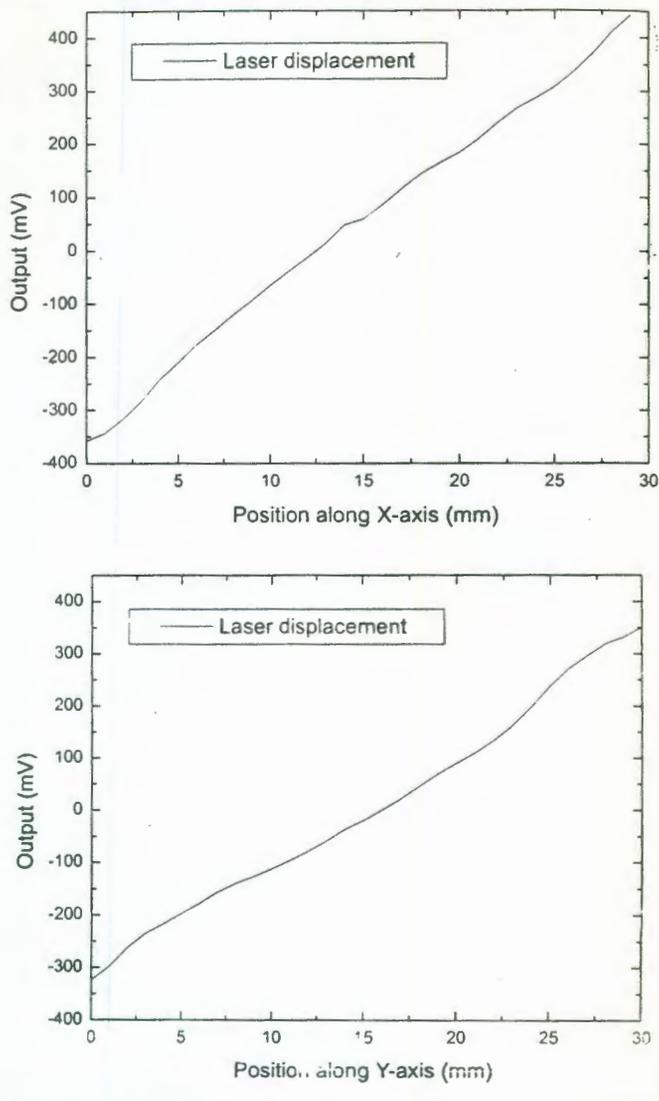


Figure 4 Semi-ellipse generated by the rotation of the sample

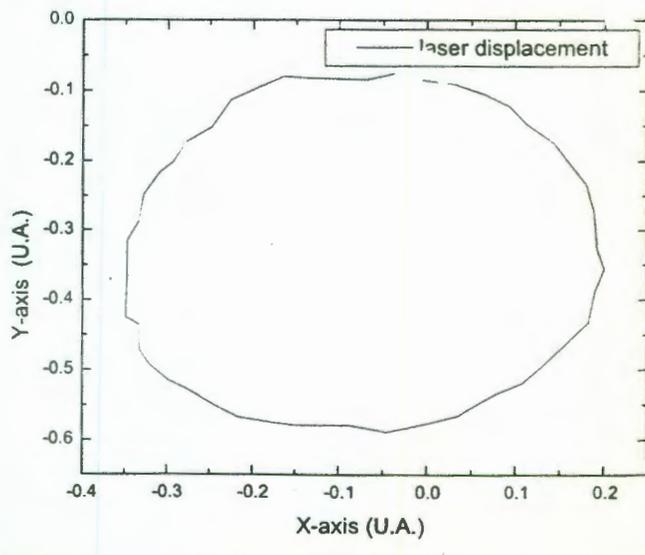
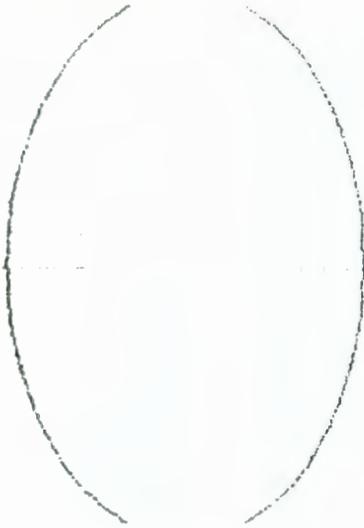


Figure 5 Ellipse obtained by using the numerical fitting algorithm



substrate determines the form of the generated patterns. To start the operation of the micropositioning system, the rotation of the sample is achieved through a computer by steps around the normal value of the substrate surface, thus obtaining a series of semi-elliptical figures, as shown in Figure 4. By using the numerical fitting algorithm, an ellipse with non-parallel axis with respect to the coordinate axes is obtained, as shown in Figure 5. However, after the alignment process, the application of the method itself ensures a convergence of the beam towards the center, within the area of the detector, as can be noticed in Figure 6. In all cases the convergence turns out to be completely repetitive.

### Diamond films deposition

Plate 1 shows a typical scanning electron microscopy (SEM) overview of the diamond film surface deposited during one hour with the high perpendicularity conditions obtained with the micropositioning system. The film consists of diamond crystallites with sizes of the order of  $15\text{-}20\mu\text{m}$  forming a circular disk around  $4\text{ mm}$  in diameter and  $20\mu\text{m}$  in thickness. Similar morphology was observed in films deposited under non-perpendicularity conditions. In both cases, the films are nearly transparent in the center, degrading to a gray-brown color at the edges. The incorporation of nitrogen on the diamond film surfaces was studied by the FTIR spectroscopy technique, which provides detailed information on the nature of chemisorbed species formed during diamond deposition. In particular, FTIR spectroscopy is superior for the observation of hydrogen, nitrogen and oxygen atoms bonded to carbon atoms on a diamond net (Ando *et al.*, 1993). Nitrogen is the major impurity found in natural and synthetic diamonds and gives rise to characteristic absorption in the one-phonon region of the optical spectrum, between  $1,400$  and  $1,000\text{ cm}^{-1}$ . Figure 7 shows the FTIR spectrum of diamond surface taken near the area shown in Plate 1. A very weak peak around the nitrogen absorption band is observed. Meanwhile, Figure 7B shows the presence of some nitrogen when the deposition process is performed out of the perpendicularity conditions. Since it is known that the synthesis of polycrystalline diamond films under strict perpendicularity conditions ensures a turbulent flame with very low levels

Figure 6 Convergence of the laser beam towards the center

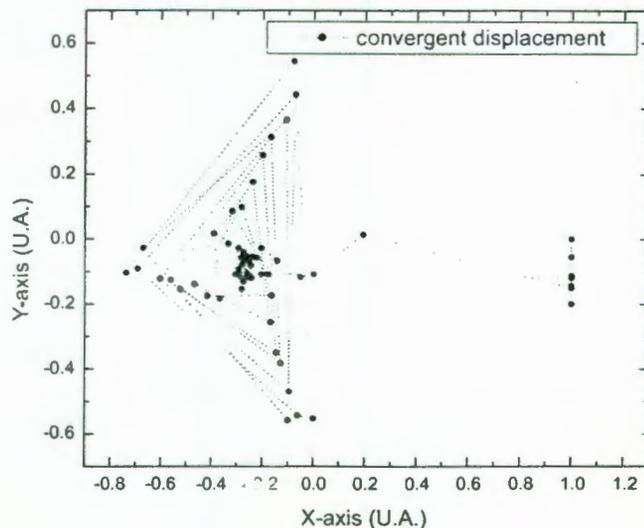
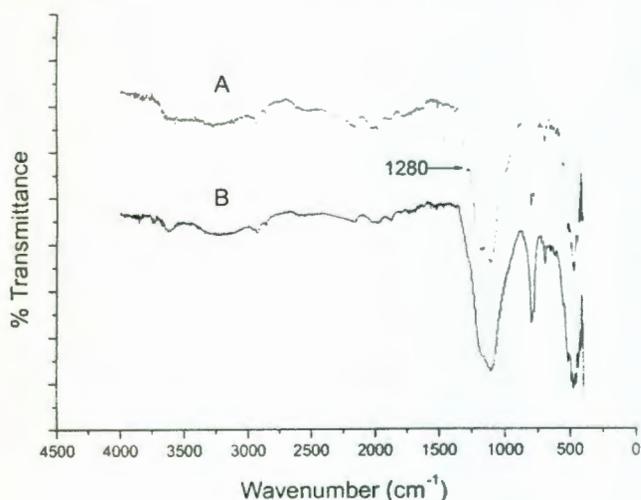


Plate 1 SEM micrograph of the diamond film surface deposited under high perpendicularity conditions



Figure 7 FTIR spectra of the combustion deposited diamond films, before (A) and after (B) being aligned with the micropositioning system. The band at  $1,280\text{cm}^{-1}$  shows the nitrogen content on diamond surface



of incorporation of nitrogen impurities, the control of the substrate alignment is key to having a repetitive, large-scale film production system.

### Conclusions

The analysis of the infrared absorption spectra of diamond films showed that the

films grown by the combustion flame technique under the high perpendicularity conditions obtained with the spatial micropositioning exhibit low incorporation of nitrogen on its surface as compared to those of conventional deposited diamond films. This result opens the possibility of using these films in the design of high performance electronic devices at industrial scales. Also, the results are very important for the *in situ* study doping of diamond films. Another possibility is to study the influence of the geometrical parameters on the doping, morphology, structure, etc. of combustion deposited diamond films, which to date has been not explored. In this regard, an investigation of the diamond film deposition at different angles formed between the sample surface and the flame axis is now under way and the results will be published elsewhere.

### References

- Apátiga, L.M., Golzarri, J.I., Mumford, J., Alba, F. and Castaño, V.M. (1999), "Thermoluminescence of diamond films induced by beta irradiation", *Radiation Physics and Chemistry*, Vol. 54, pp. 223-8.
- Ando, T., Ishii, M., Kano, M. and Sato, Y. (1993), "Thermal hydrogenation of diamond surfaces studied by diffuse reflectance Fourier-transform infrared, temperature-programmed desorption and laser Raman spectroscopy", *J. Chem. Soc. Faraday Trans.*, Vol. 89 No. 11, pp. 1783-9.
- Castañeda-Miranda, A., Bulenkova, L., Beliasvski, G. and Castaño, V.M. (2000), "Automatic optical alignment by numerical ellipse fitting", *Optik*, Vol. 111, pp. 189-94.
- Freitas, J.A., Strom, U., Doverspike, K., Marks, C.M. and Snail, K.A. (1992), "Optical evidence of reduction of radiative defects in diamond films grown by acetylene-oxygen flames", *Mat. Res. Soc. Symp. Proc.*, Vol. 242, pp. 139-44.
- Hirose, Y. and Kondo, N. (1988), *Program and Book of Abstracts, 35th Japan Applied Physics Spring Meeting*, Japan Society of Applied Physics, Tokyo, 1988, p. 434.
- Spear, K.E. (1989), "Diamond: ceramic coating of the future", *J. Am. Ceram. Soc.*, Vol. 72 No. 2, pp. 171-91.

# ASSEMBLY AUTOMATION: AN INTERNATIONAL JOURNAL

Volume 21 Number 4 2001

In 2001 this journal will consist of 4 printed issues delivered in 4 despatches  
+ Internet online publishing with archive, reference linking, research register, non-article content,  
institution-wide licence and e-mail alerting service

## CONTENTS

### Number 4

#### Forming technologies

Guest Specialist: Dr T.G. Nieh

- 
- 283 Access to *Assembly Automation* online  
284 Abstracts & keywords  
286 Editorial  
287 High strain rate, superplastic metal forming  
T.G. Nieh  
289 Company news  
296 Rapid tooling applications of the selective laser sintering process  
S.S. Dimov, D.T. Pham, F. Lacan and D.D. Dotchev  
303 Smaller control suppliers also make their mark  
Richard Bloss  
307 Stamping and forming merging with automated assembly  
Richard Bloss  
310 Low-cost tooling for composite parts: "the LCTC process"  
David Cloud and John Norton  
317 BMW breaks new ground with hydroforming  
John Mortimer  
321 Dieless forming  
Anna Kochan  
323 Tailor-welded blanks bring multiple benefits to car design  
Brian Rooks  
329 A new design of screw head  
Brian Rooks  
333 Krause plans low-volume assembly hall for Ricardo  
John Mortimer  
336 Micropositioning device for automatic alignment of substrates for industrial-scale thin films  
deposition  
A. Castañeda, L.M. Apátiga, R. Velázquez and V.M. Castaño  
341 Mini features  
349 New products  
356 Internet page  
358 Media reviews  
360 Patent abstracts  
362 Diary  
364 Note from publisher  
365 Author and title index to volume 21, 2001

**MCB**  
University Press 

## CONTENTS

Preface .....	vii
Acknowledgements .....	ix
<b>FSA Design of a Gradient Coil Set for Head Imaging</b> .....	<b>1</b>
D. Tomasi	
<b>Silicon Detectors in Imaging Applications</b> .....	<b>10</b>
L. M. Montaña Zetina	
<b>Magnetic Resonance Dosimetry</b> .....	<b>15</b>
O. Baffa, A. M. O. Kinoshita, F. C. Abrego, and N. A. Silva	
<b>Dosimetric Characterisation of a Brachytherapy Source for Gynaecological Applications</b> .....	<b>43</b>
M. Rodríguez-Villafuerte, S. Arzamendi, and R. Díaz-Perches	
<b>Positron Emission Tomography and Radiation Oncology</b> .....	<b>49</b>
G. D. Fullerton, P. Fox, and W. T. Phillips	
<b>Deuterium Microimages and Microvolume Localized Spectroscopy at 9.4T</b> .....	<b>55</b>
B. Foerster, A. Tannús, E. L. G. Vidoto, M. J. Martins, and H. Panepucci	
<b>Development of Targeted Radiotherapy Systems</b> .....	<b>63</b>
G. Ferro, C. A. Murphy, J. E. Villarreal, M. Pedraza, L. García, J. I. Tendilla, and L. Paredes	
<b>Evaluation of Mammography Equipment Performance, Dose, and Image Quality in Five Latin American Countries</b> .....	<b>71</b>
M.-E. Brandan, C. Ruiz-Trejo, C. E. M. Caspani, I. Fleitas, R. de-la-Mora, A. A. Miranda, M.-C. Plazas, C.-M. Betancourt, and C. Borrás	
<b>Human Brain Somatic Representation: A Functional Magnetic Resonance Mapping</b> .....	<b>76</b>
J. Romero-Romo, R. Rojas, J. Sánchez-Cortazar, A. Vazquez-Vela, and F. A. Barrios	
<b>Magnetic Resonance Imaging in Mexico</b> .....	<b>89</b>
A. O. Rodríguez, R. Rojas, and F. A. Barrios	
<b>More Efficient Focusing for Extracorporeal Shock Wave Lithotripsy</b> .....	<b>99</b>
A. M. Loske and F. E. Prieto	

## CONTRIBUTED PAPERS

<b>A Tool for the Analysis, Segmentation, and Reconstruction of MR Brain Images</b> .....	<b>107</b>
F. Flores M., M. Villaseñor A., and M. E. Algorri	
<b>Design of a Research Device to Perform Optical Tomography</b> .....	<b>115</b>
J. J. García, A. Castañeda, and A. M. Loske	
<b>Simulation of an Anthropomorphic Phantom for Dynamic Renal Studies</b> .....	<b>121</b>
J. M. Lárraga, A. Martínez-Dávalos, and C. Martínez-Duncker	

<b>Experimental Measurements of Spatial Dose Distributions in Radiosurgery Treatments.....</b>	<b>127</b>
M. A. Ávila-Rodríguez, M. Rodríguez-Villafuerte, R. Díaz-Perches, and M. A. Pérez-Pastenes	
<b>Targeted Radiotherapy Dosimetry of <sup>153</sup>Sm Hydroxide Macroaggregates for Radiation Synovectomy.....</b>	<b>133</b>
J. E. Villarreal, G. Ferra, O. Hernández, and J. Carmona	
<b>Leakage Neutron Radiation in a Medical Electron Accelerator .....</b>	<b>140</b>
L. Paredes, M. Balcazar, R. Genis, and R. Ortiz	
<b>Petal Resonator Surface Coil in Spectroscopy by Magnetic Resonance.....</b>	<b>148</b>
S. Hidalgo, A. Rodriguez, R. Rojas, J. Sanchez, G. Reynoso, and F. A. Barrios	
<b>Experimental Treatment of Neoplastic Diseases and Tumors with Iono Magnetic Therapy .....</b>	<b>151</b>
E. K. Rizsanyi, D. Lavan Quiróz, C. L. Huamaccto, and E. Guerra Marroquín	

#### STUDENT SESSIONS

<b>Monte Carlo Determination of the Functions <math>\Lambda(r,Z)</math>, <math>G(r,\theta)</math>, <math>g(R)</math>, and <math>F(r,\theta)</math> for Amersham CDCS-M-Type <sup>137</sup>Cs Source.....</b>	<b>159</b>
F. R. Fragoso Valdez and J. T. Alvarez Romero	
<b>Mapping of Motor and Sensory Activity in the Human Spinal Cord with Functional Magnetic Resonance Imaging (fMRI).....</b>	<b>167</b>
D. Morales, R. Rojas, and F. A. Barrios	
<b>Study of the Heartbeat of an Invertebrate during Long Periods .....</b>	<b>170</b>
P. A. Ritto, D. Vera, J. G. Contreras, and J. J. Alvarado-Gil	
<b>Expression of P53 Protein after Exposure to Ionizing Radiation .....</b>	<b>176</b>
A. M. Salazar, C. Salvador, C. Ruiz-Trejo, P. Ostrosky, and M. E. Brandan	
<b>Novel Photoplethysmography System .....</b>	<b>184</b>
A. D. Lozano Uribe, R. López Ramírez, A. Castañeda Miranda, and V. M. Castaño	
<b>Optimization Method to Calculate Shieldings on X Ray Diagnostic Rooms by <math>H_E</math> and <math>E</math>, and Verification Using <math>H^*(10)</math>.....</b>	<b>193</b>
J. G. Gutiérrez and J. T. Alvarez	
<b>Author Index.....</b>	<b>203</b>

The F  
tional  
2001.  
worki  
exciti  
bring  
ical P  
talks :  
Mexic  
of this

Fifty i  
ered a  
A tot:  
studer  
(6 stu

The F  
other  
in Me  
contri  
This i  
the in  
the w  
which

# Design of a Research Device to Perform Optical Tomography

Jorge J. García\*, Alejandro Castañeda†\*, and Achim M. Loske\*

\*Departamento de Física Aplicada y Tecnología Avanzada,  
Instituto de Física, UNAM, A.P. 1-1010, 76000 Querétaro, Qro., México

†Universidad Autónoma de Querétaro, Cerro de las Campanas,  
76010 Querétaro, Qro., México

**Abstract.** The purpose of this work was to design and construct a device to obtain optical tomography images of small objects using a laser with a wavelength of 650 nm. Linear and time-invariant absorption and scattering interactions of photons are considered. The mathematical model describing the propagation of light and the design of the device are explained briefly. Some initial results are also presented.

## INTRODUCTION

Optical tomography is a promising field, currently under research, for visualizing tumors, hematomas, and the oxygenation of the brain [1,2,3,4], offering the potential to obtain three dimensional images. It is based on the fact that light passes through the body in small amounts, and emerges providing information about tissues through which it has passed. Since human tissue has some transparency to light in the 650 – 1000 nm region, it is possible to differentiate tissue due to variations in optical absorption and dispersion of near infrared photons and to obtain a spatially resolved map of the optical properties within the part of the body under investigation. In general, high power pulsed laser diodes and very sensitive photodetectors are required to monitor absorption changes of selected frequencies [5,6,7,8].

Advantages of the technique are its low-cost and little side-effects. Light is nonionizing over many wavelengths which pass relatively easily through several biological tissues and is well tolerated, so that patients could be examined repeatedly. Since tissue is a highly scattering medium, the pathlength of the photons is several times the distance between the input and output. Due to this, the associated mathematical problem is difficult to model accurately. The interaction of light and tissue can be described by Maxwell's equations.

An experimental device to perform *in vitro* optical tomography on small objects using a 650 nm laser was designed and constructed. Since, as already mentioned, scattering and absorption affect light propagation in tissue, linear and time-invariant absorption and scattering interactions were considered. Our theoretical model is based

# Novel Photoplethysmography System

A. D. Lozano Uribe <sup>\*</sup>, R. López Ramírez <sup>\*</sup>, A. Castañeda Miranda <sup>†</sup>,  
V.M. Castaño <sup>†</sup>

<sup>\*</sup> *Universidad Tecnológica de Querétaro, Av. Pie de la Cuesta s/n,  
San Pedrito Penuelas, Santiago de Querétaro, Qro., México*

<sup>†</sup> *Instituto de Física UNAM A.P. 1-10101 Querétaro, Qro.  
76000, México. Tel (42)381150, Fax (42)381154*

**Abstract.** Optical technologies are new technical tool which are being implemented for medical diagnosis and prescription in various processes related to detection within human blood. They have the virtue of be non-invasive method and non-destructive methods, in addition to being a remote detection technique, sensibility enough as to study the properties of the blood through electromagnetic excitation. In the present work, a device to obtain the oxygen level in blood with the aid of 650 nm. and 850 nm was designed. Physically, a model to test extenuation of light through the blood, was implemented to control, in the frequency domain through same electronic devices and thus obtain a data base in the time domain for their subsequent Fourier analysis. The acquisition times are of the order of milliseconds and the system is controlled automatically through an accessible software in a Personal Computer.

## INTRODUCTION

Photoplethysmograph (PPG) is based on the determination of the optical properties of skin area. For this propose non-invisible infrared light is emitted into the skin. Consequently, the backscattered light correspond with the variation of the blood volume. Blood volume changes then be determinate by measuring the reflected light and using the optic properties of tissue and blood. The photoplethysmograph does nearly the same thing but much higher sensitivity and resolution.

Modern measuring methods, using sophisticated equipment, allow to greatly accuracy and reliability of photometric methods. Nevertheless, keep in mind that on measurements are possible so that **only volume changes** not absolute levels. The principles of operation by photo excitation in the finger whit pair light emitted diode (LED) and detector with different exited parts is show in the figure 1.

The fo  
and se  
pulse (c  
through  
in whic  
sensor  
blipped  
signal.  
saturat  
simplie  
bigges  
artifact  
render  
therefo  
Ongoin  
progres  
to quar  
situatio  
the term  
induced  
the oxy  
probe h  
the tran  
In fact  
produc  
lowerin  
pressur  
while s  
affect li  
Ambier  
directly



# IEEE

# Sensors 2002

The first IEEE international conference on sensors

June 12-14, 2002 - Hyatt Orlando Hotel - Orlando, Florida, U  
Tutorials on June 11, 2002

- Advance Technical Program
- Special Sessions
- Tutorial Program
- Conference Registration
- Hotel Registration
- Authors' Information
- Organizing Committee
- Technical Program Committee
- Exhibit Information
- Conference Proceedings
- IEEE Sensors Council
- Local Information
- Sensors 2002

## Session 62

### APPLICATIONS: BIOMEDICAL

Friday, June 14 / 3:30–5:00 pm / Ballroom II

Chair: *Shanhong Xia, Chinese Academy of Sciences, Chi*

**62.1: A Novel System for Measuring Optical Properties in Man**

*A. Castaneda-Miranda  
Instituto de Fisica, U.N.A.M., Mexico*

**62.2: A Biomedical Smart Sensor for the Visually Impair**

*L. Schwiebert, G. Auner, S. Gupta, P. Siy, R. Iezzi, G.  
Wayne State University, Detroit, MI*

**62.3: Microcomputer-Based Acceleration Sensor Device  
Biomechanics Stroke Evaluation by Using Swimme**

*Y. Ohgi  
Keio University, Kanagawa, Japan*

**62.4: Non-Invasive and Unrestrained Monitoring of the  
System by Sensorized Environment**

*Y. Nishida, T. Hori  
Digital Human Laboratory, National Institute of Advanc  
Technology, Tokyo, Japan*

**62.5: Miniature Fiber-Optic Pressure Sensor for Medical**

*E. Cibula, D. Donlagic*

## A PC-BASED AUTOMATIC SYSTEM FOR FINGERPRINT PATTERN RECOGNITION

Alejandro Castañeda-Miranda, Efrén Gorrostieta

Centro de Bachillerato Tecnológico Industria; y de Servicios No.118  
Prolongación Corregidora Pte. S/N  
Corregidora Querétaro. 76180, México  
e-mail: [radiometry@yahoo.com](mailto:radiometry@yahoo.com)

Key words: pattern recognition, fingerprints, pc-based software, segmentation, dactiloscopia

### ABSTRACT

A pc-based automatic system for register and classification fingerprint is described. The system consists of a six-step process: a) acquisition, b) preprocessing, c) fragmentation, d) representation, e) description and f) recognition. Details of each stage, along with actual examples of recognition fingerprint are provided.

### 1.-INTRODUCTION

It is well known that recognition and classification fingerprint allows the unique identification of a person, since the fingerprint presents natural patterns in an almost infinite variety of combinations. Even in the case of similar fingerprints, these combinations are unique in order to prevent two exactly identities.

The practical application of recognition fingerprint and characterization ranges from public or private safety, forense medicine, legal matters, etc. From the Forense Science point of view, there are two main methods for identification fingerprint, based on standard and arbitrary classification. Indeed, whereas in South America and parts of Europe the Vucetich method is employed, in the United States and England the Henry classification scheme is used.

From the engineering standpoint, either classification is made by surveying the fingerprint, thus assigning a denomination; according to the particular scheme used by identify the given finger. In this way, by using the ten fingers of the hand, one will have a combination that identity a person uniquely. However, it can happen that the combination is repeated and therefore a sub-classification must be devised. This is based on the topological characteristic of the patterns of the fingerprints, such as branching, merging, islands, etc. Nevertheless, this process requires the meticulous examination of experts in dactiloscopia, which turns this classification into a cumbersome and slow process that relies on the skill are mood and

honesty of the expert in charge of the identification. Of course, the commercial packages that allow fingerprint recognition, but there are either expensive, completely dedicated and thus not flexible and, above all, constitute a black box to the user.

Accordingly, this work has the objective of describing a pc-based automatic system for digitizing and analyzing fingerprints, by extracting the topologically-essential points that allow to distinguish one fingerprint from another. These peculiarities within the fingerprint are known as characteristic points and can be classified into interruptions in the combs, abrupt end, ramifications and fusions. The characteristic points and their relative position are of key importance for the effectiveness the comparison of two fingerprints and although each fingerprint contains about 100 characteristic points, it is usually enough to analyze a dozen to identify a standard positively.

### 2.-BLOCK DIAGRAM OF THE SYSTEM

The whole system consists of six stages, shown schematically in the diagram of Figure 1. As it can be observed there, the system itself is extremely simple and modular, allowing updating and improving the different stages easily.

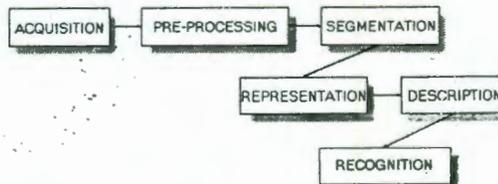


Figure 1. Stages of the system for recognition fingerprint

### 3.-APPLICATIONS.

For the description process, a tracking of the fingerprint around the points interest is performed, analyzing each pixel in relation with

two or more of its neighbors. Depending on its vicinity, each pixel belongs to one of the three following cases:

- 1) The basic type of forking.
- 2) A step line.
- 3) A square line.

The first case is so due to the fact that a forking requires at least of two pixels to represent two ramifications. The second and third case tell us that, the fact of having two pixels does not ensure that a forking will be found, since there exist lines that cannot be made sharper, digitally speaking, without facing the risk of losing connection. Figure 2 shows these three cases schematically.

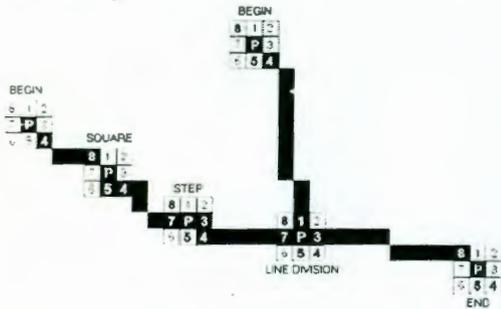


Figure 2. – Diagram representing the cases of two neighbors within a region.

To distinguish among these three cases, their corresponding neighbors must be carefully analyzed to characterize each one. As can be observed in figure 2, one can distinguish a forking from an echeloned line or a square, through the analysis of each pixel. In the case of these three types having the same amount of neighbors, the difference is found in the position that they may have with respect to the given pixel. Some connectivity criteria must also be applied: if the pixel has four neighbors, it can be likely assigned to forking condition.

The characteristic points play an important role in the identification of a fingerprint, being the principal characteristic taken into account in this work the forking of the combs.

For obtaining the forking within the fingerprint a tracking algorithm (bifur.exe), programmed in C, is employed. This algorithm provides the coordinates of all the forking found within the fingerprint. A typical set of coordinates is shown in Table 1.

Once the tracking of the characteristic points is carried out and the forking characteristics of the fingerprint are identified (figure 3), coordinates are assigned represented in the following way:



Figure 3. Image form with its detected forking.

$$H(p) = \left\{ \begin{array}{l} p_1(x_1, y_1) \\ p_2(x_2, y_2) \\ p_3(x_3, y) \\ \vdots \\ p_n(x_n, y_n) \end{array} \right\} \quad (1)$$

where  $H(p)$  is the set that identifies the fingerprint, being  $P_i(x_i, y_i)$  a set of points and  $x_i, y_i$  being the horizontal and vertical coordinates of the point  $i$ , respectively.

Next, once the position of the first point  $P_1(x_1, y_1)$  in the fingerprint is established, the nearest five points are located, as is observed in figure 4.

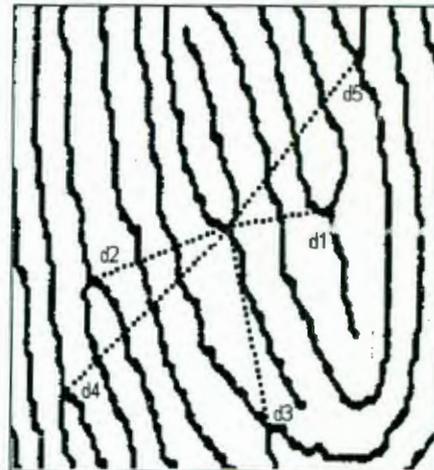


Figure 4. Image of relationship by distances between the characteristic points

Based on the Euclidian distance between points, the values of the five distances to a group that will identify to the point  $p_i$  are assigned. This group of distances defines the standard vector that determines the first point (i.e  $p_1$ ) and will be identified as  $D_1$ .

By reproducing this process for each point of  $H(p)$  we will obtain a standard vector for each one. As a rule for each point  $i$ , the corresponding vector will be:

$$D_i[p_i(x_i, y_i)] = \begin{Bmatrix} d_1 \\ d_2 \\ d_3 \\ d_4 \\ d_5 \end{Bmatrix} \quad (2)$$

where  $d_1, d_2, d_3, d_4$  and  $d_5$  are the minimal distances from the  $P_i$  position  $(x_i, y_i)$  towards the five nearest points. The distances are ordered so that  $d_1 < d_2 < d_3 < d_4 < d_5$ .

Once the five vectors are defined, their total length in 5 dimensional space is calculated, according to the equation:

$$L[p_i(x_i, y_i)] = \left\{ \sum_{j=1}^5 (d_j)^2 \right\}^{1/2} \quad (3)$$

#### 4.-CONCLUDING REMARKS

Effective identification of fingerprints can be achieved by means of a pc, by means of proper software. The topological characteristics of each

fingerprint are relevant for a successful identification, therefore the use of an optical system is recommended with enough resolution for the acquisition of the fingerprint, instead of digitizing a printout. The vector technique provides a useful tool to make the system of adjustments invariable of the images of the fingerprints.

The test performed in our system show that it constitutes a reliable tool and some work towards adding of some mathematical morphogenesis concepts, is under way.

#### ACKNOWLEDGEMENTS.

The financial support of CONCYTEQ is also gratefully acknowledged.

#### 5.-REFERENCES

- 1.-Anil K. Jain, Fundamentals of Digital Images Processing. Prentice Hall.
- 2.-Milan Sonka, Vaclar Hlavac, Roger Boyle, Image Processing, Analysis and Machine Vision.
- 3.-R. Gonzalez, R. Woods, Digital Image Processing. Addison-Wesley.
- 4.-Darío Maravall Gomez-Allende, Reconocimiento de Formas y Visión Artificial. Addison-Wesley.
- 5.-Harley R. Myler, Arthur R. Weeks, Computer Imaging Recipies in C. Prentice Hall.
- 6.-Shoichiro Nakamura, Análisis Numérico y Visualización Gráfica con MATLAB. Prentice Hall

No	x	y									
1	49	25	16	230	112	31	209	195	46	195	277
2	18	30	17	168	121	32	364	198	47	24	287
3	203	31	18	466	123	33	4	209	48	152	288
4	295	49	19	147	128	34	134	210	49	194	297
5	326	68	20	124	142	35	87	212	50	82	310
6	50	71	21	179	158	36	29	216	51	130	317
7	89	85	22	363	160	37	191	216	52	163	318
8	110	88	23	262	163	38	96	219	53	130	321
9	141	91	24	248	167	39	73	227	54	220	328
10	364	93	25	214	171	40	137	230	55	68	332
11	141	95	26	476	171	41	58	252	56	265	337
12	148	96	27	102	179	42	185	254	57	392	345
13	17	107	28	484	183	43	82	255	58	268	354
14	142	111	29	123	184	44	246	263	59	235	360
15	213	111	30	43	190	45	449	266			

Table 1 Coordinating data of the forking found by the tracking algorithm

## A NOVEL SYSTEM FOR MEASURING OPTICAL PROPERTIES IN ARTERIAL BLOOD OF MAN

Alejandro Castañeda-Miranda, Efrén Gorrostieta

Centro de Bachillerato Tecnológico Industria; y de Servicios No.118  
Prolongación Corregidora Pte. S/N  
Corregidora Querétaro. 76180, México  
e-mail: [radiometry@yahoo.com](mailto:radiometry@yahoo.com)

### ABSTRACT

*Optical technologies are new technical tools which are being implemented for the medical diagnose and to prescribe various processes within the human blood. These techniques have the virtue of being non-destructive, in addition to a remote detection technique in-situ, with sensibility capable of studying the properties of the blood through electromagnetic excitation. In the present work a device to obtain the oxygen level in the blood with the aid of quartz lamp, emitting between 200 nm and 2200 nm, is designed.*

*Physically, a model to test the attenuation of light through the blood is used. Electronically, a control in the frequency domain, through circuit devices is designed, to obtain a data base in the time domain for their subsequent analysis by Fourier techniques, obtain absorption spectra in wavelength. The acquisition times are of the order of milliseconds and the system is controlled automatically through accessible software from a Personal Computer.*

Topic of interest: Sensors application: medical

### 1. INTRODUCTION.

The systems of feedback are not limited to the engineering, but also are found in various fields detached from it. For example, the human body is a very advanced feedback control system. The corporal temperature as well as the sanguine pressure is preserved constant through a physiological pressure. In fact, the feedback accomplishes a vital function: It returns to the relatively insensitive human being to the external disturbances, by something which enables to operate a form adapted in a changing environment, a distribution system for various cell concentrations in our body: The blood. The system allows to know some properties of the blood through the application of an optical test, the one which, at the same time, has the characteristic of not being invasive and in-situ, something which a complex configuration and

coupling of all the parts by accomplishment, in the same way, an optical system based on the optical properties of the blood is developed. The motivation of this project is based on the indirect knowledge of the intensity of a luminous beam, as well as of the changes that make this of time and spatial way, it is possible to build detection or alteration systems using, for example, a commercial lamp; v. gr. curvature ratios, superficial ruggedness, internal angles and other parameters of the surface under test, <sup>[1,2,3,4,5,7]</sup> being the radiation detector an essential part. <sup>[3,7]</sup> Departing of the interaction of the electromagnetic radiation with the atoms of a material, we would produce a great variety of phenomena, that at the same time, they have been taken advantage in the different technological devices manufacture, being possible the various processes detection through optical transitions, being collected through the combination of the optics and the electronics. Therefore, the margin of application and operation is base on properties of the diode radiation detectors, those which are entrusted with converting an optical sign into electrical. <sup>[3]</sup> The physical detection principle consists in a diode of indirect band gap that acts as a photo detector, when the P-N junction or diode is illuminated through a window with sufficient radiation. This process transmits the necessary energy to excite electrons from the valence band to the conduct band, being obtained a current from free electrons as of photons of light (photocurrent). An operation manner for the photodiode is to connect it to a charge resistance, transforming photocurrent in voltage. A typical sensibility of these devices is of the order of the microamperes for microwatt of incident light, being as a rule, affected by far parasite signals independent noise of the luminous interest intensity (white noise). Then, taking advantage the properties of an operational amplifier (AOP) to amplify the signal amplitude originated from the photodiode, at the same time, a filter for the treatment of response of the device can be designed, letting go by the only frequency

that contain the signal we are interested in. This configuration is called integrative and consists on a resistance, as well as a capacitor, both connected in parallel and connected between extremities to the exit and to the inverting terminal of the AOP.<sup>[9]</sup> One of the important applications for these devices is the FTIR spectroscopy (Fourier Transformed in Infrared), the one which studies the absorption of the electromagnetic radiation by the matter, being obtained in this way atomic and molecular spectra, obtaining information detailed on the structure (symmetry, distance and angles between liaison) in addition to the properties of the material (electronics distribution, liaison force, intermolecular process).<sup>[5]</sup>

**2. OPTICS AND THERMAL PROPERTIES OF THE BLOOD.**

The material properties under the optical or thermal diffusion mechanism are shown in chart 1, where furthermore is shown the description and model of the optical sign of the system.

The special Cases from the optical point of view a material is characterized by the optical opaqueness, the one which is determined by the relationship that there is between the optical absorption length  $\mu=1/a_j$  and the Thickness of sample (l) of the material. Thus according to optical opaqueness, the materials can be divided in two large groups:

1. Material optically transparent: A material is optically transparent when of all the intensity of the light that arrives to the surface of same and small part is absorbed throughout all the thickness of the sample, but the radiation share is transported. The foregoing is expressed mathematically as  $\mu s > 1$ .

2. - Material optically opaque: In this case, the light intensity that arrives to the surface of the material is attenuated thoroughly much before cross to the sample. It is written:  $\mu s \gg 1$ . On the other hand, from the thermal point of view a material can be catalogued according to the relationship that there is between the magnitude of the thermal diffusion length, defined as  $m_s$  and the thickness of the sample.

$$\mu_s = \sqrt{\frac{\alpha}{\pi f}} \tag{1}$$

1. - Thermal fine material: This type of materials are considered when the thermal diffusion length  $\mu_s > 1$  is greater than the thickness of the sample:  $\mu_s > 1$  as can be appreciated in the figure 1.

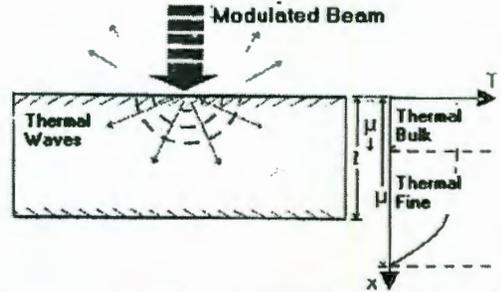


Figure 1. - Behavioral Illustration of fine and bulk thermal material.

2. - Thermal bulk material: They are characterized by the fact that the thermal wave is attenuated in the interior of the sample:  $\mu s < 1$ . In this work is considered alone thermal material bulk and optically opaque. In the figure 1, we show in a diagrammatically way the thermal behaviors described above:

**3. FREQUENCY MODEL BY PHOTODIODE**

The model consists of decomposing a photodiode in a source of current by photons, at the same time, in a capacitance of board of the diode ( $C_D$ ) and in a resistance of the same ( $R_D$ ),<sup>[4]</sup> all this connected in parallel, as it's shown in the following figure 2. Therefore, the photodiode is connected to a AOP, permitting to make an electrical analysis by the Kirchhoff Law, being obtained, in this way, the total impedance of the circuit, and therefore, modeling the behavior in frequency through a transfer function (Bode Graphic).

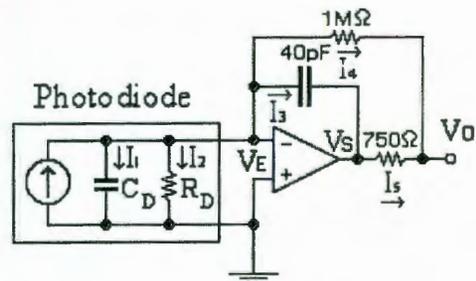


Figure 2. - Model of the photodiode and operational amplifier.

Of the figure 2 is made an analysis by Kirchoff Law taking into account that the dynamic resistance of the diode is very large in the order of the  $M\Omega$  ( $R_D \gg 1$ ), has the following exit function for the system, the basic equations are:

$$I = I_1 + I_2 + I_3 + I_4 \quad (2)$$

$$I_1 = s(V_E C_D) \quad (3)$$

$$I_2 = \frac{V_E}{R_D} \quad (4)$$

$$I_3 = (V_E - V_S) s C \quad (5)$$

$$I_4 = \frac{V_E - V_O}{R} \quad (6)$$

$$I_S = \frac{V_S - V_O}{R_S} \quad (7)$$

$$\Delta_V = \frac{V_O}{V_E} \quad (8)$$

By combining and accommodating the equations 2,3,4,5,6,7 and 8, and taking also into account equation (9) is obtained:

$$\frac{V_O}{I} = \frac{s(\Delta_V R R_S C - R R_S C) + \Delta_V R}{s(RC - \Delta_V R C + \Delta_V R_S C - R_S C) + R_S C_D + 1 - \Delta_V} \quad (9)$$

If we substitute some values of the manufacturer, for example, for the photodiode OPT101 (Burr-Brown) has a Capacitance ( $C_D=1200PF$ ), and a  $\Delta V_0=90dB$  (in other form is:  $\Delta V_0=10^5$ ).

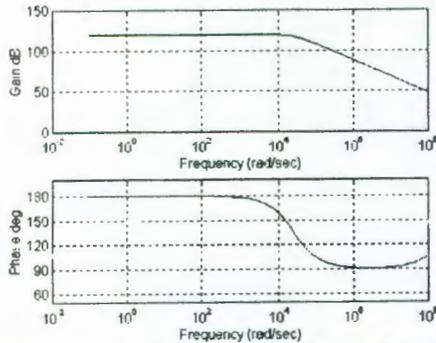


Figure 3. Graph of Bode for the model of the photodiode.

Furthermore, taking into account a feedback resistance ( $R_F = 1M\Omega$ ) and a capacitor of feedback ( $C_F=11PF$ ), considering the poles and zeroes of the equation 9, is obtained the graph from Bode (figure 3) so much for the profit (in Decibels dB) as well as the phase (in degrees). As it's shown in the figure 3 upon having a phase change of  $180^\circ$  to  $90^\circ$ , is found the cut frequency ( $f_c$ ) of the filter (frequency which attenuates the signal, with a reason of 20 dB for decade), then, to be accurate, is would find that the open loop profit has a  $f_c$  to  $120^\circ$  of phase. This behavior of the sign is known as a filter passes decreases, the one that lets go by in ideal form only smaller frequencies to it's  $f_c$ . Therefore, they were obtained results to prove the efficiency of the

model; the experiment is developed as follow: We put a led on the active area of the photodiode and at the same time, the issuing light device is connected to a signs generator, where a wave squared with extent between 0 and 5 Volts is produced, permitting in this way to vary the frequency of the sign. On the other hand, the exit of the photodiode is connected to a sensitive amplifier to the phase, calculate in this way the open loop profit of the device from different frequencies, the experimental results are observed in the figure 4.

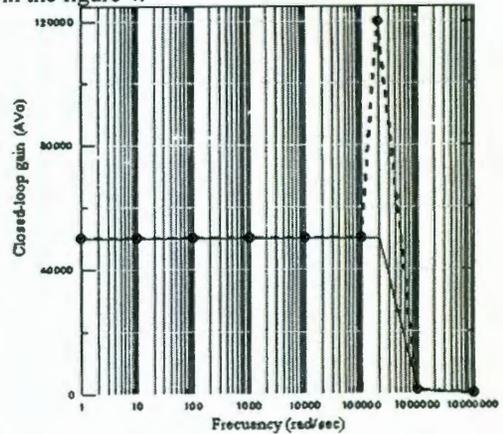


Figure 4. Experimental Results of the model.

The figure 4 has a graph of the closed loop profit against frequency, being presented two results for the behavior of the device: one graphed in the form of line that corresponds to the theoretical result of our model, and other, put at the same time, in the form of point, corresponding to the experimental result, where was found that the result obtained through the measurement instrument, matches the experimental and theoretical behavior, with in some instances nearby exception to the cut frequency, where the phenomenon of resonance appears, therefore, we obtain that the experimental slope decays quickly against the open loop profit of the circuit, this last is due to the fact that we must consider factors, for example the environment temperature, dissipated temperature and above all, the stability of the dual source voltage with the one which the AOP is fed, etc.

#### 4. - DESIGN AND CONSTRUCTION OF ARTIFACT.

To achieve the parameters measurement of the blood by an optical means, a modulated system is needed, in the one which can detect the changes in extent and phase for the optical intensity by the

sample, through employing a light detector (Silicon detector) and a wide spectral radiation with a source of white light (lamp), where lamp is entrusted to issue the different wavelengths and upon impacting normally on the surface of the finger, of observing the absorption regions of the spectrum. In this way, the information collected by the beam of light reflected by the surface of the sample is collected by a detector, as well as the transmitted light is absorbed by an additional detector.

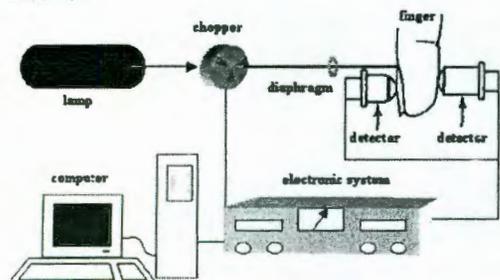


Figure 5. Diagrammatically assembly of the mecatronic system

In the configuration for the optical system of the experimental arrangement, first it has a source of light that impacts normally on the sample, in their path the beam is modulated with the aid of a chopper (motor of direct current coupled to a perforated disk), thereafter it is controlled the luminous flow through a diaphragm, which has a maximum opening of 8 mm, therefore, the light impacts on the finger, and it is collected through detectors, then, the detected signal corresponds so much the dispersed radiation as well as transmitted it in the finger (sample).

For the design of the first optical system it's necessary to have response of the lamp pursuant to the needs of the problem, the one which constitutes a source of white light. Therefore, to select the lamp we need a criterion of the percentage of emission of light intensity versus the wavelength, and being lineal in response in a wide spectral region. Agreeing to the criterion mentioned before, the lamps of quartz filament are less invariant with respect to the wavelength (have less abrupt transitions throughout its spectral response). Therefore, once having the lamp of adequate dimensions the characteristics of the power supply for the lamp are taking in account, the source is designed to 360 Watts of consumed power, the one that is supplied through a source of 12V and a current of 2 Amperes. On the other hand, this type of lamps has an maximum intensity between 600nm and 700nm, region that corresponds to the red, where the manners

vibrations are excited, rotationally, longitudinally and transversally of the red globules.

## 5. - RESULTS

Upon obtaining a data base that contains the extent of the optical sign against the time, we go to the space frequency through a Fourier transform (equation 10), taking into account that the optical sign is modulated periodically, the experimental result is shown in the figure 6. Now, using the relationship of the equation 11, taking the data base of the figure 6 (Extent against frequency) is obtained upon clearing an absorption spectrum that is shown in the figure 7, taking the inverse of the frequency and multiplying it by the speed of the light.

$$H_N = \sum_{k=0}^{N-1} e^{2\pi(mk)/N} h_k \quad (10)$$

$$c = \lambda \cdot f \quad (11)$$

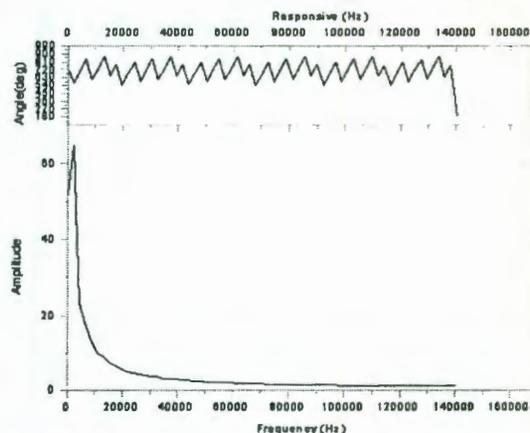


Figure 6. Graphed of response of the blood through FFT.

In the figure 6 an absorption of many red globules to 685 nm as well as of white globules to 1450 nm is shown, the width determines quantitatively the amount, at the same time, between 2800 and 3100 nanometers that has a minimal response for the rotational manners for molecules of groups hydroxyls (O-H).

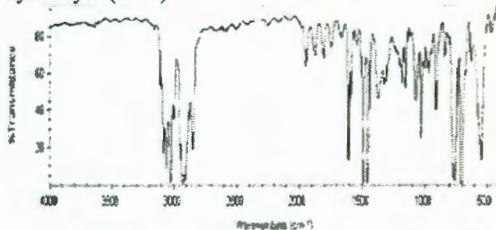


Figure 7.- Absorption Spectrum of the normalized blood.

In the figure 7 the absorption response for several elements from different wavelengths, between them are inorganic components, organic tailing and proteins is observed, being the blood a complex fluid.

#### 6. - CONCLUSIONS

In this research an optical system for the determination of some properties of the blood is developed, where an absorption spectrum through the technique from Fourier is obtained. The system operates in an automatic way achieving to accomplish a scan in-depth to be used on the finger upon changing the modulation frequency of the light. It was obtained a correlation of the theoretical and experimental result for the optical system, as well as the results for the complete system is satisfactory. A software to keep a database with respect of the time for your subsequent analysis of Fourier is developed.

#### REFERENCES

1. Hurowitz, Paul, The art of electronics-2ª-Ed. Cambridge University Press 1994.
2. McKelvey, Physical of the Solid State and Sem.-8ª-Ed. Limusa, press 1996.
3. Hecht, Zajac, Optic. -1ª-Ed. Addison Wesley, 1974.
4. Reitz, Milford, Christy, Bases of electromagnetic theory, Addison Wesley, 4ª-Ed. press 1996.
5. S.H.CHANG and B.C.DU, Rev.Sci.Inst. 69, 402, (1998).
6. A. Castañeda-Miranda, L. Bulenkova, Beliasvski, V. M. Castaño, Optik, 189-194, 11, (2000).
7. Linear Products, Burr-Brown IC Date Book, Press in 1996/1997.

PARAMETER	DENOMINATION	UNIT
$K_j$	Thermal Conductivity of material j	W/cm-K
$\rho_j$	Density of material j	gr/cm <sup>3</sup>
$C_j$	Specific Heat of material j	W/g-K
$\omega$	Modulation Frequency of beam	Rad/sec
$\alpha_j$	Thermal Diffusion of material j	Cm <sup>2</sup> /ses
$a_j$	Diffusion Thermal Coefficient of material j	cm <sup>-1</sup>
$\sigma_j$	Complex Coefficient of Thermal Diffusion	cm <sup>-1</sup>
$\mu_j = 1/a_j$	Thermal Diffusion Length of material j	Cm
$l_s$	Thickness of Sample	Cm
$\beta$	Optical Absorption Coefficient	cm <sup>-1</sup>
$\mu_\beta$	Optical Length de Absorption	Cm

Chart 1. Notation for the description of optical signals.