

28  
ZEJ

**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO**

---

FACULTAD DE INGENIERIA



"SISTEMA DE BARRIDO PARA LA MEDICION DEL PERFIL DE LA CORNEA POR EL METODO DE DEFLECTOMETRIA LASER"

**TESIS**

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE  
**INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA**  
(AREA ELECTRICA ELECTRONICA)

PRESENTA:  
**ALBERTO CABALLERO RUIZ**

DIRECTOR: M. EN I. GABRIEL ASCANIO GASCA  
CO-DIRECTOR: FIS. MARIO GONZALEZ CARDEL

CIUDAD UNIVERSITARIA, MEXICO, D. F., JUNIO 1998

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

263341



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**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.

A mis padres Guadalupe y Margarito

por haber estado en todo conmigo y haber confiado en mí les dedico esta tesis que refleja el fruto del segundo mejor regalo que me han dado en la vida a parte de la vida misma..... la oportunidad de estudiar.

A mis hermanos Víctor y Leonor

por todo su apoyo y consejos durante mi vida

A Leopoldo

por su gran amistad y por su gran apoyo durante la realización de este proyecto

A mis amigos:

Arcelia  
Héctor  
Gustavo  
Fernando

por su invaluable amistad y su apoyo durante mi estancia en la Facultad de Ingeniería.

## *AGRADECIMIENTOS*

En primer lugar quiero agradecer al M. en I. Gabriel Ascanio Gasca por su gran amistad, apoyo e infinita paciencia durante mi estancia en el Centro de Instrumentos.

Agradezco al Dr. Rufino Díaz Uribe , al Fis. Mario González Cardel, al Ing. Benjamin Valera Orosco y al M. en I. Wilfredo Martínez Payán por su asesoría, supervisión y tiempo dedicado a este proyecto.

Al Centro de Instrumentos y muy en especial a mis amigos del departamento de dibujo José Juan Corona y José Luis Juárez, así como a los integrantes del taller mecánico, 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 compañeros en el Centro de Instrumentos: Selene, Abdul y Carlos por la gran amistad que tuvimos y que nos ayudo a superar los malos ratos.

A mis amigos de la Facultad de Ingeniería: a la banda alcoholisaurica del sur por su gran amistad y por los buenos momentos que pasamos en esas históricas pedas, a la banda electrónica por el gran equipo que hicimos juntos tanto dentro de la facultad como fuera de ella y que dio paso al surgimiento de una gran amistad, a la banda mecánica por su amistad y de forma muy especial a Toño, los Mauricios, Martha, Carlos, Rosana, Claudia, Luis y Javier.

A mis sinodales por sus comentarios y aportaciones.

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 Leopoldo Ruiz Huerta y Mario González Cardel. El trabajo fue financiado por CONACyT, proyecto 2120-PA.

# ÍNDICE GENERAL

INTRODUCCIÓN	1
1 LA CÓRNEA	5
1.1. LA IMAGEN	5
1.2. LA CÓRNEA	8
1.3. DESVIACIONES DEL PERFIL DE LA CORNEA	9
1.3.1 Principales desviaciones	10
1.3.2 Principales soluciones	10
2 MÉTODOS PARA LA MEDICIÓN DE LA TOPOGRAFÍA CORNEAL	13
2.1. ¿POR QUÉ MEDIR LA TOPOGRAFÍA DE LA CORNEA?	13
2.2. EQUIPOS COMERCIALES EMPLEADOS PARA OBSERVAR LA TOPOGRAFÍA CORNEAL	14
2.2.1 Disco de Plácido	14
2.2.2 Queratómetro de Javal-Schiotz	16
2.2.3 Queratoscopio	18
2.2.4 Escáner	21
2.2.5 Interferometría	22

3	NUEVA PROPUESTA	24
3.1.	QUERATOPOGRAFÍA POR DEFLECTOMETRÍA LÁSER	25
3.1.1	Deflectometría	25
3.1.2	Láser	26
3.1.3	Deflectometría láser	29
3.2.	SISTEMA PREVIO	30
3.2.1	Logros y carencias	34
3.2.2	Limitaciones	38
4	ALTERNATIVAS	39
4.1.	LA MECATRÓNICA Y EL DISEÑO EN INGENIERÍA	40
4.2.	NECESIDADES	43
4.3.	ALTERNATIVAS	44
4.3.1	Movimiento lineal	44
4.3.2	Movimiento circular	45
4.3.3	Control y adquisición de datos	46
4.4.	SELECCIÓN DEL SISTEMA DE CONTROL Y ADQUISICIÓN DE DATOS	49
5	DESCRIPCIÓN DEL QUERATOPÓGRAFO LÁSER	51
5.1.	SUBSISTEMA ÓPTICO	52
5.1.1	Láser	52
5.1.1.1	Seguridad ocular	53
5.1.2	Componentes ópticas	56
5.1.2.1	Prisma Dove	56
5.1.2.2	Retardador y Polarizador $\lambda/4$	57
5.1.2.3	Divisor de haz	58
5.1.2.4	Espejo parabólico	58
5.1.3	Sensor de posición $XY$	58
5.1.3.1	Arreglos multi-elemento	59
5.1.3.2	Detectores de cuadrante y bi-celdas	59

5.1.3.3 Diodos de efecto lateral	60
a) Funcionamiento	62
b) Circuito equivalente	63
5.2. SUBSISTEMA MECÁNICO	64
5.2.1 Componente lineal (radial)	64
5.2.2 Componente circular (angular)	65
5.3. SUBSISTEMA DE CONTROL Y ADQUISICIÓN DE DATOS	66
5.3.1 Control del motor	66
a) Control del motor de DC	67
b) Control del motor de AC	69
5.3.2 Control de actuador neumático	69
5.3.3 Polarización	70
5.3.4 Acondicionamiento de señal	72
5.3.5 Adquisición de datos	74
5.3.5.1 Tarjeta AT-MIO-16E-1	74
5.3.5.2 Interfaz	78
5.3.6 Visualización del proceso	78
5.4. NUEVO PROTOTIPO	80
6 PRUEBAS Y RESULTADOS	81
6.1. ANÁLISIS DE LAS SEÑALES	81
6.1.1 Caracterización del movimiento lineal	82
6.1.2 Análisis de Fourier	86
6.1.3 Caracterización del movimiento circular	91
6.1.4 Movimiento compuesto	95
CONCLUSIONES	98
APÉNDICE	100
BIBLIOGRAFÍA	102



## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1	El ojo, a)corte, b)vista frontal	7
Figura 1.2	Queratotomía radiada	12
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	Queratoscopio por CCD	18
Figura 2.6	Método para determinar radio de curvatura en el queratoscopio	19
Figura 2.7	Imagen de resultados de un queratoscopio	20
Figura 2.8	Información obtenida del queratometro CANON RK-2	22
Figura 2.9	Queratómetro CANON RK-2	21
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 lineal y circular	31

*ÍNDICE DE FIGURAS*

Figura 3.6	Prisma DOVE (dimensiones en mm)	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	36-37
Figura 3.9	Movimiento real combinado	37
Figura 4.1	Proceso de diseño en ingeniería	40
Figura 4.2	Diagrama de bloques de un sistema mecatrónico	41
Figura 4.3	Diagrama del sistema	47
Figura 5.1	Sistema de queratopografía láser	52
Figura 5.2	Gráfica de la función de transferencia de un fotodetector de efecto lateral	61
Figura 5.3	(a) Construcción de un fotodiodo de efecto lateral (b) Construcción de un fotodiodo de barrera de Schottky	61
Figura 5.4	Funcionamiento del fotodiodo	62
Figura 5.5	Circuito equivalente del fotodiodo de efecto lateral tipo PIN	64
Figura 5.6	Componente lineal del queratopógrafo láser	65
Figura 5.7	Componente angular del queratopógrafo láser	66
Figura 5.8	Diagrama de control de velocidad	68
Figura 5.9	Circuito para controlar la velocidad de un motor de DC	68
Figura 5.10	Diagrama de bloques del control del motor AC	69
Figura 5.11	Diagrama de conexiones del control del actuador neumático	70
Figura 5.12	Sistema de energizado del motor de AC	72
Figura 5.13	Sistema de energizado en DC	72
Figura 5.14	Diagrama de bloques de amplificador 301 DIV	74
Figura 5.15	Diagrama de bloques de la tarjeta AT-MIO-16E-1	75
Figura 5.16	Diagrama de señales de control	77
Figura 5.17	Diagrama de conexiones para realizar la adquisición de datos.	78
Figura 5.18	Diagrama de flujo del programa para gobernar el queratopógrafo láser	79

*INDICE DE FIGURAS*

Figura 5.19	Fotografía del prototipo montado en el Centro de Instrumentos	80
Figura 6.1	Curva de Posición vs Tiempo del actuador lineal a diferentes presiones	82
Figura 6.2	Zona lineal del actuador neumático	83
Figura 6.3	Desplazamiento lineal del sistema de Queratopografía Láser	85
Figura 6.4	Error del movimiento lineal	85
Figura 6.5	Espectro en potencia de la señal del movimiento lineal	88
Figura 6.6	Señal de entrada simulada	88
Figura 6.7	Simulación de la señal de entrada filtrada por medio de un filtro tipo Chebychev	89
Figura 6.8	Simulación de la señal real de entrada	89
Figura 6.9	Simulación de la señal real de entrada filtrada	90
Figura 6.10	Señal real del movimiento lineal después de ser filtrada	90
Figura 6.11	Movimiento circular del queratopógrafo láser	91
Figura 6.12	Circunferencias generadas en el movimiento circular. (a) menor; (b) mayor	92
Figura 6.13	Desviación entre las trayectorias (a) $r = 2.9118$ mm; (b) $r=3.2211$ mm	93
Figura 6.14	Espectro en potencia del movimiento circular a) 10000 rpm; b) 12600 rpm; 15000 rpm	94-95
Figura 6.15	Barrido final del movimiento compuesto	96
Figura 6.16	a) Barrido desglosado obtenido del sistema (exterior - centro); b) Barrido desglosado obtenido del sistema (centro - exterior)	97

# INTRODUCCIÓN

La ingeniería, en su carácter multidisciplinario, tiene como objetivo solucionar 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.

En la oftalmología, se requiere de instrumentación de alta precisión, en particular cuando se necesita conocer con profundidad el estado y funcionamiento de determinados órganos, tales como retina y córnea. En el caso de la córnea es de vital importancia 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 lentes de contacto y lentes fijos, que representan soluciones fáciles y rápidas para corregir el problema de la mala captación de imágenes observadas, además de ser soluciones económicas y sencillas. Sin embargo, estas alternativas

representan para muchas personas una solución incómoda y para algunas más, una solución dependiente.

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

Por lo antes mencionado podemos percatarnos de la importancia de contar con la instrumentación adecuada para la medición de la córnea, 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 seccionarlo en *seis capítulos*, en donde se lleva una secuencia cronológica desde los orígenes de los sistemas para observar la forma de la córnea hasta la evaluación del nuevo prototipo propuesto.

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 cuál es la problemática que obliga a desarrollar nuevas alternativas de la medición del perfil corneal.

En el *capítulo segundo* se hace una descripción de los distintos 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 de este 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 el método de deflectometría láser, exponiéndose su historia, desarrollo, evaluación y reportando los avances conseguidos hasta este momento. El sistema descrito en este capítulo 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 se puede omitir el mencionar que en la realización de instrumentación, se observan ajustes que están implícitos en el 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 la seguridad ocular, dado que no es recomendable tener demasiado tiempo en exposición a la córnea con el haz emitido; así mismo, 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.

Una vez conocidas las limitantes del primer prototipo, se describe (*capítulo cuarto*) una serie de alternativas reales para resolver algunos de los problemas más importantes que están presentes en la primera versión del equipo. 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 la nueva propuesta desarrollada, requirió un trabajo analítico y experimental en distintas 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 a la sociedad de forma constructiva.

En el capítulo cinco se realiza una descripción de los sistemas que componen el prototipo, haciendo una explicación más detallada de los elementos que intervienen en él.

Así mismo, para analizar los datos obtenidos del nuevo prototipo (*capítulo seis*), se debe aplicar una combinación de conocimientos relativos a los procesos que se investigan, teniendo claro las limitaciones de los mismos, es decir, se deben conocer 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, analizando en ello, el estado en que se encuentra la investigación, y cuáles serán los siguientes pasos para mejorar el equipo en desarrollo.

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, sin embargo, el desarrollo de esta instrumentación depende de muchos factores como son de tipo ingenieril, científico, etc.

## CAPÍTULO

# LA CÓRNEA 1

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.

### 1.1. 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

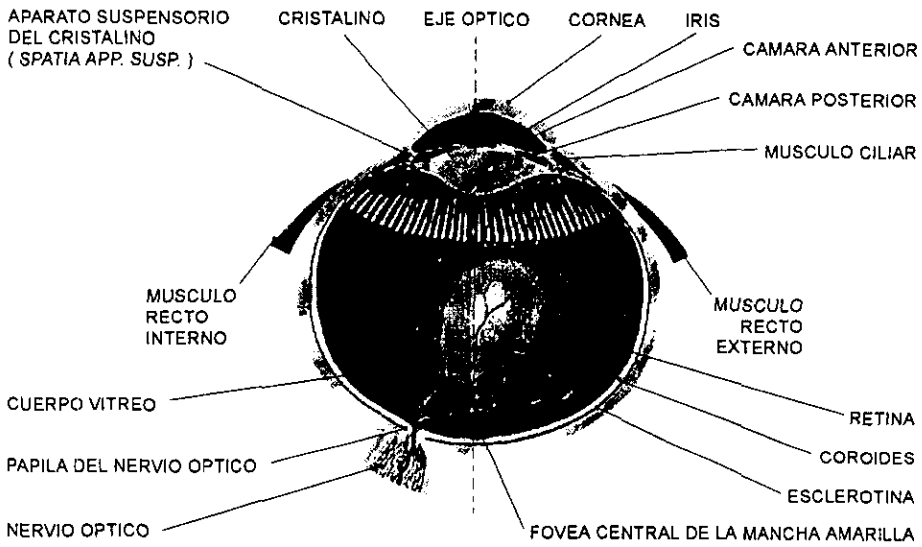


central (la pupila), y separa la cámara anterior de la posterior; *el cuerpo ciliar* encargado de producir el humor acuoso que nutre a la córnea y el cristalino, y que mantienen también la presión dentro del ojo; y *la coroides*, por donde corren los vasos sanguíneos que alimentan la retina. Justamente esta compleja estructura nerviosa donde comienza a formarse la visión, constituye la membrana interna en cuanto a los medios ópticos, uno de sus componentes es el citado humor acuoso, el segundo es el cristalino, una lente transparente y elástica encargada de enfocar la imagen en la retina, y por 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).

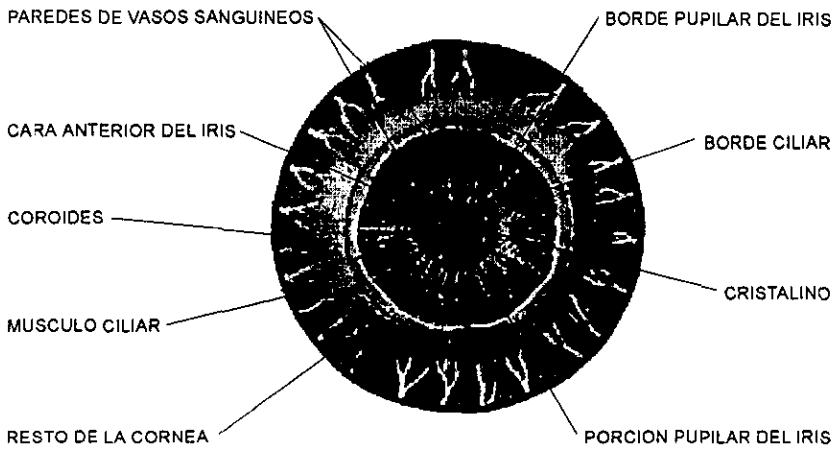
Los demás componentes del ojo son el nervio óptico, integrante de la cadena que lleva la información al cerebro, los músculos que mueven el globo ocular, y los sistemas de protección: párpados, conjuntiva y aparato lagrimal.

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 que hacen primero es 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

## 1.2. LA 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 y es muy resistente a la acción mecánica. Su tamaño es 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 0.5 mm en la parte central, aumentando hasta unos 0.7 mm en la periferia. El grado de curvatura de la córnea varía de acuerdo a la persona 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 ésta, 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, ésta es la primera superficie por donde pasa la luz, y siendo ésta 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 que toma un valor estándar (debido a que no existen dimensiones únicas para el ojo humano y por razones prácticas, se ha considerado 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  $r_{\text{media}} = 7.98$  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.

### 1.3. 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 por ciento 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.

#### 1.3.1. 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.

### 1.3.2. 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) Epiqueratofaquia. Esta 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. 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 fotoabradación del tejido estromal superficial mediante un haz luminoso con longitud de onda de 193 nanómetros (en el rango ultravioleta); su empleo se encuentra aún restringido.

c) La queratotomía radiada, miópica y astigmática. Se efectúa cirugía de manera que se conserva un área central libre de cortes y se debilita la periferia mediante incisiones radiales (ver 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 reseca una lamacela corneal que incluye: Epitelio, capa de Bowman y estroma con un grosor aproximadamente 300 micrómetros; ésta se congela y se talla para darle la potencia requerida y saturarla sobre su lecho original.

e) La queratomileusis BKS. Consiste en reseca, al igual que en el procedimiento anterior, una lamela corneal con los mismos elementos 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 **2** LA MEDICIÓN DE LA TOPOGRAFÍA CORNEAL

## 2.1. ¿PORQUÉ 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. Estos instrumentos proporcionan resultados que han permitido desarrollar técnicas para 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 información del sistema de visión humana, y con esto ayuden a obtener mejores resultados.



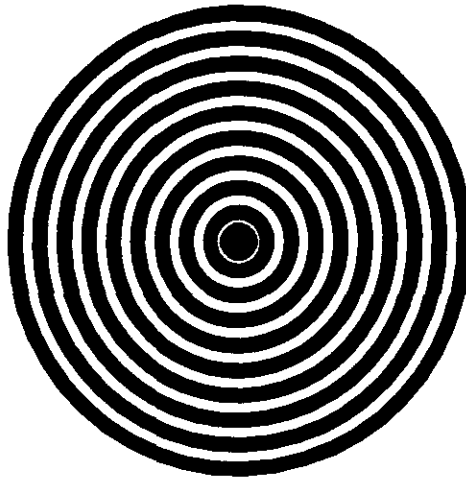
## 2.2. EQUIPOS COMERCIALES PARA LA MEDICION DE LA TOPOGRAFIA CORNEAL

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

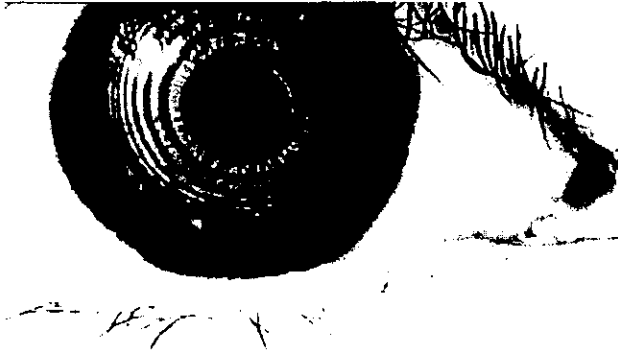
### 2.2.1. Disco de Plácido

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 éstos en el ojo ha estudiar, esto 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.

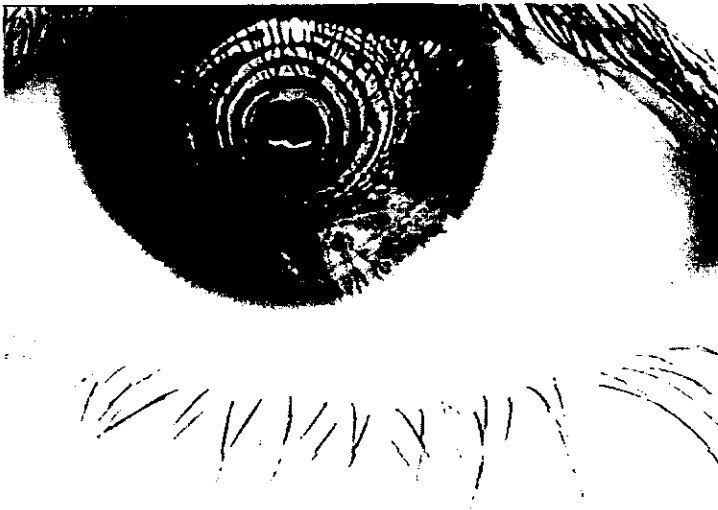
La forma como se ve el reflejo que produce el disco de Plácido sobre un ojo, puede apreciarse en la figura 2.2.



*Figura 2.1 Disco de Plácido*



(a)



(b)

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

### 2.2.2. Queratómetro de Javal-Schiotz

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

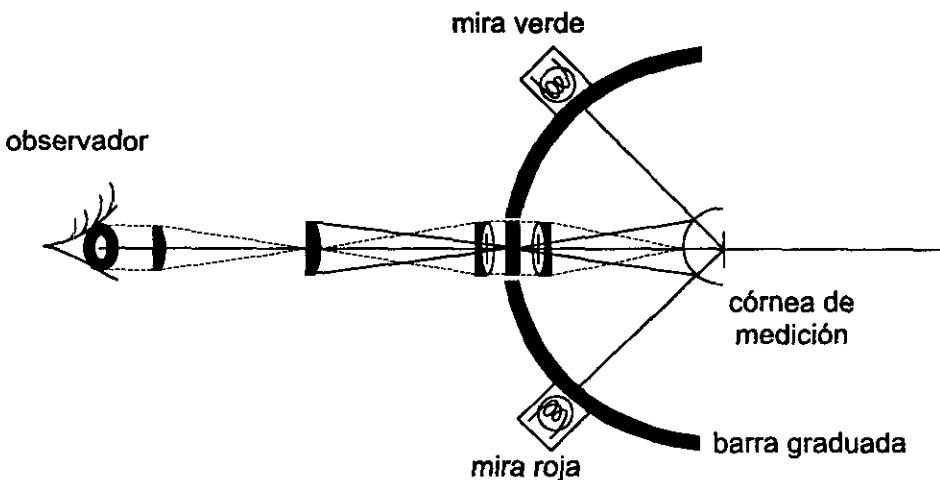


Figura 2.3 Queratómetro de Javal-Schiotz

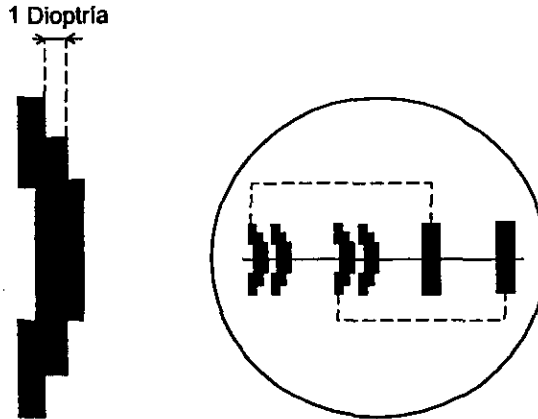


Figura 2.4 Imagen observada en el queratómetro de Javal-Schoitz

El radio de curvatura se determina mediante la siguiente relación:

$$r \cong 2d \frac{h_i}{h_o} \quad (2.1)$$

en donde  $h_i$  es el tamaño de cada una de las imágenes de las miras,  $h_o$  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 un mejor conocimiento punto a punto de la superficie y así conocer otras deformaciones.

### 2.2.3. Queratoscopio

Uno de los instrumentos que actualmente ofrece mejores resultados es el queratoscopio, 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.

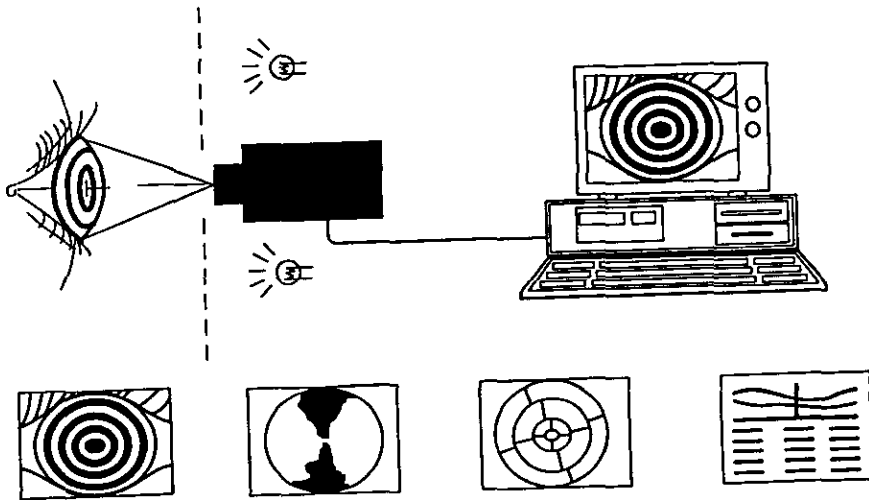


Figura 2.5 Queratoscopio por CCD

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, éstas producen deformación en la imagen de los anillos. El método que se sigue para analizar las imágenes consiste en trazar líneas radiales que

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 éstas, 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.

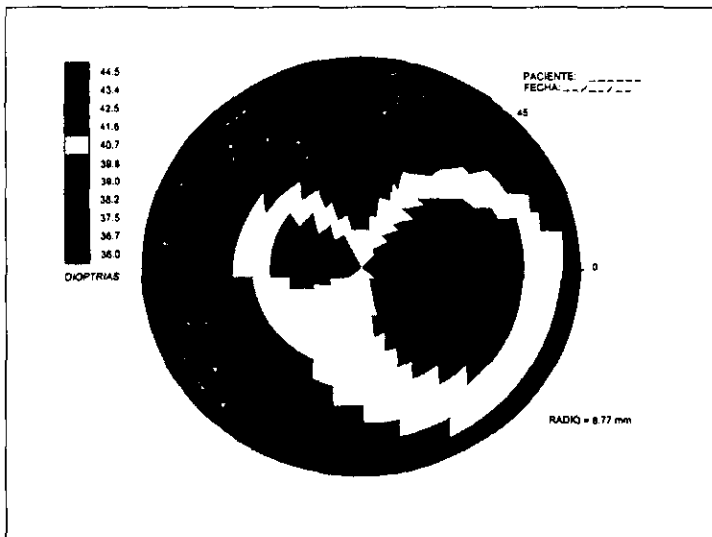


Figura 2.7 Imagen de resultados de un queratoscopio

### 2.2.4. Escáner

Existen también equipos ofrecidos por diferentes compañías, con bajo costo, que son capaces de proporcionar datos sobre la forma y características de la córnea utilizando una combinación del método del queratoscopio 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 queratoscopio 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 serán analizadas después por ecuaciones simples de geometría óptica. El equipo físico se muestra en la figura 2.9, un equipo de estas características proporciona información como la mostrada en la figura 2.8.

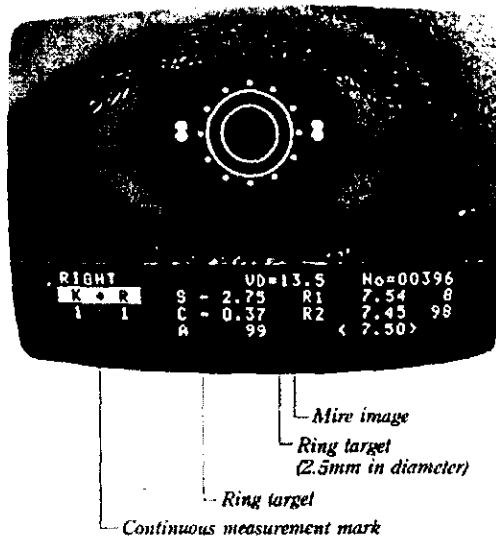
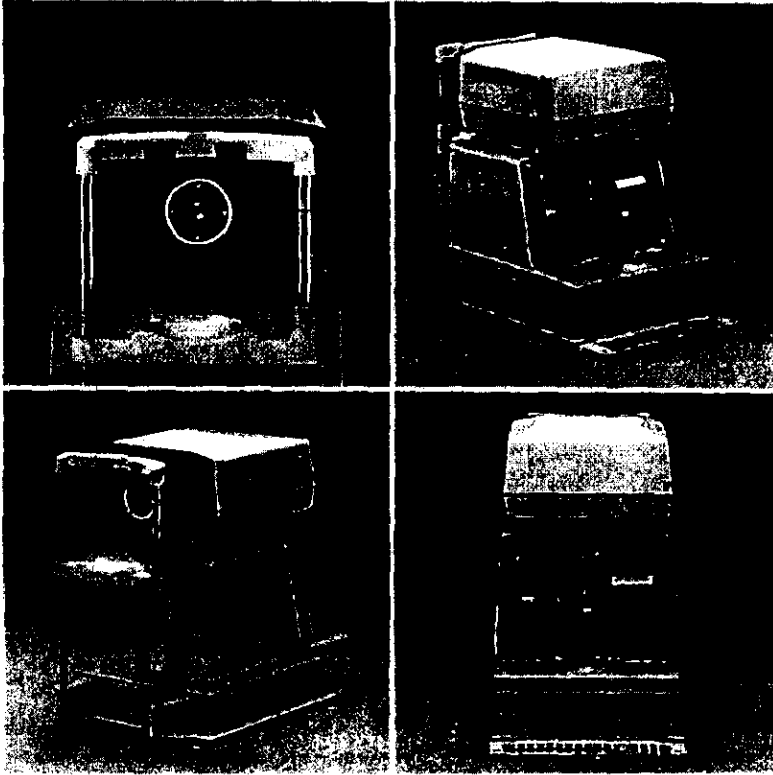


Figura 2.8 Información obtenida de un queratómetro CANON RK-2



*Figura 2.9 Queratómetro CANON RK-2*

### 2.2.5. 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 al 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. Las perspectivas que se plantean son favorables para tener una mayor precisión en la evaluación, sin embargo una posible deformación real no ha sido planteada.

## CAPÍTULO

# NUEVA PROPUESTA 3

Si tenemos en consideración las ventajas y desventajas de los sistemas antes mencionados, surge la idea de utilizar una teoría conocida como deflectometría, que junto con la interferometría, permitan desarrollar un instrumento que nos proporcione una mayor cantidad 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, su operación debe llevarse a cabo de una manera segura.

### 3.1. QUERATOPOGRAFÍA POR DEFLECTOMETRÍA LÁSER

#### 3.1.1. 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 poder llevar a cabo este método es necesario localizar en la curva los siguientes puntos: intersección, de tangencia y uno dentro de la curva, así como obtener el ángulo central  $\Delta$ , el cual es numéricamente igual a la deflexión del ángulo  $\Delta_1$ . Teneindo 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 [6].

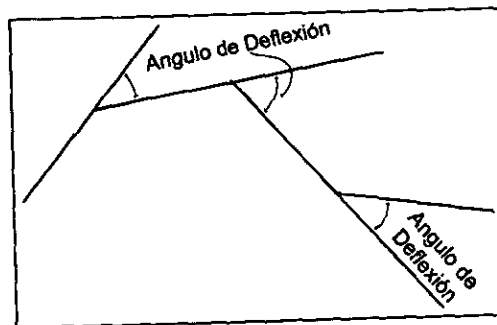


Figura 3.1 Angulo de deflexión

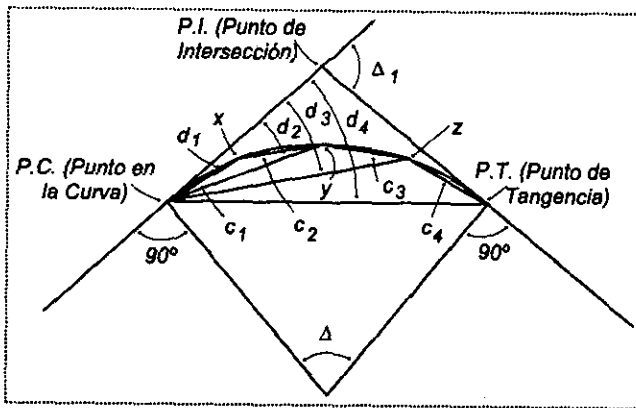


Figura 3.2 Deflectometría

### 3.1.2. Láser

Un láser es una fuente de radiación en la parte visible, infrarroja o ultravioleta, del espectro electromagnético. Sus siglas significan: "Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation", es decir, "amplificación de luz por medio de la emisión estimulada de radiación".

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

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

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  $10^{-8}$  s (figura 3.3).

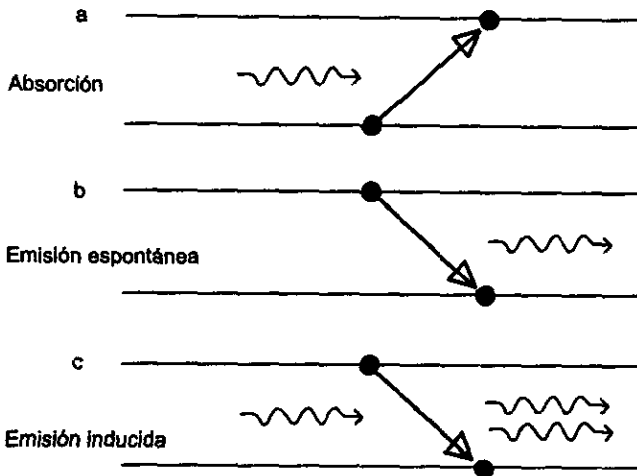


Figura 3.3. Efectos láser

- a) 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  $E_j$ .
- b) Este átomo excitado puede después radiar energía espontánea emitiendo un fotón y volviendo al estado  $E_i$ .

c) 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 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 en el número de fotones que viajan en cierta dirección.

Básicamente son cuatro propiedades que caracterizan a la luz del láser y 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 apropiados, 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 intensidad muy baja ( $\approx 1.5 \text{ mW}$ ) 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.
- d) GRAN COHERENCIA ESPACIAL. Se refiere al hecho de que el haz sale prácticamente de un punto (el diámetro del haz es menor a 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 una facilidad y claridad extraordinaria experiencias y prácticas que han sido tradicionalmente muy difíciles de lograr [20].

### 3.1.3. 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 las leyes de 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 los datos a partir de los cuales se evalúa la forma de la superficie corneal son los ángulos de incidencia y de reflexión.

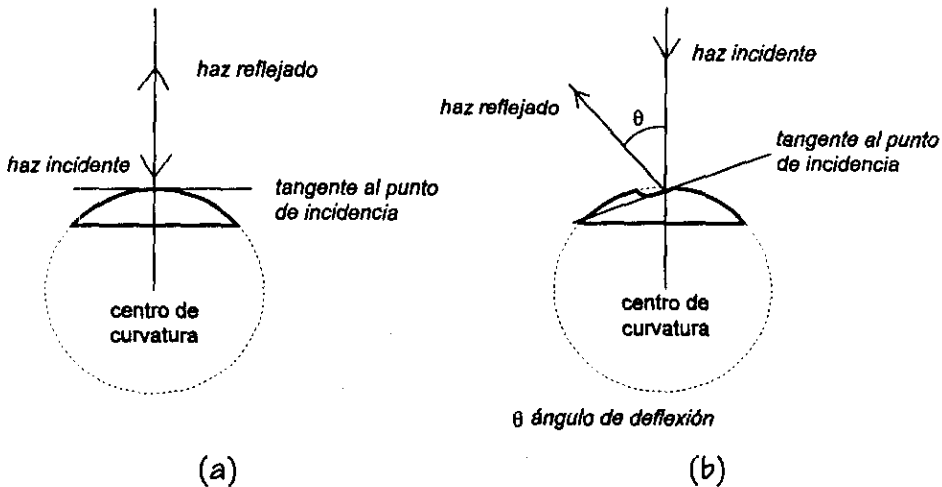


Figura 3.4 Diagrama de un haz incidente en diferentes superficies: a) esférica, b) deformada

### 3.2. SISTEMA PREVIO

Al contar con 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 proporcionarnos información para determinar el perfil de la córnea humana, con suficiente precisión y cantidad de datos para lograr recrear por simulación digital el estado real de ésta.

Por todo lo anterior, hace algunos años se desarrolló un sistema de *queratopografía por deflectometría láser*, el cual está conformado por los siguientes 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 realizará 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 de 1.7 [mW], el cual, primeramente pasa por un espejo a 45° 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:

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

$$v(t) = 4\omega_1 a \sin(\omega_1 t) \quad (3.3)$$

donde  $p(t)$  es la distancia que recorre la platina respecto a su centro,  $h$  es la diferencia de alturas entre el centro de giro de la manivela y el punto de unión de la biela con la platina,  $a$  es el tamaño de la manivela y  $l$  es la longitud de la biela.

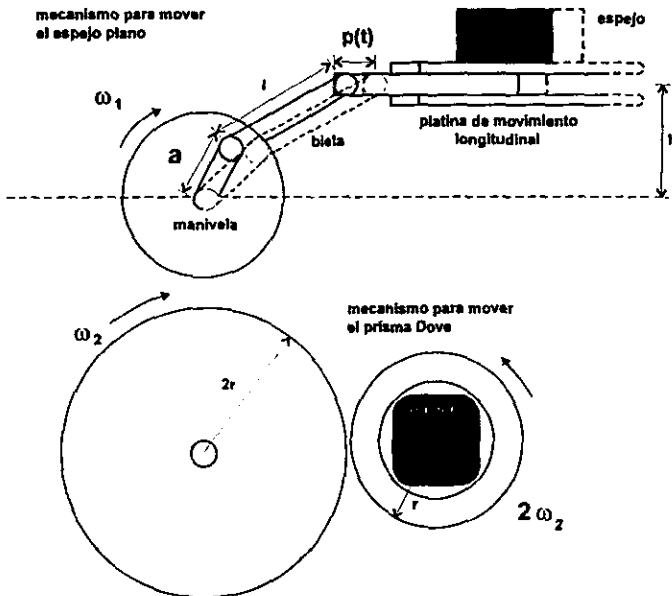


Figura 3.5 Esquemas de movimiento lineal y circular

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.

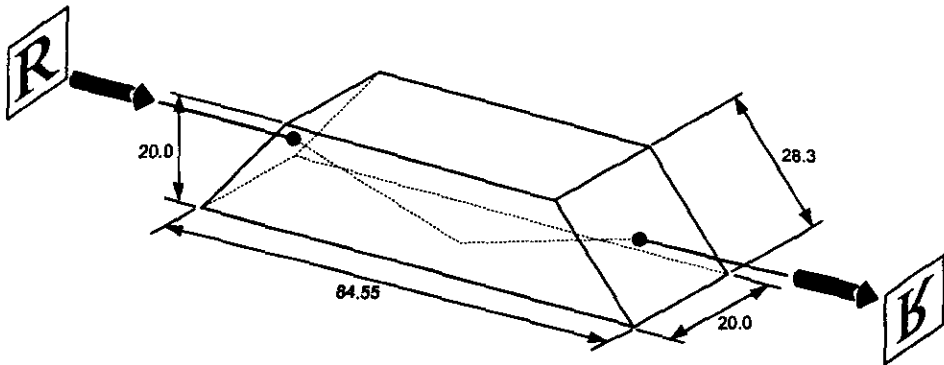


Figura 3.6 Prisma DOVE (dimensiones en mm)

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 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 el haz en un punto entre la córnea y la retina, desde donde diverge de nuevo y al llegar a la retina cubre un área mayor que en ausencia de la lente, disminuyendo así la irradiancia del haz. 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 de película 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 un retardador de  $\frac{1}{4}$  de longitud de onda. Esta combinación evita que 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 de PC LAB, 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, U.N.A.M., logró proporcionarnos información valiosa para conocer la factibilidad del proyecto, proporcionando resultados tales como un tiempo de trabajo de 1 s, y la adquisición de 1000 datos.

### 3.2.1. Logros y carencias

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

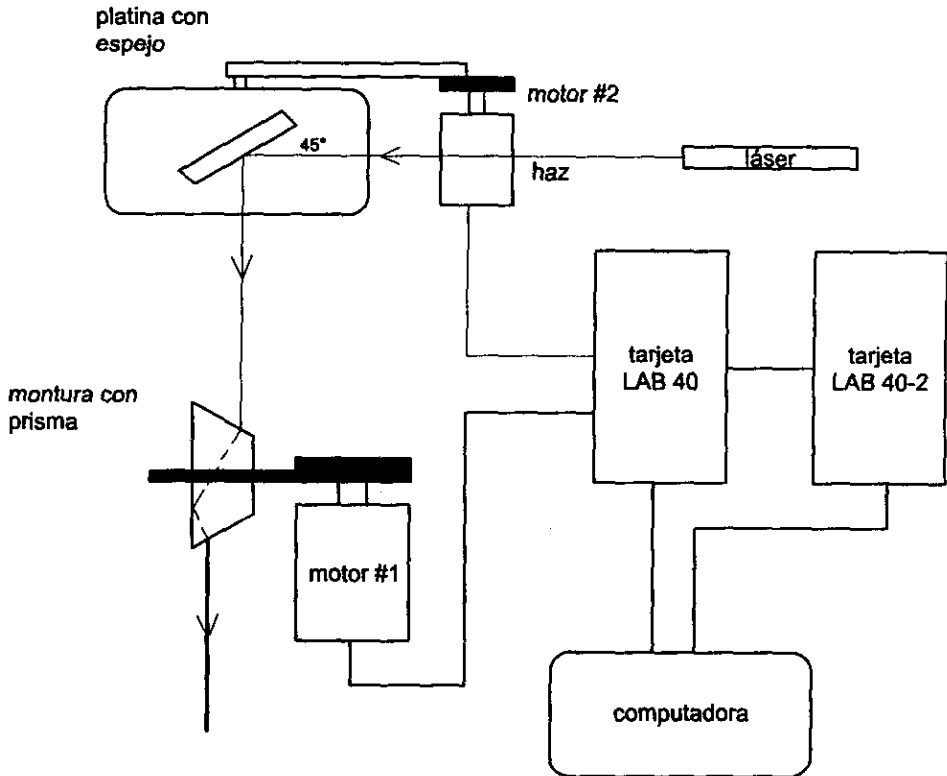


Figura 3.7 Diagrama del equipo

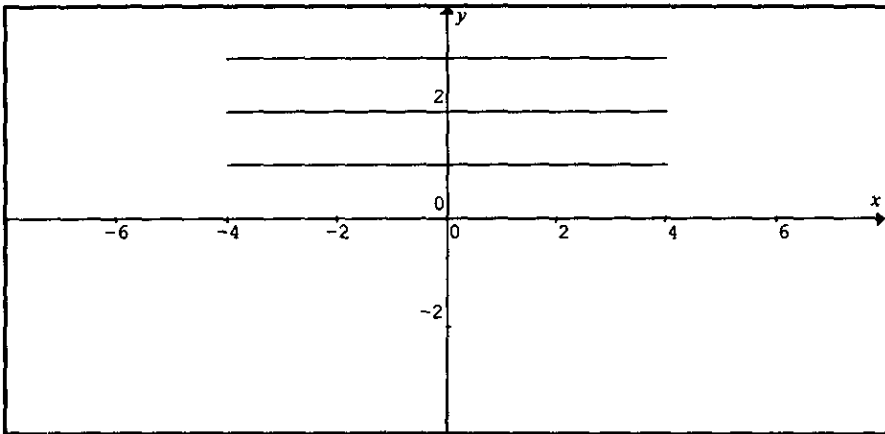
Respecto al sistema mecánico, se presentan desviaciones, denominadas "juegos o backlash", los cuales son inherentes a los mecanismos y formas de transmisión utilizados, que presentan inconvenientes para esta aplicación. En lo que respecta al sistema biela-manivela, debido a su giro, se producen velocidades lineales demasiado lentas debido a la velocidad del motor utilizado y a la características del sistema de conversión de movimiento, que no permiten disminuir la cantidad de tiempo (aproximadamente 1s) 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 éstos que generan 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 ésta presenta una curva de funcionamiento semejante a la mostrada en la figura 3.8(a); mientras que para la componente angular presenta un movimiento como el mostrado en la figura 3.8(b). La unión de ambos movimientos teóricos es mostrada en la figura 3.8(c).

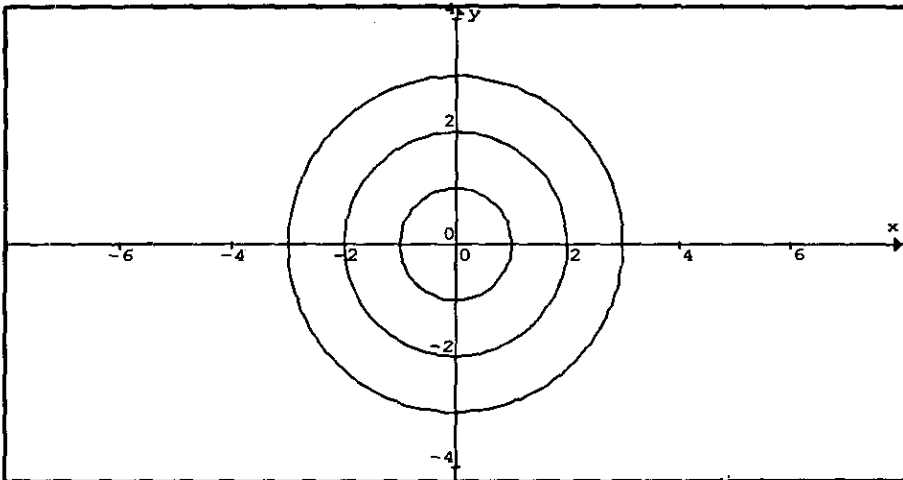
Cuando observamos una gráfica de los valores reales obtenidos del sistema (figura 3.9), llegamos a la conclusión de que existen una infinidad de elementos que proporcionan "ruidos" al sistema, los cuales son originados por diferentes fuentes (mecánica, electrónica, luminosa, etc.).

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 datos se realiza desde un programa en 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)

### 3.2.2. Limitaciones

Los resultados obtenidos con esta primera versión se encuentran dentro del margen de lo satisfactorio, sin embargo, la experiencia que se obtuvo con este equipo, así como las desviaciones encontradas en el movimiento, proponen como metas el refinamiento del movimiento final obtenido e incrementar la velocidad del proceso, con el fin de disminuir el tiempo de exposición de la retina al haz de láser. Por otro lado, el incrementar 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.

# CAPÍTULO

# ALTERNATIVAS 4

En nuestros días, la necesidad de hacer más accesibles los sistemas que el usuario emplea para satisfacer sus diferentes necesidades humanas, ha conducido a la interacción de varias áreas de la ingeniería y a la creación de un nuevo concepto, la mecatrónica. La aproximación integrada en el diseño de sistemas complejos de ingeniería envuelve a la ingeniería electrónica, la ingeniería mecánica y a la computación.

Como una definición, la mecatrónica es la combinación de ingeniería mecánica de precisión, control electrónico y sistemas 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 es desarrollar con imaginación el *hardware* mecánico, pero la mejor realización usualmente depende de una consideración de ingeniería electrónica de control y computación desde las más cercanas etapas del diseño.

#### 4.1. LA MECATRÓNICA Y EL DISEÑO EN INGENIERÍA

La ingeniería de diseño en el desarrollo de productos son, como se ilustra en la figura 4.1, procesos complejos que envuelven una interacción entre algunas técnicas y disciplinas.

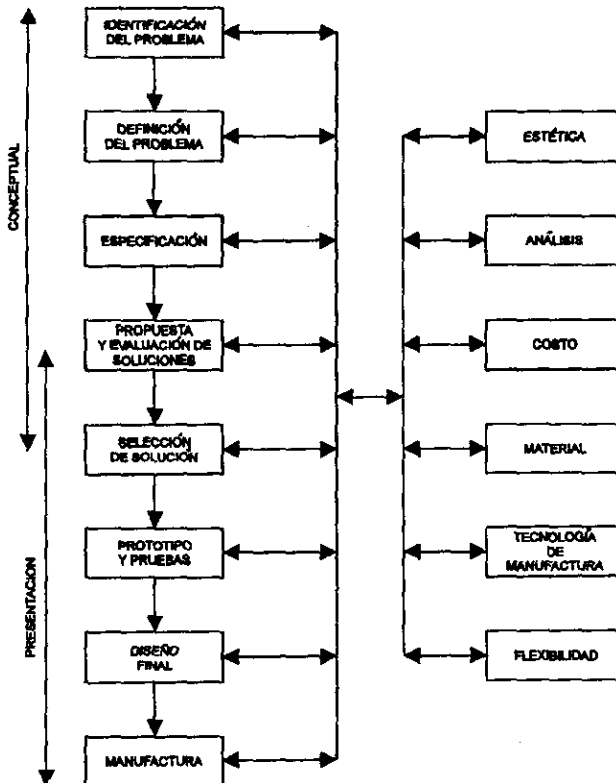


Figura 4.1. Proceso de diseño en ingeniería

Una característica de la mecatrónica en la ingeniería de diseño es que el sistema mecánico resultante envuelve pocos componentes y su uso es muy sencillo.

En ingeniería de diseño la mecatrónica representa y requiere de un ancho rango de material de información con la intención de fabricar sistemas donde el principal objetivo es hacerlos más flexibles y de mas alta eficacia que sus predecesores, puesto que incorporan un ancho rango de nuevas cualidades.

Un esquema de un módulo mecatrónico para la solución de un problema es el mostrado en la siguiente figura.

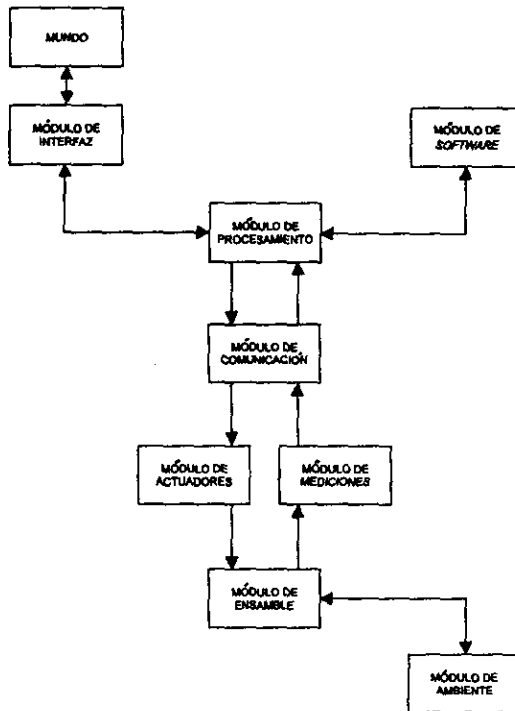


Figura 4.2. Diagrama de bloques de un sistema mecatrónico

El rol de cada uno de los módulos es el siguiente:

*Módulo del ambiente:* Este módulo se refiere a los parámetros externos como son rangos de temperatura, factores de carga y otros factores, los cuales pueden influir en forma directa en la operación del sistema. En nuestro sistema este módulo de ambiente está constituido por fuentes de ruidos ambientales que pueden afectar las lecturas, temperatura de trabajo de los dispositivos, etc.

*Módulo de ensamble:* Representa la realización física de los elementos mecánicos y estructurales del sistema. En este punto se integran los dispositivos mecánicos para lograr realizar el movimiento en forma de espiral.

*Módulo de mediciones:* Este módulo se refiere a la información generada por el sistema. Esta sección está conformada por el transductor que proporcionará la información de la posición del haz del láser.

*Módulo de comunicaciones:* Es lo concerniente a la transmisión de información entre los módulos dentro del sistema. Este módulo lo representa la tarjeta controladora que gobernará al sistema.

*Módulo de procesamiento:* Es donde se procesa toda la información proveniente de los módulos de interfaz y de medición. Una tarjeta de adquisición de datos realizará esta función para que los datos puedan ser adquiridos por la PC.

*Módulo de software:* Este módulo contiene las instrucciones de operación y define los algoritmos para el sistema y controles de operación del módulo de procesamiento. Este módulo sirve para poder visualizar el sistema desde la PC y se realiza con la ayuda de algún paquete de programación.

*Módulo de actuadores:* En este módulo se encuentran los músculos del sistema que nos ayudarán a cambiar las condiciones de éste. En

el sistema de queratopografía corneal este módulo lo conformarán el actuador lineal y el actuador angular.

*Módulo de interfaces:* Este módulo es el encargado de la transferencia de información entre los módulos del sistema. En este sistema el módulo estará constituido por el *hardware* necesario para comunicar al sistema de queratopografía láser con la PC [3].

## 4.2. NECESIDADES

Una vez que el sistema descrito en el capítulo anterior se caracterizó y evaluó, surge la necesidad de incorporar algunas modificaciones con el fin de mejorar el sistema y así poder cumplir con parámetros tales como la disminución de ruido y tiempo empleado en la medición y el 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 comprendido entre 1/10 y 1/60 s), esto con el fin de exponer el menor tiempo posible al ojo del láser, así como también para no captar movimientos involuntarios del ojo.
- ✓ Generar un mayor número de espirales ( mayor a diez).
- ✓ Detectar y eliminar en la medida de lo posible, los "ruidos" que generan errores en la toma de lecturas y que por consiguiente generan aproximaciones erróneas de la superficie a medir.
- ✓ Diseñar un nuevo sistema de control que permita un mejor manejo y sincronización de arranque de los dispositivos.
- ✓ Mejorar el sistema de captura de datos, con el fin de proporcionar un mayor número de datos bajo las nuevas condiciones de operación.

- ✓ Realizar un programa en computadora para manejar el equipo de una forma sencilla.

### 4.3. ALTERNATIVAS

Para solucionar las nuevas necesidades de este prototipo, es necesario tomar en cuenta diferentes alternativas que sean factibles y que, principalmente, nos den la oportunidad de discernir entre ellas, para tener una mejor perspectiva de cual es la mejor solución.

#### 4.3.1. Movimiento lineal

En el sistema de queratopografía láser el tiempo de duración del proceso está determinado por la velocidad del dispositivo encargado de realizar el desplazamiento lineal. La magnitud de este movimiento debe de ser igual al radio promedio de la córnea humana que, como se mencionó en un principio, es del orden de los 6 mm.

En el punto anterior se estableció el tiempo en el cual se debe realizar la prueba, por lo que la velocidad a la cual debe moverse el actuador lineal a elegirse deberá estar comprendida entre los 60 y 360 mm/s.

Después de realizar un análisis de 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 que se manifiestan principalmente como generación de calor en los dispositivos e imprecisión en movimientos debidos a las características propias de los mismos, así como la complejidad que involucran los maquinados de muy alta precisión.

Lo anterior nos lleva a buscar alternativas que proporcionen el movimiento lineal como primer resultado de conversión de movimiento. Ejemplos de este tipo de dispositivos son los actuadores neumáticos, hidráulicos y magnéticos.

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 conseguirse a un bajo costo.

Los actuadores neumáticos de la marca FESTO ofrecen una gran variedad en cuanto a velocidades, fuerzas, tamaños y calidad 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.

Considerando el bajo peso que se tiene el espejo que se desplaza linealmente, la fuerza de empuje necesaria para realizar este movimiento podrá ser también baja.

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

#### 4.3.2. Movimiento circular

Las características del movimiento circular (angular) están estrechamente relacionadas con la velocidad del actuador, ya que de esto depende el número de vueltas que tendrá la espiral después de haber realizado el barrido de la superficie de la córnea, es decir, entre

más veloz sea el actuador neumático, más veloz tendrá que ser el motor que se necesitará.

Se analizaron diferentes opciones para seleccionar el motor para generar la componente angular del barrido, entre las cuales se encuentran motores neumáticos, motores de DC y motores de AC. De esta terna de alternativas encontramos que los motores neumáticos ofrecen un alto par, pero sin lograr alcanzar las velocidades las revoluciones por minuto requeridas; así también, los sistemas de control para este tipo de dispositivos no son tan accesibles.

En el caso de los motores de corriente alterna, tenemos que estos tiene un excelente par y son más sencillos de adquirir en el mercado, a un costo relativamente bajo, a pesar de la velocidad requerida, pero tiene el inconveniente de que los sistemas de control de velocidad para este tipo de motores son costosos.

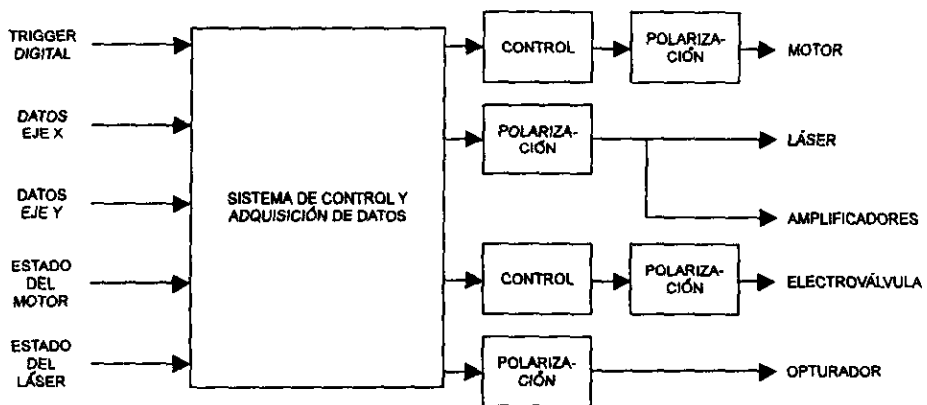
Como última opción se tiene el motor de DC, el cual sería mucho más sencillo de controlar, por lo cual es la solución más sensata puesto que también entregan pares considerables, aunque con la única desventaja de que el precio es superior al de un motor de AC, sin considerar la dificultad para adquirirlos este tipo de motores en el mercado nacional.

### 4.3.3. Control y adquisición de datos

Para la etapa de control y adquisición de datos se consideró la cantidad de datos que se deberían capturar y la cantidad de entradas y salidas necesarias para un control preciso del sistema.

La cantidad de datos que el investigador desea obtener del nuevo sistema es de un promedio mayor a 8000 datos por cada proceso que se realice, por lo que, si observamos el tiempo que requiere la prueba, la frecuencia de muestreo estará entre 80 y 5000

Kmuestras/s, pero como se trata de una trayectoria en espiral, se tienen que tomar medidas en dos ejes, por lo que la velocidad de muestreo se duplica si se quiere utilizar un solo convertidor analógico digital y en realidad la frecuencia de muestreo estará comprendida entre 160 y 1000 Kmuestras por segundo. Para el caso de la parte de control, un diagrama general es el mostrado en la figura 4.7, en donde podemos observar que se necesita al menos un puerto de seis bits bidireccionales y 1 salida analógica con fines de control.



*Figura 4.7. Diagrama del sistema*

Para la solución de este problema contamos con las siguientes alternativas:

- ✓ Módulo de adquisición de datos marca IOtech modelo Wavew Book/512, cuyas características son:
  - Módulo diseñado bajo tecnología DSP lo que provee una calibración digital en tiempo real.
  - 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.
  - 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.
- ✓ Tarjeta de adquisición de datos marca National Instruments modelo AT-MIO-16E-1, con las siguientes características:
- Uso de una tecnología normal donde el control del sistema lo tiene un *microcontrolador* de adquisición de datos.
  - Velocidad de muestreo de 1.25 Mmuestras/s repartida en 16 entradas simples o 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 *timming* interno y 950 Kmuestras/s con *timming* externo.
  - Cuenta con *trigger* digital y analógico, etc.
  - Tiene un ancho de banda de 1.6 MHz.
- ✓ Elaboración de un circuito convertidor analógico digital fabricado con circuitos integrados comerciales, cuyas características son:
- Tiene que ser implementado directamente para el bus ISA o EISA, ya que las velocidades de captación de datos por los puertos paralelo y serie de la máquina son muy bajas.
  - Costo más bajo en comparación con las tarjetas comerciales.
  - Implica demasiado tiempo de desarrollo.

#### 4.4. SELECCIÓN DEL SISTEMA DE CONTROL Y ADQUISICIÓN DE DATOS

En esta parte del trabajo se hace una evaluación de las alternativas antes mencionadas, pues todas son muy atractivas para la solución del problema.

El módulo de adquisición de datos Wavew Book/512 es muy atractivo, pues por su flexibilidad se adapta perfectamente a las necesidades que requiere el sistema, además de que puede emplearse en otros proyectos. Otro de los aspectos que la hacen ser muy atractiva es la tecnología DSP que utiliza pues agiliza todo tipo de operaciones a realizar con la información adquirida. Una de las desventajas sería que no cuenta con salidas analógicas, y la desventaja principal es el costo pues es demasiado alto y queda fuera del presupuesto del proyecto.

La alternativa de realizar el desarrollo de una tarjeta de adquisición de datos queda fuera de nuestras opciones, puesto que llevar a cabo esto representaría demasiado tiempo.

Después de haber hecho una evaluación de las opciones se determinó que lo mas conveniente es el uso de la tarjeta de adquisición de datos de *National Instruments* por las siguientes razones:

- Cumple con las necesidades primarias del sistema.
- La velocidad de comunicación con la computadora es alta por estar instalada directamente en el bus serial ISA o EISA de la computadora.
- La flexibilidad para utilizarse en varias aplicaciones por su gran capacidad de funciones electrónicas. Aunque su costo es elevado se cuenta con los recursos económicos para su adquisición

- Se cuenta con el *software* para su programación, LabView, el cual nos permite obtener un programa bajo un ambiente muy sencillo de utilizar.

## CAPÍTULO

# DESCRIPCIÓN DEL **5** QUERATOPÓGRAFO LÁSER

El nuevo sistema de queratopografía láser está formado por subsistemas, los cuales cumplen diferentes funciones específicas para que, en conjunto, logren el objetivo de dar información acerca de como está formada la superficie de una córnea. El diagrama del nuevo sistema se muestra en la figura 5.1.

Este sistema está formado principalmente por el subsistema óptico que se encarga de dirigir el haz del láser a la córnea; el subsistema mecánico que es el cuerpo del sistema, el cual fue diseñado para que el proceso se realizara de la mejor forma posible, es decir, que exista la menor fricción posible entre los componentes, que las piezas empleadas sean de las características adecuadas para el uso que se les dará, etc.; y el subsistema de control y adquisición de datos donde se gobernará al sistema y nos servirá para desplegar en el monitor de la computadora la información obtenida acerca de la forma de la córnea.

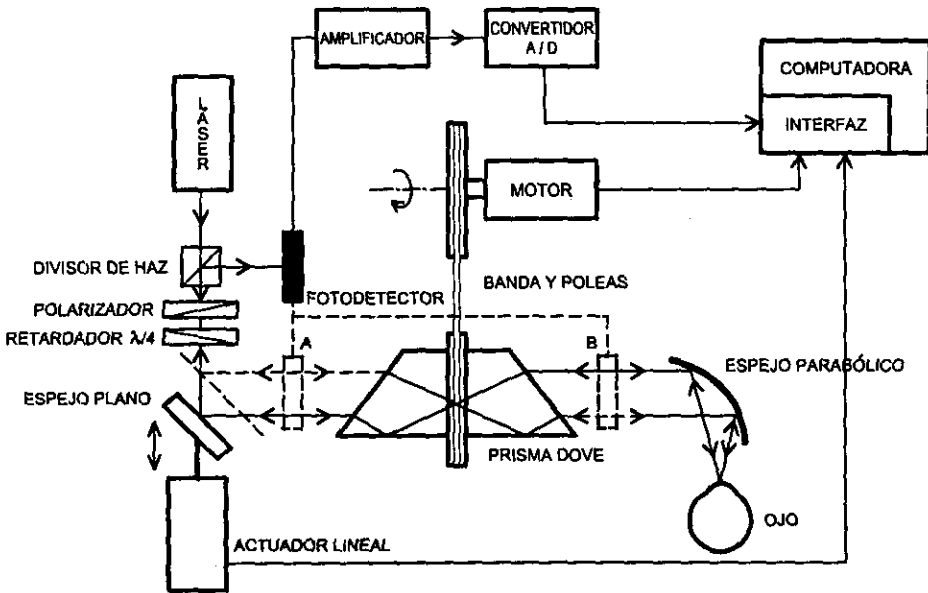


Figura 5.1 Sistema de queratografía láser

## 5.1. SUBSISTEMA ÓPTICO

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 a la manera en que la información sobre el ángulo de reflexión del haz reflejado en la córnea conducirá a deducir su topografía.

### 5.1.1. Láser

El láser utilizado es de He-Ne marca Spectra-Physics modelo 117 A, con una potencia de 1.7 mW y 633 nm de longitud de onda con estabilización en frecuencia e intensidad de la clase IIIa.

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.

El diámetro del haz láser es de  $26.6 \mu\text{m}$  @ 17 mm de distancia de proyección, y su potencia de 1.7 mW. De lo anterior se obtiene que la potencia producida por unidad de área del láser utilizado es de  $865.8 \text{ mW/cm}^2$ .

#### 5.1.1.1. Seguridad ocular

Una aproximación básica de casi todos los estándares de seguridad ocular para el uso de láseres ha sido la de clasificarlos por sus riesgos potenciales basados en sus emisiones ópticas, y entonces, especificar medidas de control las cuales están en proporción de los riesgos relativos de la clasificación.

La ANSI<sup>1</sup> estableció en 1986 estándares de seguridad para el uso de láser en su norma No. Z-136.1 de 1986 [14]. Esta norma engloba la clasificación de los láseres por la intensidad del haz emitida por el láser (límite de emisión), si éste es utilizado por si solo, o de un sistema completo si el láser forma parte de un sistema de

---

<sup>1</sup> American National Standard Institute

láseres donde las características del haz dependen del sistema. Básicamente, el esquema de la clasificación de los láseres es utilizado para describir la capacidad de lesiones en personas. Una descripción de cada una de las clasificaciones se muestra a continuación:

- ✓ 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 puede presentar algunos potenciales de riesgo si son vistos por extensos 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 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 No. Z-136.1.

Tipo de láser	Longitud 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 <sup>3/4</sup> 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 <sup>1/4</sup> J/cm <sup>2</sup> de 100 ns a 10 s; y 0.2 W/cm <sup>2</sup> para mayores tiempos
Helio-Enón	632.8 nm	0.5 $\mu\text{J}/\text{cm}^2$ de 1 ns a 18 $\mu\text{s}$ ; 1.8t <sup>3/4</sup> 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 <sup>3/4</sup> 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 <sup>1/4</sup> 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 <sup>3/4</sup> 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 <sup>1/4</sup> J/cm <sup>2</sup> de 100 ns a 10 s; y 0.5 W/cm <sup>2</sup> para mayores tiempos
Dióxido de Carbono	10.6 $\mu\text{m}$	10 mJ/cm <sup>2</sup> de 1 ns a 100 ns; 0.56t <sup>1/4</sup> 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 límites de exposición ocular.

Tabla 5.1 Límites de exposición ocular y de piel para los tipos de láseres más comunes

De la tabla anterior podemos observar que la "Máxima Exposición Permitida" (MPE) está dada por la siguiente formula:

$$\text{MPE} = 1.8t^{3/4} \text{ mJ/cm}^2 \quad (5.1)$$

Para nuestro caso el tiempo de exposición estimado es de 16 ms aproximadamente por lo que la máxima exposición permitida es:



$$\text{MPE} = .04498 \text{ mJ/cm}^2 \quad (5.2)$$

O bien, si se divide entre el tiempo de exposición:

$$\text{MPE} = 5.06107 \text{ mW/cm}^2 \quad (5.3)$$

Por otro lado tenemos que el diámetro de la mancha luminosa que produce el haz de láser en la retina es de aproximadamente 26.6  $\mu\text{m}$ , por lo que la potencia por unidad de área del láser será de:

$$\text{PUA} = 216.45 \text{ mW/cm}^2 \quad (5.4)$$

Como se puede observar la potencia del láser es mucho mayor a la permitida por los estándares de la ANSI, sin embargo, el paso del láser por los dispositivos ópticos propicia una caída en la potencia de éste que va del 60 al 90%, así como también el sistema está diseñado para enfocar el haz del láser en un punto entre la cornea y la retina .

## 5.1.2. Componentes ópticas

### 5.1.2.1. Prisma Dove

El prisma Dove es utilizado como rotador de imágenes en una gran variedad de sistemas optomecánicos. Cuando el prisma está girando, la imagen que pasa a través de éste girará al doble de la velocidad a la cual esté girando el prisma.

El uso de este componente óptico en el sistema es importante, ya que aparte de ayudarnos a realizar el movimiento necesario para obtener la espiral, nos ayudará en el aspecto del motor a utilizar, pues por su característica de duplicar la velocidad, la velocidad de éste

será de la mitad de la velocidad necesaria para obtener el número de espirales deseado.

Un prisma DOVE convencional consta básicamente en dos caras refractantes a  $45^\circ$  con respecto a una cara interna reflectante. Este tipo de prismas requieren de gran calidad en su proceso de fabricación, dado que los errores generados 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" formado por la intersección de los planos de las dos caras de transmisión 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, esto para no provocar desviaciones en la salida del eje. Este tipo de montura no evita el error de pirámide antes mencionado.

El prisma Dove utilizado en esta aplicación es de la marca *Manufacturers of Optics* modelo 01PDE005.

#### 5.1.2.2. Retardador y Polarizador $\lambda/4$

Debido a que el haz reflejado en la superficie de prueba puede regresar a la cavidad del láser y desestabilizarlo, se interpuso entre éste y el divisor de haz un polarizador y un 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.

### 5.1.2.3. Divisor de haz

Con el fin de dirigir el haz láser a un fotodetector, el cual 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. Se eligió un divisor de película, el cual cumple con la característica de no generar haces múltiples. El divisor empleado desviará el haz proveniente de la superficie de medición 45°.

### 5.1.2.4. Espejo parabólico

En este sistema se introduce el uso de un espejo parabólico fuera de eje. Este tipo de elemento reflector es utilizado en sistemas donde el límite de reflexión no es esencial, y en nuestro caso esto nos trae beneficios pues reducirá la potencia del haz incidente en la córnea. Otro beneficio que trae consigo el uso de este espejo es la posibilidad de localizar de forma correcta un punto focal lejos de la zona de peligro del ojo, evitando así, cualquier riesgo que pueda presentarse debido a una exposición directa del haz.

El espejo parabólico utilizado es de la marca *Melles Griot* modelo 02POA019.

### 5.1.3. Sensor de posición XY

Un fotodetector es un transductor de estado sólido empleado para convertir energía luminosa en energía eléctrica. Las aplicaciones de este tipo de dispositivos se han expandido rápidamente para la obtención de medidas de ángulos, distancia, altura, uniformidad de

superficies, centrado y otros parámetros relacionados con el sentido de posición.

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

Los principales sistemas de sentido de posición son tres: El arreglo multielemento, los detectores biceldas y los detectores de efecto lateral.

#### 5.1.3.1. Arreglos multielemento

El concepto tradicional de detectores para el sentido de posición es que éstos están formados por un arreglo de fotodiodos. Un haz de luz colocada sobre el arreglo induce fotocorrientes en los elementos iluminados, por lo tanto todos los elementos están muestreando para determinar la posición del haz incidente.

Este tipo de arreglos tienen dos grandes desventajas: Su mayor resolución está definida por el tamaño de píxeles y el haz de luz colocado debe ser menor que el tamaño de un pixel. Si el tamaño del haz es mayor, se debe calcular la localización del centroide para medir la salida de varios elementos adyacentes. Sin embargo esto incrementa la complejidad para analizar los datos.

#### 5.1.3.2. Detectores de cuadrante y bi-celdas

Un arreglo simplificado de una bi-celda o detector de cuadrante sobrelleva las desventajas de un arreglo multielemento en ciertas aplicaciones.

Las características del detector de cuadrantes es que tiene cuatro elementos de sensado en un solo chip. Para una resolución óptima, el tamaño del haz colocado sobre el sensor debe ser lo más pequeño posible, sin ser menor que el espacio entre las celdas. Las magnitudes de las salidas de las celdas individuales permite el cálculo de la posición del haz de luz colocado con respecto al centro del detector.

Con los diodos bi-celda y sensores de cuadrante, la resolución de posición es excelente, pero esto depende relativamente del diámetro del haz. También el rango dinámico es limitado por la función de transferencia del diodo, la cual es lineal únicamente al centro de movimiento. Con resoluciones de 0.1 micrómetros o mejores, las bi-celdas y los sensores de cuadrante son ideales para utilizarse en centrados de precisión y para el seguimiento de posición sobre rangos angostos.

### 5.1.3.3. Diodos de efecto lateral

Muchas aplicaciones requieren un ancho rango en el área de sensado de posición. Esto se logra al utilizar diodos de efecto lateral, los cuales nos ofrecen también una alta resolución y linealidad. Estos diodos difieren de las celdas de cuadrante y de los arreglos multielemento, porque solo utilizan un fotodiodo simple con capacidad de detección continua, eliminando las regiones muertas que en otros casos existen entre las celdas.

La posición está dada por la división de electrones fotogenerados dentro de la región  $N$ , más que por la intensidad del haz perfilado sobre la superficie. Por lo tanto, un fotodiodo de efecto lateral de 2 ejes actúa como un par de resistencias variables de control de luz para medir la posición de un haz de luz colocado sobre los ejes coordenados  $X$  y  $Y$ .

La función de transferencia del comportamiento de los diodos de efecto lateral se muestra en la figura 5.2. Como se puede observar estos diodos tienen un ancho rango dinámico, lo cual los hace perfectos para nuestras necesidades. En la realidad, la mayoría de unidades muestra una linealidad dentro del 0.5% sobre el 25% del área central activa, dentro del 3% fuera del 75% y dentro del 5% fuera de la periferia.

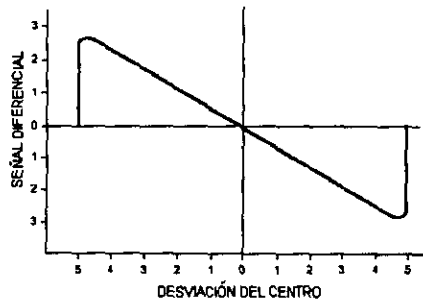


Figura 5.2 Gráfica de la función de transferencia de un fotodiodo de efecto lateral

Muchas técnicas de construcción son empleadas, no obstante, para dispositivos con buena 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 5.3 se muestra como están fabricados los fotodiodos antes mencionados.

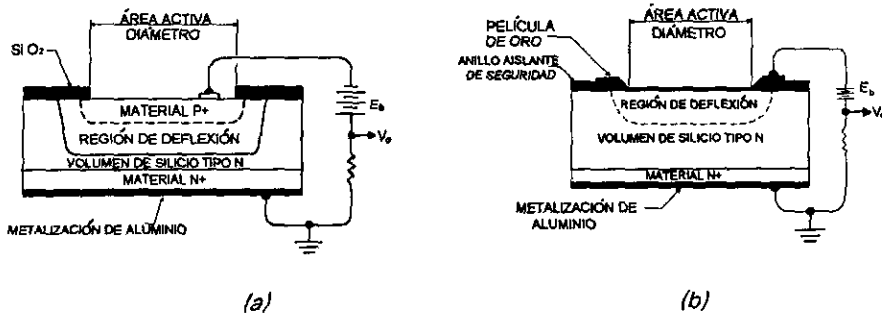


Figura 5.3 (a) Construcción de un fotodiodo de efecto lateral;  
(b) Construcción de un fotodiodo de barrera Schottky

A continuación se describe el funcionamiento y el circuito equivalente de estos dispositivos.

### a) Funcionamiento

Cuando un fotón de luz con suficiente energía es absorbida por el fotodiodo, un par electrón-hueco es excitada (figura 5.4). La fotocorriente se crea cuando la pareja electrón-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 se 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 fuera del área de vaciamiento.

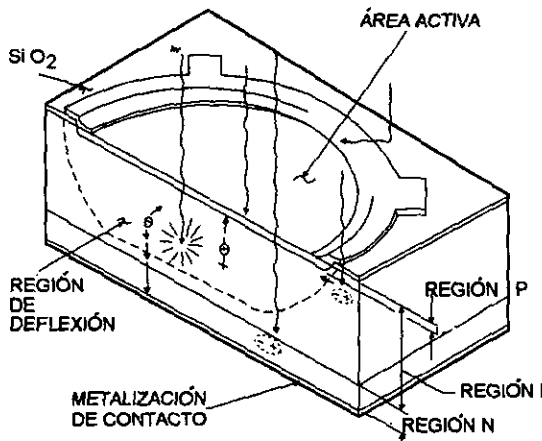


Figura 5.4 Funcionamiento del fotodiodo

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 mas allá de ésta. La profundidad que un fotón penetra está 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, lo cual permite detectar luz con niveles de potencia de nanoWatts, y en algunos casos de picoWatts.

## b) Circuito equivalente

La región de tipo N se comporta como el cátodo y siempre es hecha positiva. La región P es el ánodo y es hecha negativa. Los electrones fluyen de la región de tipo P a la región de tipo N dentro del fotodiodo y la fotocorriente fluye de la región de tipo P a la región de tipo N en la parte de afuera del circuito. Si una carga fuera conectada en serie con el fotodiodo, la fotocorriente hará que se cree



una diferencia de voltaje en la resistencia. En la figura 5.5 se muestra el circuito equivalente de un fotodiodo tipo PIN.

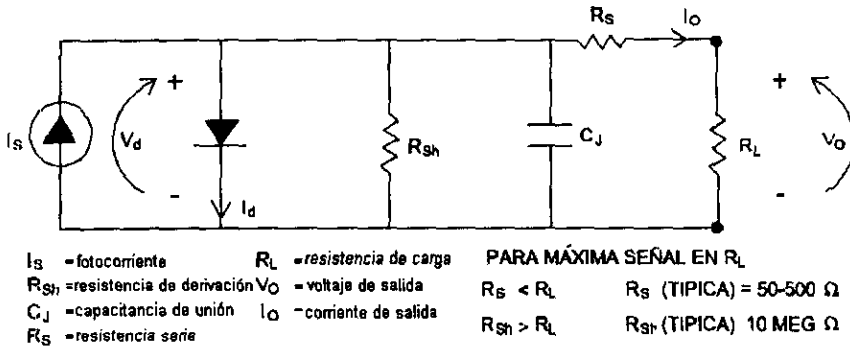


Figura 5.5 Circuito equivalente del fotodiodo de efecto lateral tipo PIN

## 5.2. SUBSISTEMA MECÁNICO

### 5.2.1. Componente lineal (radial)

Esta componente se obtiene al utilizar un actuador lineal de la marca *FESTO* modelo EZH-10/40-40-A. Este actuador trabaja en un rango de presión de 3 a 6 Bar y se mueve a una velocidad de aproximadamente 500 mm/s según datos del fabricante.

En el actuador se sujetará una base que aloja un espejo aluminizado por el frente que reflejará el haz láser con un ángulo de 45°; la base se desliza sobre un rodamiento lineal de la marca *IKO* 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 kgfm), 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 pudiesen presentarse. En la figura 5.6 se muestra una fotografía del subsistema antes descrito.

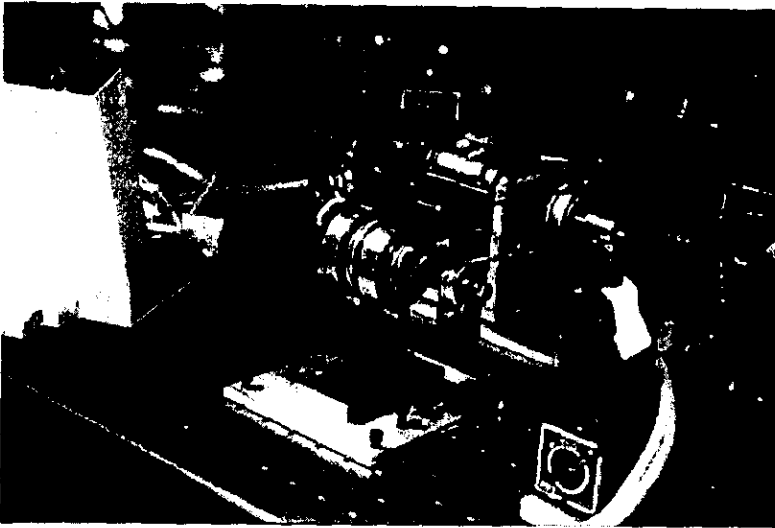


*Figura 5.6 Componente lineal del Queratopografo láser*

### 5.2.2. Componente circular (angular)

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 nylon 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, lo cual nos proporcionan 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, 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 15,000 rpm, el cual no es fácil conseguir con las características de par necesarias para romper con el momento total demandado durante el período de aceleración, razón por la cual en esta etapa de desarrollo se utilizará uno de corriente alterna de 1 HP, 120 V, 5 A y 30,000 rpm. En la figura 5.7 se muestra la fotografía de la parte del equipo donde se genera el movimiento angular.



*Figura 5.7 Componente angular del Queratopógrafo láser*

## 5.3. SUBSISTEMA DE CONTROL Y ADQUISICIÓN DE DATOS

### 5.3.1. Control del motor

En este punto se desarrolló el sistema de control empleado para el motor de DC y de AC, puesto que el motor de DC ideal para este sistema no se consigue en nuestro país y eso retrasaría la etapa del proyecto que se reporta en este trabajo.

### a) Control del motor de DC

En el caso de utilizar el motor de DC, con el fin de satisfacer las necesidades de diseño y por cuestiones de precisión fue necesario diseñar un control de velocidad para garantizar rpm constantes.

El sistema de control de velocidad para el motor de DC estabiliza la velocidad del motor a 8000 rpm. Este control está hecho en base a 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 que manda una señal casi 0 volts 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:

$$N = \frac{F}{n} \times 60 \text{ [rpm]} \quad (5.5)$$

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 la cual es igual a aplicar la función *EXOR* a las señales de entrada. La señal obtenida del comparador es filtrada mediante un filtro paso bajas, para obtener el valor promedio de la señal, 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 5.8).

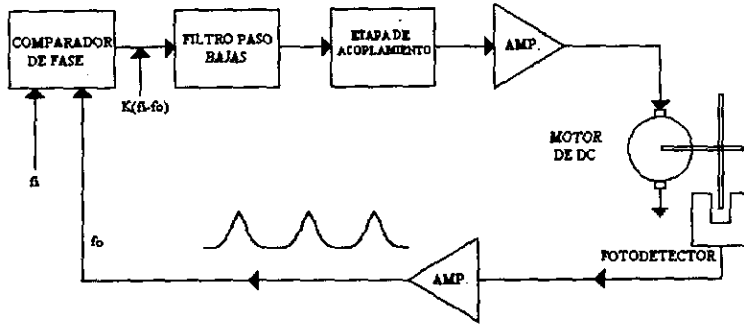


Figura 5.8 Diagrama del control de velocidad

Para la implementación se emplea el circuito integrado MC14046. Este integrado es un PLL el cual contiene un VCO (oscilador controlado por voltaje), dos comparadores de fase digitales una fuente de bajo voltaje y un diodo zener. El diagrama de conexiones se muestra en la figura 5.9.

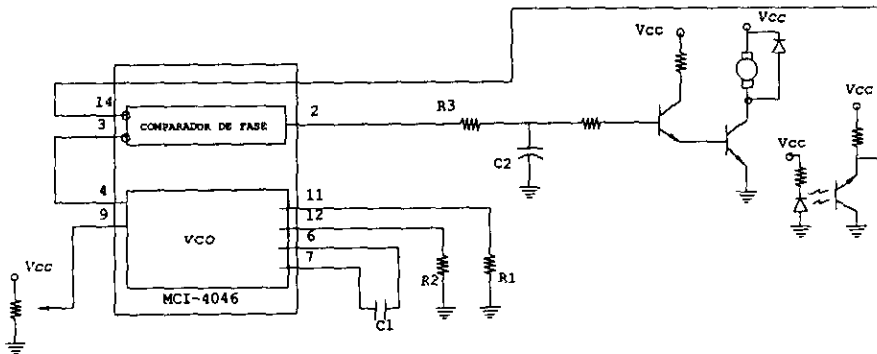
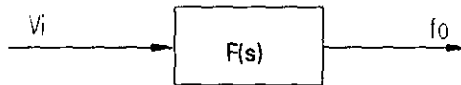


Figura 5.9 Circuito para controlar la velocidad de un motor de DC

## b) Control del motor de AC

En el caso de utilizar un motor de AC se utiliza como controlador de velocidad un variac, el cual es un autotransformador variable. El variac empleado es de la marca Electro Industrias Delta modelo CH 140-10 cuyas características de voltaje de entrada son de 127 V 60 Hz y entrega a la salida un voltaje entre 0 y 140 volts, pudiendo soportar una carga hasta de 10 A. El diagrama de bloques de este control se muestra en la figura 5.10. Como se puede observar es un sistema de lazo abierto el cual no nos garantiza un buen control sobre la velocidad, aunque se tendrá que analizar las variaciones de la velocidad para observar como repercuten en la captación de datos.



*Figura 5.10 Diagrama de bloques del control del motor de AC*

### 5.3.2. Control del actuador neumático

Para realizar el control del actuador neumático se hace uso de una electroválvula de la marca FESTO modelo JMZ-5/2-1.5-L-LED; los estados de ésta son controlados directamente desde el control de accionamiento el cual esta restringido por la posición del prisma Dove. La interfaz con la tarjeta de adquisición de datos se logra mediante el uso de circuitos de acoplamiento óptico, para evitar que la tarjeta se dañe en el caso de tener algún problema en la etapa de potencia. Los optoacopladores utilizados son del modelo 4N38, el cual es un acoplador óptico con transistor a la salida. En la figura 5.11 se muestra el diagrama de conexiones de la electroválvula.

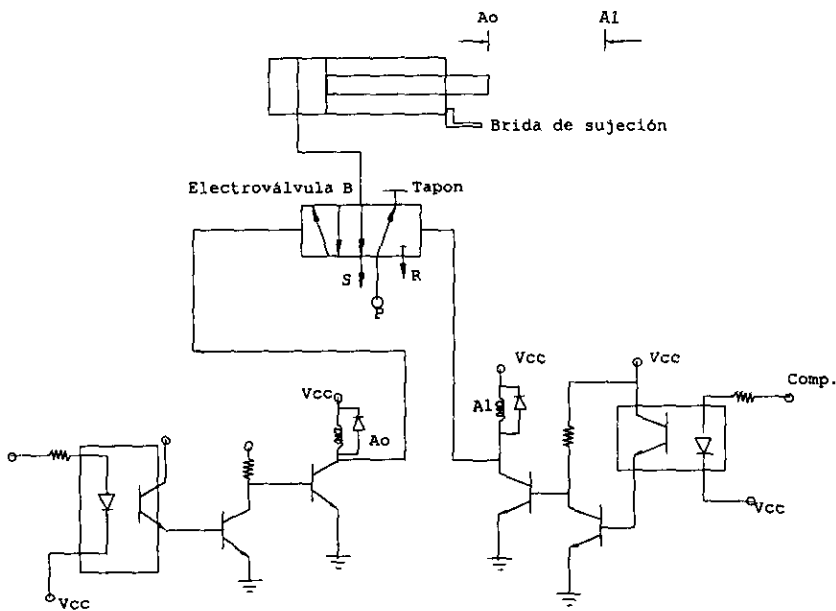


Figura 5.11 Diagrama de conexiones del control del actuador neumático

### 5.3.3. Polarización

Este subsistema se encarga de energizar al motor cuando se mande la señal desde la pantalla del programa. En este sistema se emplean optoacopladores para aislar la etapa de control de la etapa de potencia.

Para poder realizar este circuito se tiene la posibilidad de utilizar relevadores electromagnéticos o semiconductores de estado sólido como lo son los transistores, SCR's y los TRAC's.

Los relevadores son dispositivos que se emplean como interruptores en sistemas de alta potencia donde los elementos de

estado sólido son deficientes. En el caso de los relevadores se encuentran las siguientes ventajas y desventajas:

1. Para la activación de cargas inductivas, los diodos de supresión conectados en paralelo a la carga no permitirán la descarga entre las terminales del interruptor.

2. Los rebotes en los contactos en muchas aplicaciones no causan problemas, sin embargo cuando se vincula con circuitos lógicos puede causar problemas.

3. Su tiempo de respuesta es lento en relación con los elementos de estado sólido.

4. Costo relativamente alto.

Como podemos ver el uso de los relevadores no nos ofrece una solución atractiva para nuestro problema. Veamos ahora las ventajas y desventajas de los elementos de estado sólido:

1. No tienen partes en movimiento, por lo tanto no están propensos a presentar problemas de fatiga o falsos contactos por suciedad en las terminales.

2. El tiempo de respuesta es mejor que el de los relevadores. En los tiristores el tiempo de conexión es menor a los 12  $\mu$ s y en los transistores es del orden de los 40 ns.

3. No están propensos a falsos disparos por vibraciones.

4. Bajo costo.

5. En el caso de los tiristores se tiene que tener cuidado con los transitorios de voltaje ( $dv/dt$ ) y también con los transitorios de corriente ( $di/dt$ ). En el caso de los transistores se debe de tener cuidado cuando se acoplan cargas inductivas, pues al despolarizarse



la corriente de inversa tiende a un valor muy grande, lo que puede dañar al transistor.

De lo anterior podemos concluir que la mejor opción para nuestro sistema es la utilización de elementos de estado sólido.

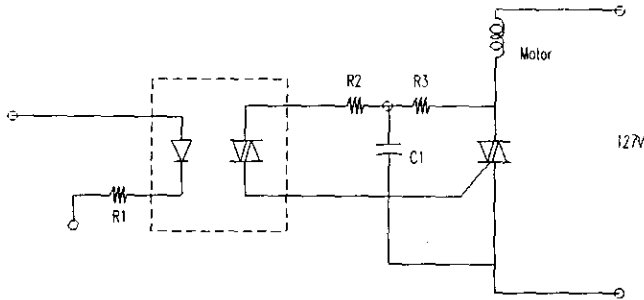


Figura 5.12 Sistema de energizado del motor de AC

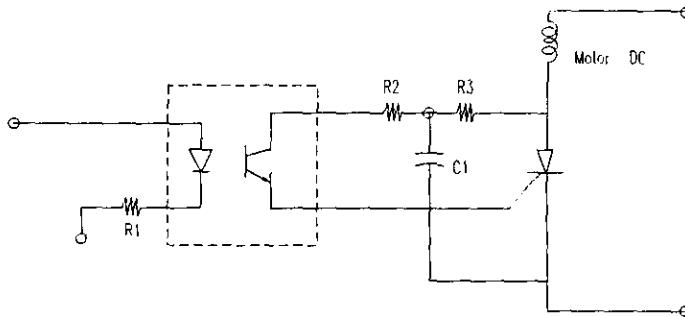


Figura 5.13 Sistema de energizado en DC

#### 5.3.4. Acondicionamiento de la señal

En este subsistema la señal proveniente del sensor de posición tiene que ser perfectamente acondicionada para su posterior

procesamiento. En dicho acondicionamiento las señales provenientes del amplificador primero se tienen que amplificar, puesto que las señales emitidas por el fotodetector son muy tenues, para que después se les aplique un ecuación de linealización y así finalmente se obtenga un valor numérico proporcional a la posición del haz incidente en el fotodetector.

Este sistema no tuvo que ser implementado, puesto que ya se contaba con un amplificador comercial muy eficiente, el cual se describe a continuación:

El amplificador utilizado como módulo de interfaz para obtener la posición del sensado es el amplificador modelo 301DIV de UDT y se emplea uno para la cordenada en  $X$  y otro para la cordenada en  $Y$ . Este versátil sistema es utilizado con fotodetectores de efecto lateral para la medición continua de posición.

Este sistema consta de dos amplificadores de bajo ruido compensados en frecuencia de tipo OP27-EP<sup>2</sup> los cuales están implementados en modo de amplificador de instrumentación. Las dos señales que salen de estos amplificadores se suman y se obtiene su diferencia con el uso de amplificadores OP 37-EP, y finalmente se realiza la división por medio de un DIV 100KP. A la salida del circuito se tienen dos salidas, una de ellas es la suma de las señales y la otra es el voltaje correspondiente a la posición. Dos módulos son empleados para sensar dos ejes en el caso de fotodiodos de efecto lateral.

El módulo del amplificador con seis rangos de entrada selectivos acondiciona la señal detectada desde  $3 \mu\text{A}$  hasta  $2 \text{mA}$ . Los diodos indicadores auxilian al usuario para elegir el correcto rango de entrada. La salida está normalizada a  $10\text{V}$ . Este circuito tiene un ancho de banda de  $30 \text{KHz}$ . El diagrama de bloques de este sistema se muestra en la figura 5.14.

---

<sup>2</sup> Estos amplificadores presentaron fallas por lo que se sustituyeron por el C.I. NE5534P.

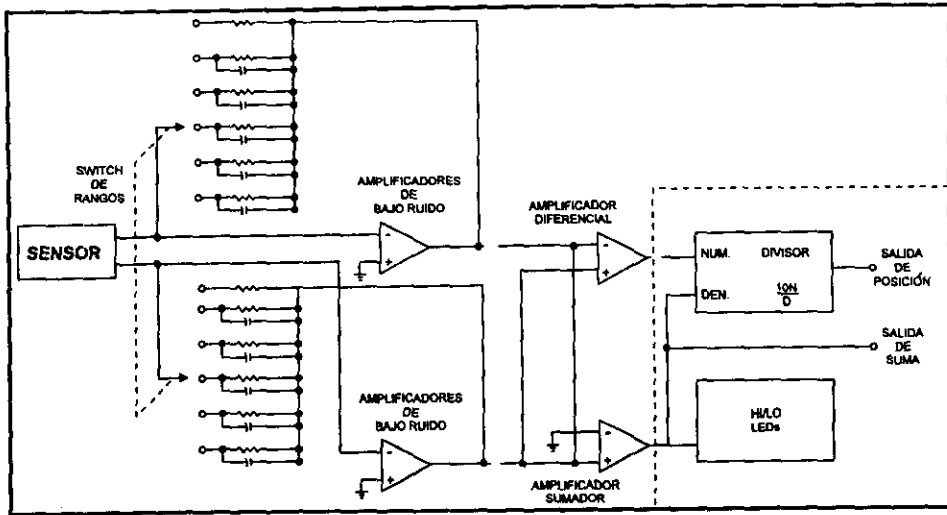


Figura 5.14 Diagrama de bloques del amplificador 301 DIV

### 5.3.5. Adquisición de datos

Las funciones de esta parte del sistema son las siguientes:

- Gobernar el sistema para la realización del proceso.
- Comunicación entre la computadora y los elementos del sistema.
- Digitalización de las señales a medir para un posterior procesamiento dentro de la maquina.

#### 5.3.5.1. Tarjeta AT-MIO-16E-1

El diagrama de bloques de la tarjeta se muestra en la figura 5.15.

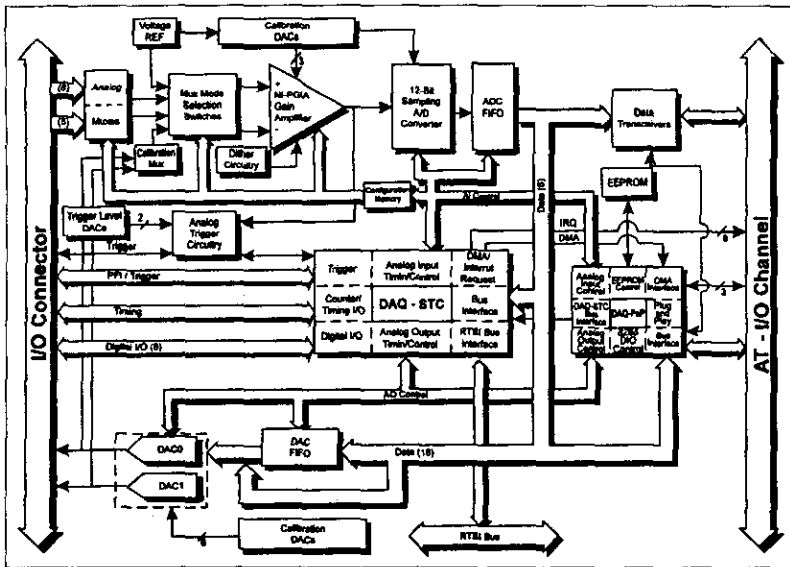


Figura 5.15 Diagrama de bloques de la tarjeta AT-MIO-16E-1

Esta tarjeta es colocada en uno de los slots de la computadora de tipo EISA o ISA .

En el caso de las entradas analógicas esta tarjeta cuenta con los siguientes modos de entrada:

- ✓ Modo diferencial: Este modo de conexión es recomendado para señales de entrada menores a 1 V, que se encuentren a mas de 3 m de la tarjeta. La señal de entrada requiere de un punto de referencia a tierra separado o un regreso de señal y la señal viaja por lugares con muchos ruidos ambientales. Este modo de conexión reduce el ruido e incrementa la atenuación del ruido en modo común.
- ✓ Modo simple: Este modo de conexión se recomienda para señales de entrada mayores a 1 V, la distancia entre la señal

y la tarjeta es menor a tres metros y la señal de entrada puede tener un punto común de referencia con otras señales. Este tipo de conexión es más propensa al ruido electrostático y magnético que en la configuración de modo diferencial.

En esta aplicación la configuración de modo simple se utiliza para la toma de medidas, puesto que nuestro rango va desde  $-5.6$  hasta  $5.6$  V y la distancia entre la toma de la señal y la tarjeta es menor a dos metros y se utiliza un cable blindado. El lugar donde se trabaja es muy propenso a ruidos pero eso se puede solucionar al utilizar un filtro digital.

Otro aspecto importante de la tarjeta es el *trigger* digital, ya que con la utilización de éste se puede colocar el punto de inicio de lecturas donde sea más conveniente con la ayuda de algún dispositivo que envíe un pulso cuando el actuador pase por dicha posición. Este *trigger* puede ser utilizado como *posttrigger* o como *pretrigger*. Cuando es utilizado en el modo *posttrigger* se observarán solo los datos después del evento de *trigger*, y cuando se utiliza en el modo *pretrigger* solo se podrán ver los datos antes del *trigger* de interés por consiguiente adquiere datos después del *trigger*. En esta tarjeta el *trigger* digital es activado con un pulso de menor o igual a  $10$  ns.

Para que la captación de datos siempre inicie casi en el mismo punto y con esto obtener la repetibilidad en la toma de lecturas se colocó un sensor en la parte de movimiento circular que permite tener sincronía entre el disparo del actuador neumático con una posición determinada del prisma DOVE, este circuito se realizó con la ayuda del circuito integrado 74LS121 el cual compara tres entradas y cuando se cumple cierta condición se tiene un tiempo de alto a la salida, el cual su tiempo de duración dependerá del valor de una resistencia y un capacitor. El control de la captación de datos es controlado mediante un sensor magnético colocado en la parte superior del actuador neumático el cual tendrá que ser disparado en

el momento en el cual el *trigger* digital sea activado dentro de la tarjeta. El diagrama de los estados de las señales del sistema se muestra en la figura 5.16.

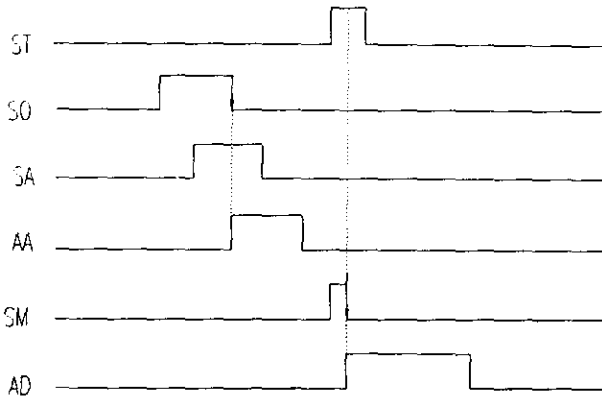


Figura 5.16 Diagrama de señales de control

Del diagrama anterior ST es el tiempo en el cual el *trigger* se encuentra habilitado dentro de la tarjeta; SO es la señal del sensor óptico colocado en el motor; SA es la señal que se manda desde el programa para energizar al actuador; AA es la señal para energizar al actuador; SM es la señal del sensor magnético colocado sobre el actuador neumático; y finalmente AD es la señal que indica la habilitación de la adquisición de datos.

La sincronización entre la señal de arranque de la toma de lecturas y el momento en el cual esta habilitada la entrada del *trigger* se lleva a cabo mediante un retardo vía *software* aplicado en la señal que activa la electroválvula. Dicho procedimiento es utilizado, ya que las operaciones de adquisición de datos y activación de la electroválvula se realizan casi simultáneamente, y por consiguiente el instante en el que pase el émbolo del cilindro neumático por la posición seleccionada para comenzar la toma de lecturas no coincide

con el momento en el que el programa habilita el trigger. En la figura 5.17 se muestra el circuito de control para la toma de lecturas.

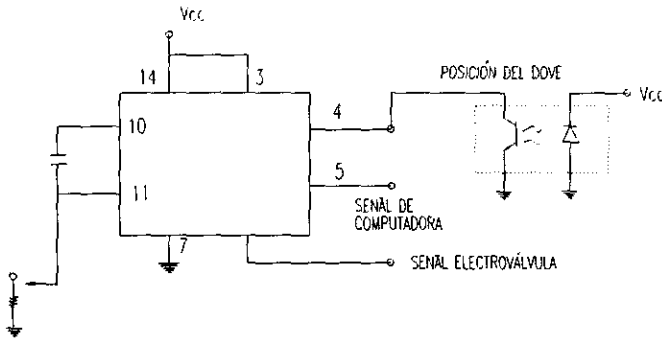


Figura 5.17 Diagrama de conexiones para realizar la adquisición de datos

### 5.3.5.2. Interfaz

Como interfaz se utiliza el módulo de conexiones SCB-68 de *National Instruments*, el cual está provisto de un chasis resistente y terminales de bajo ruido, además que dentro de sus principales características tiene espacios libres para introducir filtros RC, divisores de voltaje, detectores de temperatura.

Para comunicar la tarjeta con el módulo de conexiones se hace uso de cable modelo SH6868 de *National Instruments*, el cual tiene 68 pins y una longitud de 2m. Este cable de conexiones cuenta con un blindaje para evitar problemas de ruido en la transmisión de la señal a la computadora.

### 5.3.3. Visualización del proceso

El proceso se sigue desde la computadora por medio de un programa realizado en LabView. Este *software* de programación es

empleado en la ingeniería por sus cualidades en áreas de ingeniería como son control, adquisición de datos y procesamiento de señales. Este paquete permite desarrollar programas sin necesidad de realizar código de texto en algún lenguaje en particular. El tipo de programación de este paquete hace uso del lenguaje de programación gráfico para crear programas en forma de diagramas de bloques.

El programa realizado en este paquete se diseñó bajo el siguiente diagrama de flujo.

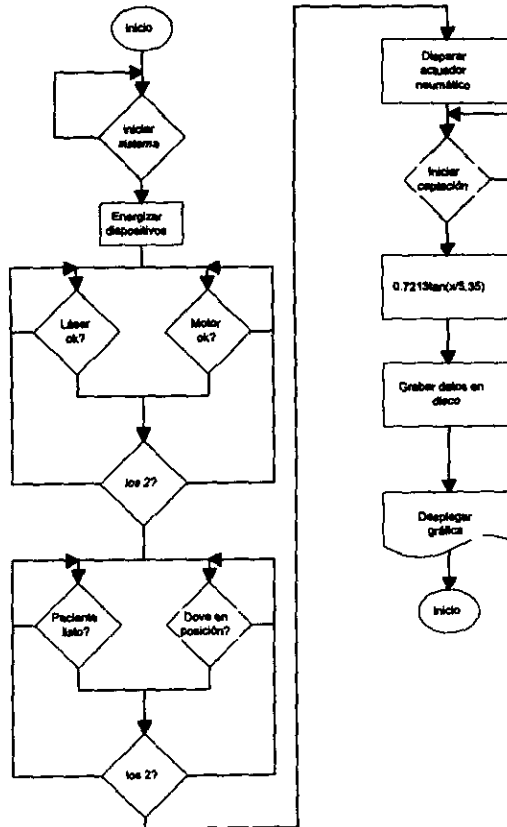
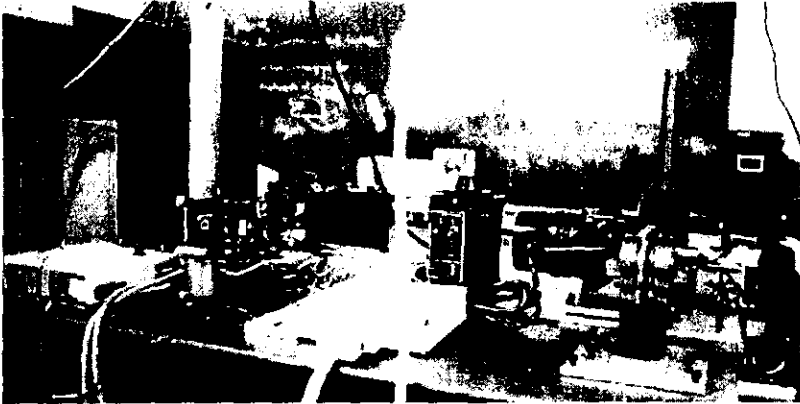


Figura 5.18 Diagrama de flujo del programa para gobernar el queratopografo láser



## 5.4 Nuevo prototipo

El nuevo prototipo de este sistema fue montado sobre una mesa de pruebas NewPort, situada en el laboratorio óptica del Centro de Instrumentos, en la figura 5.19 se muestra una fotografía del sistema montado.



*Figura 5.19 Fotografía del prototipo montado en el Centro de Instrumentos*

# PRUEBAS Y RESULTADOS **6**

En el capítulo anterior se presentó el desarrollo de la nueva propuesta del sistema de queratopografía láser citándose los alcances de éste obtenidos de forma teórica a partir de datos de los elementos que lo conforman, los cuales fueron obtenidos de hojas de especificaciones proporcionadas por los fabricantes. No obstante, como ya es bien sabido, la realidad es otra y por ello se tiene que observar de forma real el comportamiento del sistema para poder establecer los verdaderos alcances de éste así como también para corregir pequeños errores que son producidos por distintas fuentes externas al sistema, las cuales son fáciles de identificar, después de analizar cuidadosamente los resultados obtenidos de las pruebas experimentales.

## 6.1. ANÁLISIS DE LAS SEÑALES

Las pruebas del sistema se desarrollan teniendo en cuenta las características del mismo, es decir, se realizan las pruebas de los principales movimientos que componen al sistema, y finalmente se

hacen pruebas con el movimiento compuesto que será el que nos ayude a obtener la información necesaria para saber las características de la superficie bajo estudio (la córnea).

### 6.1.1. Caracterización del movimiento lineal

Las pruebas del movimiento lineal se realizaron con el fin de caracterizar al actuador neumático, para tener una visión más exacta de la región en la cual la velocidad se comporta de forma más constante posible, así como también para saber cual es la magnitud de ésta para poder determinar con mayor exactitud las características del motor con el cual se realizará el movimiento circular, pues como se mencionó anteriormente este movimiento determinará la velocidad del proceso.

Para la realización de esta prueba, se operó el actuador neumático a cuatro regímenes de presión distinta (3, 4, 5 y 6 bar), tomándose en cuenta seis eventos de cada presión. En la figura 6.1 se muestra el promedio de cada una de las curvas de posición en función del tiempo bajo distintos regímenes de presión.

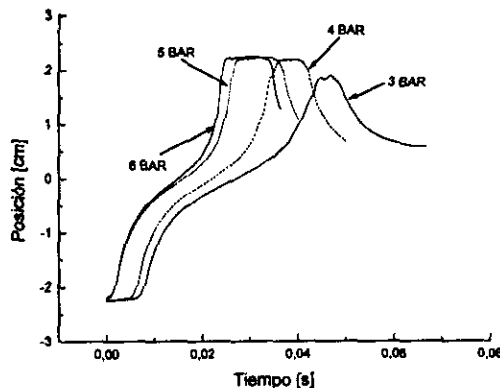


Figura 6.1 Curva de Posición vs Tiempo del actuador lineal a diferentes presiones

En la gráfica anterior podemos observar como el actuador neumático incrementa su velocidad conforme se incrementa la presión y también se observa que la velocidad cuasiconstante se encuentra en la zona central de la curva, pues como sabemos para tener velocidad constante, la curva de posición contra tiempo debe estar determinada por una recta con pendiente diferente de cero. Las características de la prueba anterior se presentan en la siguiente tabla:

PRESIÓN [bar]	No. DE MUESTRAS	FRECUENCIA [muestras/s]
3	20,000	300,000
4	20,000	400,000
5	20,000	500,000
6	20,000	550,000

Tabla 6.1 Características de las mediciones

Para determinar el comportamiento del actuador en la zona central para cada presión se obtuvo la gráfica en el rango de posición de  $-3$  a  $3$  mm, la cual se presenta a continuación.

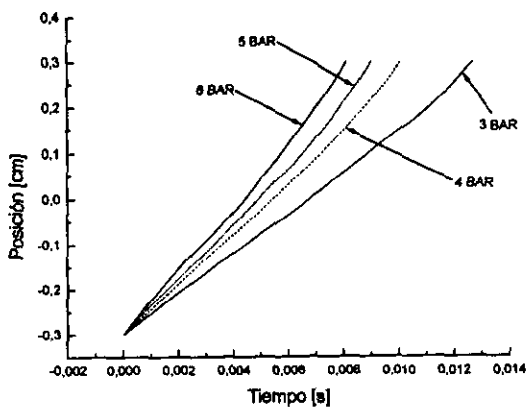


Figura 6.2 Zona lineal del actuador neumático

En la siguiente tabla se exponen las características de cada curva:

PRESIÓN [BAR]	No. DE MUESTRAS	TIEMPO DE BARRIDO [s]	VELOCIDAD [mm/s]	$\sigma^1$ [cm]
3	3,820	0.01273	471.2	0.00583
4	4,048	0.01012	592.88	0.00721
5	4,526	0.009052	662.83	0.00913
6	4,485	0.008154	735.78	0.0084

Tabla 6.2 Características de la curva de posición vs tiempo en el rango de -3 a 3 mm

Como se puede observar en la tabla 6.2 las velocidades obtenidas con el actuador se encuentran por encima de la velocidad necesaria para satisfacer los objetivos planteados para este nuevo sistema, pero otro punto que tenemos que considerar es la desviación estándar de la curva en cada presión para determinar cual es la más conveniente.

Después de haber evaluado las características de cada movimiento, se llegó a la conclusión de trabajar a 3 bar, puesto que además de presentar la menor desviación estándar, el tiempo de barrido influye directamente en la velocidad del motor que nos proporcionará el movimiento angular.

Para finalizar la caracterización del actuador se realizaron las pruebas obteniendo 8,000 datos en el rango de posición de -3 a 3 mm en seis eventos diferentes, esto con el fin de someter al sistema a condiciones de operación normal. El promedio de las curvas se muestra en la figura 6.3.

En la gráfica de la figura 6.4 se ilustran los errores obtenidos a partir de esta curva.

---

<sup>1</sup>  $\sigma$  = Desviación Estándar

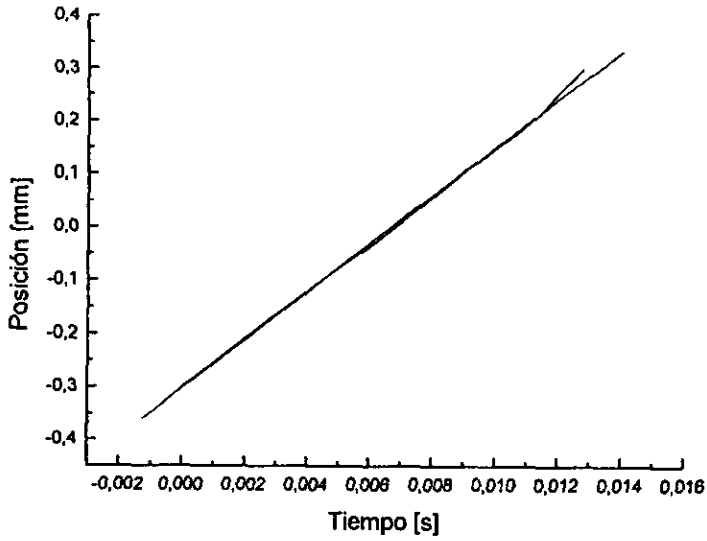


Figura 6.3 Desplazamiento lineal del sistema de Queratopografía Láser

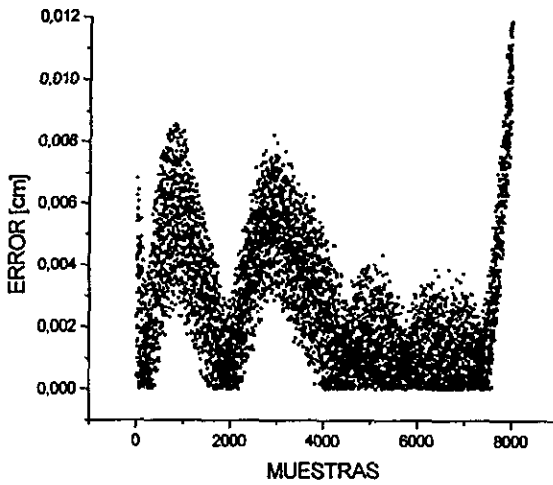


Figura 6.4 Error del movimiento lineal

Como se puede observar en la gráfica de la figura 6.3, la curva de desplazamiento está siendo afectada por una señal de ruido la cual está compuesta por señales ajenas al sistema como son la PC, las máquinas en funcionamiento que se encuentran fuera del laboratorio y las fuentes de luz que no pueden ser eliminadas totalmente. Por lo anterior se decidió analizar la forma de la curva en su espectro de potencia para determinar su ancho de banda y poder así tratar de disminuir el ruido en la señal con la ayuda de un filtro digital.

### 6.1.2. Análisis de Fourier

El análisis de Fourier nos ayuda a determinar el ancho de banda de una señal mediante el estudio del espectro de potencia de ésta. El espectro de potencia está dado por la magnitud de la transformada de Fourier de una señal y representa como esta distribuida la potencia de ésta en la frecuencia. Esta información es necesaria para poder determinar en que rango de frecuencia se encuentra concentrada la información más valiosa de la señal para poder así introducir filtros en el sistema que nos ayuden a eliminar el mayor ruido posible y permitan mantener integra la información de la señal capturada.

La ecuación para determinar la transformada de Fourier de una señal es la siguiente:

$$F(\omega) = \int_0^T f(t) \cdot e^{-j\omega t} dt \quad (6.1)$$

En nuestro caso  $f(t)$  está definido idealmente por la recta de pendiente igual a la división del recorrido de 0.6 cm entre el tiempo de 12.73 ms, por lo tanto,  $f(t)$  es:

$$f(t) = 47.133 \cdot t \quad (6.2)$$

Sustituyendo esta ecuación en la ecuación 6.1 tendremos lo siguiente:

$$F(\omega) = 47.133 \int_0^{\tau} t \cdot e^{-j\omega t} dt \quad (6.3)$$

O bien

$$F(\omega) = 47.133 \int_0^{\tau} t \cdot \cos(\omega t) dt - j47.133 \int_0^{\tau} t \cdot \sin(\omega t) dt \quad (6.4)$$

Donde  $\tau$  es el tiempo total que dura el proceso y tiene un valor de 0.01273 s, por lo tanto, la transformada de Fourier de la señal es:

$$F(\omega) = 47.133 \left[ \frac{\cos(0.01273\omega) - 1}{\omega^2} + \frac{0.01273 \sin(0.01273\omega)}{\omega} \right] - j47.133 \left[ \frac{\sin(0.01273\omega)}{\omega^2} - \frac{0.01273 \cos(0.01273\omega)}{\omega} \right] \quad (6.5)$$

En la siguiente ecuación se presenta el modulo de la función anterior.

$$|F(\omega)| = 47.133 \sqrt{\frac{\cos^2(0.01273\omega) - 2 \cos(0.01273\omega) + \sin^2(0.01273\omega)}{\omega^4} - \frac{0.02543 \sin(0.01273\omega)}{\omega^3} + \frac{0.000162[\sin^2(0.012\omega) + \cos^2(0.01273\omega)]}{\omega^2}} \quad (6.6)$$

La gráfica de la ecuación anterior se muestra en la figura 6.5. Como se puede observar en la gráfica el espectro en potencia de la señal nunca llega a cero por lo que no se puede definir con certeza el ancho de banda de la señal, pero lo que si se puede hacer es aproximarla y mediante simulación en Matlab utilizando el programa Simulink, el cual es un *software* diseñado para simular sistemas y el método de programación se realiza mediante diagramas de bloques, establecer la frecuencia de corte del filtro que se utilizará.



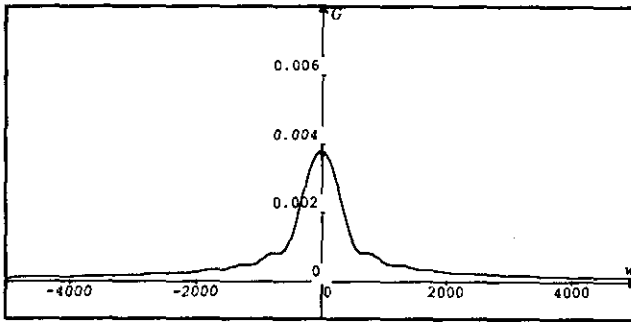


Figura 6.5 Espectro en potencia de la señal del movimiento lineal

El primer paso para hacer la simulación fue obtener una señal lo más parecida posible a la señal que se adquiere del sistema de queratopografía láser (ver figura 6.6).

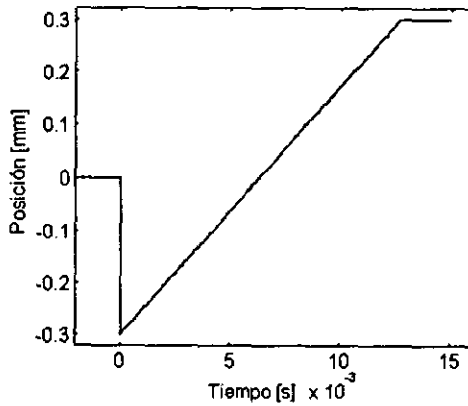
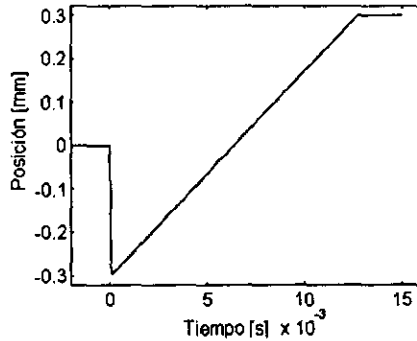


Figura 6.6 Señal de entrada simulada

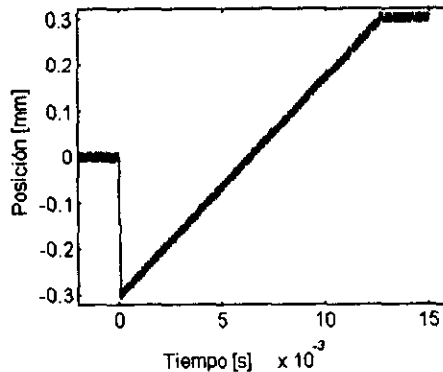
Después de realizar pruebas con filtros de tipo Chebychev y Butterworth se llegó a la conclusión de utilizar un filtro tipo Chebychev con una frecuencia de corte de 10 kHz, pues la

pendiente del filtro es mayor y tendremos más atenuación de ruido. En la figura 6.7 se muestra la señal después de pasar por el filtro Chebychev.



*Figura 6.7 Simulación de la señal de entrada filtrada por medio de un filtro tipo Chebychev*

La señal de ruido que se tiene montada en la señal adquirida en la computadora es de aproximadamente 60 kHz con una amplitud máxima de 0.02 mV. En la figura 6.8 se muestra la simulación de la señal real que se obtiene en la PC.



*Figura 6.8 Simulación de la señal real de entrada*

Finalmente se hace pasar a esta señal por el filtro elegido obteniéndose la gráfica mostrada en la figura 6.9.

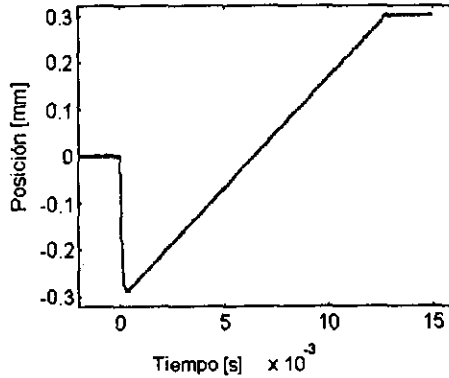


Figura 6.9 Simulación de la señal real de entrada filtrada

Al aplicar la solución anteriormente obtenida en el programa de adquisición de datos se obtuvo el siguiente resultado.

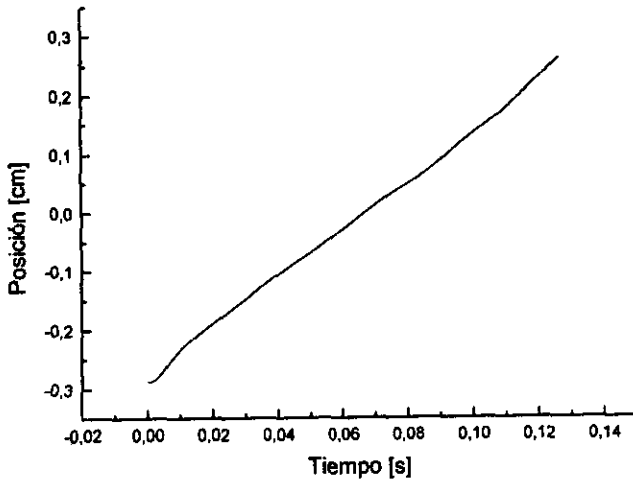
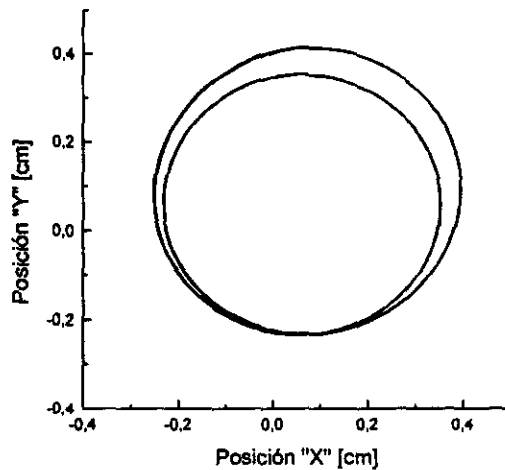


Figura 6.10 Señal real del movimiento lineal después de ser filtrada

### 6.1.3. Caracterización del movimiento circular

Para el caso del movimiento circular se tienen que realizar pruebas para poder observar las características de éste. Para llevar a cabo dichas pruebas, se comenzó por alinear el sistema, ya que el haz de láser debe coincidir con el eje del prisma DOVE para poder generar una sola circunferencia uniforme. El radio de dicha circunferencia es igual a la distancia que hay entre el centro del prisma y el haz del láser. Al tener alineado el sistema se pudo observar una sola circunferencia reflejada en el fotodetector, pero al observar la imagen en la computadora se observan dos circunferencias tal como se puede apreciar en la figura 6.11.



*Figura 6.11 Movimiento circular del queratopógrafo láser*

La prueba que arrojó como resultado la gráfica anterior se realizó al capturar 10,000 datos con una velocidad de muestreo de 100 km/s. Al analizar los datos se encontró que la gráfica está formada por aproximadamente 34 circunferencias. En la gráfica 6.12 se muestran las dos circunferencias que se tienen en el movimiento

circular; el radio promedio de la menor es de 2.9118 mm y en la mayor es de 3.2211 mm.

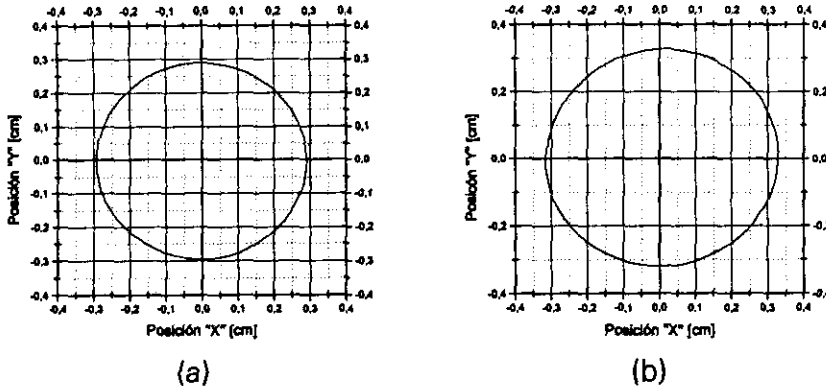


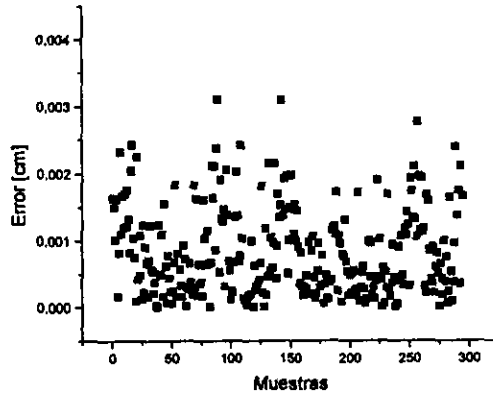
Figura 6.12 Circunferencias generadas en el movimiento circular: (a) menor; (b) mayor

El significado que tiene el fenómeno anteriormente mencionado es que todavía se presenta pequeña desalineación en el sistema, la cual siempre es la misma pues se desarrollaron múltiples pruebas a diferentes velocidades, obteniéndose los mismos resultados.

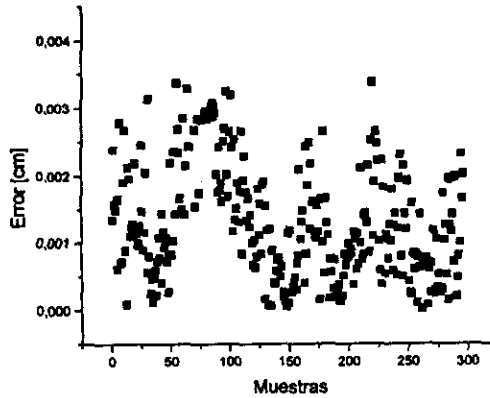
Al analizar las trayectorias se concluyó que no se trata de circunferencias, aunque se aproxima más la de radio menor. Esto no es un problema serio para el desarrollo del prototipo, pues la trayectoria es conocida y lo importante es que pase siempre por los mismos puntos, de tal manera se analizaron círculos contra círculos par observar las desviaciones en las trayectorias. En la figura 6.13 se muestran los resultados obtenidos.

En dicha figura podemos observar que tenemos errores mínimos que se pueden deber a factores mecánicos, pero para tener una idea mas clara de como ésta conformado este movimiento se obtuvo la gráfica de espectro en frecuencia de la señal a tres

regímenes distintos de operación, esto con el fin de observar si siempre se comporta de la misma forma el sistema. En las gráficas de la figura 6.14 se muestran dichos espectros.

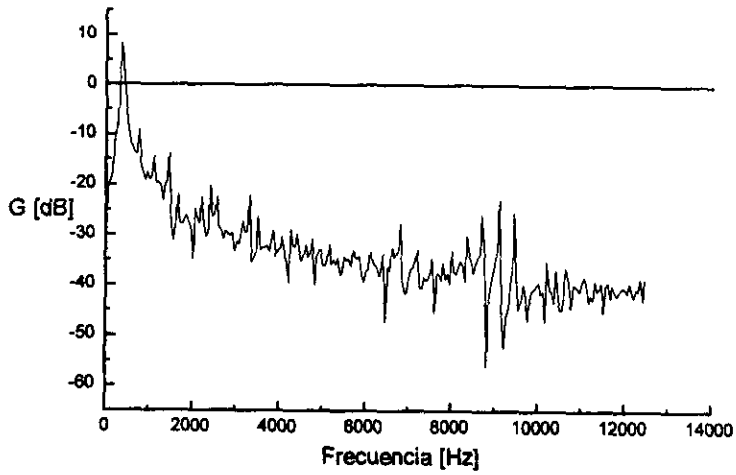


(a)

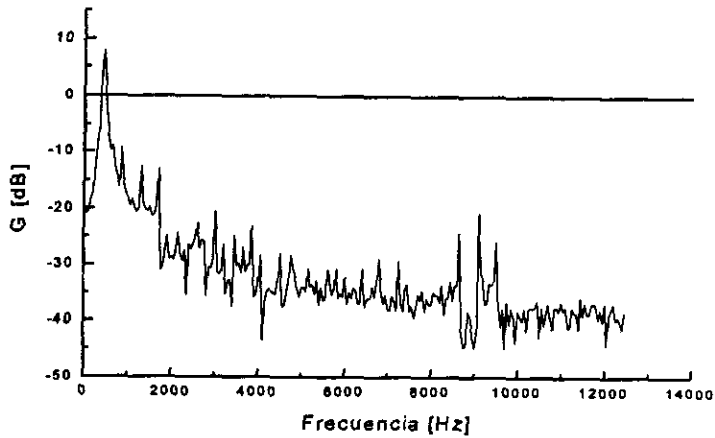


(b)

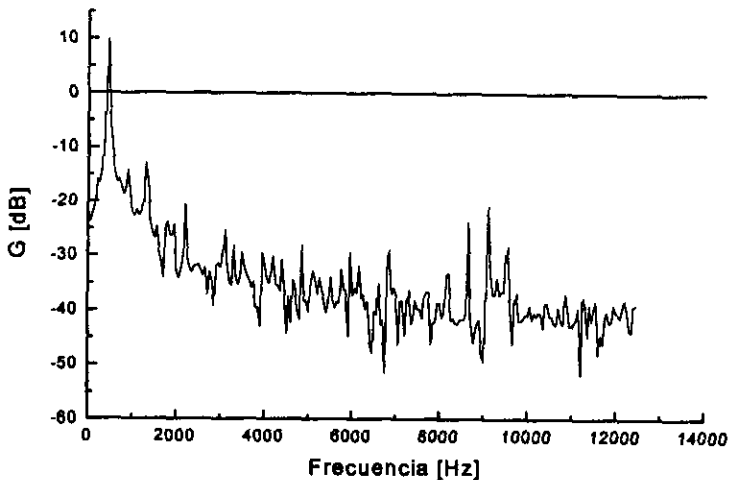
Figura 6.13 Desviación entre trayectorias:  
(a)  $r = 2.9118\text{mm}$ ; (b)  $r = 3.2211\text{mm}$



(a)



(b)



(c)

Figura 6.14 Espectro en potencia del movimiento circular.  
a) 10000 rpm; b) 12600 rpm; c) 15000 rpm

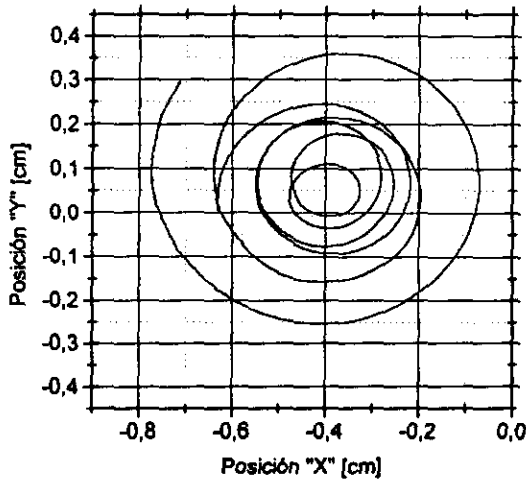
De la gráficas podemos observar que dentro de los 2000 Hz se encuentra la espiga fundamental, la cual representa el mayor porcentaje de información de la señal y tres espigas más que se repiten en el rango de 8000 a 10000 Hz, que indican la presencia de ruidos en el sistema. Puede decirse también que todas las espigas se encuentran en algún múltiplo de la frecuencia a la cual gira el motor, por lo que se concluye que estos ruidos son provocados por cabeceos en los rodamientos y también que la banda transmite algunas vibraciones al soporte del prisma.

#### 6.1.4 Movimiento compuesto

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 6.15. Para generar la espiral fue necesario configurar nuestro sistema para adquirir 8000 datos.



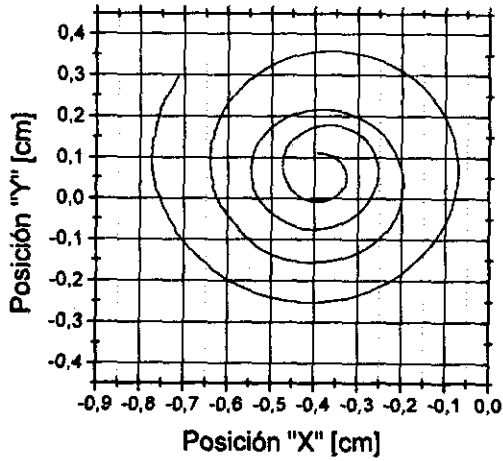
*Figura 6.15 Barrido final del movimiento compuesto*

Trabajando con los datos obtenidos para la trayectoria anterior, encontramos que ésta 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, mientras que los siguientes 3000 corresponden a la segunda (figura 6.16).

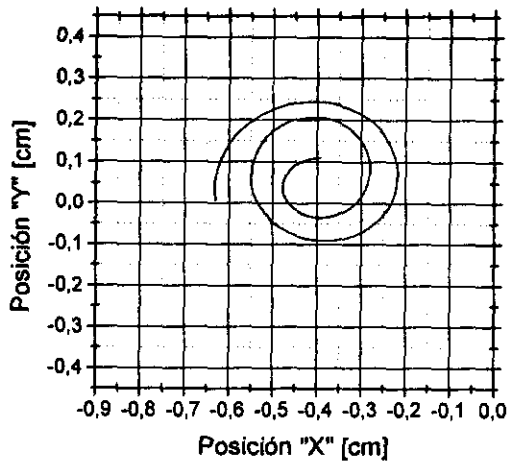
Si se consideran una cantidad mayor de datos para el análisis, logramos obtener un mayor recorrido con la segunda espiral, lo cual se traduce en un conocimiento más certero de la superficie.

Es importante apreciar como en las gráficas de la figuras 6.16, se observa 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 6.16 a) Barrido desglosado obtenido del sistema (exterior - centro); b) Barrido desglosado obtenido del sistema (centro - exterior)

## CONCLUSIONES

El sistema desarrollado presenta avances *significativos* tanto en términos técnicos así como en la calidad y cantidad de información recolectada. Con un análisis que hasta este momento se encuentra en sus primeras valoraciones, podemos identificar un claro avance en comparación con el primer prototipo presentado hace algunos años.

Pese a las grandes ventajas obtenidas por este sistema, identificamos que al manejar una mayor cantidad de información podemos apreciar desviaciones de orden menor generadas en gran parte por los sistemas mecánicos empleados así como por el ruido de orden electromagnético que se encuentra en el entorno.

De esta manera podemos afirmar que el desarrollo de instrumentación es un proceso largo que requiere de ciclos iterativos para su correcta evaluación y mejora, todo esto en función de la calidad que se requiera del mismo.

El siguiente paso para este dispositivo comprenderá un análisis exhaustivo de la incertidumbre, por parte del grupo de óptica del CI, de este con el uso de esferas calibradas, en donde los resultados

finally, we will get as a result the true reaches and a idea of how we can compensate different errors that we have in this. As well another of the goals is to introduce in the program an algorithm to obtain the surfaces generated in 3D.

Now well, if we consider the relative low cost of development of the equipment, in comparison with the benefits obtained and clear, without losing sight of the costs of similar equipment, we obtain a cost/benefit ratio very high, which is a fundamental part of engineering. The prototype made has a cost of approximately \$6,500 USD, in terms of materials, a cost of fabrication of \$2,000 USD, and an engineering cost of \$11,500 USD.

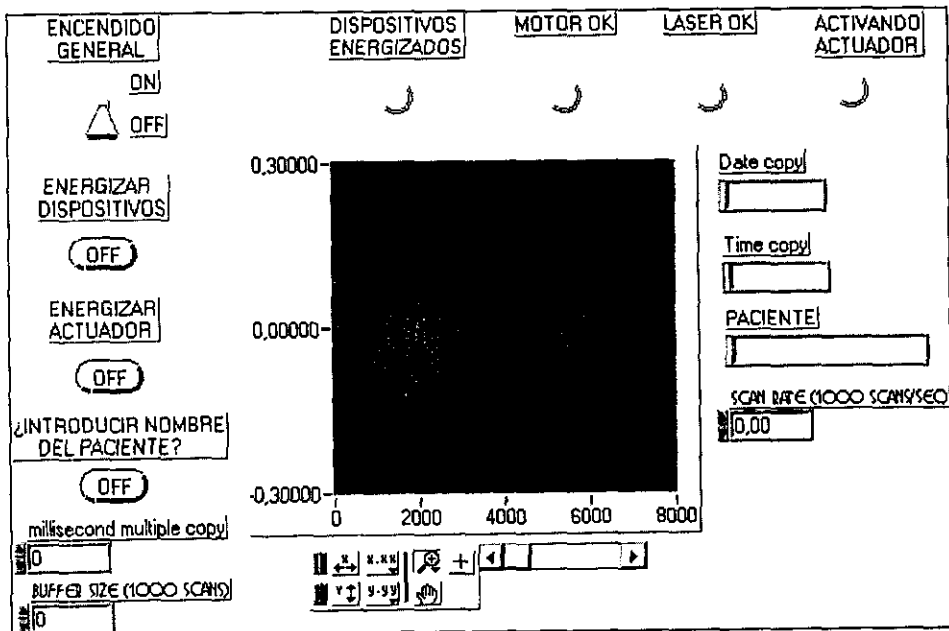
The costs managed are an excellent reflection of a low cost for devices of this type given that, without losing sight of the fact that always the costs required for the development of prototypes are of a higher order in comparison with the costs of production. We find that the cost of \$20,000 USD of this prototype is quite competitive with the cost of a commercial device whose prices oscillate around the 16,000 USD.

Due to the magnitude of the project, since it began its theoretical development, a large amount of information has been generated that has been relevant for this project, and for many others that in one way or another relate to the needs that result for this device. For the above we have had to generate a series of reports, memories for congresses, and in response to the amiable request of the ASPE (*American Society for Precision Engineering*), we are currently in the process of an article in which the results of the equipment will be presented.

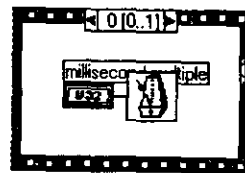
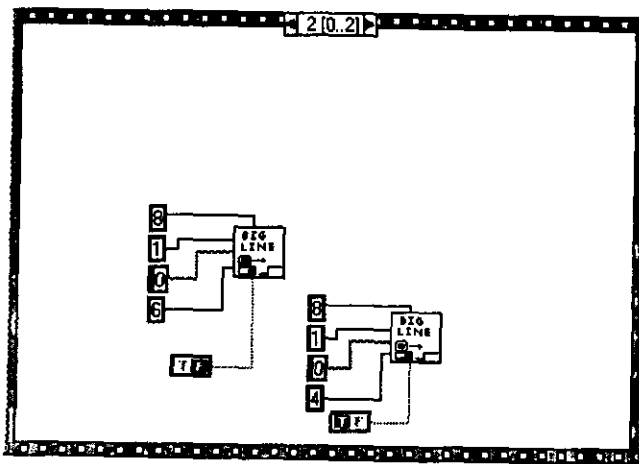
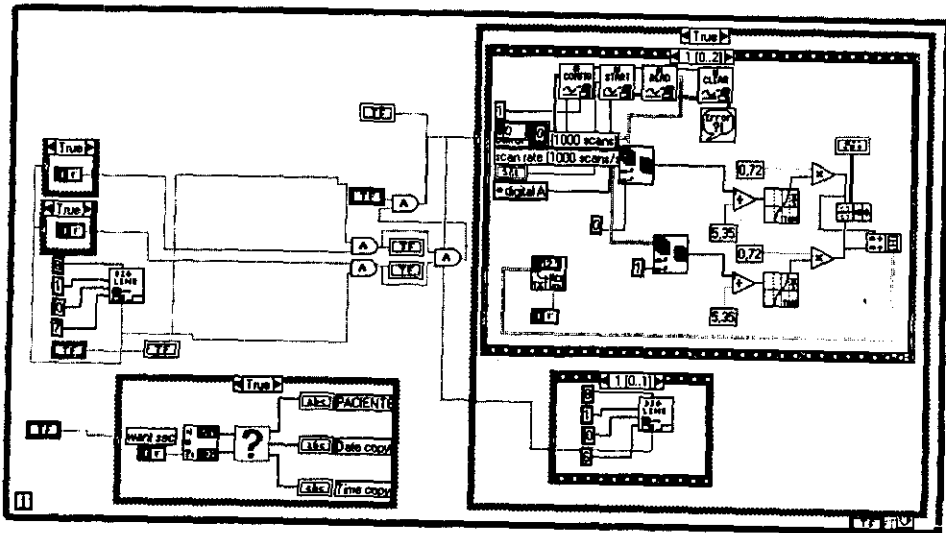
Finally, we had a great experience in the aspect of carrying out a multidisciplinary work in areas of investigation and using them as instruments for the realization of this project, which for the personnel was very fruitful.

# APÉNDICE

## A.1 Pantalla del programa realizado en LabVIEW para el Queratopógrafo láser



A.2 Programa del Queratopógrafo láser.



### A.3 Características de la tarjeta de adquisición de datos AT-MIO-16-E1

La tarjeta AT-MIO-16E-1 es una tarjeta multifunción E/S de alta velocidad que se configura por software sin necesidad de jumpers y switches.

#### ENTRADAS ANALOGICAS

- 1,250 kmuestras/s
- 12-bits resolución
- 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
- 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
- Adquisición de datos con Post y Pre-Trigger
- Disponible muestreo simultaneo con el SC-2040

#### SALIDAS ANALOGICAS

- 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

#### OTRAS

- Configuración Plug and Play sin switches
- 10 entradas con funciones programables (PFI) con flexibilidad de conexión de señales

## BIBLIOGRAFÍA

1. Anaszkievicz, 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 edition, 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, 2º edition, 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 Transmition, 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, *Sistem 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.