

143  
2es-



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA  
DE MEXICO

---

FACULTAD DE INGENIERIA



DESARROLLO DE UN SISTEMA DE BARRIDO PARA  
QUERATOPOGRAFIA POR DEFLECTOMETRIA LASER

# TESIS

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE  
**INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA**

AREA MECANICA

P R E S E N T A .

**LEOPOLDO RUIZ HUERTA**

Director: M. en I. Gabriel Ascanio Gasca

Co-Director: Dr. Rufino Díaz Uribe

MEXICO, D.F.

1998

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

1616/6



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

---

Este trabajo fue realizado en el Centro de Instrumentos de la Universidad Nacional Autónoma de México con la tutoría del M. en I. Gabriel Ascanio Gasca, con la supervisión del Dr. Rufino Díaz Uribe y con la participación de Alberto Caballero Ruiz y Mario González Cardel. El trabajo fue financiado por CONACyT, proyecto 2120-PA.

---

*... a mi madre*

*a quien debo lo que soy, dedico este trabajo como la cosecha al apoyo, confianza y cariño que me ha brindado todos estos años.*

---

...a mi padre  
por su apoyo y cariño

...a mi hermana Margarita  
por su gran cariño, apoyo y comentarios

...a Aurora  
con todo cariño por el apoyo y comprensión que me ha brindado

...a Alberto  
quien con su amistad y conocimientos hizo posible este trabajo

...a Abdul, Arcelia, Carlos, Gianna y Selene  
por su amistad, consejos y comentarios.

...a mis niñas  
quienes me acompañaron en esos interminables desvelos

...a todos aquellos que he omitido (no por descortesía sino por falta de espacio), que contribuyeron o por lo menos no interfirieron en la realización de este trabajo.

---

En primer lugar y de forma muy especial quiero agradecer a mi amigo M. en I. Gabriel Ascanio Gasca, quien con su apoyo, consejos, paciencia, y sobre todo su infinita amistad contribuyó de forma invaluable al desarrollo de este trabajo.

Agradezco al Dr. Rufino Díaz Uribe y al Fis. Mario González Cardel, por su asesoría, supervisión y tiempo dedicado a este proyecto.

Al Centro de Instrumentos en donde encontré un apoyo tanto de infraestructura como de conocimientos esenciales para este trabajo.

A mis amigos del departamento de dibujo del C.I., de forma muy especial a José Juan Corona y José Luis Juárez, así como a los integrantes del taller mecánico del C.I., en especial a mis amigos Daniel Ruiz, Jorge Ríos, Alejandro Pérez, Gabriel Romero, Juan Arenas y Valentín López, agradeciendo a estos últimos los conocimientos aportados de su experiencia.

A mis sinodales por sus comentarios y aportaciones:

Dr. Marcelo López  
Dr. Vicente Borja  
M. en I. Gabriel Ascanio  
M. en I. Leopoldo González  
Ing. Adrián Espinosa.

A mis maestros, a la Facultad de Ingeniería y a la Universidad Nacional Autónoma de México por todos los conocimientos y experiencias que de estos he recibido.

---

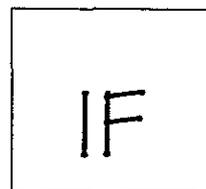
ÍNDICE GENERAL	i
ÍNDICE DE FIGURAS	iv
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO 1 “LA CÓRNEA”	5
LA IMAGEN	5
CÓRNEA	8
DESVIACIONES EN EL PERFIL DE LA CÓRNEA	9
PRINCIPALES DESVIACIONES	9
PRINCIPALES SOLUCIONES	10
CAPÍTULO 2 “MÉTODOS CONVENCIONALES PARA LA MEDICIÓN DE LA TOPOGRAFÍA CORNEAL”	13
¿POR QUÉ MEDIR LA TOPOGRAFÍA CORNEAL?	13
DISCO DE PLÁCIDO	14
QUERATÓMETRO DE JAVAL - SCHIOTZ	16
VIDEOQUERATÓMETRO	17
ESCÁNER	21
INTERFEROMETRÍA	22

---

CAPÍTULO 3 “NUEVA PROPUESTA”	24
QUERATOPOGRAFÍA POR DEFLECTOMETRÍA LASER	25
DEFLECTOMETRÍA	25
LÁSER	26
DEFLECTOMETRÍA LÁSER	29
LOGROS Y CARENCIAS	30
LIMITACIONES	37
CAPÍTULO 4 “DESARROLLO”	38
DISEÑO	38
PARÁMETROS DE DISEÑO	40
DESARROLLO TEÓRICO	41
MECÁNICA	41
MOVIMIENTO LINEAL	42
ACTUADOR LINEAL	42
RODAMIENTO LINEAL	43
MOVIMIENTO ANGULAR	44
TRANSMISIÓN	44
RODAMIENTOS	45
ACTUADOR ANGULAR	46
ÓPTICA	47
DOVE	47
LÁSER	48
ESPEJO PARABÓLICO	50
DIVISOR DE HAZ	50
POLARIZADOR Y RETARDADOR DE HAZ	51
ELECTRÓNICA	51
FOTODETECTOR	51
ELECTROYÁLVULA	52
CONTROL	53
ADQUISICIÓN Y PROCESAMIENTO DE DATOS	53

---

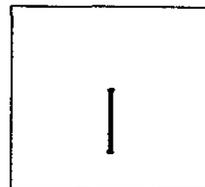
TARJETA DE ADQUISICIÓN	53
PROGRAMA	55
ANÁLISIS	56
DESCRIPCIÓN	56
CAPÍTULO 5 “PRUEBAS Y RESULTADOS”	66
DISEÑO DE PRUEBAS	66
PRUEBAS	67
MOVIMIENTO LINEAL	67
MOVIMIENTO ANGULAR	70
MOVIMIENTO COMBINADO	72
ANÁLISIS GENERAL DE RESULTADOS	74
CONCLUSIONES	76
APÉNDICE	79
BIBLIOGRAFÍA	85



## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1	El ojo, a) corte, b) vista frontal	7
Figura 1.2	Queratotomía radiada	11
Figura 2.1	Disco de Plácido	14
Figura 2.2	Información del disco de Plácido, a) Córnea sana, b) Córnea con deformación.	15
Figura 2.3	Queratómetro de Javal - Schiötz.	16
Figura 2.4	Imagen observada en el queratómetro de Javal-Schoitz	17
Figura 2.5	Videoqueratómetro	18
Figura 2.6	Medición del radio de curvatura con un videoqueratoscopio	19
Figura 2.7	Imagen de resultados de un Videoqueratoscopio	20
Figura 2.8	Información obtenida del queratómetro CANON RK-2	21
Figura 2.9	Queratometro CANON RK-2	22

Figura 3.1	Ángulo de deflexión	25
Figura 3.2	Deflectometría	26
Figura 3.3	Efectos Láser	27
Figura 3.4	Diagrama de un haz incidente en diferentes superficies: a) esférica, b) deformada	30
Figura 3.5	Esquemas de movimiento	31
Figura 3.6	Prisma DOVE	32
Figura 3.7	Diagrama del equipo	34
Figura 3.8	a) Movimiento teórico del sistema biela - manivela b) Movimiento del sistema angular c) Conjunción de movimientos	35-36
Figura 3.9	Movimiento real	37
Figura 4.1	Fases del diseño	39
Figura 4.2	Potencia de un láser He-Ne permisible para el ojo humano	49
Figura 4.3	Ejes de voltaje en el fotodetector	52
Figura 4.4	Diagrama del control de velocidad	59
Figura 4.5	Diagrama de la tarjeta AT-MIO-16E1	62
Figura 4.6	Pantalla del programa de adquisición de datos	62
Figura 4.7	Prototipo	63
Figura 4.8	Componentes del movimiento lineal	64
Figura 4.9	Componentes del movimiento angular	64
Figura 4.10	Diagrama del nuevo prototipo	65
Figura 5.1	Tiempo de recorrido total a diferentes presiones de operación y condiciones de muestreo	68
Figura 5.2	Zona lineal de trabajo a 3 bar de presión	70
Figura 5.3	Trayectoria circular producida por el sistema	71
Figura 5.4	Barrido de trabajo obtenido del sistema	72
Figura 5.5	a) Barrido desglosado obtenido del sistema (exterior - centro) b) Barrido desglosado obtenido del sistema (centro - exterior)	73-74
Figura A-1	(a) construcción de un fotodiodo de efecto lateral (b) Construcción de un fotodiodo de barrera Schottky.	82
Figura A-2	Funcionamiento del fotodiodo	83



## INTRODUCCIÓN

La ingeniería, en su carácter multidisciplinario, tiene como objetivo la solución de problemas en diversas áreas; la medicina no es la excepción. Desde sus orígenes la medicina, al igual que muchas otras ciencias, han requerido de avances tecnológicos para poder llevar a cabo sus objetivos.

Para la oftalmología, se requiere instrumentación de alta precisión, en particular cuando se necesita conocer a ciencia cierta el estado y funcionamiento de determinados órganos, tales como retina y córnea. En el caso de la córnea es de vital importancia el conocer con la mayor exactitud posible todas las características y variaciones de su superficie, debido a que algunas enfermedades como la miopía, el astigmatismo y en general las ametropías son producto de una mala formación del perfil corneal.

---

Actualmente, algunos de los problemas de visión son resueltos con dispositivos como los lentes de contacto y lentes fijos, que representan soluciones fáciles y rápidas para corregir el problema de la mala captación de imágenes observadas, sin embargo, estas alternativas representan para muchas personas una solución incómoda y para algunas más, una solución dependiente para resolver estos problemas. Debido a su costo y sencillez son comúnmente empleadas.

Otro tipo de alternativas, como la cirugía, requieren de un conocimiento todavía mayor para su adecuada aplicación, es decir, es necesario considerar de la forma más exacta posible el estado de los órganos a operar antes de practicar la corrección.

Por lo antes mencionado podemos percatarnos de la importancia de la córnea, así como la de la instrumentación adecuada para su medición, razón por la cual se ha decidido abordar el problema para aportar los conocimientos adquiridos durante nuestra formación.

Debido a la magnitud del tema se ha decidido dividirlo en *seis capítulos*, en donde se lleva una secuencia cronológica desde los orígenes hasta la evaluación del nuevo prototipo.

En el *capítulo primero* se expone la forma en que el sistema de la vista capta y recrea nuestro entorno, así como las características anatómicas y fisiológicas de la córnea, con el fin de tener en forma clara cual es la problemática que obliga a desarrollar nuevas alternativas de la medición del perfil corneal.

En el *capítulo segundo* se hace una descripción de múltiples métodos conocidos para la medición de la topografía corneal, tales como: el disco de Plácido, el Queratoscopio, el Queratómetro, y el escáner entre otros. Todos estos, a excepción del último, están basados en el principio de funcionamiento del disco de Plácido, el cual consiste simplemente en una superficie plana de color blanco, en la que se trazan anillos negros concéntricos que pueden verse reflejados en la córnea por medio de un orificio hecho en el centro de los

---

anillos; lo observado a través de dicho orificio dependerá del estado de la córnea misma, es decir, anillos concéntricos uniformes en córneas sanas y anillos distorsionados en córneas con irregularidades. El tipo de dispositivo que se encarga de suministrar la fuente emisora de luz para formar los anillos, así como la forma de captación de datos, caracteriza a los diferentes instrumentos de medición, mostrando cada uno de ellos diferentes aplicaciones.

En el *capítulo tercero* se presenta una propuesta para la medición de la topografía corneal basada en la deflectometría láser, exponiéndose su historia, desarrollo y evaluación; reportando los avances conseguidos hasta ese momento. Este sistema utiliza un láser de He-Ne, el cual nos ayuda a satisfacer algunos de los requerimientos de diseño, tales como: eliminar zonas oscuras obtenidas con otro tipo de instrumentos y la precisión en las mediciones.

No es posible omitir que, en la realización de instrumentación, se observan ajustes que están implícitos al uso de nuevas técnicas, las cuales resultan limitantes en su funcionamiento, sin embargo, de ello aprendemos claves para mejorarlas.

Un ejemplo claro de esto, se ve reflejado en la primera versión del equipo, donde se detectaron deficiencias tales como una baja velocidad de medición y baja tasa de muestreo. Parte de esta problemática surge del aspecto de seguridad ocular, dado que no es recomendable que la córnea esté demasiado tiempo expuesta al haz emitido; también la sincronización de los dispositivos queda supeditada a este punto, lo que implica un alto régimen de operación en posición y tiempo debido a la repetibilidad requerida.

En el *capítulo cuarto* se describen una serie de alternativas reales para resolver algunos de los problemas más importantes que están presentes en el equipo, una vez conocidas las limitantes del primer prototipo. El incremento de velocidad y calidad de los sistemas mecánicos, así como la sincronización de actuadores y adquisición de datos fueron los primeros aspectos a solucionar, buscando con esto un adecuado funcionamiento del equipo y los

---

demás dispositivos involucrados y probados en cuanto a funcionamiento y eficiencia.

La experimentación sobre esta nueva propuesta desarrollada, requirió de un trabajo analítico y experimental en diversas áreas técnicas y científicas, las cuales no exceptúan al usuario (médico). Es por esto que a la ingeniería no solo le interesa la medición de parámetros físicos, sino también su control y aplicación de forma constructiva a problemas de la sociedad.

Así mismo, para analizar los datos (*capítulo 5*), se debe de aplicar una combinación de conocimientos relativos a los procesos que se investigan, teniendo claro las limitaciones de los mismos, es decir, se deben tener presentes los parámetros y limitaciones de operación de toda la instrumentación usada, así como tomar en cuenta los errores, tanto sistemáticos como aleatorios, que ocurren durante la obtención de datos experimentales.

Para finalizar, ningún tipo de trabajo de desarrollo tiene aportaciones reales sino se dan conclusiones a los puntos planteados (*capítulo sexto*), analizando en ello, el estado en que se encuentra la investigación, y cuales serán los siguientes pasos para lograr cumplir de forma total todos los objetivos.

La realización de este trabajo de tesis tiene como objetivo dar un paso más en el avance de nuevas técnicas dentro de la instrumentación médica.

## CAPÍTULO

## 1

## LA CÓRNEA

El cuerpo humano consta de cinco sentidos que le permiten una adecuada comunicación con su entorno. Uno de estos sentidos es el de la vista, que por medio del ojo, recolecta las imágenes del medio que nos rodea para ser procesadas en la zona específica de Brodman (Cisura Celérica) en el cerebro.

### LA IMAGEN

Anatómicamente, los ojos constan de tres membranas y tres medios ópticos. La membrana más externa, gruesa y firme se denomina esclerótica la cual, en su parte más anterior, se hace más convexa y las fibras que la forman se ordenan regularmente convirtiéndose en un casquete transparente. Dicha zona, llamada *córnea*, es la lente más poderosa del ojo.

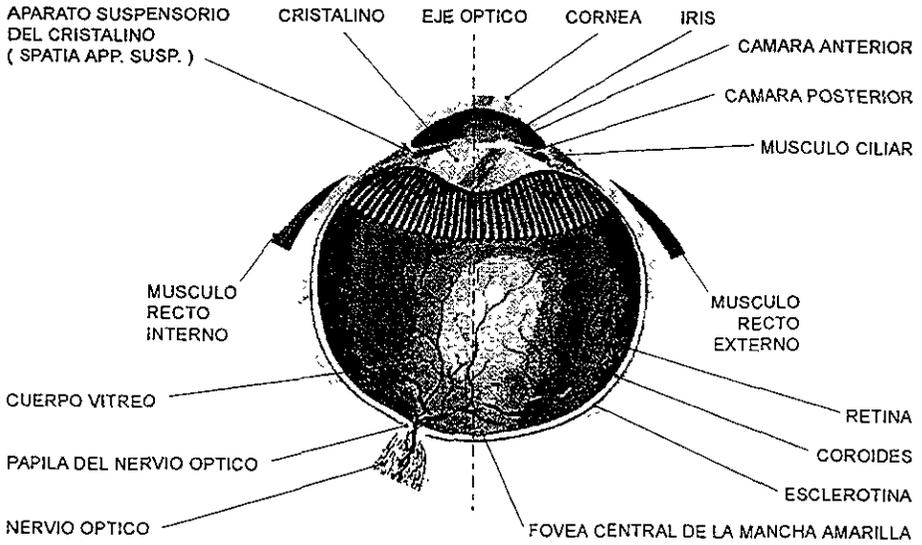
---

La membrana media o úvea tiene a su vez tres partes: *el iris*, que es la porción coloreada, la cual funciona como el diafragma de una cámara fotográfica regulando la luz que pasa por su abertura central (la pupila), y separa la cámara anterior de la posterior; *el cuerpo ciliar* encargado de producir el humor acuoso que nutre a la córnea y el cristalino, y que mantienen también la presión dentro del ojo; y *la coroides*, por donde corren los vasos sanguíneos que alimentan la retina. Justamente esta compleja estructura nerviosa, donde comienza a formarse la visión constituye la membrana interna en cuanto a los medios ópticos, uno es el citado humor acuoso, el segundo es el cristalino, una lente transparente y elástica encargada de enfocar la imagen en la retina. Y el último, el humor vítreo, sustancia gelatinosa que, a su poder de refracción, se añade la función de ser el que sostiene a la retina en su posición (figura 1.1).

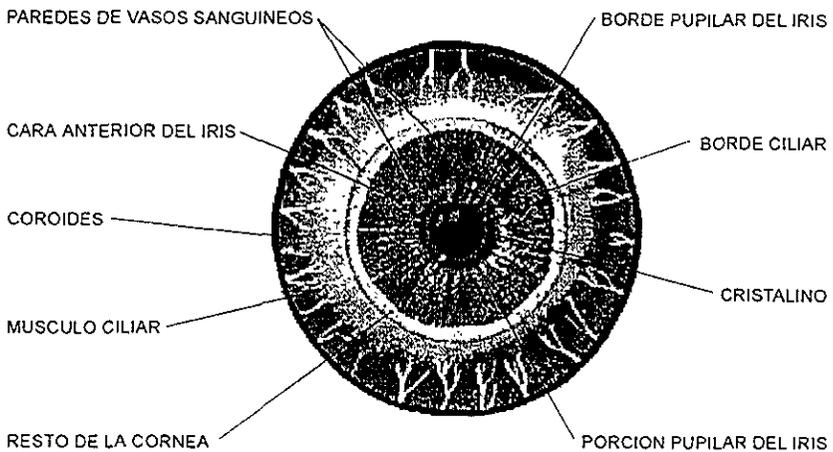
Los demás componentes del ojo son el nervio óptico, integrante de la cadena que lleva la información al cerebro, los músculos que mueven el globo ocular, y los sistemas de protección: párpados, conjuntiva y aparato lagrimal.

El encargado de ver es el cerebro y los ojos son solamente sus herramientas. Estos instrumentos reciben las imágenes en forma de rayos luminosos y, utilizando las propiedades de sus lentes, lo primero que hacen son invertirlas de tal manera que la retina tiene una información opuesta a la realidad.

Los fotorreceptores retineanos - cono y bastones - hacen un primer procesamiento de esa información y la transmiten a través del nervio óptico. El paso siguiente es un entrecruzamiento de las fibras internas de cada ojo en el quiasma óptico, lo que facilitará la visión binocular y la apreciación del relieve de los objetos. Tras otra estación intermedia, la corteza cerebral recibe aquella primera imagen que impactó en la retina y, además de volver a invertirla para que quede al derecho, discrimina forma, tamaño, orientación espacial y colores del objeto en cuestión, y en un proceso de asociación en el que participan la memoria visual, el aprendizaje y hasta la psicología, acaba por determinar qué es lo que estamos viendo. Por supuesto, millones de veces más rápido de lo que cuesta explicarlo.



(a)



(b)

Figura 1.1 El ojo, a) corte, b) vista frontal

---

## CÓRNEA

La córnea es el área clara y circular de la porción anterior de la capa fibrosa externa del globo ocular. Del latín *corneus* (semejante al cuerno en consistencia, duro); su nombre proviene del hecho de que la córnea adquiere un aspecto córneo tras la muerte. Es una membrana avascular, es decir que carece de vasos sanguíneos, muy resistente a la acción mecánica.

Siendo su tamaño de unos 11.5 mm de alto por unos 10.5 mm de ancho, por lo que es ligeramente elíptica. Esto se debe a que el limbo más opaco cubre un poco la superficie anterior de la córnea hacia arriba y hacia abajo.

Desde atrás la córnea es circular, con un diámetro de 11.5 mm. El espesor es de aproximadamente 500  $\mu\text{m}$  en la parte central, aumentando hasta unos 700  $\mu\text{m}$  en la periferia. El grado de curvatura de la córnea varía en las distintas personas y es mayor en los jóvenes que en los ancianos.

La córnea se encuentra formada por 5 capas fácilmente identificables consideradas desde la superficie anterior. Dichas capas son: Epitelio anterior, lámina limitante anterior (capa de Bowman), estroma o substancia propia, lámina limitante posterior (membrana de Descemet), y el epitelio posterior (endotelio de la cámara anterior).

La propiedad más significativa de la córnea es su exclusiva transparencia, así, la intensidad de la luz disminuye muy poco durante su paso por esta, y lo más importante, no se produce difracción de la luz, la cual impediría la formación de la imagen. Se ha demostrado que menos del 1% de la luz que atraviesa la córnea se dispersa.

Dado que la córnea está colocada en la parte frontal del ojo, esta es la primera superficie por donde pasa la luz, y siendo esta una superficie refractora, de superficie esférica y con radio de curvatura  $r$ , su potencia refractora está expresada en la ecuación 1.1:

$$P = \frac{N - 1}{r} \quad (1.1)$$

donde  $N$  es el índice de refracción del medio posterior a la superficie corneal;  $N$  toma un valor estándar, (debido a que no existen dimensiones únicas para el ojo humano, se han considerado por razones prácticas como un ojo estándar a un ojo con dimensiones promedio), de  $N = 1.3375$ . Cuando  $r$  se mide en metros, las unidades de la potencia son dioptrías, teniendo como valor promedio de  $r$  a  $r_{media} = 7.98$  mm. La córnea como elemento refractor proporciona alrededor del 70% del poder refractivo del sistema de visión; la potencia media total del ojo es de 58.6 dioptrías, y la córnea contribuye con una potencia de alrededor de 43 dioptrías.

## DESVIACIONES EN EL PERFIL DE LA CÓRNEA

Una córnea normal tiene una superficie transparente y, en general, su curvatura varía suavemente. Cuando se presenta algún defecto las imágenes no se forman adecuadamente, lo que provoca una disminución en la visión.

Todas las patologías llamadas refractivas, por su relación con el paso de luz a través de las diferentes lentes del ojo, afectan al 60% de los menores de 40 años.

Muchos de los errores refractivos que se presentan en el sistema de visión están relacionados de forma directa con un cambio en el radio de curvatura de la córnea como consecuencia de variaciones en la forma de la superficie corneal.

## PRINCIPALES DESVIACIONES

Como principales casos de estas patologías encontramos que cuando la córnea toma una forma cilíndrico-esférica, existirá una diferencia entre los radios de curvatura de dos direcciones perpendiculares, dando esto lugar al *astigmatismo*.

---

En otros casos la córnea toma una forma casi cónica, evitando que se forme una imagen definida y nítida en la retina; esta enfermedad es llamada queratocono.

## PRINCIPALES SOLUCIONES

Está claro que ha pasado mucho tiempo desde que los contemporáneos de Hipócrates se dedicaban a trocear el cristalino con un punzón para después aspirarlo con un popotillo. Los anteojos, los lentes de contacto, las lentes intraoculares, las técnicas de cirugía y los aparatos han ido evolucionando a velocidades vertiginosas, hasta permitir que médicos y ópticos puedan dar soluciones asombrosas a problemas que parecían insuperables hace algunos años.

Los casos que nos conciernen son aquellos que pueden modificar el poder refractor de la córnea, corrigiendo con ello problemas en la visión tales como astigmatismo, miopía y en general a las ametropías. La corrección se realiza a través de la modificación de la curvatura corneal de manera simétrica o en alguna dirección preferencial, utilizando diferentes técnicas quirúrgicas, como son:

- a) Epikeratofaquia, la cual consiste en tallar un botón donante al cual se le ha removido el epitelio y el endotelio, y se le ha dado una potencia conocida. Esta lentícula así tallada, se coloca sobre la córnea receptora a la cual se le ha removido previamente el epitelio. Actualmente esta técnica ha caído en desuso.
- b) Láser de Exímero, el cual actualmente se emplea para cambiar de forma controlada el radio de curvatura y en consecuencia el poder refractivo, lo cual es posible para la corrección de miopías que van de bajas a moderadas. La técnica consiste principalmente en efectuar la fotoabrasión del tejido estromal superficial mediante un haz luminoso con longitud de onda de 193 nm (en el rango ultravioleta); su empleo se encuentra aún restringido.

- c) La queratotomía radiada, miópica y astigmática, en la cual se efectúa cirugía de manera que se conserva un área central libre de cortes y se debilita la periferia mediante incisiones radiales (figura 1.2). El efecto que esto produce ante una presión intraocular uniforme en toda la cara posterior de la córnea, es la de "abombar" la periferia debilitada con el consiguiente aumento del radio de curvatura de toda la córnea. Esto se traduce en un aumento de las cuerdas sin modificaciones de la ságitas, modificando así su poder refractivo.
- d) La Querioqueratomelesius o queratomileusis, consiste en resecar una lamacela corneal que incluye: Epitelio, capa de Bowman y estroma con un grosor aproximadamente 300  $\mu\text{m}$ ; esta se congela y se talla para darle la potencia requerida y suturarla sobre su lecho original.
- e) La queratomileusis BKS, consiste en resecar, al igual que en el procedimiento anterior, una lamela corneal con los mismos elementos y sin requerir de congelación, únicamente fijando el tejido mediante succión y cortando con un microqueratomo esta lamela, para darle la potencia necesaria y así corregir la ametropía.



*Figura 1.2 Queratotomía radiada*

El uso de estas técnicas ha mostrado que pueden provocar una subcorrección o una hipercorrección que es necesario evaluar para realizar una nueva corrección de defectos residuales mediante el uso de anteojos o lentes de contacto.

## MÉTODOS CONVENCIONALES PARA LA MEDICIÓN DE LA TOPOGRAFÍA CORNEAL

### ¿POR QUÉ MEDIR LA TOPOGRAFÍA CORNEAL?

Definitivamente, para poder realizar cualquier método de corrección es indispensable conocer con la mayor precisión posible todas las características de lo que deseamos modificar.

La necesidad de medir la forma o topografía de la córnea, ha conducido al desarrollo de diferentes sistemas, técnicas e instrumentos a lo largo de la historia, que tratan de cumplir tal propósito. A ciencia cierta, estos instrumentos proporcionan resultados que han permitido desarrollar técnicas para la corrección de algunos problemas de visión, pero entre más avanzan las técnicas de corrección, se requiere del desarrollo de nuevos instrumentos que

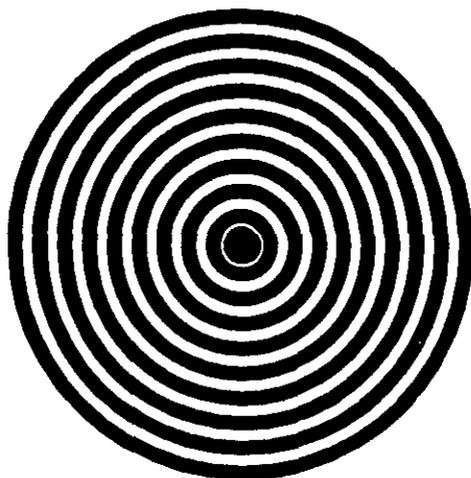
permitan obtener mayor y mejor información del sistema de visión humana, y con esto ayuden a obtener mejores resultados.

Por lo anterior daremos una breve explicación de la instrumentación mas común con la cual obtenemos información de la topografía corneal.

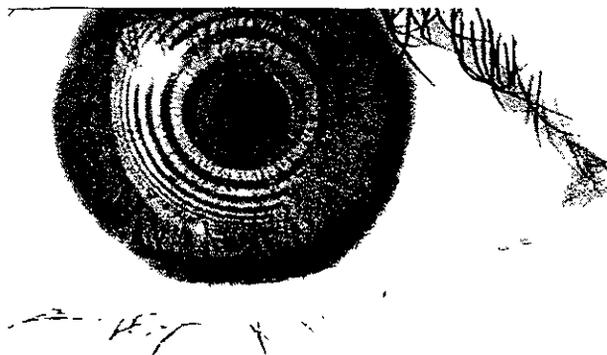
## DISCO DE PLÁCIDO

Este instrumento es sumamente sencillo, consta básicamente de una superficie plana blanca sobre la cual son trazados una serie de anillos concéntricos (negros) igualmente espaciados y de espesor constante; cuenta con un pequeño orificio en el centro de los anillos, por donde se observa el reflejo de estos en el ojo a estudiar, lo cual nos permite a simple vista percatarnos del grado de deformación de la córnea. Un esquema de dicho disco se presenta en la figura 2.1.

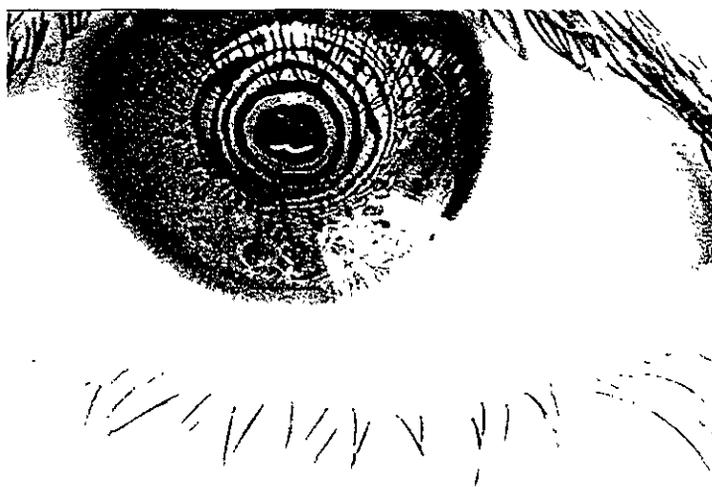
La forma como se ve el reflejo que produce el disco de Plácido sobre un ojo, puede apreciarse en la figura 2.2.



*Figura 2.1 Disco de Plácido*



(a)



(b)

*Figura 2.2 Información del disco de Plácido,  
a) Córnea sana, b) Córnea con deformación.*

## QUERATÓMETRO DE JAVAL - SCHIOTZ

El queratómetro de Javal-Schiotz (fig. 2.3), es quizás uno de los más populares. Su funcionamiento consiste en formar una imagen detrás de la córnea de dos patrones luminosos llamados miras, las cuales pueden moverse dentro de un arco cuyo centro se localiza donde se forman las imágenes.

Estas imágenes son observadas a través de un telescopio, que tiene un objetivo formado con un sistema de dos lentes en medio de las cuales, se encuentra un elemento birrefringente que forma una imagen doble, debido a que el desdoblamiento angular es fijo. El radio de curvatura se localiza mediante el movimiento de las miras sobre el arco en donde pueden deslizarse. Para compensar la dispersión cromática del elemento duplicador de imagen, se pone un filtro rojo en una mira y uno verde en la otra. Las imágenes observadas en este instrumento son similares a las mostradas en la figura 2.4.

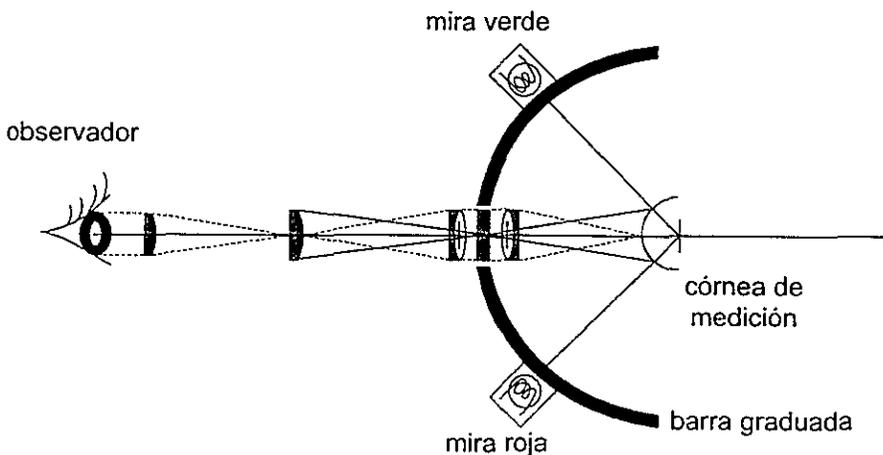


Figura 2.3 Queratómetro de Javal - Schiotz.

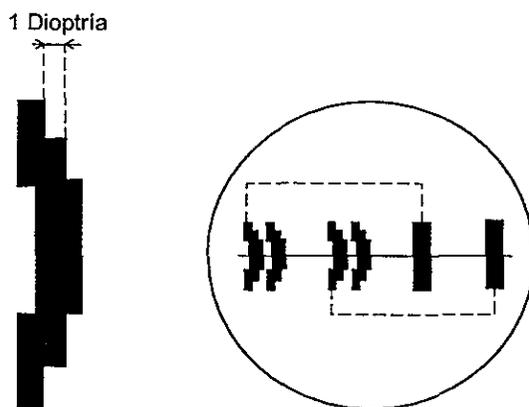


Figura 2.4 Imagen observada en el queratometro de Javal-Schiötz

El radio de curvatura se encuentra dado mediante la siguiente expresión:

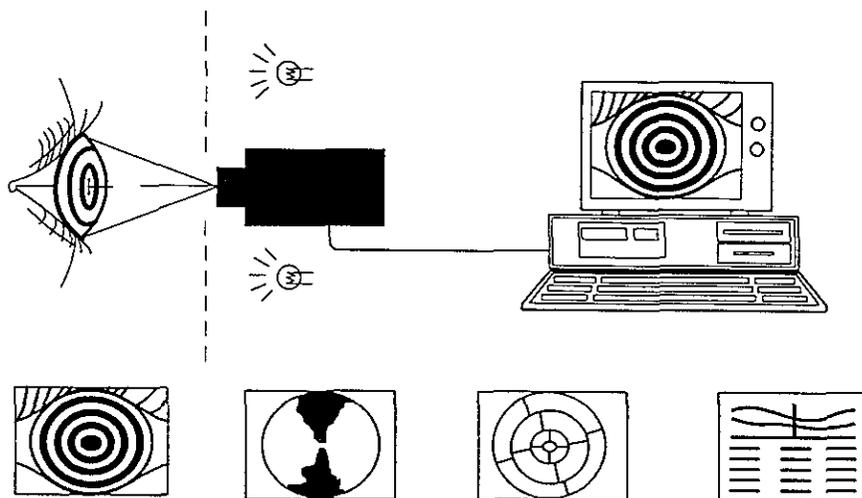
$$r \cong 2d \frac{h_1}{h_0} \quad (2.1)$$

en donde  $h_1$  es el tamaño de cada una de las imágenes de las miras,  $h_0$  es el tamaño de cada una de las miras y  $d$  es la distancia de las miras a la córnea. Este instrumento nos brinda información muy limitada, pues para cada córnea sólo nos proporciona una medida del radio de curvatura promedio por cada posible orientación. Aunque esta información es suficiente para detectar astigmatismo, requerimos tener datos punto a punto de la superficie para así conocer otras deformaciones.

## VIDEOQUERATÓMETRO

Uno de los instrumentos que actualmente ofrece mejores resultados es el videoqueratómetro, cuyo funcionamiento está basado en la proyección del

disco de Plácido sobre la córnea. En este caso, el disco consiste en una serie de anillos concéntricos iluminados que al proyectarse sobre la córnea permite observar una imagen reflejada disminuida de los anillos. Esta imagen es adquirida por un sistema de video que, con ayuda de tarjetas digitalizadoras, se acopla a una computadora, tal y como se aprecia en la figura 2.5.



*Figura 2.5 Videoqueratómetro*

Si la superficie corneal no presenta deformaciones, la imagen capturada que se observa es parecida a la del objeto, es decir, se observan los anillos perfectamente concéntricos y con cierta relación de tamaños. Si existen deformaciones sobre la superficie, estas producen deformación en la imagen de los anillos. El método que se sigue para analizar las imágenes consiste en trazar líneas radiales que parten del centro de la imagen. Tomando los puntos de intersección de estas líneas con los anillos y midiendo la separación entre puntos, de anillos adyacentes, puede determinarse el radio de curvatura (a mayor separación corresponde un mayor valor de radio).

Con este instrumento se observan variaciones del orden de  $10\ \mu\text{m}$ , pero la repetibilidad de las mismas apenas llega a  $100\ \mu\text{m}$  (precisión en el radio de curvatura). La información así adquirida es desplegada en forma de un mapa de colores distintos, cada uno de los cuales corresponde a un valor diferente del radio de curvatura local. Este instrumento es calibrado por medio de esferas de acero, tomadas como superficies de referencia, con radios de curvatura parecidos a los de una córnea. La figura 2.6 nos muestra el procedimiento de análisis del equipo.

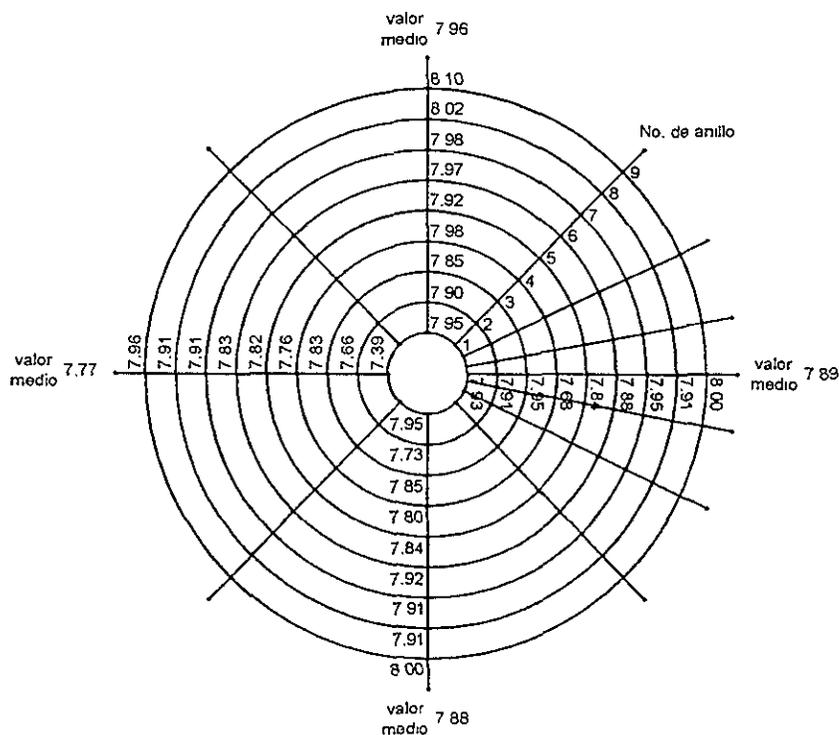
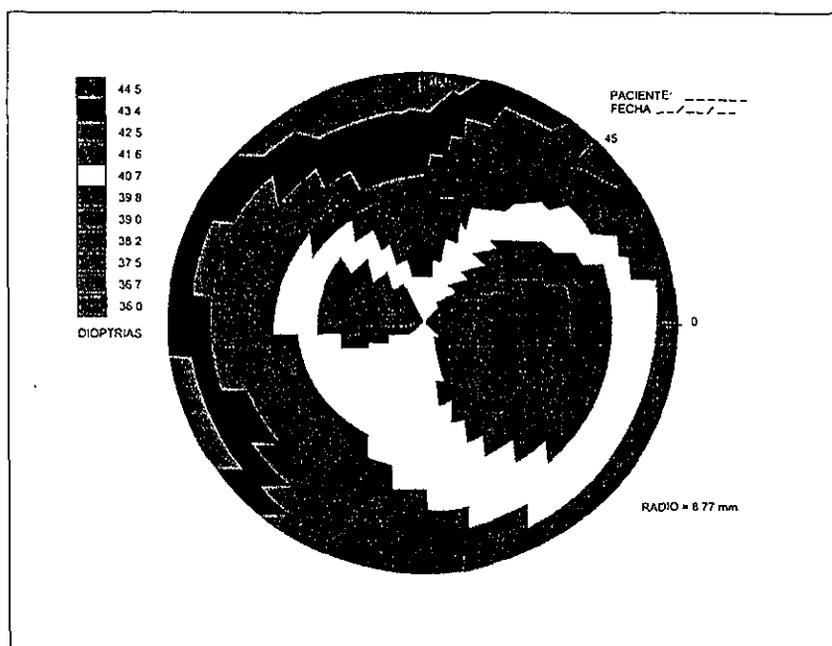


Figura 2.6 Medición del radio de curvatura con un Videoqueratómetro

Pese a que este instrumento nos brinda una forma rápida y confiable para obtener la topografía corneal, existen dificultades que no han podido

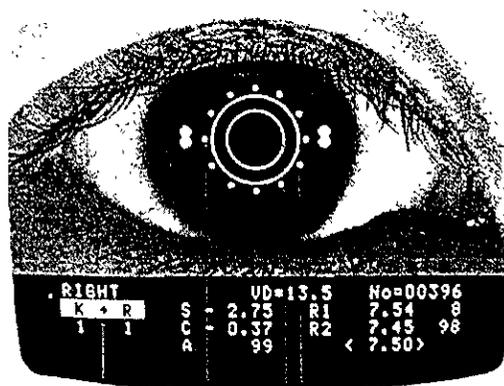
resolverse, por ejemplo, si las deformaciones que presenta la córnea son de gran magnitud, se presenta una mezcla entre los anillos que no permite una evaluación final de la topografía corneal. También se llega a obtener una mala definición de la imagen y con esto no es posible la localización del centro de los anillos a partir del cual se trazan las líneas radiales, con una consecuente y obvia pérdida de información. Además, por la presencia de zonas oscuras en las cuales no son proyectados los anillos, no se tiene información de estas, por lo que se realiza una aproximación en la evaluación. Estas limitaciones son importantes, pues una vez realizada la corrección de algún defecto por medios quirúrgicos, no es posible evaluar la topografía inmediatamente para el ajuste de suturas, sino hasta que cicatricen las incisiones de la operación, por lo que una probable corrección inmediata es totalmente descartada. En la figura 2.7 se muestra un ejemplo típico de los resultados obtenidos por la computadora.



*Figura 2.7 Imagen de resultados de un Videoqueratómetro*

## ESCÁNER

Existen también equipos ofrecidos por diferentes compañías, de bajo costo, que son capaces de proporcionar datos sobre la forma y características de la córnea utilizando una combinación del método del videoqueratómetro y luz infrarroja. En lo que respecta a las características de la córnea, estos equipos utilizan una proyección de luz infrarroja (con longitud de onda invisible para el ojo humano), lo cual permite medir el poder de refracción de la misma con un tamaño natural de la pupila; para las mediciones de superficie corneal, es utilizada una variante del videoqueratómetro en la cual es tomada una fotografía digitalizada del ojo (con el fin de evitar movimientos involuntarios durante la medición), para después sobreponerle una serie de anillos con diferentes características, que servirán de referencia para un análisis por medio de geometría óptica. Un equipo de estas características proporciona información como la mostrada en la figura 2.8, mientras que el equipo físico se muestra en la figura 2.9.



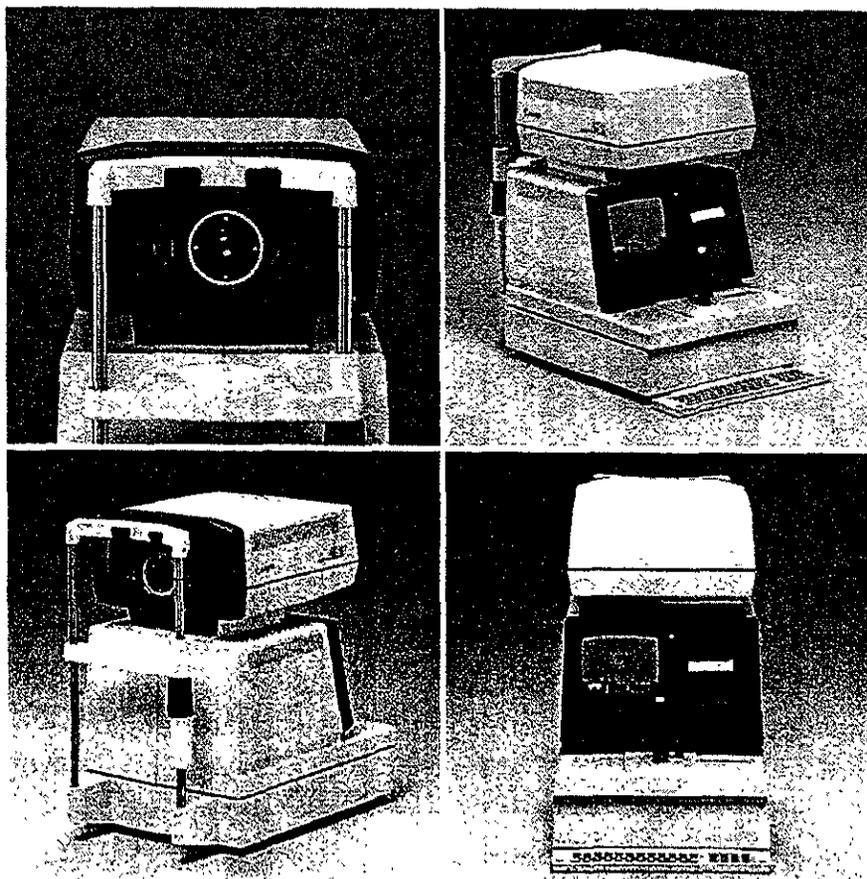
Min image

Ring target  
(2.5mm in diameter)

Ring target

Continuous measurement mark

Figura 2.8 Información obtenida de un queratómetro CANON RK-2.



*Figura 2.9 Queratómetro CANON RK-2*

## INTERFEROMETRÍA

Una propuesta de evaluación para la topografía corneal, utiliza la interferometría de dos longitudes de onda diferentes (una dentro del espectro naranja y la otra dentro del espectro rojo). En el arreglo experimental son utilizados dos sistemas láser, formando con cada uno de

---

estos un patrón de interferencia entre los haces reflejados por la superficie (donde se simula la córnea con una esfera), y a través de un espejo plano de referencia los patrones de interferencia se dirigen hacia un sistema de video digitalizador donde son capturados. La caracterización de este equipo se llevó a cabo con una esfera de calibración, continuando con córneas humanas en donde, como primeros resultados se logró verificar que la córnea tiene una forma más parecida a la de un elipsoide de revolución que a la de una esfera, llegando a establecer para esta cónica su constante de conicidad  $k = -0.2$  y un radio de curvatura paraxial de  $r = 7.8$  mm. Todas las pruebas realizadas hasta ahora no consideran el caso cuando la córnea es demasiado deforme, ni se ha evaluado la precisión que puede conseguir este instrumento. Esta propuesta no es una solución total al problema.

Analizando los dispositivos anteriores podemos percatarnos que pese a la existencia de instrumentación para la medición de la superficie corneal, es necesario la implementación de nuevos equipos que proporcionen datos más exactos en cuanto a las zonas de deformación y las magnitudes de estas.

## NUEVA PROPUESTA

Si tenemos en consideración las ventajas y desventajas de los sistemas antes mencionados, surge la idea de utilizar un método conocido como deflectometría, que junto con la interferometría, permitan desarrollar un instrumento que proporcione una cantidad mayor de información en un menor tiempo mediante el uso de las herramientas de cómputo existentes.

Es de esta manera como surge la idea de iniciar el diseño, construcción y caracterización de un sistema de topografía corneal por deflectometría láser. Este equipo debe obtener suficientes datos referentes al radio de curvatura de la córnea a lo largo de toda su superficie, con el fin de proporcionar a los cirujanos las zonas de corte en intervenciones quirúrgicas. Así mismo debe ser seguro en su uso.

## QUERATOPOGRAFÍA POR DEFLECTOMETRÍA LASER

### DEFLECTOMETRÍA

En topografía, el ángulo formado entre una línea y la extensión de la línea precedente es llamado ángulo de deflexión (figura 3.1). Las curvas son frecuentemente medidas por el método de deflectometría angular (figura 3.2). Antes de poderse llevar a cabo este método es necesario el localizar en la curva los siguientes puntos: intersección, tangencia y uno dentro de la curva, así como obtener el ángulo central  $\Delta$ , el cual es numéricamente igual a la deflexión del ángulo  $\Delta_1$ . Teniendo el valor de  $\Delta_1$ , los ángulos de deflexión de  $d_1$ ,  $d_2$ ,  $d_3$ , etc., pueden ser calculados asumiendo la longitud de las cuerdas  $c_1$ ,  $c_2$ ,  $c_3$ , etc.. El tránsito es primeramente colocado sobre P.C. y visto en P.I.. El ángulo de deflexión  $d_1$  que da la dirección de la línea desde P.C. a  $x$ , es entonces apagado por medio del tránsito. La longitud de la cuerda  $c_1$  es medida sobre la tierra por una tapa de acero que definitivamente arregla las posiciones del punto  $x$ . El punto  $y$  puede ser localizado apagando el punto de deflexión  $d_2$  y midiendo la cuerda  $c_2$  desde el punto  $x$ . Otros puntos en la curva pueden ser colocados de manera similar. Desde la geometría de la figura se observa que el ángulo de deflexión  $d_4$  a PT es igual a  $\frac{1}{2}$  del ángulo central <sup>[6]</sup>.

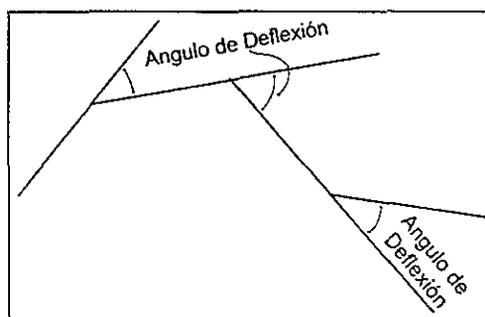


Figura 3.1 Ángulo de deflexión <sup>[6]</sup>

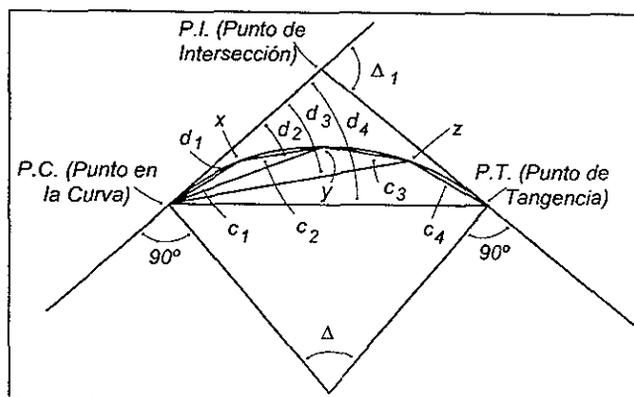


Figura 3.2 Deflectometría<sup>[6]</sup>

## LÁSER

Un láser es una fuente de radiación en la parte visible, infrarroja o ultravioleta, del espectro electromagnético. Sus siglas significan: "Amplificación de Luz por Medio de la Emisión Estimulada de Radiación" (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation)

Su funcionamiento consiste en la teoría de que en todo sistema físico, cada uno de sus átomos posee una cierta cantidad de energía interna y tiende a ocupar un estado en el que esta energía sea mínima. A este estado se le llama estado base. Además, un átomo puede estar en cualquiera de varias configuraciones con energías  $E_1, E_2, \dots, E_n$ , superiores a las del estado base; a estos estados se les llama estados excitados.

Einstein estableció en 1917, que un átomo puede absorber, si se encuentra en un estado base o emitir si se encuentra en uno de sus estados excitados, una radiación cuya frecuencia es

$$\nu_y = \frac{E_j - E_i}{h} \quad (3.1)$$

donde  $E_i < E_j$  y  $h$  es la constante de Planck. A causa de esta cuantización de la energía de radiación, se dice que un átomo absorbe un fotón de frecuencia  $\nu_{ij}$  y energía  $E_j - E_i$ .

La emisión, al pasar el átomo del estado  $E_j$  al estado  $E_i$ , puede suceder de dos maneras: Espontáneamente o inducida por un fotón. Es espontánea cuando el átomo, sin recibir radiación, decae al estado  $E_i$  después de un período de vida aleatorio del orden de  $10^{-8}$  seg (figura 3.3).

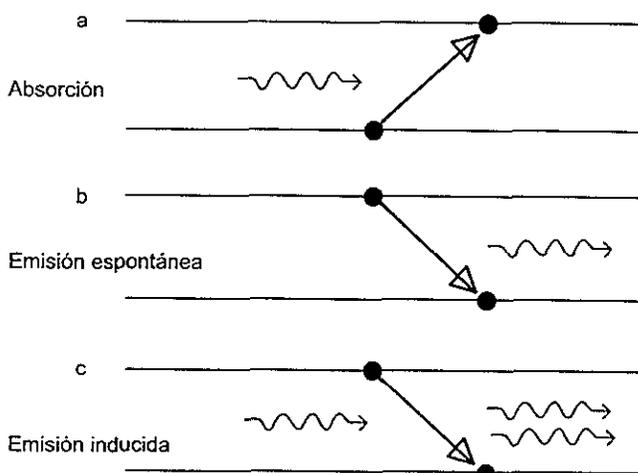


Figura 3.3 Efectos Láser (• electrón,  $\curvearrowright$  fotón) [20]

- Cuando un átomo está en el estado  $E_i$  puede absorber un fotón (la flecha ondulada) y elevarse a un nivel de energía más alto  $E_j$ .
- Este átomo excitado puede después radiar energía espontánea emitiendo un fotón y volviendo al estado  $E_i$ .
- Un átomo excitado también puede ser inducido a emitir un fotón cuando es alcanzado por otro fotón, en este caso se tendrán dos fotones de la misma frecuencia.

Si se hace incidir sobre los átomos radiación de frecuencia  $\nu_{ij}$ , los átomos en el estado  $E_i$  pueden absorber un fotón que los eleve al estado  $E_j$ . Pero a su vez los átomos del estado  $E_j$  pueden ser inducidos a emitir luz, por un fotón que es idéntico en frecuencia, energía, dirección y fase al que indujo la emisión. El fotón original continua su trayectoria y es exactamente el mismo que antes de su interacción con el átomo pero ahora está acompañado de otro fotón que es idéntico a él. Estos dos fotones pueden a su vez incidir sobre otros átomos e inducirlos a emitir. Se tiene así una amplificación del número de fotones que viajan en cierta dirección.

Básicamente son cuatro las propiedades que caracterizan a la luz del láser y las que determinan su excepcional importancia en la óptica moderna:

- a) GRAN INTENSIDAD. La luz del láser puede ser muy intensa y se puede concentrar en un objeto, con lentes apropiadas, calentándolo a temperaturas altísimas. Las temperaturas de láseres como los de rubí o  $\text{CO}_2$ , cuya potencia es del orden de kilowatts, al concentrarse pueden perforar hasta diamantes. Pero los láseres comunes en la enseñanza, como los de He-Ne, tienen una potencia muy baja (de 1 a 100 mW) y aún cuando el haz se concentre sobre la palma de la mano ni siquiera se sentiría; sin embargo, es potencialmente dañina para los ojos si se mira directamente al haz o a su reflejo. Aunque la intensidad del láser He-Ne es baja, es lo suficientemente intensa para permitir hacer experiencias en lugares que tengan luz ambiental tenue y verlas claramente.
- b) GRAN MONOCROMATICIDAD. La luz del láser es casi monocromática, es decir tiene un solo color o longitud de onda; esta característica también se conoce como coherencia temporal, y se refiere a que los fotones emitidos tienen la misma frecuencia. La longitud de onda típica del láser de He-Ne es de 632.8 nm, que corresponde a un color rojo
- c) GRAN DIRECTIVIDAD O COLIMACIÓN. El haz de láser tiene una divergencia muy pequeña, del orden de un miliradián, o sea que el ancho del haz es casi constante a lo largo de distancias grandes, lo cual permite utilizarlo en experiencias donde se necesite un haz intenso y colimado (rayos paralelos).

d) GRAN COHERENCIA ESPACIAL. Se refiere al hecho de que el haz sale prácticamente de un punto (el diámetro del haz es menor de 1.5 mm) y la parte más intensa está en el centro del cilindro. Esta propiedad está relacionada con la coherencia temporal, y se aprovecha en las experiencias en donde se muestra el carácter ondulatorio de la luz (interferencia y difracción).

Todas estas características permiten realizar con facilidad y claridad extraordinarias experiencias y prácticas que han sido tradicionalmente muy difíciles de lograr <sup>[20]</sup>.

## DEFLECTOMETRÍA LÁSER

Cuando un haz incide en una superficie, se puede reflejar o refractar, por lo general, después de incidir en la superficie, no tiene la misma dirección, esta diferencia entre los ángulos de incidencia y los de reflexión o refracción es llamado ángulo de deflexión. En el caso de la reflexión, si se conoce el ángulo de incidencia y el de deflexión, es posible conocer la geometría de la superficie haciendo uso de la Ley de la Reflexión.

En la figura 3.4 se presenta un diagrama que ejemplifica lo que sucede con un haz que incide en una superficie curva. El ángulo de incidencia se toma con respecto a la normal del plano tangente a la superficie en el punto de incidencia del haz. En la queratopografía láser se evalúa la forma de la superficie corneal a partir de los ángulos de incidencia y de reflexión.

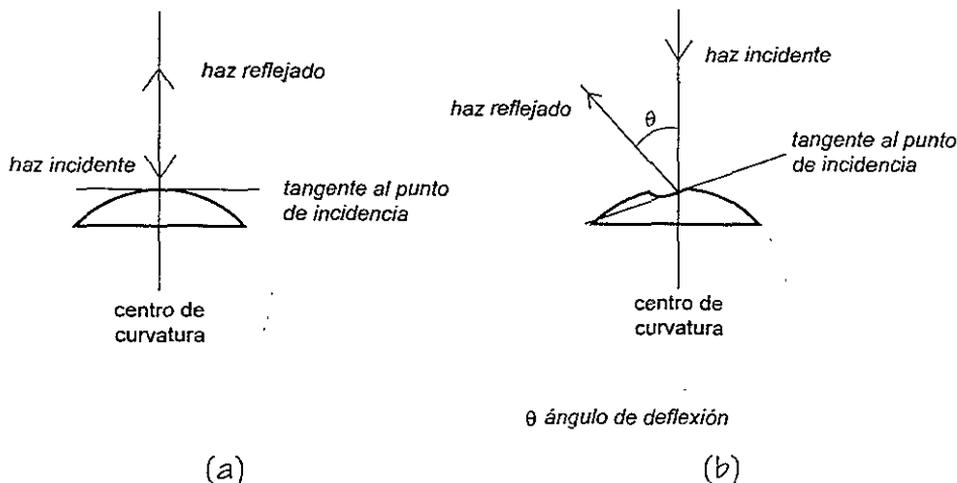


Figura 3.4 Diagrama de un haz incidente en diferentes superficies: a) esférica, b) deformada

## LOGROS Y CARENCIAS

Al contar con un amplio dominio de la teoría y la técnica de medición de superficies por medio de la deflectometría láser, surge la propuesta de desarrollar un sistema que sea capaz de proporcionar información para determinar el perfil de la córnea humana, con suficiente precisión y cantidad de datos para lograr recrear por cálculo numérico el estado real de ésta.

Por lo anterior, desde 1990 se inició el desarrollo de un sistema de *queratopografía por deflectometría láser*, el cual está conformado por los sistemas: óptico, mecánico, de control, y adquisición de datos. El funcionamiento consiste, básicamente, en realizar un barrido en forma de espiral sobre la córnea, mediante un mecanismo que está constituido por dos movimientos: un movimiento longitudinal y un movimiento circular, el cual realiza un recorrido a través de diferentes dispositivos para completar la trayectoria mencionada. El haz de luz que incide en la córnea es suministrado

por un láser de He-Ne con 1.7 mW de potencia, el cual, primeramente pasa por un espejo a  $45^\circ$  colocado sobre una base de baja fricción Newport de 42 mm, cuyo movimiento longitudinal se lleva a cabo por medio de un mecanismo biela-manivela (figura 3.5). Dicho movimiento está determinado por las siguientes ecuaciones:

$$p(t) = a \cos(\omega_1 t) + \sqrt{l^2 - [h - a \sin(\omega_1 t)]^2} - \sqrt{l^2 - h^2} \quad (3.2)$$

$$v(t) = 4\omega_2 t + v_0 \quad (3.3)$$

donde  $p(t)$  es la distancia que recorre el punto de unión entre la biela y la platina con respecto al centro del movimiento,  $h$  es la diferencia de alturas entre el centro de giro de la manivela y el punto de unión de la biela con la platina,  $a$  y  $l$  son las longitudes de la manivela y la biela respectivamente,  $\omega_1$  y  $\omega_2$  son las velocidades angulares de la manivela y del engrane en ese orden.

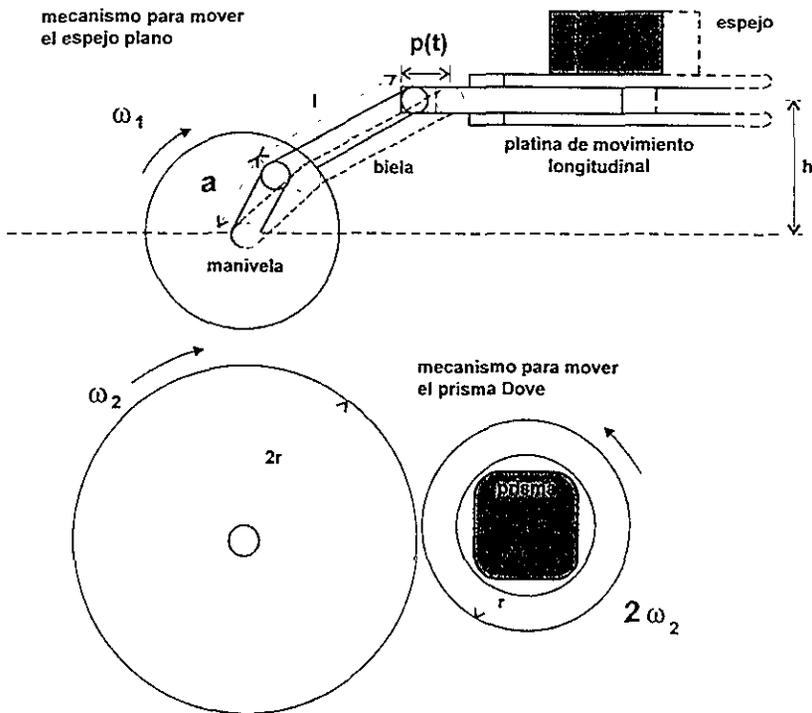


Figura 3.5 Esquemas de movimiento<sup>[2]</sup>

El haz de láser pasa posteriormente por un prisma DOVE (figura 3.6) apoyado en un par de rodamientos unidos por una montura de PVC, que obtienen su movimiento circular de un motor eléctrico acoplado a través de engranes de dientes rectos.

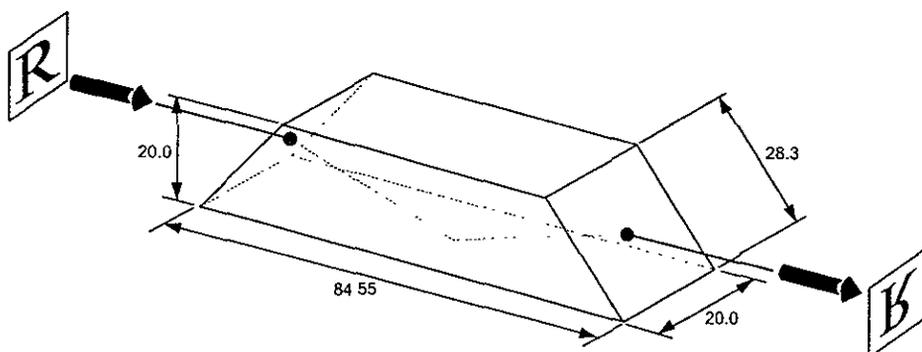


Figura 3.6 Prisma DOVE (dimensiones en mm)

Al pasar por los dos elementos ópticos antes mencionados, el haz tendrá una trayectoria que describirá una espiral y posteriormente pasará por una lente positiva que tiene como característica particular el dirigir al haz siempre a un mismo punto (el foco de la lente). Es importante mencionar que la lente positiva del sistema de barrido ayuda a disminuir el riesgo de daño retinal pues evita que el haz que se trasmite a la córnea, se concentre excesivamente en la retina. La lente enfoca al haz en un punto entre la córnea y la retina, desde donde diverge de nuevo hasta llegar a esta última, disminuyendo así la irradiancia del haz al cubrir un área mayor sobre la retina que en el caso de la ausencia de la lente. Al hacer coincidir el foco de la lente con el centro de la superficie esférica a medir, el haz reflejado regresará por la misma trayectoria por donde provino; de esta manera, al recorrer el haz la lente, el prisma DOVE y el espejo móvil en dirección inversa, todos los movimientos del haz se cancelarán exactamente, dejando "de nuevo un haz

estático". En términos de óptica se dice que un haz es estático cuando el haz del láser viaja en dirección contraria al movimiento de los elementos mecánicos no afectando su trayectoria. Por otro lado, si la superficie no es una superficie estrictamente esférica, el haz se moverá ligeramente de su dirección original manifestando las variaciones de forma.

Con el fin de enviar el haz a un fotodetector para poder cuantificar las variaciones de posición que nos proporciona el láser, se coloca un divisor de haz entre el láser y el espejo móvil. El divisor de haz que se utiliza es un divisor polarizador de cubo para evitar la aparición de haces múltiples. Para impedir que el haz reflejado en la superficie de prueba regrese a la cavidad del láser y provoque una inestabilidad en el mismo, se interpuso entre este y el divisor de haz un polarizador y retardador de  $\frac{1}{4}$  de longitud de onda. Esta combinación evita que un el haz que haya atravesado inicialmente al arreglo y se refleje en un dieléctrico pueda volver a atravesarlo en dirección contraria.

Por otro lado se cuenta con un sistema de adquisición de datos basado en una tarjeta Lab40, con una frecuencia de muestreo de 100 kmuestras/segundo y con una resolución de 12 bits, que obtiene la información amplificada proveniente del fotodetector por medio de tarjetas en el equipo de cómputo, para que dichos datos puedan ser procesados en una recreación lo más cercana posible a la realidad. Un diagrama del equipo es mostrado en la figura 3.7.

Este sistema, desarrollado en el Centro de Instrumentos, de la U.N.A.M., logró proporcionarnos información valiosa para conocer la factibilidad del proyecto, proporcionando resultados tales como un tiempo de barrido de 1 s y la adquisición de 1000 datos.

Partiendo de los resultados obtenidos con el sistema anterior, se procedió a caracterizarlo, obteniendo los valores que este arrojaba al medir, usando como superficie de prueba una esfera de calibración. De esta manera se detectaron algunos problemas de operación, y se plantearon futuras metas, que convergen principalmente en las técnicas que fueron usadas para el funcionamiento de esta base teórica.

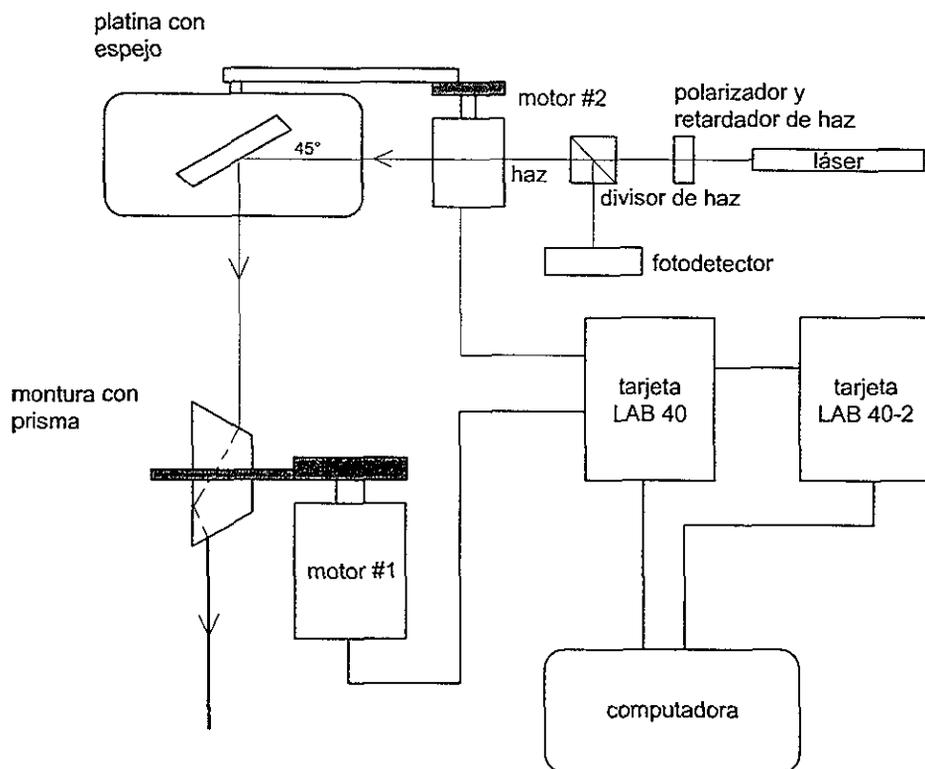


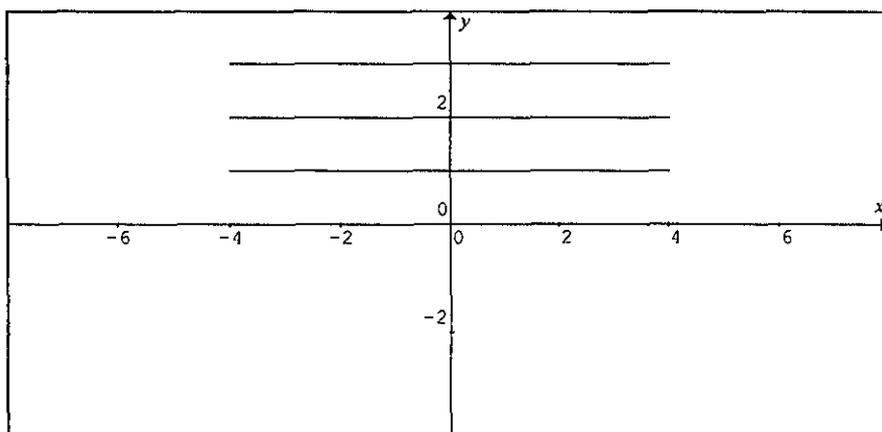
Figura 3.7 Diagrama del equipo

Respecto al sistema mecánico, se presentan desviaciones, denominadas "juegos o backlash", los cuales son inherentes a los mecanismos y formas de transmisión utilizados, los cuales presentan inconvenientes para esta aplicación. En lo que respecta al sistema biela - manivela, debido a su giro, se producen velocidades lineales demasiado lentas, que no permiten disminuir la cantidad de tiempo empleado para realizar el barrido de toda la superficie. Por otro lado, dado que el movimiento circular es una consecuencia directa de la rotación de un par de engranes, se presentan vibraciones debidas a estos y se manifiestan como "ruido" en la adquisición de datos.

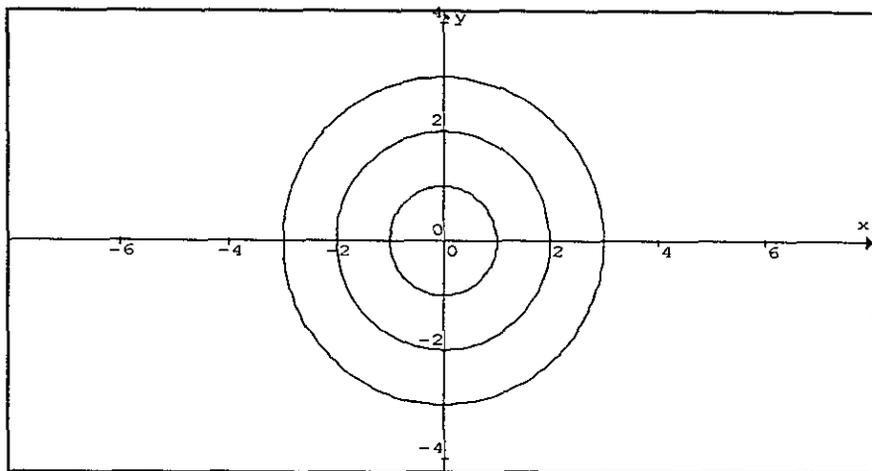
Un análisis más profundo del sistema mecánico nos permite obtener gráficas teóricas de cada uno de los movimientos y de la unión de ambos, de donde, para la componente radial, encontramos que esta debe presentar una curva de funcionamiento semejante a la mostrada en la figura 3.8a; mientras que para la componente angular se debería presentar un movimiento como el mostrado en la figura 3.8b.. La unión de ambos movimientos teóricos es mostrada en la figura 3.8c.

Cuando observamos una gráfica de los valores reales obtenidos del sistema (figura 3.9), llegamos a la conclusión de que existen una infinidad de elementos que proporcionan "ruidos" al sistema, los cuales son originados por diferentes fuentes (mecánica, electrónica, luminosa, etc.).

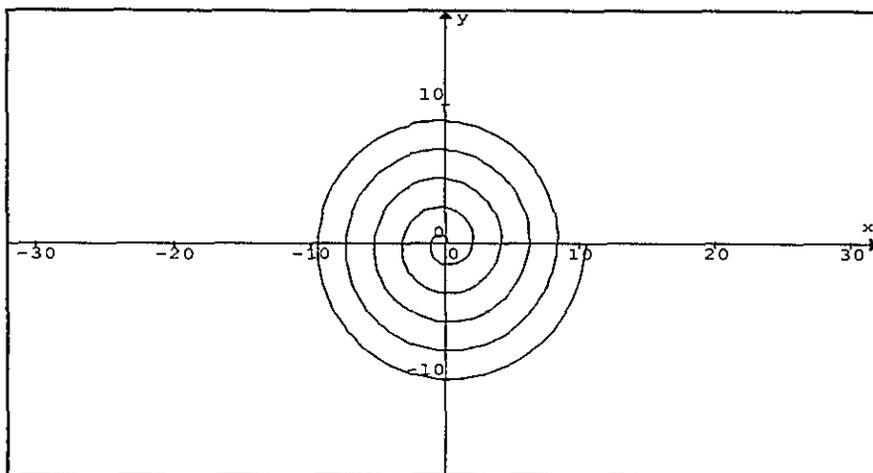
En lo referente al sistema de control, se presentan problemas de sincronía, que impiden la puesta en marcha, en el mismo instante, de los dos motores utilizados. Así mismo el sistema de adquisición de datos no es lo suficientemente rápido como para capturar un mayor número de datos, y el procesamiento de los mismos se realiza desde un programa en *Microsoft DOS* por lo que hace un poco más complicado su manejo. El "ruido" generado por el ambiente produce errores de medición, los cuales se manifiestan en distorsiones sobre los 1000 datos obtenidos



(a)

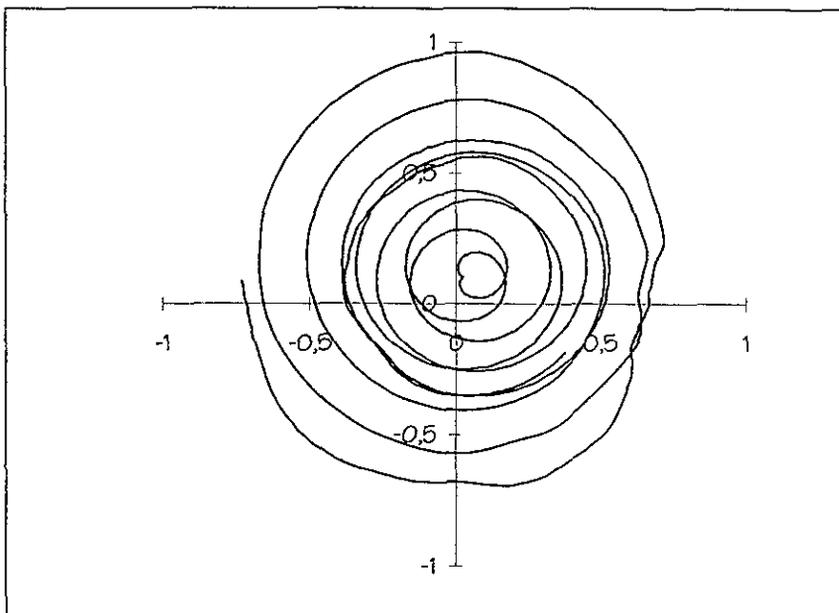


(b)



(c)

Figura 3.8 (estimaciones en mm) a) Movimiento teórico del sistema biela - manivela b) Movimiento del sistema angular, c) Conjunción de movimientos



*Figura 3.9 Movimiento real (dimensiones en cm)*

## LIMITACIONES

Los resultados obtenidos con esta primera versión se encuentran dentro del margen de lo satisfactorio, sin embargo, la experiencia que se tuvo con este equipo, así como las desviaciones encontradas en el movimiento, proponen como metas el refinamiento del movimiento final obtenido e incrementar la velocidad, esto debido a que sería mejor un menor tiempo de exposición a luz láser. Por otro lado, el aumento de la velocidad de barrido nos obliga a un aumento de la velocidad de respuesta y captura de datos, involucrando esto todo un nuevo sistema de control, adquisición y procesamiento de datos.

## DESARROLLO

### DISEÑO

Diseñar es formar un plan para satisfacer una demanda humana, la cual puede o no encontrarse bien definida desde el principio. El diseño en ingeniería mecánica consiste en: la definición y selección de objetos y sistemas de naturaleza mecánica y/o electromecánica (máquinas, aparatos, estructuras, dispositivos e instrumentos), en el cual se abarcan todas las disciplinas de la ingeniería mecánica.

Todo proceso de diseño lleva una cierta metodología. El proceso de diseño clásico en ingeniería mecánica, posee una secuencia como la mostrada en la figura 4.1, en la cual puede apreciarse la importancia de ciclos iterativos, que consisten en evaluaciones continuas, a fin de determinar con certeza cual es la solución ideal.

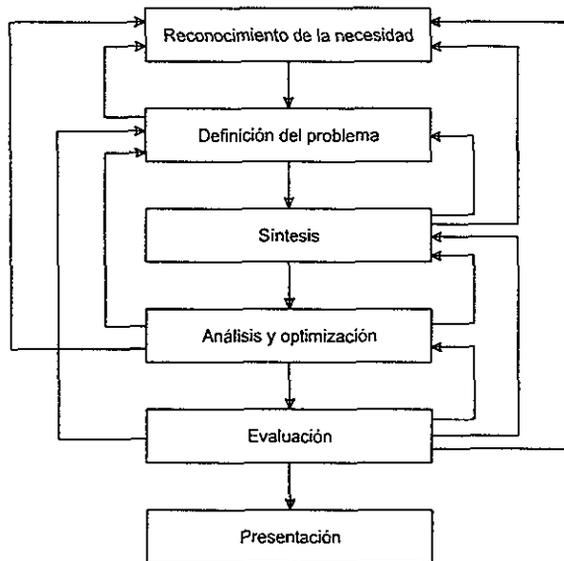


Figura 4.1 Fases del diseño <sup>[22]</sup>

En nuestros días, la necesidad de hacer más accesibles para el usuario los sistemas que satisfacen las diferentes demandas humanas ha conducido a interrelacionar áreas de la ingeniería, y a la creación de un nuevo concepto, la mecatrónica. Como definición, la mecatrónica es la combinación de ingeniería mecánica de precisión, control electrónico y software pensados para el diseño de productos y procesos.

Si hablamos de alta competitividad, únicamente los nuevos productos en los cuales existe una combinación efectiva de ingeniería electrónica y mecánica llegan a ser exitosos. En general, la causa más común de fallas en el desarrollo de estos objetivos es una inhibición en la aplicación de la electrónica. En la mayoría de procesos y productos innovadores lo primero en desarrollarse es el *hardware* mecánico, pero la mejor realización, depende de una adecuada consideración de ingeniería electrónica, de control y computación desde las primeras etapas del diseño. En este tipo de diseño el

sistema mecánico resultante es, por lo regular, simple y envuelve pocos componentes, al mismo tiempo que su uso es muy sencillo [3].

Cuando el proceso de diseño ha llegado al punto en el cual se tienen definidos con mayor precisión cuales son las necesidades específicas o parámetros de diseño, surgen una serie de consideraciones que deben de respetarse a lo largo de todo el proceso, con el fin de que estas mismas sean evaluadoras de la factibilidad de cada una de las propuestas hechas.

Las consideraciones a verificar son:

- |                         |                |                         |
|-------------------------|----------------|-------------------------|
| • Resistencia           | • Costo        | • Flexibilidad          |
| • Confiabilidad         | • Seguridad    | • Control               |
| • Propiedades Térmicas  | • Peso         | • Rigidez               |
| • Corrosión             | • Duración     | • Acabado superficial   |
| • Desgaste              | • Ruido        | • Lubricación           |
| • Rozamiento o fricción | • Estilización | • Mantenimiento         |
| • Procesamiento         | • Forma        | • Volúmen               |
| • Utilidad              | • Tamaño       | • Responsabilidad legal |

Con base en lo anterior, se definirán y seleccionarán los dispositivos necesarios para un correcto funcionamiento del nuevo prototipo.

## PARÁMETROS DE DISEÑO

Una vez que el sistema descrito en el capítulo anterior se caracterizó y evaluó, surge la necesidad de realizar mejoras al mismo, que nos permitan cumplir con parámetros tales como la disminución “ruidos”, y del tiempo empleado, así como, un incremento del número de datos registrados. De esta manera se plantean los siguientes puntos como parámetros de diseño:

- Disminuir el tiempo empleado para realizar la medición (en un rango de 1/60s a 1/10s), lo cual se debe a que entre menos tiempo se encuentre la córnea humana expuesta al haz de láser, menor será el riesgo de radiación

---

de este tipo recibida. Así mismo se deben incrementar el número de curvas que forman la espiral (a 10 vueltas preferentemente).

- Buscar repetibilidad de muestreo así como, eliminar en medida de lo posible, los “ruidos” generados por problemas de: funcionamiento mecánico, tales como vibraciones y corrimientos en el movimiento circular, y aquellos de naturaleza electromagnética producidos por computadora, motores, etc..
- Diseño de un nuevo sistema de control que permita un mejor manejo y sincronización de arranque de los dispositivos.
- Mejora del sistema de captura de datos, para proporcionar un mayor número de datos (superior a 10,000) bajo las nuevas condiciones de operación.
- Realizar un programa que permita un manejo más sencillo y amigable del nuevo prototipo.

## DESARROLLO TEÓRICO

El nuevo sistema deberá cumplir, con la mejor relación costo/beneficio posible, los nuevos parámetros de diseño. Por este hecho, se requieren alternativas reales que cumplan en forma satisfactoria dichas necesidades. Para un mejor manejo, se ha dividido el proyecto en sistemas principales, los cuales se componen de múltiples subsistemas o partes.

### ✓ MECÁNICA

Como parámetro inicial necesitamos elementos que nos permitan manejar altas velocidades de operación constante (por lo menos en el intervalo que se requiere para la medición), para cumplir con tiempos inferiores a 1/10s. Partiendo de esta base, y siendo necesario recorrer la

distancia radial de la córnea, que en promedio es de 6 mm, obtenemos que se requiere de una velocidad de 60mm/s, o superior, para disminuir el tiempo invertido en el desplazamiento lineal. Así mismo, dado que el movimiento circular marcará el número de espirales formadas y ocurre de manera simultánea con el desplazamiento lineal, podemos determinar la velocidad angular del sistema que deberá ser superior a las 3000 rpm, con lo cual se observarían 10 vueltas formando la espiral.

## MOVIMIENTO LINEAL

De lo anterior se llega a la conclusión de que, dado que el movimiento lineal determina el tiempo del barrido, es necesario, *a priori*, determinar cual será la forma de realizar este movimiento. El movimiento lineal tendrá dentro de la espiral la componente radial del movimiento.

Después de analizar diferentes alternativas, dentro de las que destacan sistemas convencionales de conversión de movimiento circular a movimiento lineal, se llegó a la conclusión, como es conocido, que los sistemas mecánicos de conversión de movimiento presentan pérdidas de diferentes tipos (energéticas y de movimiento), las cuales se manifiestan principalmente como generación de calor en los dispositivos e imprecisión de movimientos debidos a las características propias de los mismos, así como la complejidad que involucra la necesidad de maquinados de muy alta precisión.

Dichas características nos llevan a buscar alternativas que proporcionen el movimiento lineal como primer resultado en la conversión de energía a movimiento. Ejemplos de este tipo de dispositivos son los actuadores neumáticos, hidráulicos y magnéticos.

## ACTUADOR LINEAL

Buscando información de estas alternativas encontramos que los actuadores neumáticos cumplen con la tarea solicitada de movimiento lineal a altas velocidades, así como una relativa facilidad para adquirirse a un bajo costo respecto a otros dispositivos.

Los actuadores neumáticos de la marca *FESTO* ofrecen una gran variedad en cuanto a velocidades, fuerzas, tamaños y calidades de movimiento. Como deseamos obtener velocidades superiores a 60 mm/s durante longitudes de 6 mm, buscamos aquellos conjuntos de actuador y válvula que proporcionen esta velocidad durante su rango central. Por desgracia, los dispositivos que cumplen con esta característica también proporcionan fuerzas extremadamente altas, razón por la cual se buscó la combinación que proporcione mayor velocidad a la mitad de su carrera, esto con el fin de acercarnos más al parámetro superior de tiempo.

De esta forma, encontramos que si deseamos disminuir el tiempo empleado para la medición, será necesario que la velocidad a la mitad del recorrido del actuador sea superior. Planteando como objetivo llegar a 1/60 s, tenemos que la velocidad debería ser de 360 mm/s. Por lo anterior podemos llegar a la conclusión que el actuador neumático a utilizar deberá de tener, a la mitad de su carrera, una velocidad comprendida entre 60 y 360 mm/s.

Por otro lado, la masa del espejo que se debe desplazar longitudinalmente es baja, por tanto la fuerza de empuje debe ser igualmente baja para que el desplazamiento se lleve a cabo a la velocidad requerida, de lo cual podemos seleccionar un actuador de baja fuerza de empuje.

Para diferentes tipos de aplicación existen diferentes tipos de actuadores neumáticos, tales como simple efecto, doble efecto, etc., por lo que, si consideramos que la medición será realizada en un solo desplazamiento, obtenemos que el tipo de actuador que nos conviene emplear es uno de simple efecto y retroceso automático (por resorte).

#### RODAMIENTO LINEAL

El actuador seleccionado deberá trasladar un espejo aluminizado por su cara frontal y colocado en una base a 45°. Como dicha base se desplazará a lo largo de toda la carrera del actuador, fue necesario implementar una plataforma que permitiera deslizamientos rápidos, suaves y precisos.

---

Bajo tales condiciones de operación se buscó entre diferentes alternativas que permitieran desplazamientos lineales, dentro de las cuales se encontraron las siguientes opciones:

- El contacto de dos guías con excelentes acabados y tratamiento térmico que proporcione condiciones de resistencia al desgaste. Esta alternativa ofrece excelentes resultados en cuanto a precisión del movimiento, pero no logra darnos altas velocidades de avance.
- Uso de rodamientos lineales montados en barras, los cuales son de gran suavidad de funcionamiento, sin embargo se requiere emplear varios de estos para generar una superficie que se mueva sin alteraciones, consiguiendo con esto un incremento substancial en tamaño.
- Por último, se consideró una guía cuadrada sobre la cual corre un rodamiento lineal, el cual, cumple con todas las características al ofrecer movimientos suaves, precisos, a grandes velocidades, así como el soportar momentos sobre su eje relativamente altos sin que estos afecten la calidad del movimiento.

#### MOVIMIENTO ANGULAR

Conociendo de antemano que el sistema de movimiento lineal se encuentra definido, encontramos que el número de vueltas necesarias para el movimiento circular se encuentran determinadas por el tiempo que este tarde en recorrer la distancia de medición, así como de las revoluciones totales de haz.

#### TRANSMISIÓN

El sistema de transmisión debe cumplir con las características de precisión y confiabilidad, ya que este tiene la responsabilidad de proporcionar un giro concéntrico para evitar desviaciones sobre el haz de láser. Tomando como base lo anterior, observamos que son pocos los sistemas mecánicos

---

que proporcionan movimientos circulares tan precisos como lo requerido, razón por la cual se considera el uso de engranes hipoidales, que disminuyen en gran medida el problema del "backlash" generado con engranes rectos de bajas calidades, sin embargo, esta alternativa presenta nuevos retos de maquinado.

Conociendo que, los sistemas de banda y polea dentadas, no presentan un deslizamiento grande durante el giro, y que requieren de un mínimo de tensión para funcionar adecuadamente, optamos por tomar una solución de este tipo, planteándonos como reto utilizar componentes que tengan un mínimo de fuerzas a vencer durante el arranque del equipo.

## RODAMIENTOS

Considerados como una parte que requiere de especial cuidado encontramos que los rodamientos, para este caso, son aplicados tanto del lado de potencia como el de transmisión. Dichos rodamientos deberán de cumplir con una serie de condiciones impuestas por la operación del instrumento en conjunto. Dentro de los puntos más importantes de análisis para estos rodamientos encontramos que deben ofrecer las condiciones mínimas de rozamiento o fricción, así como ser capaces de soportar altas velocidades de giro.

Con las especificaciones planteadas, encontramos una variedad de rodamientos que existen, los cuales, tienen como principio el satisfacer necesidades específicas de funcionamiento. Para nuestro caso el factor velocidad angular representa el punto de mayor cuidado para el rodamiento dado que la carga radial estática del mismo es muy baja, pero debido a fuerzas producidas por el mismo durante el giro, encontramos que estas crecen de forma significativa, dependiendo del tipo de rodamiento, el lubricante y la misma velocidad angular.

Para la selección del rodamiento correcto partimos del espacio disponible, el cual para el caso de transmisión de potencia no existe ningún problema dado que este solamente se encuentra definido por el diámetro de

la flecha a utilizar para tal fin, sin embargo, el extremo de movimiento final se encuentra limitado, en cuanto a diámetro de flecha, por el diámetro del soporte para el prisma DOVE. En el apartado de cargas, el cual involucra al tipo, cantidad y magnitud, nos será únicamente de especial atención las del tipo dinámicas generadas por el conjunto en movimiento. En cuanto a la desalineación de los rodamientos encontramos que las flexiones debidas a la operación del equipo pueden llegar a ser significativas y probablemente justificar el uso de un tipo específico de autoalineables, los cuales, absorben ciertas diferencias angulares. En contraposición, para este tipo de rodamientos, encontramos que debido a estas características, ideales para muchos casos, tienen un incremento substancial de fricción y de fuerzas dinámicas generadas. La precisión solicitada a los rodamientos a emplear es de las más altas para la zona de movimiento, dado que si en esta existen problemas de excentricidad se generarán problemas de alineación del haz de láser. La velocidad de operación será crucial para determinar el tipo adecuado de rodamiento dado que se manejarán altas velocidades de operación. Por último el tipo de montaje utilizado para los rodamientos deberá ser fijo para evitar posibles movimientos no deseados durante la operación.

Usando técnicas recomendadas por SKF, encontramos que los rodamientos de bolas son ideales para esta aplicación, dado que estos proporcionan un excelente desempeño en: alta velocidad, alta exactitud de giro, funcionamiento silencioso, y bajo rozamiento; un buen funcionamiento con disposiciones fijas, así como un aceptable comportamiento en su funcionamiento con cargas combinadas (radial y axial) y excelente rigidez. Dentro de los inconvenientes encontrados se encuentran su mala compensación en montaje y funcionamiento, así como los bajos momentos soportados por los mismos. Así mismo, se encuentra que la lubricación bajo estas condiciones de operación, será un parámetro importante de estudio dado que, del tipo y forma de realizarse, depende la fricción presentada.

#### ACTUADOR ANGULAR

Para determinar las características del actuador angular, usamos las condiciones que se requieren de este, tales como el par necesario para mover

---

todo el conjunto de dispositivos angulares, la suavidad y precisión de operación, así como las altas revoluciones por minuto solicitadas.

Una evaluación entre diferentes tipos de actuadores angulares nos llevó a tres conclusiones: motores neumáticos, eléctricos de corriente directa y eléctricos de corriente alterna. De esta terna de alternativas encontramos que los motores neumáticos ofrecen buen par, pero interviene el problema de que no logran alcanzar las revoluciones por minuto requeridas, y no presentan un esquema de control accesible. En el dominio de los motores de corriente alterna encontramos que estos proporcionan excelentes momentos de empuje, así como son capaces, en determinados casos, de alcanzar las revoluciones solicitadas. El inconveniente más fuerte para el uso de este tipo de motores es el problema de control debido a las de frecuencias manejadas en la línea de alimentación. Nuestra tercera alternativa es la que mejores posibilidades de compaginación con el proyecto presenta, dado que los motores de corriente directa presentan por lo general altas velocidades angulares, así como momentos no tan despreciables; por último, pero no menos importante, es la característica de facilidad de control con componentes electrónicos simples.

## ✓ ÓPTICA

El sistema óptico del equipo no presentará grandes variaciones, esto debido a que los dispositivos seleccionados desde la primera etapa han mostrado un excelente comportamiento bajo las condiciones de operación solicitadas. La novedad dentro del apartado óptico radica principalmente en la incorporación de un espejo parabólico. A continuación se describen brevemente los dispositivos que componen el sistema óptico.

### DOVE

Un prisma DOVE convencional consiste básicamente en un par de caras refractantes a  $45^\circ$  con respecto a una cara interna reflectante; principalmente es usado para la rotación de imágenes. Este tipo de prismas

---

requieren de gran calidad en su proceso de fabricación, dado que los errores generados durante esta, no siempre son corregibles.

Los errores de desviación producidos por la tolerancia angular entre las caras y la cara de reflexión pueden ser compensadas por un ajuste en el montaje, pero los errores encontrados entre el paralelismo de la cara reflexionante y el "techo" no pueden ser compensados por ningún tipo de ajuste mecánico; dicho tipo de falla es llamado error de pirámide.

Cuando la montura de un prisma DOVE se encuentra sobre rodamientos angulares, será necesario ajustar de forma paralela la cara reflectante con el eje de giro del prisma con el fin de evitar desviaciones en la salida del eje. Este tipo de montura no evita el error de pirámide antes mencionado.

## LÁSER

Antes de poder hablar de las características del láser haremos hincapié en el hecho de la seguridad ocular para el trabajo con láseres. Los estándares de seguridad ocular para el uso de láseres, clasifica a estos por su riesgo potencial basado en su emisión óptica, entonces (clasificación de acuerdo con el Laser Institute of America) regulando las medidas de control en función de los riesgos relativos a esta clasificación.

La ANSI (American National Standards Institute) estableció en 1986 estándares para la seguridad con el uso de láser. En su norma No. Z-136.1, se engloba la clasificación de los láseres por la intensidad del haz emitido (límite de emisión), si este es utilizado por si solo, o bien de un sistema completo si el láser forma parte de un sistema de láseres, donde las características del haz dependerán del sistema.

Los aspectos ópticos de este dispositivo están asociados principalmente al tipo y características del láser que se va a emplear, al tipo de componentes ópticas utilizadas para conducir el haz de láser hasta la córnea, y la manera en que la información sobre el ángulo de reflexión del haz reflejado en la córnea conducirá a deducir su topografía.

El láser utilizado en este trabajo es de He-Ne de 1.7mW y 633 nm de longitud de onda con estabilización en frecuencia e intensidad de la clase IIIa, la cual denota a los láseres o sistemas de láseres que normalmente no producen un riesgo si son vistos con el ojo al desnudo únicamente por períodos momentáneos de tiempo. Estos pueden representar un riesgo si son vistos utilizando colectores ópticos de luz.

El uso de este láser nos proporciona las siguientes ventajas:

- Emisión de una luz roja con longitud de onda dentro del rango de radiación visible. Esto facilita la alineación de los componentes ópticos en el instrumento, pero se sacrifica una cierta cantidad de luz reflejada.
- La baja potencia de la luz transmitida por todo el sistema reduce los riesgos de daño ocular.
- Al estar estabilizado en intensidad disminuyen los riesgos de incertidumbre en las lecturas capturadas, ya que al variar la intensidad se pueden tener problemas de detección con datos.

Para el haz utilizado se cuenta con una potencia máxima permisible para este tipo de láser de  $1.8/(t)^{1/4}$  mW/cm<sup>2</sup> (Apéndice).

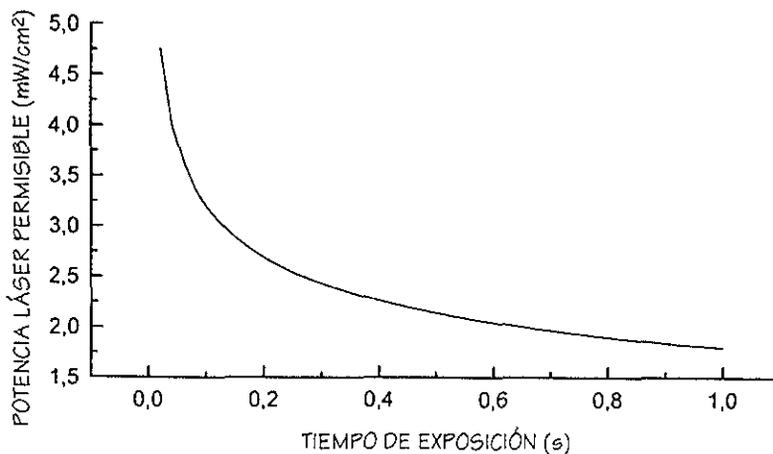


Figura 4.2 Potencia de un láser He-Ne permisible para el ojo humano

La figura 4.2 muestra la potencia soportada por el ojo sin daño con respecto al tiempo de exposición.

El diámetro del haz láser es de  $500\ \mu\text{m}$  @  $17\ \text{mm}$  de distancia de proyección, y su potencia de  $1.7\ \text{mW}$ . De lo anterior se obtiene que la potencia producida por unidad de área del láser utilizado es de  $865.8\ \text{mW}/\text{cm}^2$ .

Con los datos anteriores se tiene la impresión de que el haz de láser que llega al ojo es más potente que lo permisible por el mismo, sin embargo, los dispositivos ópticos consumen una cantidad de esta potencia, la cual se encuentra dentro del rango del 60 y 90%, lo cual aunado a que el haz se encuentra en movimiento y que este no se enfocará directamente en la retina, será suficiente para satisfacer los límites de seguridad.

#### ESPEJO PARABÓLICO

Tomando como base la caracterización del sistema anterior, se llegó a la conclusión de que será mejor incorporar un espejo parabólico fuera de eje, el cual, nos proporcionará dos ventajas; la primera de estas es la posibilidad de localizar de forma correcta un punto focal lejos de la zona de peligro del ojo, evitando con esto, cualquier riesgo que pueda presentarse debido a una exposición directa del haz. Como segunda ventaja encontramos que el hecho de que este dispositivo nos proporcione una desviación del haz, reduce de forma considerable la dimensión longitudinal del instrumento en conjunto.

#### DIVISOR DE HAZ

Con el fin de dirigir el haz láser a un fotodetector, que dará cuenta de las variaciones de posición del haz reflejado, se coloca entre el láser y el espejo plano móvil (acoplado al movimiento lineal), un divisor de haz. Como único requisito para este divisor de haz es que no produzca haces múltiples, los cuales proporcionarían información distorsionada, para lo cual se eligió un divisor de película. El divisor empleado desviará el haz proveniente de la superficie de medición  $90^\circ$ . En dicha trayectoria deberá de encontrar al fotodetector.

---

## POLARIZADOR Y RETARDADOR DE HAZ

Debido a que el haz reflejado en la superficie de prueba puede regresar a la cavidad del láser y desestabilizarlo, se interpuso entre este y el divisor de haz, un polarizador y retardador de  $\frac{1}{4}$  de longitud de onda. Esta combinación evita que un haz que lo haya atravesado inicialmente y se refleje en un dieléctrico pueda volver a atravesarlo en dirección contraria.

## ✓ ELECTRÓNICA

### FOTODETECTOR

Las aplicaciones de dispositivos optoelectrónicos se han expandido rápidamente para la obtención de medidas angulares, longitudinales en los tres ejes, uniformidad de superficies, centrado y otros parámetros relacionados con el sensado de posición.

Un sistema típico consiste en un arreglo para determinar posición con un láser o led emisor de luz, un espejo o sistema de espejos y un fotodiodo receptor que colecta la luz reflejada y provee una señal de salida proporcional a posición.

El fotodetector utilizado, cuenta con lectura de datos en dos ejes, es decir, nos proporciona el desplazamiento que tiene un punto de luz medido como un par de voltajes. Los ejes de voltaje del fotodetector utilizado son mostrados en la figura 4.3.

Existe un punto a considerar en el fotodetector, y esto es que después de llevar a cabo diferentes etapas de experimentación, se ha podido constatar que este no proporciona linealidad total a lo largo de toda su superficie, razón por la cual se utiliza una ecuación de corrección obtenida en el Laboratorio de Óptica Aplicada del Centro de Instrumentos (UNAM) <sup>[1]</sup>, la cual será implementada dentro del programa de adquisición de datos, con el fin de eliminar este error antes de la etapa de análisis.

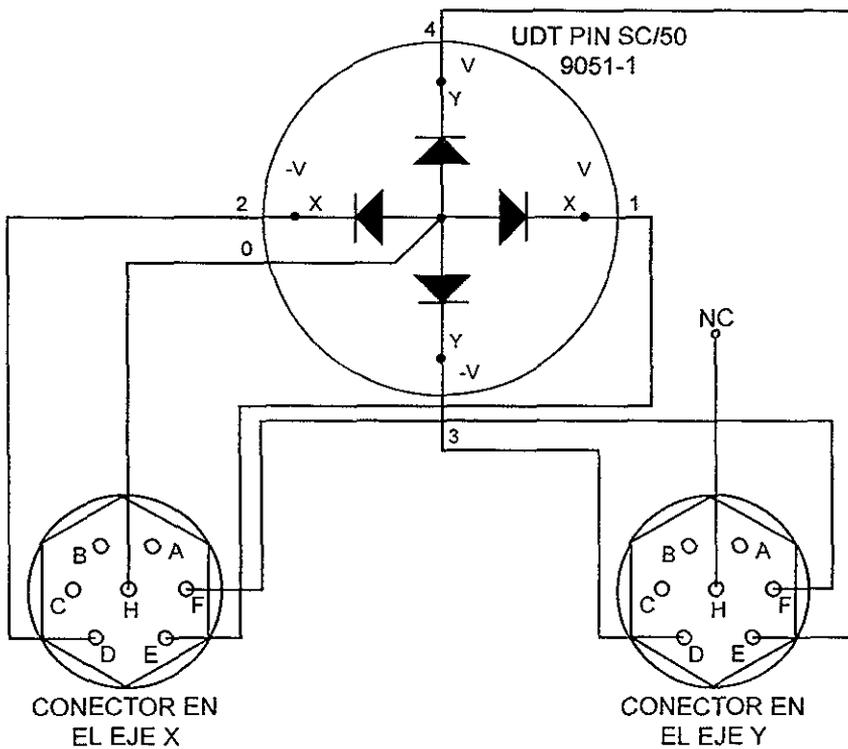


Figura 4.3 Ejes de voltaje en fotodetector

Los fotodetectores utilizan un par de amplificadores para proporcionar una lectura adecuada de la respuesta obtenida por el mismo.

#### ELECTROVÁLVULA

Con el fin de tener un proceso de automatización en la lectura realizada por el instrumento, utilizaremos una serie de dispositivos compatibles con la selección hecha para el desplazamiento lineal. Dentro de los dispositivos que se requieren para un adecuado funcionamiento necesitamos una electroválvula que sea capaz de dispararse desde el panel de control, la cual, por medio de un par de sensores de posición colocados en la trayectoria del

actuador, indicarán el momento de inicio y fin de la prueba, logrando con esto la carga y liberación del fluido de trabajo.

## CONTROL

Con el conjunto de los dispositivos antes mencionados, será necesario contar con un sistema de control que sea capaz, en primer término, de sincronizar las dos componentes del movimiento, logrando con esto generar, con niveles aceptables, repetibilidad en cada una de las mediciones realizadas.

El sistema de control que se requiere, deberá determinar el instante del tiempo en el cual se han estabilizado el movimiento circular (componente angular), y el sistema láser de acuerdo a las condiciones de operación establecidas. Una vez que ambos dispositivos se encuentran en dichas condiciones, un disparador montado sobre el panel de control podrá ser accionado de forma manual una vez que la superficie de prueba se encuentre en posición, esto indicará a todo los sistemas el inicio de la prueba. Como consecuencia se accionará la electroválvula iniciando el llenado del actuador lineal, provocando su movimiento, este será detectado por un sensor de posición para iniciar la captura de datos. Los datos serán almacenados en la computadora hasta que cumplan con las condiciones de cantidad de datos en una determinada frecuencia, lo cual se ajusta para adaptarnos a las condiciones de velocidad específica de cada prueba. Un segundo detector de posición indicará el momento en el que el actuador lineal ha terminado su recorrido, enviándole información a la electroválvula para que libere el volumen de aire contenido en el actuador lineal.

## ✓ ADQUISICIÓN Y PROCESAMIENTO DE DATOS

### TARJETA DE ADQUISICIÓN

Para lograr recolectar la gran cantidad de información que ahora se requiere para un análisis adecuado, será necesario un dispositivo que tenga funciones integradas tales como: una adaptación sencilla a diferentes

condiciones de operación, facilidad de programación, elementos blindados que permitan aislar la información transmitida, compatibilidad con equipo de cómputo. El dispositivo adquisidor deberá contar también con una gran velocidad de adquisición, es decir alrededor de 600,000 muestras/s para el mejor de los casos, en el cual el tiempo de barrido sea alrededor del 1/60 s. Así mismo el número de canales de entrada deberá ser mínimo de dos, dado que la información ahora obtenida será de dos ejes.

Un dispositivo que cumpla con todas las características antes mencionadas implicaría demasiado tiempo para desarrollarse de forma eficiente, motivo por el cual se recurrió a buscar dispositivos comerciales que cumplieran con dichas especificaciones. En la búsqueda encontramos un par de alternativas, la primera de ellas es un módulo de adquisición de datos, de la marca *IOTECH* modelo *Wavew Book/512*, el cual presenta las siguientes características:

- Este módulo está hecho bajo tecnología DSP lo que provee una calibración digital en tiempo real.
- Tiene una velocidad de muestreo de 1 Mmuestra/s con una resolución de 12 bits.
- Cuenta con 8 líneas bidireccionales compatibles con TTL.
- Cuenta con función de *trigger* digital y analógico.
- Es un módulo muy cómodo, pues se conecta al puerto paralelo de cualquier computadora, lo que lo hace muy portátil.
- Se puede programar vía *software* con el uso de LabView, VisualLab, Visual Basic y otros, con la ayuda de librerías proporcionadas por el fabricante. Esto hace que el ambiente bajo el cual se maneja sea más agradable y facilite el trabajo al operador.

Nuestra segunda opción es la tarjeta de adquisición de datos marca *NATIONAL INSTRUMENTS*, modelo *AT-MIO-16E-1*, la cual ofrece:

- Una tecnología normal donde el control del sistema lo tiene un microcontrolador de adquisición de datos.

- Tiene una velocidad de muestreo de 1.25 Mmuestras/s repartida en 16 entradas simples u 8 diferenciales con una resolución de 12 bits.
- Cuenta también con 8 líneas digitales compatibles con TTL.
- Tiene 2 salidas analógicas de 12 bits de resolución con una entrega máxima de 1 Mmuestra/s con timing interno y 950 Kmuestras/s con timing externo.
- Cuenta con *trigger* digital y analógico, etc.
- Tiene un ancho de banda de 1.6 MHz.

Después de evaluar estas opciones, se determinó que lo más conveniente es el utilizar la tarjeta de adquisición de datos de *NATIONAL INSTRUMENTS*, considerando que:

- Cumple con las necesidades primarias del sistema.
- La velocidad de comunicación con la computadora es muy alta por estar instalada directamente en el bus EISA de la computadora.
- La flexibilidad para usarse en varias aplicaciones por su gran capacidad de funciones electrónicas.
- Se cuenta con el *software* para su programación (LabView) el cual nos permite obtener un programa bajo un ambiente muy sencillo de utilizar.

#### PROGRAMA

El programa de operación será desarrollado en *LabVIEW*, el cual presenta total compatibilidad con la tarjeta adquisidora. Así mismo, nos permite tener un manejo adecuado de la información por medio de arreglos y funciones matemáticas, los cuales preparan la información para ser procesada por diferentes aplicaciones computacionales.

Por otro lado, el programa de operación tendrá otras funciones asociadas, tales como el monitorear el estado de los dispositivos en funcionamiento, de esta manera la computadora se convierte en el cerebro del funcionamiento del instrumento.

## ANÁLISIS

Una vez que se tienen los datos recolectados, el proceso de evaluación dependerá de forma directa de ecuaciones ópticas utilizadas, dentro de las cuales se consideran la separación entre cada uno de los dispositivos empleados para realizar la medición.

## DESCRIPCIÓN

- MECÁNICO. Con lo anterior, y después de revisar las posibilidades de movimiento lineal, se llegó a la conclusión de que los sistemas neumáticos lineales, proporcionan de forma efectiva y sin problemas estas velocidades, por lo que se recurrió a utilizar un actuador lineal de la marca *FESTO* modelo EZH-10/40-40-A, que reúne las siguientes características:

Fluido:	Aire comprimido filtrado con o sin lubricación.
Función:	Actuador de émbolo rectangular.
Presión de funcionamiento:	$2.8 \leq P \leq 6$ bar
Temperatura de operación:	$-20 \leq T \leq 80$ °C
Material:	Cuerpo: Latón; Émbolo rectangular: Plástico reforzado con fibra de carbono; Juntas: Perbunan.
Dimensiones del émbolo:	10x40 mm
Carrera:	40 mm
Fuerza de empuje mínima @ 6[bar]:	185 N
Fuerza de retorno:	18 N mín., 28 N máx.
Conexiones:	G 1/8

A dicho actuador se le sujetará una base que aloja un espejo aluminizado por el frente que reflejará el haz láser con un ángulo de 45°; la base desliza sobre un rodamiento lineal de la marca *KO* modelo LWL C1R100-BH que proporciona excelentes características mecánicas al soportar altas

velocidades de funcionamiento con gran precisión, así como soportar momentos elevados sobre su eje de deslizamiento (hasta  $1.4 \text{ kgf} \cdot \text{m}$ ), lo cual evita errores que pudieran generarse dada la masa y aceleraciones empleadas. Posterior a este espejo, será colocado otro espejo con las mismas características, pero montado sobre una base de ajuste de precisión marca *NEWPORT 630A-2*, la cual nos proporcionará los ajustes necesarios para las desviaciones angulares que pudieran presentarse.

Una vez que el haz de láser logra realizar su desplazamiento radial, deberá pasar por un prisma *DOVE* que se encuentra dentro de una montura de dura-aluminio (aluminio 1200 h14) apoyada en un par de rodamientos rígidos de bolas de la marca *SKF* modelo 61807, que tienen como dimensiones diametrales 47 mm y 35 mm, exterior y de flecha, respectivamente, esto aunado a que permiten una lubricación con aceite proporcionando giros más suaves y rápidos; el movimiento es transmitido por medio de 2 poleas con relación de 1:1, de la marca *SDP* modelo 6A3M30H9508, de 48.5 mm de diámetro de paso, y una banda dentada *SDP* modelo 6R3M121060 con 121 mm de longitud. El motor que, idealmente debería funcionar con corriente directa y proporcionarnos de 3,000 a 18,000 rpm, el cual no es fácil conseguir con las características de par necesarias para romper con el momento total demandado durante el periodo de aceleración, razón por la cual se utilizará en esta etapa de pruebas uno de corriente alterna 1 HP, 120 V, 5 A y 30,000 rpm.

- **ÓPTICO.** Con respecto al sistema óptico, seguimos conservando el funcionamiento básico, incluyendo un segundo espejo que nos proporcionará ajustes angulares del haz láser fuera de las zonas de movimiento, logrando con esto el evitar vibraciones al instalar el primer espejo sobre una base fija. En sustitución a la lente positiva, se usará un espejo parabólico fuera de eje marca *MELLES GRIOT*, modelo 02P0A011 de 10.2 mm de distancia focal y 30 mm de diámetro.
- **ELECTRÓNICO.** Como se mencionó en la parte mecánica para iniciar pruebas se utilizará un motor de AC, que podrá ser ajustado a la velocidad angular

requerida con la ayuda de un autotransformador variable, conocido comúnmente como reóstato o variac.

En un futuro próximo, se contempla utilizar un motor de DC, cuyo sistema de control de velocidad estabiliza la velocidad del motor a las revoluciones indicadas. El control está hecho con base en un PLL (phase locked loop). Este circuito compara la frecuencia de una señal proveniente de un oscilador controlado por voltaje (VCO) de una frecuencia predefinida, con la frecuencia de una señal que es retroalimentada de la salida del motor, la cual se obtiene con un fotodetector compuesto por un fotodiodo y un fototransistor, el cual manda una señal de casi 0 V cuando el haz del fotodiodo incide en la base del fototransistor y un voltaje igual al de polarización cuando el haz del fotodiodo no incide en la base del fototransistor, esto se debe a que el fototransistor trabaja en la zona de saturación y corte.

Para poder saber cual es la velocidad a la cual gira el motor, utilizamos un disco con orificios, el cual pasa entre los dos dispositivos que componen al fotodetector, para obtener a la salida de este una señal cuadrada que será directamente proporcional a la velocidad del motor. La cantidad de orificios en el disco depende de las características de la carga y del motor, pues a mayor inercia en la carga, la absorción de pequeños cambios en la velocidad será mayor, lo que indica que el sistema será más estable. La relación de número de orificios y frecuencia contra velocidad es la siguiente:

$$N = \frac{F}{n} \times 60 \text{ rpm} \quad (3)$$

donde F es la frecuencia de la señal medida y n el número de orificios del disco.

A la salida del comparador se obtiene una señal digital cuyo valor promedio es proporcional a la diferencia de las fases de las señales de entrada. La señal obtenida del comparador es filtrada mediante un filtro paso bajas, para eliminar las variaciones de las señales de entrada, dejando pasar

únicamente un valor de voltaje de DC, posteriormente se amplifica y se acopla a una etapa de potencia para alimentar así el motor (ver figura 4.4).

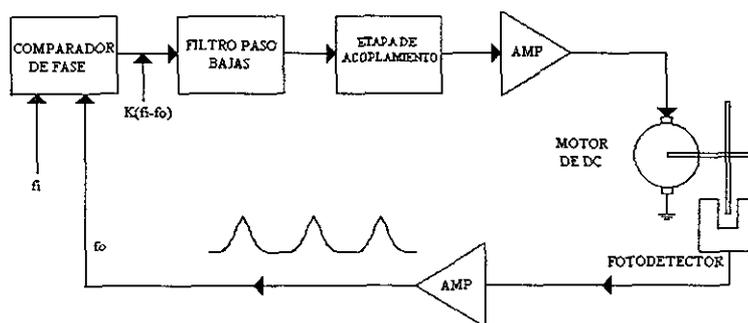


Figura 4.4 Diagrama del control de velocidad

Para controlar el arranque del actuador neumático se utiliza la salida del comparador de fase, la señal de DC proveniente de este se hace pasar por un comparador con histéresis, donde la señal se compara con un rango de voltaje que depende directamente de la precisión que se requiere en la velocidad. A la salida de este se tiene un nivel de voltaje alto cuando la velocidad este dentro del rango deseado, esta señal es captada por la tarjeta de adquisición de datos, para que cuando el programa detecte que el motor esté en las condiciones de operación envíe una señal a la electroválvula para que el actuador neumático inicie su carrera.

Sobre el actuador neumático se emplean sensores inductivos de posición marca FESTO modelo SME-35Q-LED-24-B con un tiempo de conexión de 0.5 ms. Estos sensores controlan el inicio y fin de la toma de lecturas y se encuentran colocados en la zona donde el actuador neumático se comporta de una manera casi lineal. El sensor de posición que detecta el fin de lectura también se encarga de mandar una se señal que cierre la

---

electroválvula para evitar golpeteos. La electroválvula utilizada es de la marca *FESTO* modelo JMZH-5/2-1.5-L-LED, la cual tiene un tiempo de conexión de 8ms @ 6 bar.

- **ADQUISICIÓN Y PROCESAMIENTO DE DATOS.** Para la adquisición de datos se hace uso de un Detector de Efecto Lateral SC-50, de *UNITED DETECTOR TECHNOLOGY*. La información que entrega este fotodetector es en forma de variaciones de corriente, transmitida posteriormente por unos amplificadores de instrumentación de la misma marca *UNITED DETECTOR TECHNOLOGY* modelo 301DIV entregando una señal en el rango de  $\pm 10V$  a la salida.

La interfaz con la computadora se realiza con una tarjeta de adquisición de datos marca *NATIONAL INSTRUMENTS* modelo AT-M10-16E-1, la cual es una tarjeta multifunción E/S de alta velocidad que se configura por software sin necesidad de jumpers ni switches, tiene una velocidad de muestreo de 1.25 Mmuestras por segundo y con las siguientes características:

#### ENTRADAS ANALÓGICAS

- 16 entradas (modo single) ó 8 entradas diferenciales (DIFF).
- Hasta 256 entradas (modo single) o 128 entradas diferenciales con el multiplexor analógico AMUX-64T.
- Hasta 3072 entradas diferenciales con el sistema de acondicionamiento de señal SCXI.
- 12-bits de resolución.
- 1,250 kmuestras/s.
- 1 Mmuestra/s de velocidad de transmisión a disco.
- Autocalibración.
- Modos y rangos de entrada seleccionables por software.
- Ganancia programable de 0.5, 1, 2, 5, 10, 20, 50, 100.
- Bus RTSI para sincronizar múltiples tarjetas.

- Adquisición de datos con *Post* y *Pre-Trigger*.
- Disponible muestreo simultáneo con el SC-2040.

#### SALIDAS ANALÓGICAS

- 2 canales de 12 bits.

#### ENTRADAS/SALIDAS DIGITALES

- 8 canales TTL, configurables como entrada o salida.

#### COUNTER/TIMER

- Incorpora el nuevo controlador ASIC DAQ-STC.
- 2 contadores de 24-bits.

#### TRIGGERS

- Digitales y analógicos.
- 10 entradas con funciones programables (PFI) con flexibilidad de conexión de señales.

El diagrama de bloques de la tarjeta de adquisición de datos se ilustra en la figura 4.5.

El programa para acondicionar los datos y llevarlos a la pantalla de la PC está realizado en *LABVIEW*. Este *software* de programación es empleado en la ingeniería por sus cualidades en el área de control; se lleva a cabo mediante bloques, el programa de adquisición de datos se muestra en el apéndice.

La pantalla de computadora, que será utilizada para realizar toda la medición, tendrá información suficiente relacionada al funcionamiento del equipo, así como datos del paciente. La pantalla utilizada se muestra en la figura 4.6.

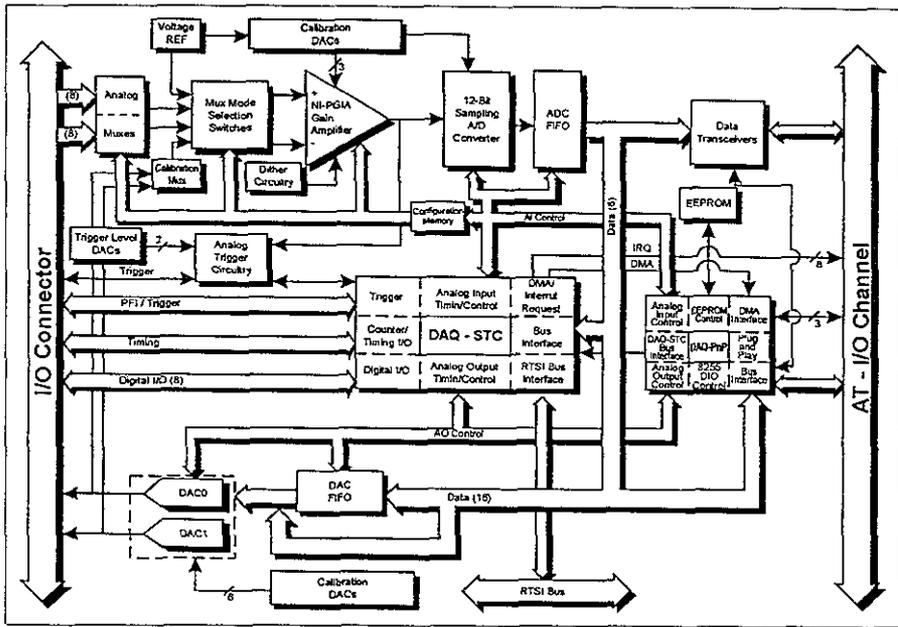


Figura 4.5 Diagrama de la tarjeta AT-MIO-16E1

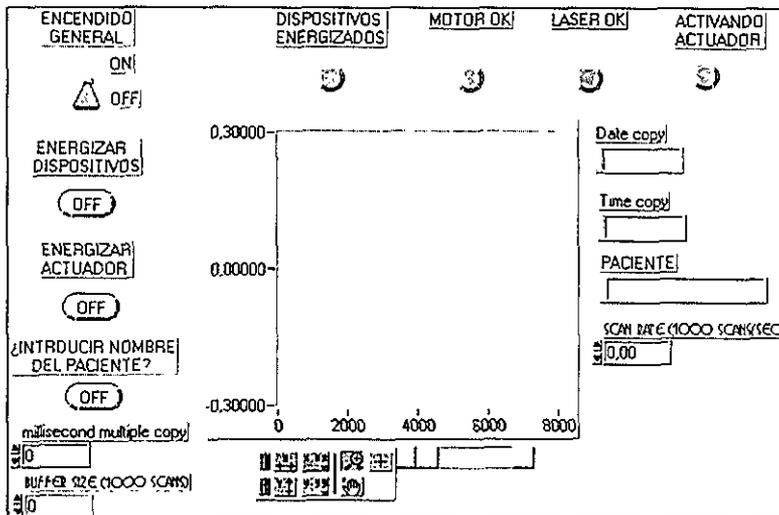
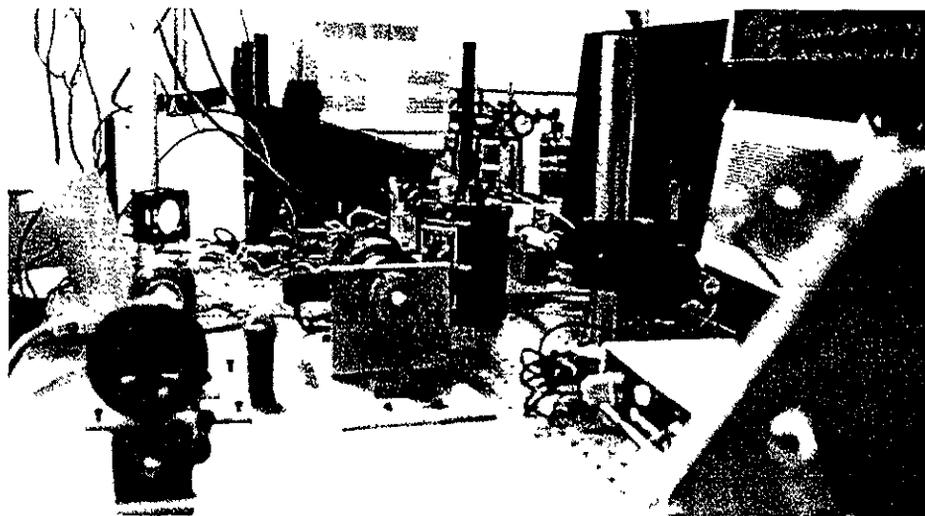


Figura 4.6 Pantalla del programa de adquisición de datos

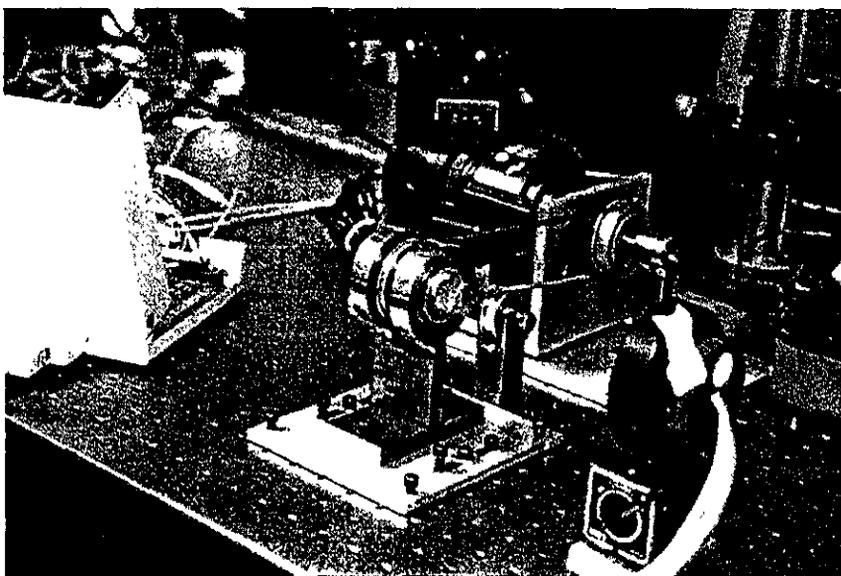
El prototipo de dicho dispositivo es mostrado en la figura 4.7.



*Figura 4.7 Prototipo*



*Figura 4.8 Componentes del movimiento lineal*



*Figura 4.9 Componentes del movimiento angular*

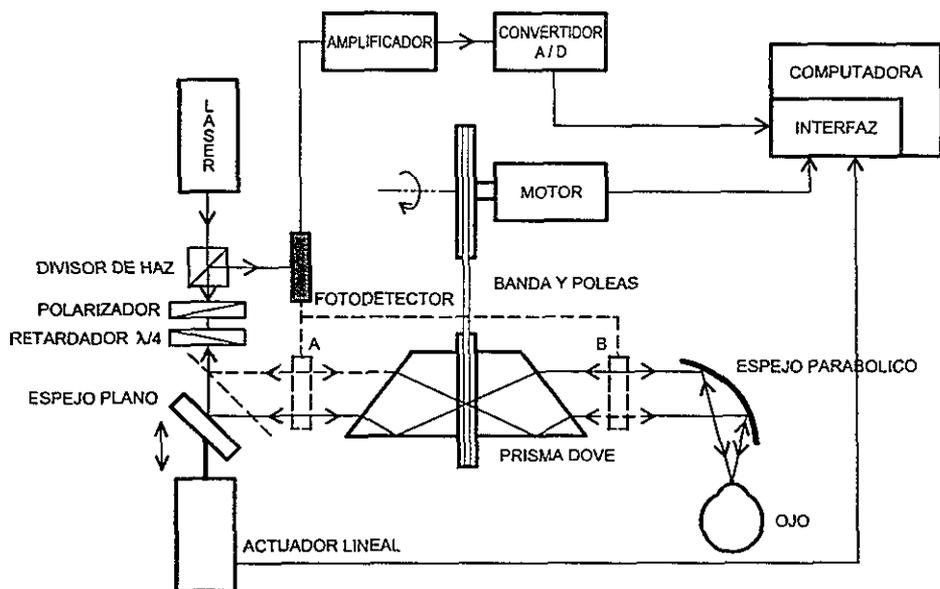


Figura 4.10 Diagrama del nuevo prototipo

## PRUEBAS Y RESULTADOS

### DISEÑO DE PRUEBAS

Una vez que se tienen conocidos cuales son los alcances teóricos de cada uno de los equipos a utilizar, se deben de realizar pruebas para conocer cuales son los factores de error que se manejan en los componentes antes mencionados. De esta manera se presentan una serie de experimentos con el fin de caracterizar el equipo en general, así como cada uno de sus movimientos.

1. Movimiento lineal (componente radial). Los resultados obtenidos de la caracterización de este movimiento, se emplearán para establecer las condiciones en las cuales deberá realizarse el movimiento circular. Así mismo, podrá conocerse la zona de trabajo en donde la velocidad de

desplazamiento longitudinal en 6 mm es constante. Es por esta razón que una vez integrados los sistemas del movimiento lineal, se realizará una caracterización del sistema, utilizando como fuentes de medición el fotodetector y la propia tarjeta de adquisición de datos.

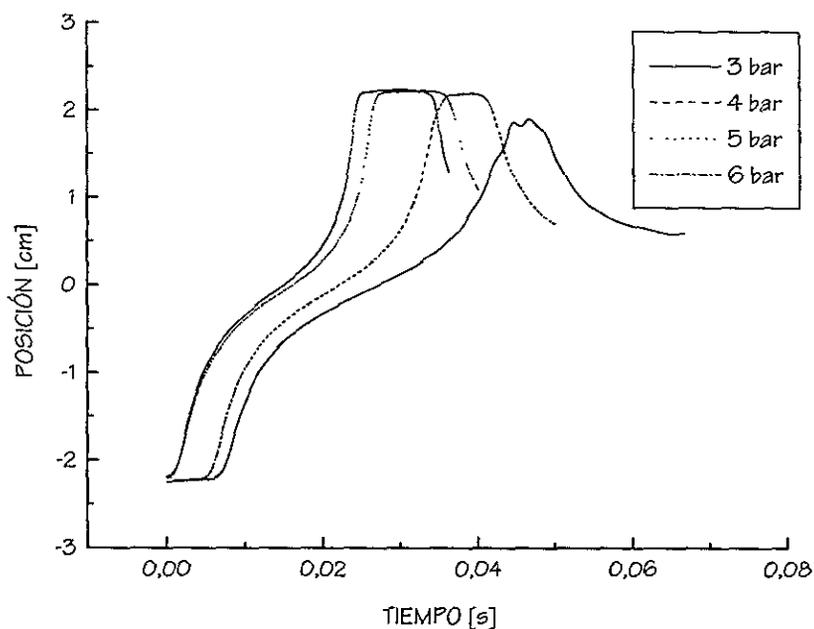
2. Movimiento circular (componente angular). Una vez que el movimiento lineal se encuentra perfectamente definido, procedemos a determinar las posibles, pero no deseadas desviaciones que presentará el sistema de movimiento circular, para lo cual se realizará una prueba muy semejante a la anterior, en donde se utilizarán los sistemas de adquisición de datos finales para determinar las condiciones del giro. Se busca que no exista excentricidad, así como el lograr mantener velocidad angular constante.
3. Movimiento combinado (componentes radial y angular simultáneas). Teniendo los resultados anteriores se realiza una prueba con ambos movimientos funcionando, lo cual da como resultado los errores totales que el sistema genera, con lo cual se tomarán medidas para corregir en lo posible su funcionamiento, y en su defecto, introducir los factores de corrección al sistema de adquisición de datos para compensar dichas fallas.

## PRUEBAS

### MOVIMIENTO LINEAL

Usando cuatro diferentes presiones de operación (3, 4, 5 y 6 bar), se realizó el experimento en seis ocasiones para cada una de estas presiones, obteniendo curvas promedio de comportamiento como las mostradas en la figura 5.1.

Esta gráfica nos muestra una relación directa entre cada una de las presiones utilizadas, dado que como era de esperarse, entre mayor es la presión utilizada, mayor es la velocidad alcanzada, y por consiguiente menor será el tiempo empleado para realizar el recorrido.



PRESIÓN DE OPERACIÓN bar	FRECUENCIA DE ADQUISICIÓN KHz	NÚMERO DE DATOS "N"
3	300	20 000
4	400	20 000
5	500	20 000
6	550	20 000

*Figura 5.1 Tiempo de recorrido total a diferentes presiones de operación y condiciones de muestreo*

Con estos datos apreciamos que el barrido deseado será fácilmente posible en un tiempo menor a 1/10 s, sin embargo, dado el comportamiento de linealidad observado en cada una de las gráficas, procederemos a analizar

cada una de estas en diferentes rangos con el fin de encontrar cual es la zona y presión de operación ideal.

Utilizando regresiones lineales para determinados intervalos de datos (zona más lineal), serán calculadas las desviaciones que proporciona cada una de las presiones de operación.

Es apreciable a simple vista que la zona de trabajo más lineal es la zona central del desplazamiento, por lo cual el análisis partió del centro de este, buscando primeramente una zona de trabajo equivalente a el radio necesario (6 mm).

De los resultados obtenidos de las regresiones lineales apreciamos que:

PRESIÓN DE OPERACIÓN bar	RANGO DE ANÁLISIS cm	NÚMERO DE DATOS ANALIZADOS N	DESVIACIÓN ESTÁNDAR cm
3	-0.3 a 0.3	3814	0.00581
4	-0.3 a 0.3	4051	0.00725
5	-0.3 a 0.3	4533	0.00913
6	-0.3 a 0.3	4490	0.00851

De lo anterior se dedujo que entre menor es la presión a la cual trabaja el actuador, el movimiento se realiza de forma más suave. Así mismo se realizaron pruebas en zonas cercanas a los 3 bar, donde no se encontraron mejores resultados.

De los resultados anteriores podemos determinar el tiempo en el cual se realiza el movimiento lineal en la zona deseada es de: 12.713 ms. Con lo anterior podemos llegar a la conclusión de que tenemos tiempos por debajo de 1/60 s que se planteó como objetivo. Este parámetro fijará ahora las condiciones de operación del sistema de movimiento angular.

Una gráfica de las pruebas obtenidas con la presión de operación a 3 bar y en la zona a la cual se operará es mostrada en la figura 5.2.

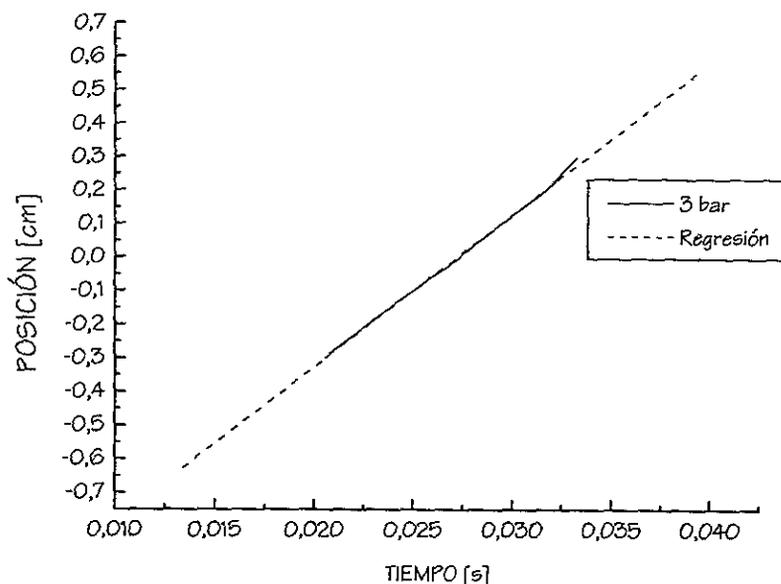


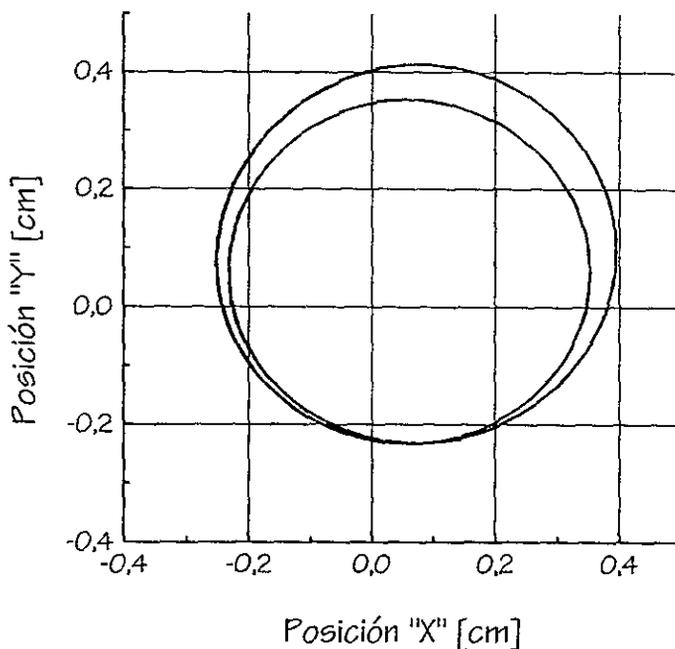
Figura 5.2. Zona lineal de trabajo a 3[bar]

Ahora con el valor del tiempo conocido, se puede obtener la cantidad máxima de potencia láser absorbida de acuerdo con la ecuación mostrada en el capítulo 4, la cual es de 5.36 mW, pero dadas las condiciones de movimiento aún no excedemos dicho valor sobre la superficie de prueba.

#### MOVIMIENTO ANGULAR

Una vez montado el sistema diseñado para movimiento circular, iniciamos una serie de pruebas que muestran la trayectoria del haz de láser que incide en el prisma DOVE. Debido a las características del prisma se presentan (en su caso ideal), circunferencias cuyo radio depende de la

posición con respecto al centro geométrico del mismo. En la figura 5.3, se presenta la trayectoria seguida por el haz de láser a la salida del prisma DOVE

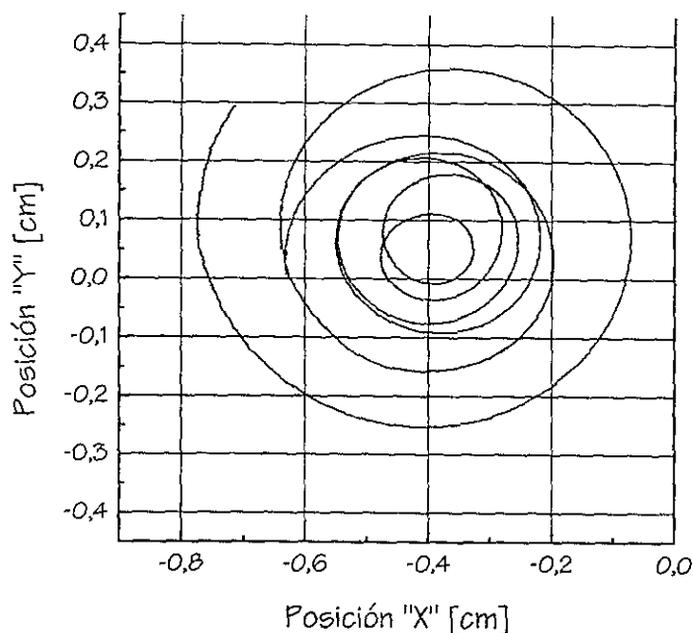


*Figura 5.3. Trayectoria circular producida por el sistema.*

Con base en la figura 5.3, apreciamos que no se presenta una circunferencia en el sentido más estricto de la palabra, pero esta trayectoria es altamente repetible, lo cual es requisito indispensable para realizar mediciones. De lo anterior podemos obtener que este movimiento si bien no es óptimo, nos permite un trabajo bastante aceptable para obtener los barridos finales. La cantidad de información utilizada para generar dicha trayectoria fue de 10000 datos.

## MOVIMIENTO COMBINADO

Con los parámetros conocidos, tanto para la componente radial (movimiento lineal), como para la componente angular (movimiento circular), contamos con información y condiciones suficientes para realizar barridos en donde se conjuntan ambos movimientos. Dichos barridos son mostrados en la figura 5.4. Para generar la espiral fue necesario configurar nuestro sistema para adquirir 8000 datos.



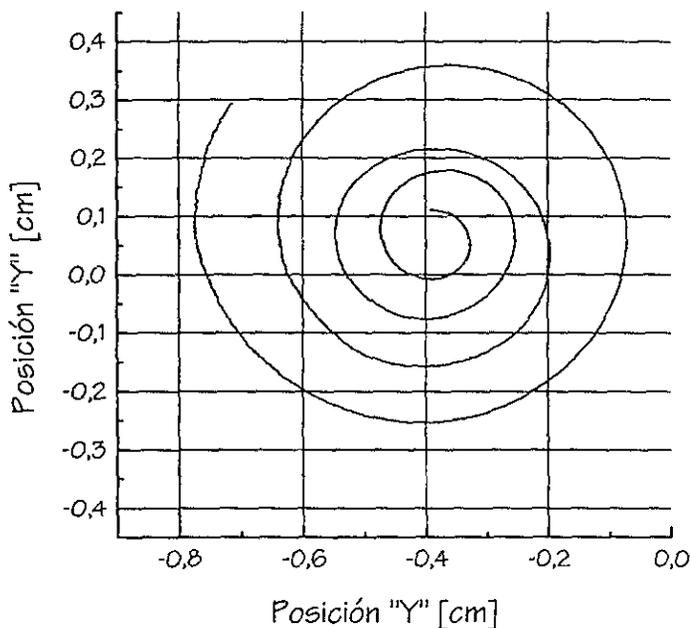
*Figura 5.4 Barrido de trabajo obtenido del sistema*

Trabajando con los datos obtenidos para la trayectoria anterior, encontramos que esta se compone de dos espirales, una del exterior hacia el centro, y otra del centro hacia el exterior. De esto realizamos un desglose de componentes, obteniendo como resultado aproximado que los primeros 5000

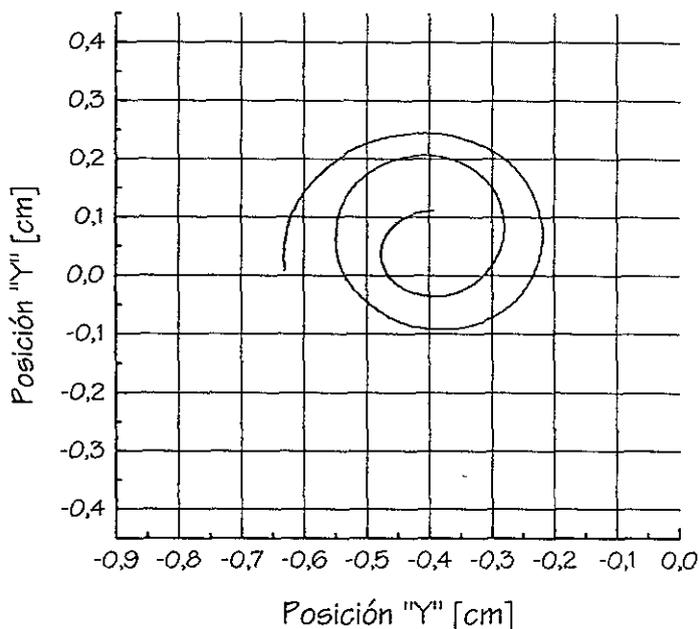
datos pertenecen a la primera espiral (figura 5.5a), mientras que los siguientes 3000 corresponden a la segunda (figura 5.5b).

Si se consideran una cantidad mayor de datos para el análisis, logramos obtener un mayor recorrido con la segunda espiral, lo cual se traduce en un conocimiento más certero de la superficie.

Es importante el apreciar como en las figuras 5.5 a y b, se aprecia un movimiento relativamente uniforme, debido a la variación de radio generada por el actuador neumático, mientras que se perciben ligeras alteraciones generadas por las desviaciones en el movimiento circular.



a)



b)

Figura 5.5. a) Barrido desglosado obtenido del sistema (exterior - centro)  
b) Barrido desglosado obtenido del sistema (centro - exterior)

## ANÁLISIS GENERAL DE RESULTADOS

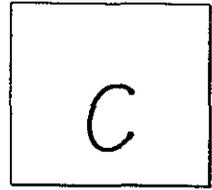
Como se aprecia en el movimiento lineal, hemos logrado incrementar de forma substancial la calidad y velocidad del sistema anterior, consiguiendo con esto, generar trayectorias más precisas y rápidas. En este aspecto se puede considerar un éxito total el dispositivo implementado, el cual presenta su mayor problemática, determinar por medio de los sensores de posición cuál será la zona ideal para el inicio y el fin de adquisición de datos.

Por otro lado, para el movimiento que forma la componente angular (movimiento circular) encontramos desviaciones grandes pero que pueden no ser de mucha importancia para una primera etapa de este prototipo, dado que la importancia de los resultados radica principalmente en la espiral generada y la información contenida en ella. De esta manera podemos asegurar que las desviaciones que presenta la trayectoria del haz láser al pasar por el prisma DOVE únicamente accionado la componente angular de movimiento son buenas, sin llegar a lo excelente por problemas de alineación.

Por último encontramos que la espiral, la cual a ciencia cierta es el resultado de mayor peso en este prototipo, presenta valores bastante aceptables en el sentido de velocidad, número de trayectorias y calidad de la misma, consiguiendo de esta manera un considerable avance y cumplimiento de los parámetros de diseño.

De la misma manera es importante el hacer notar que los resultados muestran que es posible utilizar los valores obtenidos con una segunda espiral generada posterior al centro geométrico del prisma, logrando obtener de esta manera, una mayor cantidad de información a un menor régimen de giro del movimiento circular.

Considero de gran interés el mencionar que las desviaciones presentadas en el movimiento circular (y por consecuencia lógica en la espiral), debidas a alineación, son producidas por una gran cantidad de factores, tales como los soportes utilizados para los rodamientos, los cuales si bien fueron maquinados con la mejor calidad posible, no dejan de revelar un desgaste natural de la maquinaria utilizada. Así mismo no es posible pasar por alto que cualquier desviación que pueda existir en el eje de giro del prisma con respecto a su eje geométrico generará desviaciones como las mostradas.



## CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos de la primera etapa de caracterización de este segundo prototipo, serán sometidas a diferentes tipos de ajustes que serán realizados por el grupo de óptica del Centro de Instrumentos, los cuales darán como resultados finales mediciones hechas a superficies de calibración esféricas, reportando de esta manera cuales son los alcances finales de este segundo prototipo.

Para obtener mejores niveles de precisión será necesario como primer término trabajar con los ajustes propios del sistema hasta obtener los mejores valores de centrado posible debidos a desviaciones del tipo mecánico, posterior a esto será necesario analizar la calidad de la señal recibida, esto con el fin de trabajar en dispositivos para aislar la adquisición de datos (en medida de lo posible), de los ruidos electromagnéticos del ambiente.

Como todo prototipo, la etapa más difícil no es la construcción, si no una etapa de evaluación exhaustiva en la cual se deberán de analizar cada una de las partes empleadas para con esto determinar los valores de eficiencia, durabilidad real, etc., consiguiendo de esta forma entrar en el ciclo iterativo del diseño que nos lleva a obtener el mejor resultado posible en cuanto a costo, duración y por supuesto apariencia.

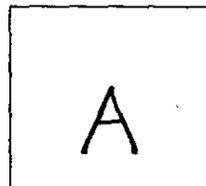
El prototipo realizado tiene un costo aproximado de \$6,500 USD, en cuanto a materiales, un costo de fabricación de \$2,000 USD, y un costo de ingeniería de \$16,500 USD.

Los costos manejados son un excelente reflejo de un bajo costo para dispositivos de este tipo dado que, sin perder de vista que siempre el desarrollo de prototipos es de orden mucho mayor a los costos de producción, encontramos que sus \$25,000 USD son bastante competitivos vs. los \$16,000 USD de un dispositivo comercial de la marca Nikon modelo Retinomax K-plus.

Por la magnitud del proyecto, desde que inició su desarrollo teórico, se ha generado una gran cantidad de información que ha sido relevante para este proyecto, y para muchos otros que de alguna u otra manera se relacionen con las necesidades resueltas para este dispositivo. Por lo anterior se ha tenido a bien generar una serie de reportes, memorias para congresos, y en respuesta a la amable solicitud de la ASPE (American Society of Precision Engineering), se encuentra en proceso un artículo en donde serán expuestos los resultados del equipo.

Para cumplir con todo lo anterior el equipo deberá de sufrir de una serie de ajustes para lograr obtener los resultados esperados del mismo. Dentro de las mejoras propuestas al sistema se sugiere la incorporación de nuevos elementos con el fin de evaluar tanto la trayectoria entrante como la trayectoria reflejada, así como también el uso de nuevos dispositivos mecánicos enfocados específicamente a giros de precisión, con lo cual sería sensiblemente aumentada la calidad del giro obtenida. Por otro lado el uso de

sistemas (maquinaria) más confiable para su fabricación proporcionaría valores más aceptables de desviaciones.



**ESTA TESIS NO DEBE  
SALIR DE LA BIBLIOTECA**

## APÉNDICE

### CLASIFICACIÓN DE LOS LÁSERES

Básicamente, el esquema de la clasificación de los láseres está basado en la capacidad de producir lesiones en personas, de acuerdo a lo siguiente:

- ✓ Clase I: Esta clase se refiere a todos los láseres o sistemas de láseres exentos de producir riesgos bajo condiciones normales de operación.
- ✓ Clase IIa: Se refiere a todos los láseres que emiten luz visible de baja potencia o sistemas de láseres que no están diseñados para programación prolongada y bajo condiciones normales de operación

no producen un riesgo si son vistos directamente por períodos que no excedan los 1,000 segundos.

- ✓ Clase II: Se refiere a todos los láseres que emiten luz visible de baja potencia o sistemas de láseres, los cuales por la respuesta de aversión humana, normalmente no presentan algún riesgo, pero pueden presentar algunos potenciales de riesgo si son vistos por largos períodos de tiempo como algunas fuentes de luz convencional.
- ✓ Clase IIIa: Denota a los láseres o sistemas de láseres que normalmente no producen un riesgo si son vistos únicamente por períodos momentáneos de tiempo con el ojo al desnudo. Estos pueden representar un riesgo si son vistos utilizando colectores ópticos de luz.
- ✓ Clase IIIb: Denota a los láseres o sistemas de láseres que pueden producir daños si son vistos directamente.
- ✓ Clase IV: Denota a los láseres o sistemas de láseres que no únicamente pueden producir riesgo por reflexiones directas o indirectas, sino también por reflexiones difusas. Además puede producir riesgos de quemaduras en la piel.

En la siguiente tabla se muestran los límites de exposición ocular para los láseres mas representativos citados en la norma ANSI No. Z-136.1.

Tipo de láser	Longitu de onda	Límite de exposición ocular	límite de exposición de la piel
Argón	488 nm, 514.5 nm	0.5 $\mu\text{J}/\text{cm}^2$ de 1 ns a 18 $\mu\text{s}$ ; $1.8t^{3/4}$ mJ/cm <sup>2</sup> de 18 $\mu\text{s}$ a 10 s; 10mJ/cm <sup>2</sup> de 10 s a 10,000 s; y 1 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ para mayores tiempos	0.02 J/cm <sup>2</sup> de 1 ns a 100 ns; $1.1t^{1/4}$ J/cm <sup>2</sup> de 100 ns a 10 s; y 0.2 W/cm <sup>2</sup> para mayores tiempos

Helio-Neón	632.8 nm	0.5 $\mu\text{J}/\text{cm}^2$ de 1 ns a 18 $\mu\text{s}$ ; $1.8t^{3/4}$ mJ/cm <sup>2</sup> de 18 $\mu\text{s}$ a 450 s; 170mJ/cm <sup>2</sup> de 10 s a 10,000s; y 17 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ para mayores tiempos	Igual que para el láser de Argón
Neodio-YAG	1064 nm	5 $\mu\text{J}/\text{cm}^2$ de 1 ns a 50 $\mu\text{s}$ ; $9t^{3/4}$ mJ/cm <sup>2</sup> de 50 $\mu\text{s}$ a 1,000 s; y 1.6 mW/cm <sup>2</sup> para mayores tiempos	0.1 J/cm <sup>2</sup> de 1 ns a 100 ns; $5.5t^{1/4}$ J/cm <sup>2</sup> de 100 ns a 10 s; y 1 W/cm <sup>2</sup> para mayores tiempos
Galio-Arsenio	910 nm	1.3 $\mu\text{J}/\text{cm}^2$ de 1 ns a 18 $\mu\text{s}$ ; $4.5t^{3/4}$ mJ/cm <sup>2</sup> de 18 $\mu\text{s}$ a 1,000 s; 10,000 s; y 0.8 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ para mayores tiempos	0.05 J/cm <sup>2</sup> de 1 ns a 100 ns; $2.8t^{1/4}$ J/cm <sup>2</sup> de 100 ns a 10 s; y 0.5 W/cm <sup>2</sup> para mayores tiempos
Dioxido de Carbono	10.6 $\mu\text{m}$	10 mJ/cm <sup>2</sup> de 1 ns a 100 ns; $0.56t^{1/4}$ J/cm <sup>2</sup> de 100 ns a 10 s; y 0.1 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ para mayores tiempos	Igual que para los limites de exposición ocular.

## MÁS SOBRE FOTODETECTORES

### CONSTRUCCIÓN

Muchas técnicas de construcción son empleadas, no obstante, para dispositivos con la resolución de posición, se construyen dos tipos de fotodiodos: de difusión plana y los de barrera Schottky, los cuales han

probado ser los más efectivos. En la figura A-1 se muestra como están fabricados los fotodiodos antes mencionados.

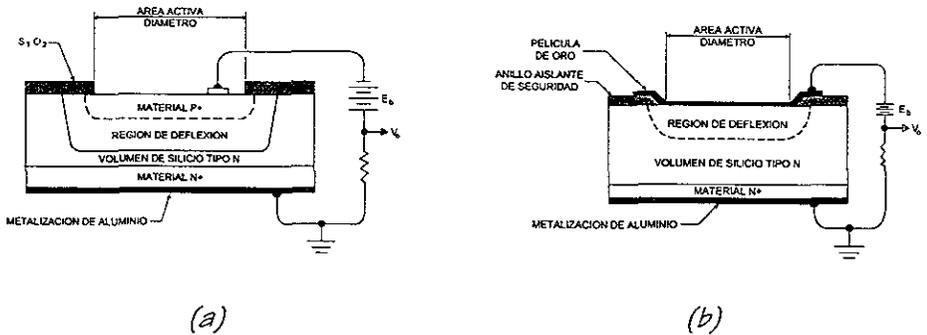
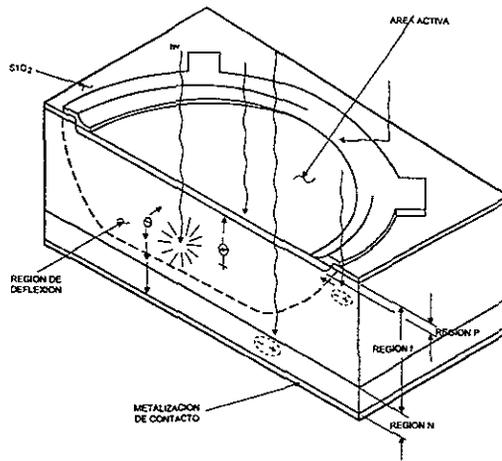


Figura A-1. (a) Construcción de un fotodiodo de efecto lateral  
(b) Construcción de un fotodiodo de barrera Schottky.

## FUNCIONAMIENTO

Cuando un fotón de luz con suficiente energía es absorbida por el fotodiodo, un par electrón-hueco es excitada (figura A-2). La fotocorriente se crea cuando la pareja electron-hueco se separa, los electrones se van al lado N y los huecos al lado P. La separación de las parejas de electrones-huecos es muy similar a lo que ocurre cuando estos forman en la región de un semiconductor donde existe un campo eléctrico. Este campo es muy fuerte en el área central del diodo entre las áreas de material tipo P y N. Así pues, los fotones absorbidos en esta región, conocida como región de vaciamiento, constituirá el volumen de flujo de electrones a través de la región N y dentro del circuito externo en forma de fotocorriente. La alternativa de separación es para recombinar las parejas de electrones-huecos, lo cual es muy parecido a lo que pasa cuando los portadores están formados a las afueras del área de vaciamiento.

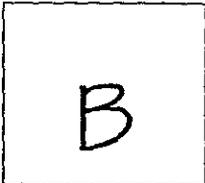


*Figura A-2. Funcionamiento del fotodiodo.*

Para mejor interpretación, un fotodiodo puede ser hecho para permitir que el mayor número de fotones sean absorbidos en la región de vaciamiento, esto es, que los fotones no pueden ser absorbidos hasta que ellos hayan penetrado tan lejos como la región de vaciamiento, y puedan ser absorbidos antes de penetrar más allá de esta. La profundidad que un fotón penetra esta en función de su longitud de onda. Longitudes de onda cortas, en regiones ultravioleta y azul, son absorbidas cerca de la superficie del material, mientras que longitudes de onda grande, en la región de infrarrojo, pueden penetrar todo el camino a través del cristal. Este fenómeno gobierna la respuesta al espectro en los fotodiodos. El silicio tiene una respuesta típica de 0.4 A/W de los 350 a los 1100 nanómetros, máxima de 0.5 A/W entre los 700 y 900 nanómetros. Esta característica de respuesta hace a los fotodetectores de silicio óptimos para usarlos con una gran variedad de luces comunes incluyendo los láseres Helio-Neón, los diodos láser, los diodos emisores de luz (LED), los diodos emisores de infrarrojo (IRED), y lámparas incandescentes o fluorescentes.

Otra característica favorable de los fotodiodos de silicio son sus excelentes velocidades de respuesta y bajo ruido. El tiempo de respuesta típico de estos dispositivos es de 5 microsegundos. La corriente de ruido

para estos fotodetectores es muy baja, permite detectar luz con niveles de potencia de nanowatts, y en algunos casos de picowatts.

A square box with a thin black border, containing the uppercase letter 'B' in a simple, hand-drawn font.

## BIBLIOGRAFÍA

1. Anaszkiwicz, Pawel, *Sistemas de Control del Movimiento y Adquisición de Datos para Keratopografía Láser*, IV Simposio Interno, Centro de Instrumentos, UNAM, 1991.
2. Ascanio, Gabriel, *Sistema Mecánico del Queratopografo Láser*, IV Simposio Interno, Centro de Instrumentos, UNAM, 1991.
3. Bradley, D. Dawson, N.C. Burd, A.J. Loader, *Mechatronics*, Chapman and Hall, 1ª edición, 1990, USA.
4. Díaz, Rufino, *Queratopografía por Deflectometría Láser: Sistema Optico*, IV Simposio Interno, Centro de Instrumentos, UNAM, 1991.

- 
5. Díaz, Rufino; Granados, F; Queratopografía por Deflectometría Láser: Teoría, IV Simposio Interno, Centro de Instrumentos, UNAM, 1991.
  6. Douglas M. Considine; Scientific Encyclopedia, Van Nostrand Reinhold Co., 6ª edición, 1993, USA.
  7. Festo pneumatic, Catálogo general de neumática, 26ª edición.
  8. Finn Geneser, Histología, Editorial Médica Panamericana, Segunda edición.
  9. Francis T.S. Yu, Principles of Optical Engineering, John Willey & sons, 1990, Republic of Singapore.
  10. González, M; Cardel, R.; Díaz R.; Medición de Desplazamientos Mecánicos por Deflectometría Láser, XII Congreso SOMI, Sociedad Mexicana de Instrumentación, México 1997.
  11. González, M; Nogueira A.; Díaz R.; Caracterización de un Detector de Posición Bidimensional de Haces Luminosos, XI Congreso SOMI, Sociedad Mexicana de Instrumentación, México 1996.
  12. H. Wilmshurst, Signal Recovery, Adam Hilger, 2ª edición, 1990, USA.  
John Harry King
  13. Keith L. Moore, Anatomía con orientación clínica, Editorial Médica Panamericana
  14. Laser Institute of America, Láser Safety Guide, James F. Smith, 6ª edición, 1987, USA.
  15. Mischa Schwartz, Information Transmission, Modulation and Noise, McGraw Hill, 4ª edición, USA, 1990.
  16. National Instruments, DAQ AT-MIO/AI E series user manual, USA, 1996.

- 
- 17.P. Holman, *Métodos Experimentales para Ingenieros*, McGraw Hill, 1ª edición, México, 1981.
- 18.Pérez Amador, Víctor, *Generadores, motores y transformadores eléctricos*, 1ª edición , Facultad de Ingeniería, México, 1992.
- 19.Rufino Díaz, Alberto Caballero, Abdul Muñiz, Leopoldo Ruiz and Gabriel Ascanio, *System for the measurement of corneal shape by laser deflectometry*, Proceedings 1997 ASPE Annual meeting.
- 20.Ruiz Boullosa, Ricardo; *Láser*, Universidad Nacional Autónoma de México, 1980
- 21.Ruiz, L., Caballero, A., Muñiz, A., Díaz, R., Martínez, W. y Ascanio, G.. *Sistema de medición de la topografía corneal por deflectometría láser*, XII Congreso SOMI, Sociedad Mexicana de Instrumentación, México 1997.
- 22.SKF, *Catálogo general*, Italia,1994.
- 23.Shigley, J. E., Mischke, C. R., *Diseño en Ingeniería Mecánica*, 5ª edición, México 1986.
- 24.Suárez - Sánchez, R. Díaz Uribe, P. Anaszkievicz, *Laser Deflectometry keratopography*, *Optics in Medicine, Biology and Environmental Research*, Gert Von Bally & Shyam Khanna, eds, Vol. 1, *Series of the International Society, Optics Within Life Sciences*; Elsevier Science Publishes, Holanda, 1993.
- 25.Warren J. Smith, *Modern Optical Engineering*, Mc Graw Hill, 2ª edición, 1990, USA.