

# UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA

FACULTAD DE INGENIERÍA,  
UNIDAD ENSENADA

**“Desarrollo de un sistema para medir la geometría de  
un elemento óptico basado en un CCD lineal”**

## TESIS

Que para obtener el grado de:  
Maestría en Ingeniería

Presenta:  
**Fernando Quirós Parra**

**Director:**

**Dr. Esteban Antolin Luna Aguilar**

**Asesores:**

**MC. Víctor Manuel Blanco Rodríguez**

**MC. Carlos Gómez Agis**

**Ensenada, Baja California, Diciembre de 2004**

**Votos de aprobación de la tesis:**

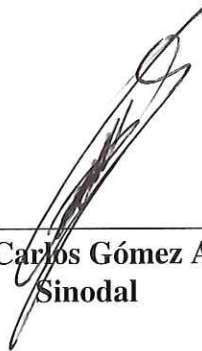
**“Desarrollo de un sistema para medir la geometría de un elemento óptico basado en un CCD lineal”**

**Presenta:  
Ing. Fernando Quirós Parra**



---

**Dr. Esteban Antón Luna Aguilar**  
Director



---

**MC. Carlos Gómez Agis**  
Sinodal



---

**MC. Víctor Manuel Blanco Rodríguez**  
Sinodal



---

**MC. Francisco Lazo Valencia**  
Sinodal

## **Agradecimientos**

**Esteban Luna**, gracias por impulsarme continuamente a terminar este trabajo, por Tu amistad y compartir Tu experiencia.

**Leonel Gutiérrez**, Gracias por Tu amistad y todos tus sabios consejos.

**Enrique Colorado**, Gracias por compartir Tu optimismo.

**Benjamín García**, Gracias por su apoyo infinito a seguir creciendo como persona.

**Francisco Lazo**, Gracias por todos sus comentarios tan acertados.

**Jorge Valdez, Antolin Córdova y Benjamín Martínez**, Gracias por su paciencia en los trabajos de mecánica.

**Manuel Núñez y Javier Salinas**, Gracias por ofrecerme siempre una sonrisa y un buen consejo de óptica.

**Víctor Manuel Blanco y Carlos Gómez Agis**, Gracias por su tiempo en la revisión de este trabajo.

**Instituto de Astronomía**, Gracias por facilitarme las cosas y poder concluir este trabajo.

Gracias a todos por su valiosa amistad y su valioso tiempo.

## **Prologo.**

Durante el presente trabajo se muestra el desarrollo de un sistema para medir el radio de curvatura de un elemento óptico basado en un CCD lineal: primeramente se estudian algunos principios de funcionamiento, posteriormente se desglosa el sistema y se analiza cada una de sus secciones a lo largo de 8 capítulos.

En el capítulo 1, se presenta los antecedentes de estudio de este trabajo, así como la hipótesis, objetivos, importancia y limitaciones de este análisis. Se explica claramente el objetivo.

En el capítulo 2, se discuten los sistemas comerciales que existen en el mercado y sus limitaciones, se analizan sus ventajas y desventajas, ampliando el panorama del campo de estudio de este trabajo.

En el tercer capítulo, se exponen las primeras pruebas realizadas, y los problemas que se tuvieron al implementarlas. Se realizaron las primeras pruebas utilizando una cabeza de un lector de discos compactos y posteriormente utilizando un rayo láser y un detector lineal basado en el método de triangulación, ambos métodos no fueron factibles, por limitaciones de intervalo dinámico de medición.

A partir del capítulo 4, se tiene una idea clara del sistema propuesto finalmente, y se divide el mismo en secciones para su estudio en los capítulos posteriores. El sistema se divide en tres secciones: sección de posicionamiento, sección de detección remota y finalmente en integración, caracterización y almacenamiento.

En el capítulo 7 se realiza un análisis de la técnica de medición, donde se exponen los detalles de la técnica de detección remota, así como un análisis matemático de la propagación de error inherente al método de medición.

En el capítulo 8 se muestra la integración del sistema y la caracterización de una de sus secciones, se presentan los programas desarrollados para el control de cada una de sus secciones.

Por último, en el capítulo 9, se da una serie de sugerencias para mejorar el sistema y las conclusiones finales.

Se añadieron cuatro apéndices que contienen información técnica para complementar lo expuesto a lo largo de todo el trabajo, o para la implementación de dicho sistema.

<b>Índice</b>	<b>Página</b>
<b>Lista de figuras</b>	<b>7</b>
<b>Lista de tablas</b>	<b>9</b>
<b>1 Introducción</b>	<b>10</b>
1.1 Antecedentes	10
1.2 Planteamiento del problema	14
1.3 Hipótesis	15
1.4 Objetivos	15
1.5 Importancia del estudio	15
1.6 Limitaciones del estudio	16
<b>2 Revisión de literatura</b>	<b>18</b>
2.1 Introducción	18
2.2 Antecedentes	18
2.2.1 Keyence. Ultra High Accuracy Laser Displacement Meter	19
2.2.2 Aerotech. Laser Interferometer System	20
2.2.3 A 3D optical profilometer using a compact disc reading head	22
2.2.4 A simple non contact profilometer	22
2.3 Sumario	23
<b>3 Primeras pruebas</b>	<b>24</b>
3.1 Perfilómetro utilizando una cabeza láser de lectura de un reproductor de discos compactos	24
3.1.1 Descripción	24
3.1.2 Antecedentes del perfilómetro	25
3.1.3 Materiales y métodos	25
3.1.3.1 Cabeza del sensor óptico	25
3.1.3.2 Actuadores	28
3.1.3.3 Medición de distancia usando la distancia focal	28
3.1.4 Problemas de hardware	28
3.2 Sensor de distancia remoto por medio de triangulación basado en un CCD lineal	29
3.2.1 Principio de operación	30
3.2.2 Características generales	31
3.2.3 Limitaciones del principio de operación	31
<b>4 Requerimientos para el sistema de medición</b>	<b>32</b>
4.1 Introducción	32
4.2 Propuesta para el sensor de distancia remoto	33
4.3 Método de muestreo	34
4.4 Elementos del sistema	35
<b>5 Posicionador polar de alta resolución</b>	<b>36</b>
5.1 Introducción	36
5.2 Posicionador polar	36
5.2.1 Actuadores	37
5.2.2 Codificador óptico de posición	38
5.2.2.1 Decodificador de posición	40
5.2.3 Codificador utilizando medición angular	41
5.3 Controlador de motores de pasos	42

5.3.1 Descripción	42
5.3.2 Características generales del controlador	43
5.3.3 Características eléctricas del controlador	44
<b>6 Sensor de distancia óptico sin contacto</b>	<b>46</b>
6.1 Descripción	46
6.2 Dispositivo acoplado por carga (CCD)	46
6.2.1 Características de los CCD	48
6.2.2 Lectura del CCD	48
6.2.3 Generación de secuencia de lectura y digitalizado	50
6.3 Integración del CCD al sistema de medición	52
6.3.1 Propuesta del sistema de medición	52
6.3.2 Mecánica y óptica asociada al detector	53
<b>7 Análisis de la técnica de medición</b>	<b>55</b>
7.1 Descripción	55
7.2 Análisis de la propagación de error	58
7.3 Medición angular por desplazamiento de imágenes utilizando correlación	61
7.3.1 Consideraciones de la escala de placa (campo visual)	62
7.3.2 Análisis de la correlación	63
7.3.3 Magnitud y sentido de desplazamiento	65
7.3.4 Búsqueda del pico de correlación por análisis de mínimos cuadráticos	66
<b>8 Integración, caracterización y almacenamiento</b>	<b>69</b>
8.1 Integración	69
8.1.1 Funcionamiento general	70
8.2 Adquisición de video de la cámara del telescopio	70
8.3 Integración de los programas desarrollados	71
8.4 Caracterización del sistema rotatorio	73
8.5 Almacenamiento de datos	75
8.5.1 formato de almacenamiento	75
<b>9 Resultados, mejoras al sistema y conclusiones</b>	<b>76</b>
9.1 Resultados experimentales	76
9.1.1 Calculo de la incertidumbre	77
9.1.2 Dependencia del error de medición contra la distancia	78
9.2 Mejoras al sistema	79
9.2.1 Tiempo de procesamiento	79
9.2.2 Ruido de lectura del detector	80
9.3 Conclusiones	81
<b>10 Referencias y bibliografía</b>	<b>83</b>
<b>Apéndice A. Rutinas del programa de análisis en C++</b>	<b>86</b>
<b>Apéndice B. Diagrama esquemático y distribución de componentes del controlador de motores de pasos</b>	<b>93</b>
<b>Apéndice C. Programa en ensamblador del controlador</b>	<b>97</b>
<b>Apéndice D. Control del manejador de picomotores modelo 8801, por medio de una PC bajo plataforma DOS y LINUX</b>	<b>105</b>

## Lista de figuras

- Figura 1. Esquema de un telescopio astronómico tipo Cassegrain. 1) Espejo primario, 2) Espejo secundario; 3) Plano de platina (lugar donde se sustentan los instrumentos de medición); 4) Plano de filtros; 5) Plano focal (Plano donde se adquiere la imagen)
- Figura 2. Bosquejo de un telescopio con montura alta-azimutal (a) Bosquejo del TIM y (b) Principio de la montura.
- Figura 3. Montura ecuatorial, (a) Telescopio de 2.12 metros del OAN, y (b) Tipos de montura ecuatorial.
- Figura 4. Algunas aplicaciones comerciales de los productos de Keyence Co. (a) medida del lector viajero en un lector de CD, (b) medida de la alineación de los pines en un conector, (c) medida de la altura de la soldadura en un tarjeta electrónica, y (d) medida del espesor de una oblea de silicio.
- Figura 5. Trayectoria del haz del láser en un sistema para medir posición, basado en un interferómetro.
- Figura 6. (a) Principio de Foucault knife-edge y (b) Imagen resultante.
- Figura 7. (a) Bosquejo del diagrama óptico, y (b) Señal de error por desenfoque.
- Figura 8. Principio de operación del detector de distancia.
- Figura 9. Aproximación de una parábola a una serie de puntos.
- Figura 10. Arreglo de los segmentos del TIM (las dimensiones son en milímetros)
- Figura 11. Esquema del medidor de distancias (calibración inicial).
- Figura 12. Montura propuesta del medidor de geometría de los segmentos del TIM.
- Figura 13. Motor de pasos tipo MO61-FD-6110.
- Figura 14. Codificador óptico de posición.
- Figura 15. Señales de salida de un codificador de posición en sus dos direcciones posibles.
- Figura 16. Codificador AT102 de compañía Mitutoyo.
- Figura 17. Decodificador de cuadratura HCTL-2016. (a) arquitectura de control y (b) secuencia de lectura.
- Figura 18. Bosquejo del sistema motor, óptico y cámara de adquisición.
- Figura 19. Caja del controlador dual de motores de pasos.
- Figura 20. Teoría de operación de los CCD's.
- Figura 21. Señales de temporización del CCD RL1024G.
- Figura 22. Respuesta relativa en función de la longitud de onda.
- Figura 23. Diagrama a bloques del esquema de funcionamiento de la tarjeta PCL-818HG.
- Figura 24. Esquema de lectura del CCD lineal.
- Figura 25. Esquema del medidor de distancias (calibración inicial).
- Figura 26. (a) Bosquejo de la óptica asociada al detector, y (b) Proyección isométrica.
- Figura 27. Arreglo experimental para la medición de distancias.
- Figura 28. Arreglo propuesto para la medición de la profundidad del espejo.
- Figura 29. Imagen obtenida del haz incidente sobre el espejo.
- Figura 30. Primer prototipo del medidor de distancia.
- Figura 31. Bosquejo del sistema motor, óptico y cámara de adquisición.

## Continuación de lista de figuras

- Figura 32. a) Imagen inicial, b) gráfica de una línea de píxeles de la imagen inicial, c) Imagen después del movimiento, d) gráfica de una línea de píxeles de la imagen después del movimiento, y e) gráfica de una línea de píxeles de ambas imágenes que muestra el desplazamiento entre ellas.
- Figura 33. A) Imagen inicial con una imagen tomada después de un movimiento, B) Resultado de la correlación de las dos señales.
- Figura 34. Ajuste de una parábola a una serie de puntos.
- Figura 35. Diagrama general a bloques del sistema de control y almacenamiento.
- Figura 36. Respuesta espectral vs. Sensibilidad relativa de la cámara TM-72EX.
- Figura 37. Muestra los errores angulares obtenidos en la montura rotatoria para movimientos de diferentes pasos. Y muestra la presencia de histéresis del sistema rotatorio.
- Figura 38. Gráfica que muestra los valores de la incertidumbre obtenida para diferentes valores de  $X$  y para diferentes distancias de medición.
- Figura 39. Sistema de desarrollo ADSP-21061, desarrollado por la compañía Analog Device.
- Figura 40. (a) fotografías de las celdas termoeléctricas, y (b) dimensiones de la celda propuesta.
- Figura B.1. Diagrama de conexión del motor de pasos al controlador.
- Figura B.2. Diagrama esquemático del controlador de motores de pasos.
- Figura B.3. Distribución de componentes del controlador de motores de pasos.
- Figura C.1. Diagrama a bloques del programa en ensamblador del controlador de motores de pasos.
- Figura D.1. Esquema del control.
- Figura D.2. Figura esquemática del principio de operación del picomotor.
- Figura D.3. Líneas de control digital del controlador.
- Figura D.4. Diagrama de tiempos de una secuencia de pasos.

# 1 Introducción

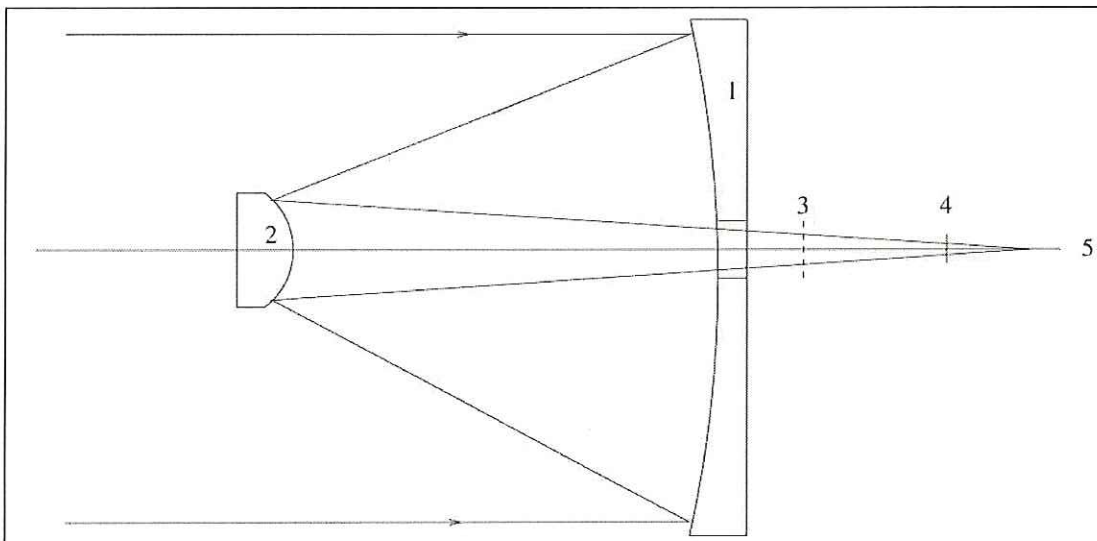
## 1.1 Antecedentes.

Uno de los grandes problemas en la fabricación de sistemas ópticos son las pruebas de la calidad de la superficie que se pule. Durante el proceso de fabricación son necesarias distintas pruebas, en especial cuando se trata de espejos cóncavos o convexos, el radio de curvatura es un parámetro que caracteriza la superficie, este radio de curvatura se debe medir aun cuando la superficie no tenga calidad óptica para que refleje o transmita luz, pues este radio de curvatura genera la superficie base para el figurado y finalmente el pulido. Existen diferentes técnicas estándar interferométricas para analizar las escalas de pulido de la superficie de un elemento óptico. Todas las técnicas coinciden en evitar el contacto físico con la superficie a medir, ya que se puede rayar. El principal problema que se tiene una vez que se terminó la superficie óptica, es como medir el radio de curvatura final, sobre todo si este es muy grande, las medidas con cinta métrica resultan con precisiones bajas dado que tienden a formar catenarias por la gravedad. La catenaria es la curva que describe una cadena suspendida por sus extremos. Los dispositivos comerciales que usan láser o interferometría tienen precisiones altas pero solo miden un par de metros.

El proyecto en el que se sustenta la idea fundamental de este trabajo está enfocado a la medida de radios de curvatura, del orden de 25 m con precisiones menores al 0.06%, de espejos esféricos para uso en la observación astronómica. Específicamente estos espejos se

usarán para el telescopio del proyecto TIM que se desarrollará en el Instituto de Astronomía de la Universidad Nacional Autónoma de México (IA, UNAM).

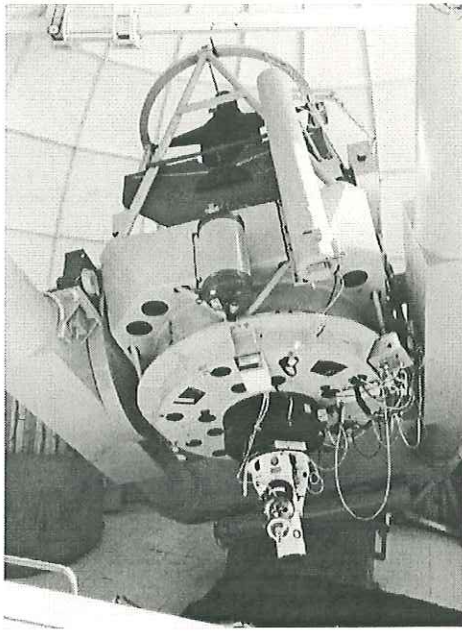
Para conocer un poco la problemática, se da una breve descripción de un telescopio para hacer observación astronómica, el cual es un instrumento óptico-mecánico que permite estudiar y observar objetos astronómicos (p.ej. galaxias, estrellas, planetas, cúmulos de estrellas, etc.). La gama de diseños ópticos esta limitada por la imaginación, sin embargo, cuando es necesario que el telescopio tenga gran apertura, mayor a 1 metro, lo ideal es usar superficies reflectoras, ya que para el uso de lentes sería necesario crecer los cristales controlando su homogeneidad para que el índice de refracción fuera constante en toda la lente, técnicamente es muy costoso, es por tal razón que la mayoría de los grandes telescopios, actuales y futuros funcionan por reflexión, por lo general con dos espejos, uno primario y otro secundario. El espejo primario colecta la luz directamente del cielo y sus dimensiones caracterizan el tamaño del telescopio. El espejo secundario es de mucho menor diámetro que el primario y recibe la luz reflejada en este para, a su vez, reflejarla sobre el instrumento donde se forma la imagen.



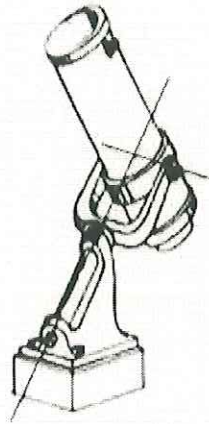
**Figura 1. Esquema de un telescopio astronómico tipo Cassegrain. 1) Espejo primario, 2) Espejo secundario; 3) Plano de platina (lugar donde se sujetan los instrumentos de medición); 4) Plano de filtros; 5) Plano focal (Plano donde se forma la imagen)**

Para soportar a los telescopios, que pueden pesar hasta algunas decenas de toneladas, se requiere una estructura firme y masiva. La estructura debe ser capaz de presentar grados de libertad para mover el telescopio con precisiones de segundos de arco. Para este fin existen principalmente dos tipos montura: la ecuatorial y la altazimut.

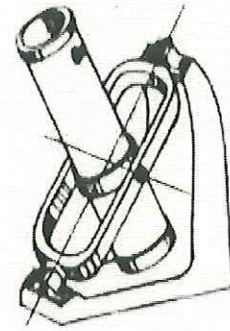
La montura altazimut, presenta dos grados de libertad: el eje de **azimut (Az)** y el de **altitud (Al)** o elevación; los dos ejes son ortogonales entre sí. El eje de Az se encuentra orientado hacia el cenit, lo cual permite al telescopio girar sobre su base. Y en conjunción con el eje de Al le permite también apuntar hacia cualquier coordenada celeste. Este tipo de estructura es mucho más ligera que la ecuatorial y por lo tanto, más indicada para telescopios de grandes dimensiones. Esta montura se puede apreciar en la Figura 2<sup>A</sup>, la cual corresponde a la montura altazimut del **Proyecto TIM** (Telescopio Infrarrojo Mexicano) que se desarrollará en el IA, UNAM.



(a)



Montura en horquilla



Montura inglesa

(b)

Figura 3. Montura ecuatorial, (a) Telescopio de 2.12 metros del OAN, y (b) Tipos de montura ecuatorial.

## 1.2 Planteamiento del problema.

Uno de los problemas en la construcción de los grandes telescopio es la fabricación del espejo primario, el cual puede ser **monolítico** o **segmentado**; además de la medición de los diferentes parámetros geométricos, tales como radio de curvatura y constante de conicidad, para obtener el espejo dentro de las especificaciones deseadas. Es importante aclarar que solo estamos interesados en estimar el radio de curvatura, dado que la estimación de la constante de conicidad esta fuera del tema de esta tesis.

Un **espejo monolítico**, como su nombre lo dice, es un espejo de una sola pieza. Por ello, generalmente es pesado, caro y de difícil manejo por sus grandes dimensiones.

Se conoce como **espejo segmentado** a un arreglo de espejos que en su conjunto forman un solo elemento óptico. A cada uno de estos sub-espejos les llamaremos **segmentos**. El espejo primario del TIM, será un espejo segmentado.

### **1.3 Hipótesis.**

Mediante el uso de la tecnología actual será posible desarrollar un dispositivo capaz de medir uno de los parámetros geométricos antes mencionados de un elemento óptico, con resolución de 5 micrómetros.

### **1.4 Objetivos.**

Diseñar y construir un sistema para medir el radio de curvatura, de los segmentos que constituirán el espejo primario del TIM, dadas las necesidades antes expuestas, es claro que la medida debe ser sin contacto físico, por los motivos expuestos en la introducción

### **1.5 Importancia del estudio.**

La mayoría de las compañías que producen espejos de grandes dimensiones (SCHOTT, CORNING, etc.), manejan varios presupuestos, los cuales varían según las propiedades del material cerámico necesitado, ya que para el caso de los espejos para uso astronómico una de las características más importantes es que los substratos tengan el coeficiente expansión térmica muy bajo, pues los gradientes de temperatura a los que se exponen los espejos son, en algunos casos, extremas, otra propiedad importante requerida para un espejo es que el material sea homogéneo.

Dadas todas estas características, es importante tener en mente que el sistema de medición ya sea para su posicionado en la mesa de pulido, así como de la estimación de parámetros tenga una alta precisión.

El sistema que se propone desarrollar es de vital importancia en la elaboración de los espejos, ya que pretende medir con una gran resolución el radio de curvatura del espejo y con esto obtener la geometría del mismo. Así, los datos que generará el sistema, son los que retroalimentan el proceso de pulido; esto es, alimentan a la máquina de pulido que es la que se encargará de corregir las imperfecciones.

De esta manera, la importancia del proyecto resulta de la posibilidad de contar con un dispositivo que mida con precisión la geometría del espejo que retroalimente su pulido, que tenga un costo comparativamente menor a los existentes en el mercado y que permita desarrollar tecnología óptica propia.

Los parámetros característicos de los grandes telescopios ya no se pueden medir con dispositivos estándares, como por ejemplo, cintas métricas, etc. Debido a las precisiones requeridas, así que el instrumento de medición que se propone en este trabajo es una idea alternativa a este tipo de medidas.

## **1.6 Limitaciones del estudio.**

El trabajo del proyecto se limitará a elementos ópticos con las siguientes características:

- Elementos poco reflectivos.
- Elementos ópticos con diámetros alrededor de 2 metros.
- Radios de curvatura mayor a 20.

En el siguiente capítulo describiremos algunas propuestas que existen en la literatura, las comentaremos en detalle. Es importante aclarar que este sistema de medida se usará solamente en las primeras etapas del pulido, dado que conforme se acerca a la figura deseada las precisiones en la medida son cada vez más pequeñas, hasta llegar a precisiones de 25 nanómetros; para lo cual se usa medidas interferométricas.

## 2 REVISIÓN DE LITERATURA

### 2.1 Introducción.

Debido a que el medidor de distancia sin contacto físico con la muestra es la parte medular del medidor requerido, nos enfocaremos al estudio de estas técnicas de medición. Se describirán las técnicas más innovadoras utilizadas por algunas de las compañías, así como algunas técnicas de medición publicadas en revistas de investigación científica.

### 2.2 Antecedentes.

Estudiaremos los dos sistemas comerciales más populares para la medición de distancia sin contacto, además de dos artículos publicados en revistas de investigación:

- KEYENCE. Ultra High Accuracy Laser Displacement Meter, LC-2400 Series
- Aerotech. Laser Interferometer System LZR3000
- A simple non contact profilometer.  
G Indebetouw.
- A 3D optical profilometer using a compact disc reading head  
Klaus Ehrmann, Arthur Ho y Klaus Schindhelm

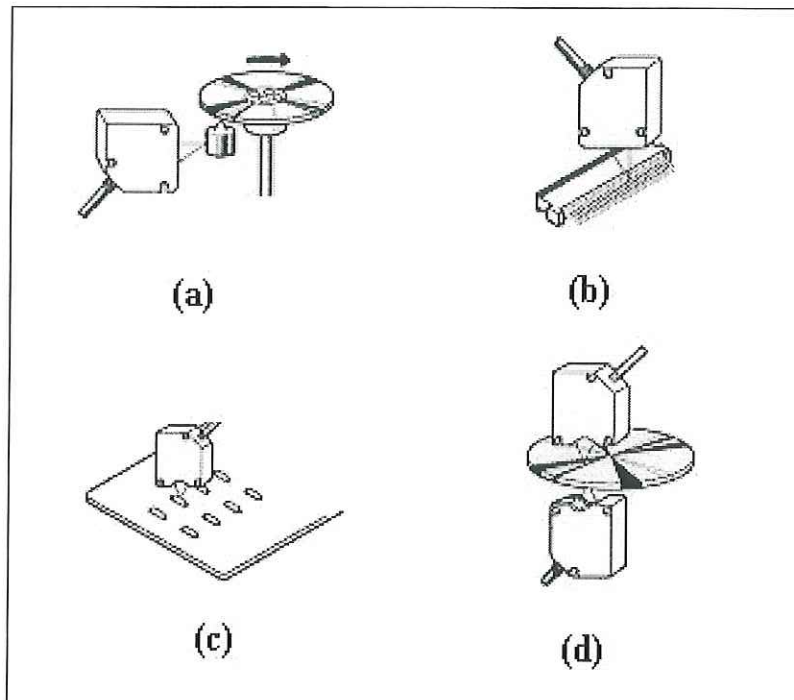
### 2.2.1 KEYENCE<sup>C</sup>. Ultra High Accuracy Laser Displacement Meter, LC-2400 Series.

La compañía KEYENCE, cuenta con una serie de medidores de distancia remota, con una gran resolución. La serie LC-2400A es lo último en velocidad de respuesta, expandibilidad, fácil manejo y estabilidad. La serie LC utiliza el principio de triangulación, el cual se basa en una fuente de luz, objetivo a medir y el sistema de detección, otra manera de ver esta triangulación es el hecho de que tenemos dos puntos fijos, y el objetivo es el que cambia de posición.

Este sistema comercial utiliza un rayo láser visible y puntual de 12  $\mu\text{m}$  de diámetro y un detector CCD lineal, y tiene las siguientes características:

- 50 KHz de frecuencia de muestreo y 10 microsegundos de tiempo de respuesta
- Resolución de 0.01  $\mu\text{m}$
- Linealidad de  $\pm 0.05\%$
- Distancia detectable hasta 50 mm

En la Figura 4, se muestran algunas de las aplicaciones comerciales donde se utiliza este tipo de medidor de distancia sin contacto.



**Figura 4.** Algunas aplicaciones comerciales de los productos de Keyence Co. (a) medida del lector viajero en un lector de CD, (b) medida de la alineación de los pines en un conector, (c) medida de la altura de la soldadura en un tarjeta electrónica, y (d) medida del espesor de una oblea de silicio.

Del resumen de características mostradas en la figura anterior, es claro que las distancia que puede medir son muy pequeñas, y por lo tanto su aplicación inmediata a nuestro caso no es factible.

### 2.2.2 Aerotech<sup>D</sup>. Laser Interferometer System LZR3000.

Se basan en un interferómetro con fuente de iluminación láser, el cual provee precisión, resolución y velocidad de estabilidad. Por todas estas características, el LZR3000 es la herramienta ideal para la manufactura de semiconductores, inspección de paneles planos, y medidas precisas. Tiene las siguientes características.

- Resolución de 0.15 nm.
- Salida estándar en cuadratura A y B, que elimina la necesidad de tarjetas de interfases
- Detección remota
- Fácil integración

Se omitirá el principio de operación del interferómetro. En la Figura 5, se muestra un diagrama de la trayectoria que sigue el haz del rayo láser, en el divisor de haz, denominado en la figura como “beamsplitter” (divisor de haz), es donde se produce el patrón de interferencia que generan los dos rayos; este patrón de interferencia es captado por un detector (arreglo CCD), el cual denominamos en la figura como “remote detector”.

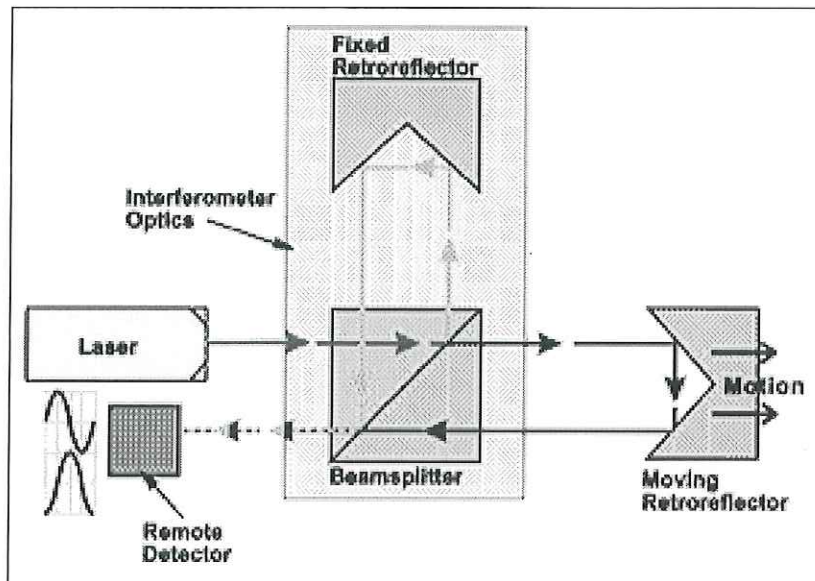


Figura 5. Trayectoria del haz del láser en un sistema para medir posición, basado en un interferómetro.

Este dispositivo tiene características que satisfacen nuestras necesidades de medida, pero tiene el inconveniente que el objetivo a medir debe estar anclado al sistema reflector, además de que la medida es incremental teniendo la necesidad de tener un punto de referencia en cada medida, esta característica del instrumento está lejos de nuestro propósito, otro inconveniente que podemos remarcar es que por ser un interferómetro, su principio de funcionamiento, no podría ser usado en un taller donde hay vibraciones y el clima no está controlado.

### **2.2.3 A simple non contact profilometer.**

Desarrollado por G. Inebetouw, del Institute of Applied Physics, University of Berne, Berne, Switzerland.

Básicamente es un perfilómetro óptico sin contacto. El principio se basa en dos rayos de luz, los cuales son detectados respectivamente sobre el objetivo a medir y sobre la superficie de referencia. La diferencia de elevación entre las dos superficies, es calculada por el tiempo de retardo entre los dos pulsos recibidos por un detector plano de imagen.

El inconveniente de este dispositivo es que la superficie que desea medir debe reflejar, la aplicación de este principio a una superficie opaca, como es nuestro caso, no tiene aplicación.

### **2.2.4 A 3D optical profilometer using a compact disc reading head<sup>1</sup>.**

Desarrollado por Klaus Ehrmann, Arthur Ho y Klaus Schindhelm, de la University of New South Wales, Sydney, Australia

El diseño, construcción y desarrollo de este perfilómetro óptico, está basado en una cabeza láser de lectura de un reproductor de discos compactos. El instrumento es capaz de hacer un perfil de un contorno arbitrario, utilizando el foco y el movimiento de desbalance ("*offset*"). Todo esto montado sobre un posicionador X-Y-Z.

Este dispositivo de medida es el que más se ajusta a las necesidades requeridas, por tal razón se hizo un estudio minucioso de este dispositivo que se presenta en el siguiente capítulo.

## 2.3 Sumario.

Después de analizar las propuestas que existen en el mercado, así como las técnicas más innovadoras publicadas en revistas científicas, fue posible contar con un panorama significativo para solucionar el problema. Así, se decidió utilizar un medidor de distancia que fuera absoluto y un principio de funcionamiento simple; por todo lo anterior, el criterio que más se aproxima a tales requerimientos es el utilizado por la compañía KEYENCE, en su sensor de desplazamiento modelo LC-2400, descrito anteriormente, este sensor como comercialmente se vende no puede ser aplicado a nuestras necesidades; sin embargo, podríamos usar su principio para generar uno nuevo, adecuado a los requerimientos establecidos, aunque esto fue coincidencia. Dado que en el transcurso de esta investigación surgió la idea, la cual nos da posibilidad de detectar movimientos de algunas cuantas micras, tal codificador fue ideado para un sistema rotacional que permitía 1000000 divisiones por vuelta equivalente a 1.2 segundos de arco de resolución, el cual como mostraremos mas adelante resolvía el problema del sistema de medidas, hay que recordar que el objetivo de caracterizar la geometría de un espejo que se esta puliendo esta dividido en dos partes, una parte óptica, fuera del alcance de esta tesis, y la parte del dispositivo de medida que es el objetivo de esta tesis.

En la siguiente sección se exponen las primeras pruebas realizadas y los logros alcanzados con cada uno de los principios propuestos inicialmente, así como las limitaciones que surgieron durante su desarrollo.

## **3. PRIMERAS PRUEBAS**

### **3.1 Perfilómetro utilizando una cabeza láser de lectura de un reproductor de discos compactos.**

En el inicio de desarrollo de este trabajo de tesis fue necesario empezar a estudiar algunos de las propuestas que mencionamos anteriormente, es por tal razón que en esta sección discutimos y analizamos ampliamente las primeras pruebas.

#### **3.1.1 Descripción.**

Nuestras primeras pruebas para desarrollar el sistema de detección de distancia en forma remota lo realizamos basándonos en el artículo titulado.

#### **A 3D optical profilometer using a compact disc reading head<sup>1</sup>**

El artículo muestra el diseño y construcción de un perfilómetro óptico, desarrollado en la Universidad de New South Wales en Sydney, Australia. El perfilómetro se basa en una cabeza láser de lectura de un reproductor de discos compactos. El instrumento es capaz de hacer un perfil de un contorno arbitrario, utilizando el foco y los movimientos de alineación propios del cabezal de lectura del reproductor.

### **3.1.2 Antecedentes del perfilómetro.**

Para mediciones de rugosidad y perfiles sin contacto se ha utilizado extensamente la técnica del principio de autoenfoco, debido a su gran resolución angular y radial. Su principio de no-contacto y su rápida respuesta; lo han convertido en la mejor herramienta en una gran gama de aplicaciones dentro del campo de la óptica y la micro mecánica.

El empleo del cabezal de un reproductor de discos compactos se debe a su desarrollo comercial, bajo costo y su alta integración; además que provee los elementos necesarios para nuestro proyecto. La cabeza óptica de lectura contiene un diodo láser, una lente colimadora, un divisor de haz, una lente como objetivo y un arreglo de foto detectores (este arreglo es parecido a un interferómetro Twyman-Green<sup>2</sup>)

Para leer los datos de información y realizar las correcciones debidas se requiere de tres señales extraídas del haz de luz reflejado: el error de enfoque, que conserva el haz enfocado en los espacios de los datos; el error de inclinación, que mantiene el haz radialmente centrado en la pista; y la señal de intensidad la cual se convierte en la información digital que está almacenada, para el caso de los reproductores de discos compactos. En nuestro proyecto la información de interés es el error de enfoque, ya que nos muestra la distancia de nuestro sistema al objetivo. A continuación describimos el dispositivo.

### **3.1.3. Materiales y métodos.**

El sistema completo, consiste en tres partes fundamentales: 1) mecánica del instrumento con la cabeza del sensor. 2) un controlador de motores para los movimientos y 3) la interfaz de acondicionamiento de las señales electrónicas.

#### **3.1.3.1 Cabeza del sensor óptico.**

El autor del artículo recomienda utilizar un lector de CD de la marca Philips modelo CDM-9; sin embargo, usamos algunos similares que utilizan solamente un rayo láser sencillo para generar y extraer las tres señales eléctricas descritas en el punto anterior.

La señal de error de foco está basada en el principio de Foucault knife-edge<sup>2</sup> (prueba de la navaja), que es equivalente a iluminar una superficie de manera rasante, para mostrar zonas brillantes que son picos y zonas oscuras que son valles, esta prueba garantiza que estamos cerca del plano focal, colocando solamente una cuchilla que elimine la mitad de la luz que proviene del objeto, tal como se muestra en la Figura 6.a.

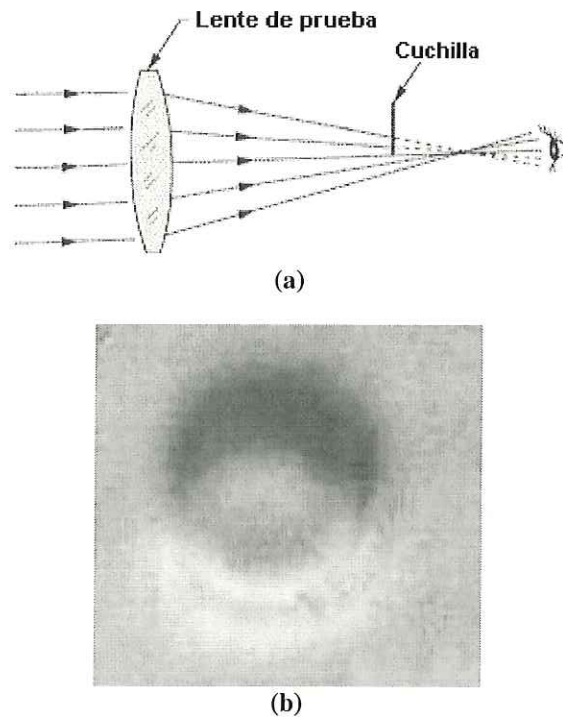


Figura 6. (a) Arreglo de prueba de Foucault ó de la navaja y (b) Imagen resultante.

En la Figura 6.b se muestra la imagen resultante, donde se puede apreciar claramente que solamente la mitad de encuentra iluminada, tal y como si la iluminación fuera de lado.

Como se muestra en la Figura 7.a, el divisor de haz produce dos haces de luz en forma de cono que son reflejados y desviados a un arreglo de cuatro fotodiodos; en la Figura 7.b, se muestra el patrón de iluminación para cada par de fotodiodos con diferentes enfoques. La señal de error de foco es la diferencia entre la intensidad de los fotodiodos internos y los dos externos, la cual en condiciones de un foco óptimo debe ser cercana a cero, lo anterior se representa matemáticamente por la siguiente ecuación:

$$S_{\text{foco}} = (\text{PD1} + \text{PD4}) - (\text{PD2} + \text{PD3}) \quad (3.1)$$

Donde las PD1, PD2, PD3 y PD4 representan la intensidad de luz captada por cada uno de los fotodetectores.

La señal de inclinación es obtenida por la diferencia entre los pares de fotodiodos inferiores y superiores (vea la Figura 7.b). Cuando se usa como sensor para medir superficie, ésta da el error de alineación entre el eje óptico del sensor y la superficie reflectora.

$$S_{\text{inclinación}} = (PD1 + PD2) - (PD3 + PD4) \quad (3.2)$$

La suma de todas las intensidades de los fotodiodos es proporcional a la intensidad de luz reflejada, de la siguiente manera.

$$S_{\text{intensidad}} = PD1 + PD2 + PD3 + PD4 \quad (3.3)$$

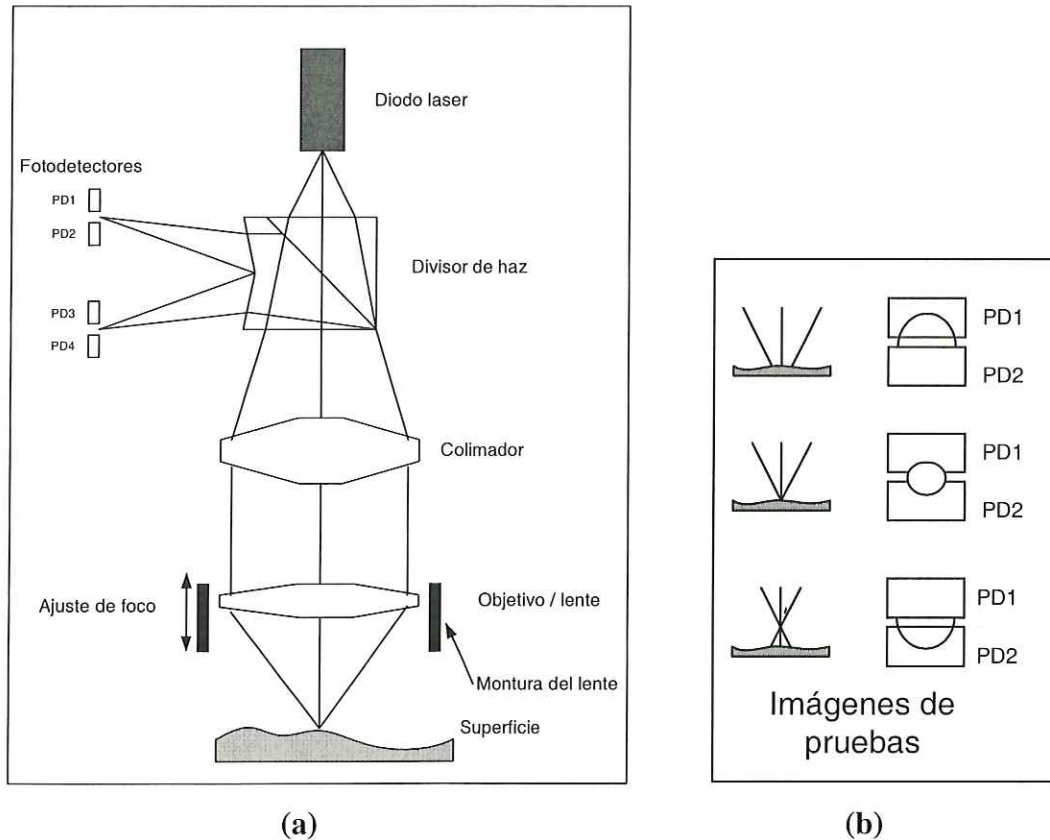


Figura 7. (a) Bosquejo del diagrama óptico, y (b) Señal de error por desenfoque.

Para la realización de este experimento se diseñó un arreglo de cuatro amplificadores de bajo ruido para leer las señales producidas por los fotodetectores, así como una fuente de corriente constante para mantener constante la intensidad del rayo láser.

### **3.1.3.2 Actuadores.**

Para el movimiento de inclinación y foco, el cabezal utiliza bobinas precargadas con una serie de resortes, los cuales a través de una montura mueven la lente en sus diferentes direcciones (vea Figura 7.a). La magnitud de los desplazamientos está en función de la corriente que pasa a través de las bobinas, para lo cual se diseñó un amplificador de voltaje a corriente regulada.

### **3.1.3.3 Medición de distancia usando la distancia focal.**

El propósito de este sistema es mantener siempre el haz de luz ortogonal y enfocado a la superficie a medir, utilizando los desplazamientos del objetivo. De esta manera, si codificamos el desplazamiento del objetivo y enfocamos el haz a la superficie, podemos deducir la distancia del sistema a la superficie.

Durante las primeras pruebas logramos codificar el intervalo dinámico del actuador de foco en 1024 posiciones, lo que nos dio una resolución de  $5 \mu\text{m}$ ; sin embargo, los movimientos de la montura no fueron lineales, lo que obligaba a caracterizar todo el sistema con algún patrón conocido y para cada modelo de lectora de disco compacto utilizado.

### **3.1.4 Problemas de hardware.**

El principal problema que se tuvo fue la inercia e histéresis que obtuvimos con los actuadores integrados en el lector de discos compactos, lo cual no permitió obtener una buena velocidad de respuesta y lectura, lo que obligó a bajar la velocidad de adquisición y no satisfacer uno de los principales objetivos de nuestro trabajo.

Además del hecho de que no teníamos un control completo de la cabeza de lectura, no se logró conseguir dos cabezales iguales, aunque mantenían el mismo principio de operación, cambiaban drásticamente en sus características intrínsecas.

Otro factor decisivo para abandonar esta idea fue que la superficie a medir fuera parcialmente reflectora, esta dificultad aunada a la anterior fue razón para abandonar esta idea de medida.

La experiencia adquirida durante el desarrollo de este trabajo motivó a regresar al principio de triangulación.

### **3.2 Sensor de distancia remoto por medio de triangulación basado en CCD lineal**

Posteriores a las pruebas con la cabeza lectora del reproductor de discos compactos, desarrollamos un sensor de distancia remota basado en un CCD (por sus siglas en inglés Charge Coupled Device) lineal. Esto fue debido a la simplicidad de su integración y sobre todo a que es un detector absoluto. Existen en el mercado una serie de medidores que usan este principio, sin embargo, no satisfacen los requerimientos que se necesitan para lograr el objetivo de la medida. Un ejemplo de este sistema de medición se muestra en la Figura 8. De esta figura, es claro que el CCD lineal desarrollado como parte de la tesis, podría ser usado como detector, aunque queda pendiente la parte óptica que está fuera del alcance del objetivo de este trabajo.

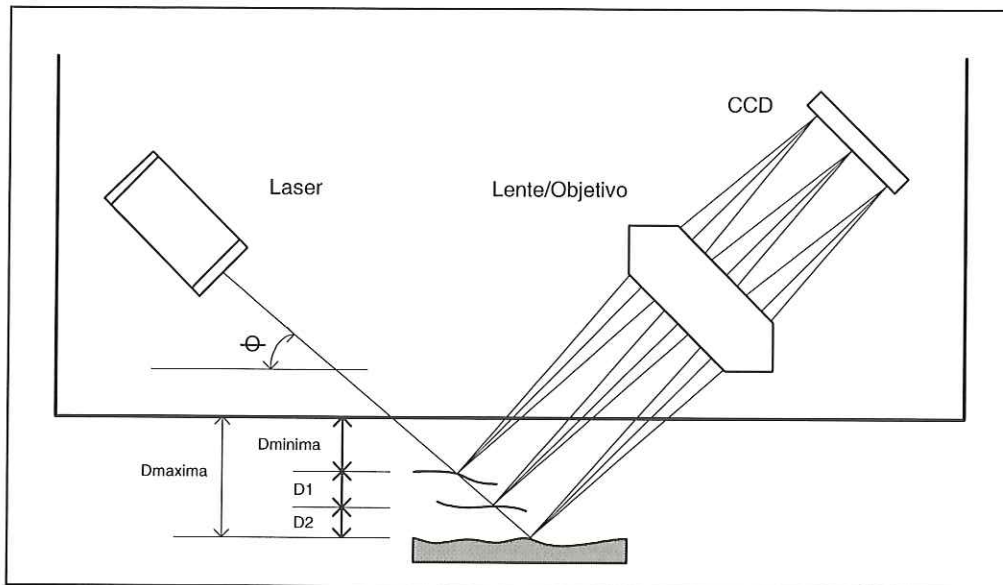


Figura 8. Principio de operación del detector de distancia.

### 3.2.1 Principio de operación.

El principio de operación se basa en la detección del haz de luz que incide sobre el CCD; esto es, el punto donde incide el haz de luz sobre el CCD está en función de la distancia del medidor al objetivo, como se muestra en la Figura 8. Aunado a esto, se desarrolló una rutina que analiza los puntos adyacentes al pico de mayor intensidad y aproxima la función de una parábola para obtener una resolución de sub píxeles. En el capítulo 7, se muestra el análisis matemático para ajustar una parábola a una serie de puntos.

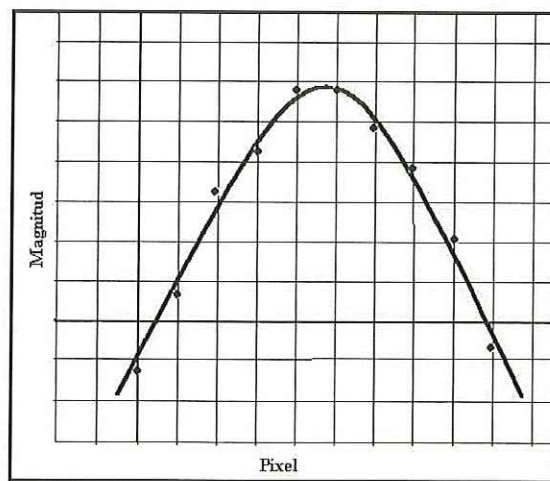


Figura 9. Aproximación de una parábola a una serie de puntos.

### **3.2.2 Características generales.**

Las características inherentes del sistema de detección remota, son:

- Detección remota
- Fácil integración
- Alta frecuencia de muestreo
- Medición absoluta
- Alta resolución

### **3.2.3 Limitaciones del principio de operación.**

El principal problema que se tuvo fue el intervalo de detección, el cual resultó ser muy pequeño para nuestros requerimientos; sin embargo, esto se podría solucionar incrementando el ángulo de incidencia lo cual implicaba sacrificar la resolución del detector.

Finalmente se siguió el mismo principio de triangulación bajo otro esquema totalmente diferente, como se muestra en el siguiente capítulo.

## **4. REQUERIMIENTOS PARA EL SISTEMA DE MEDICION**

### **4.1 Introducción.**

Como se mencionó en el capítulo 1, el espejo primario del TIM será un espejo segmentado. Como se muestra en la Figura 10, este constará de 18 segmentos de 1.85 metros de diámetro cada uno.

El sistema de medición propuesto en este trabajo fue propuesto como una solución a la estimación del radio de curvatura generado en cada uno de los segmentos que formaran el espejo primario.

En este capítulo se describe el principio de operación del desarrollo del dispositivo que mide la geometría de los espejos, así como el desglose de cada uno de los elementos que componen el sistema completo.

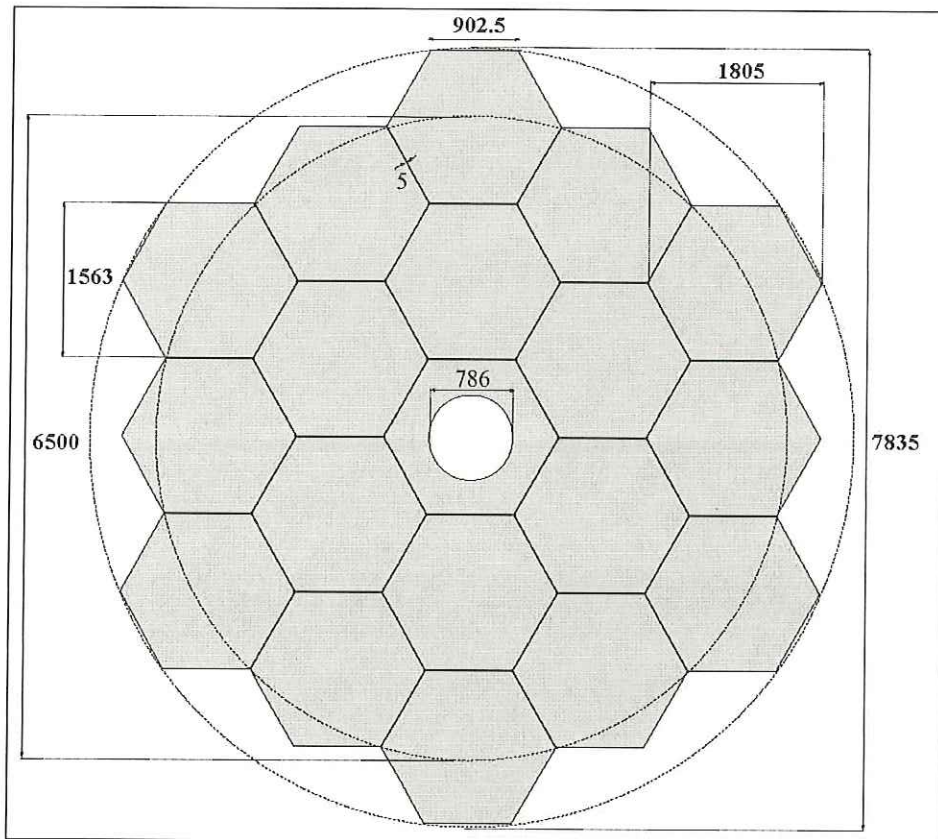


Figura 10. Arreglo de los segmentos del TIM (las dimensiones son en milímetros)

#### 4.2 Propuesta para el sensor de distancia remoto.

Nuestra propuesta está basada en el método de medición de distancias (telemetría) usado en las cámaras fotográficas<sup>3</sup>. Este método consiste en hacer que rayos de luz emitidos por una fuente de luz (comúnmente láser) recorran dos caminos diferentes y lleguen a un punto en común.

La idea es rotar el espejo plano, para hacer coincidir los puntos **A** y **B**, y calcular la distancia **S**, la cual está en función del ángulo del espejo plano (Figura 11). La función del CCD, es decodificar los movimientos angulares del espejo plano, por medio de una serie de imágenes sucesivas y un análisis matemático.

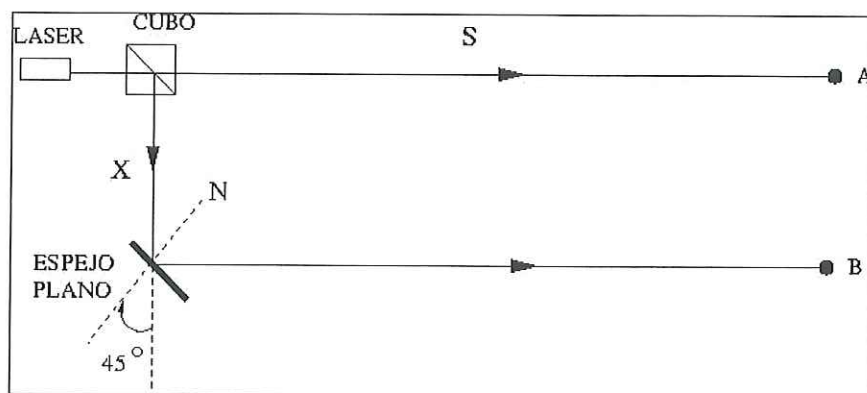


Figura 11. Esquema del medidor de distancias (calibración inicial).

Se propone una cámara comercial, para tomar las imágenes de los puntos proyectados y determinar cuando convergen en el mismo punto, lo anterior se trata con mayor detalle en el capítulo 7.

#### 4.3 Método de muestreo.

Como se mencionó en el capítulo 1, la parte medular del sistema es el medidor de distancia sin contacto, el cual dará la profundidad del espejo (llamado sagita); sin embargo, se necesita hacer un muestreo a toda la superficie del segmento, para esto, se propone un mecanismo de posicionamiento polar.

En la Figura 12 se muestra un bosquejo del mecanismo que se propone. Al medidor de distancia sin contacto lo denominamos “elemento óptico - electrónico de medición”.

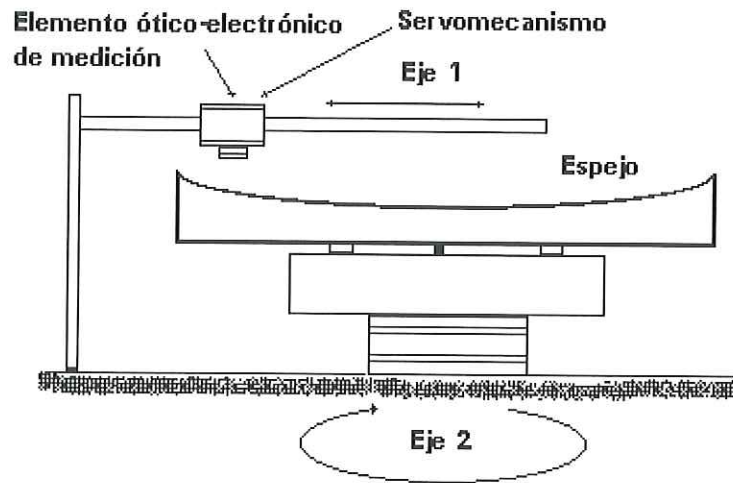


Figura 12. Montura propuesta del medidor de geometría de los segmentos del TIM.

#### 4.4 Elementos del sistema.

Para analizar cada una de los elementos del sistema, se separó en tres bloques:

- Posicionador polar de alta resolución
- Sensor de distancia óptico sin contacto
- Sistema de adquisición y almacenamiento

En los siguientes capítulos se discuten ampliamente cada uno de los elementos del sistema propuesto para la medición de la geometría de los segmentos del telescopio del proyecto TIM.

# **5. POSICIONADOR POLAR DE ALTA RESOLUCIÓN**

## **5.1 Introducción.**

La propuesta para esta etapa del dispositivo de posicionamiento debe cumplir con los siguientes puntos:

- Alta resolución.
- Buena repetibilidad.
- Mecánica con mecanismos anti-juego.

## **5.2 Posicionador polar.**

Es un sistema electromecánico que cuenta con dos grados de libertad, y con capacidad de posicionarse en cualquier punto de un plano, limitado por las dimensiones del posicionador; está basado en dos servomecanismos de alta resolución, cuenta con un actuador para cada eje, dos codificadores de posición incrementales de alta resolución y mecanismos precargados, para disminuir efectos indeseables en la mecánica.

En este capítulo estudiaremos el tipo de actuadores que utilizamos, el principio de operación de los codificadores ópticos de posición y el desarrollo de un controlador de motores.

A continuación se describe ampliamente los elementos que componen al sistema posicionador.

### 5.2.1 Actuadores.

Por las características del posicionador se optó por utilizar motores de pasos síncronos, ya que presentan movimientos discretos y una inercia muy baja; esto es, al detener la secuencia de control se frenan casi instantáneamente.

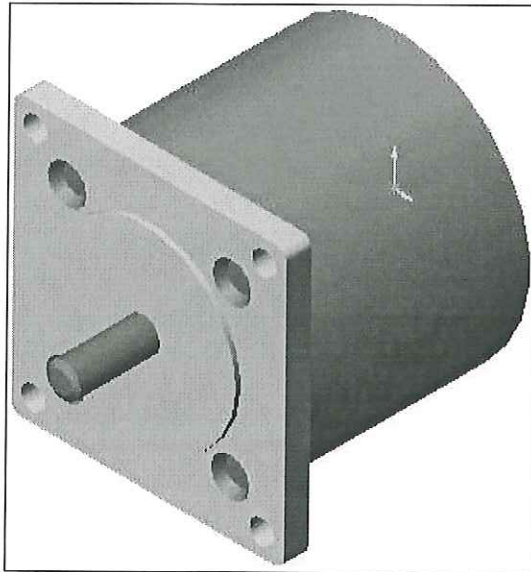
Se caracterizan por el tipo de movimiento discreto; esto es, se puede tener control sobre el movimiento, sin utilizar un codificador de posición o tacómetro, solamente con la secuencia de manejo que se le aplica; entre los más comunes se encuentran los de cuatro y cinco bobinas.

Existen varios métodos de control, con los cuales se puede aumentar la resolución de paso del motor; sin embargo, esto implica agregar un controlador más complejo.

El motor de pasos propuesto fue el tipo **MO61-FD-6110** de la compañía **Superior Electric** que tienen las siguientes características:

Pasos por revolución	200
Voltaje de alimentación	5 Vcd
Corriente por fase	1 Amp.
Torca	53 oz . in
Número de bobinas	4

En la Figura 13, se presenta un bosquejo del motor de pasos utilizado.



**Figura 13. Motor de pasos tipo MO61-FD-6110.**

### **5.2.2 Codificador óptico de posición.**

Un codificador óptico se puede resumir como un dispositivo opto electrónico, capaz de codificar la posición y la velocidad de un objeto a medir, mediante el número de pulsos de salida o la frecuencia de salida respectivamente.

Decodificar la velocidad es relativamente fácil, ya que esta es la frecuencia de salida del codificador; sin embargo, decodificar la posición es muy poco más complejo, obteniéndose dos señales, la dirección y el número de pulsos de desplazamiento.

Existe una gran variedad de codificadores, diferenciándose por el número de pulsos por revolución, lo cual da la resolución.

En la Figura 14, se muestra la retícula de un codificador óptico incremental giratorio, donde se muestran las zonas claras y oscuras que codifican el desplazamiento del disco giratorio.

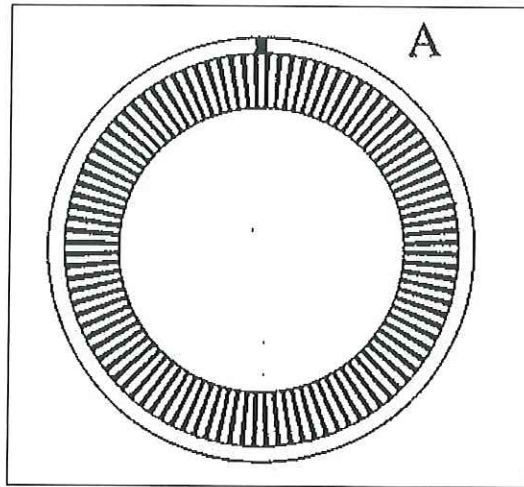


Figura 14. Codificador óptico de posición.

En la siguiente figura, se muestra una ampliación de los sensores y las señales de salida del codificador, se generan dos señales, A y B, las cuales tienen un desfase de 90 grados de la fase B con respecto a la A, cuando el codificador se desplaza en sentido de las manecillas del reloj (CW) y  $-90$  grados en el sentido contrario (CCW)

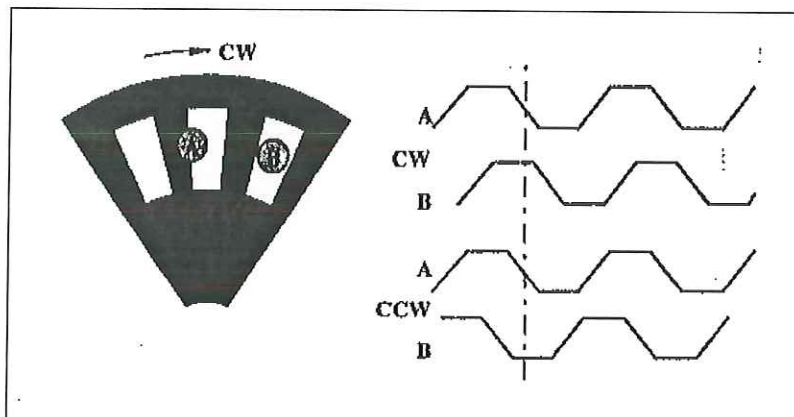
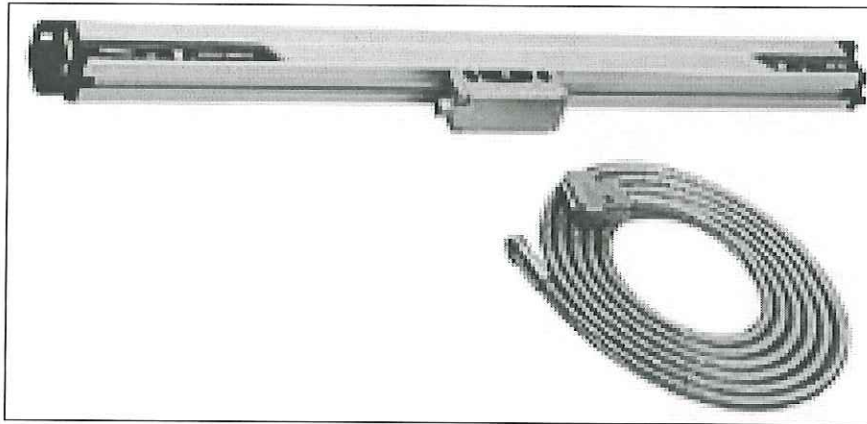


Figura 15. Señales de salida de un codificador de posición en sus dos direcciones posibles.

Estas dos señales dan la información necesaria para conocer en todo momento, el sentido y la magnitud de los desplazamientos; a estas dos señales se les conoce como “**señales en cuadratura**”. Aunque en nuestro sistema proponemos utilizar codificadores incrementales lineales, estos, trabajan bajo el mismo principio de operación. El codificador propuesto es una escala lineal modelo **AT-102** de la compañía **Mitutoyo** (véase Figura 16), la cual da

una resolución de  $5 \mu\text{m}$  directamente y hasta  $0.2 \mu\text{m}$  utilizando el interpolador **SAM-15** de la misma compañía.



**Figura 16. Codificador AT102 de compañía Mitutoyo.**

La escala del codificador es de uso industrial, tiene alta protección contra polvo, grasas, chispeo de líquidos, alta inmunidad al ruido eléctrico, etc. Las fases de salida son en cuadratura y en modo diferencial, con lo cual se aumenta la inmunidad al ruido eléctrico.

#### **5.2.2.1 Decodificador de posición.**

Se implementó basándose en el circuito integrado **HCTL-2016**, el cual es un contador de cuadratura de 16 bits, con “**latch**” interno, sistema de “**anti-aliasing**” y conexión a ducto. La conexión a ducto nos reduce el número de componentes electrónicos, el sistema “**anti-aliasing**” elimina los pulsos generados por ruido e interferencia, lo que aumenta la inmunidad al ruido.

En la Figura 17 se muestra el diagrama de tiempo de cada contador, cabe señalar que al momento de seleccionar el contador (al poner en bajo la línea “selección”), internamente retienen el dato de su contador interno, sin dejar de contar internamente algún pulso que le llegue en el tiempo de lectura<sup>E</sup>.

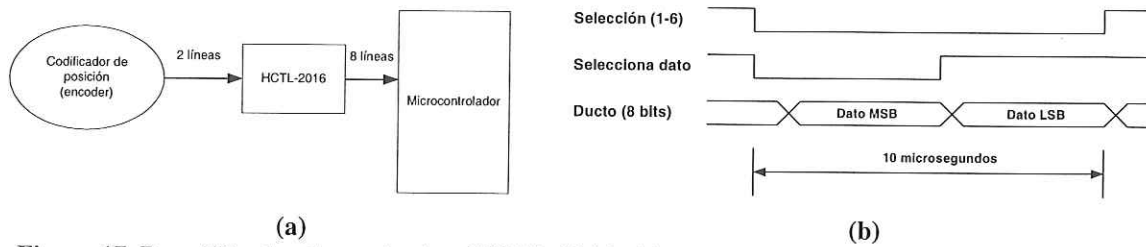


Figura 17. Decodificador de cuadratura HCTL-2016. (a) arquitectura de control y (b) secuencia de lectura.

### 5.2.3 Codificador utilizando medición angular (sistema alternativo para aumentar precisión y resolución)<sup>4</sup>.

Para aumentar la resolución de la regleta se propone el uso de un codificador óptico adicional, el cual se basa en una serie de imágenes tomadas al engrane del sistema motor. Estas imágenes son analizadas matemáticamente por medio de correlaciones sucesivas y de esta forma calcular el movimiento angular en el engrane del sistema motor. Para lo cual se ha caracterizado un sistema rotatorio comercial, el cual es controlado a través de la computadora.

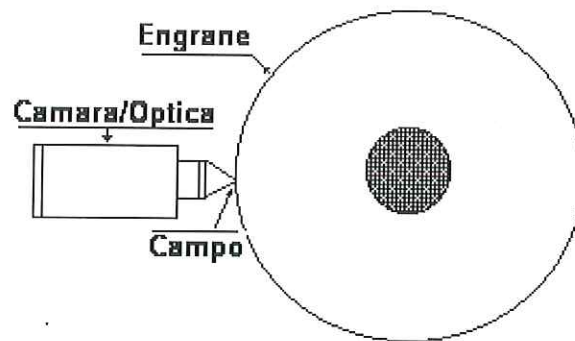


Figura 18. Bosquejo del sistema motor, óptico y cámara de adquisición.

El principio se basa en una serie de imágenes de los engranes tomadas por la cámara y un análisis matemáticos de la mismas, el proceso se explica a detalle en el capítulo 6, donde tiene su aplicación principal en el sistema.

## 5.3 Controlador de motores de pasos<sup>5</sup>.

### 5.3.1 Descripción.

Se diseñó e implementó un controlador dual de motores de pasos, el cual está basado en el microcontrolador **AT89C2051-10PC** de la compañía **ATMEL**, el cual es un dispositivo que tiene integrado dentro de un encapsulado de 20 patas, 2 KB de memoria flash, 128 bytes de memoria RAM, 15 líneas configurables de entrada / salida, 1 puerto serie, 2 contadores, 2 temporizadores y 2 interrupciones externas.

Se optó por la opción del microcontrolador con el fin de tener un sistema autónomo; esto es, que fuera totalmente independiente y modular, que contara con un puerto serie por el cual reciba los mandos de control y no dependiera del resto del sistema.

En el apéndice B se muestran los diagramas esquemáticos y distribución de componentes del controlador. Una de las principales características del controlador es el hecho de que toda la etapa de potencia está eléctricamente aislada de la alimentación de microcontrolador, lo que robustece la inmunidad al ruido eléctrico. En la tabla 1 se muestra la función de cada conector; además, el controlador dual, tiene un puerto de 2 bits de entradas digitales, los cuales utiliza para supervisar los interruptores de proximidad o mecánicos.

**Tabla 1. Conectores de controlador dual.**

<b>Conector</b>	<b>Función</b>
CON-1	Alimentación y salida a motor
CON-2	Alimentación de +5Vcd y puerto serie RS-485
DB9	Puerto serie RS-232
FRENO	Salida a frenos
CONFIG	Configuración y entrada a codificador

En la Figura 19 se muestra una fotografía del sistema completo, el cual está integrado en una caja de uso industrial, lo cual lo protege de las inclemencias del ambiente de operación.

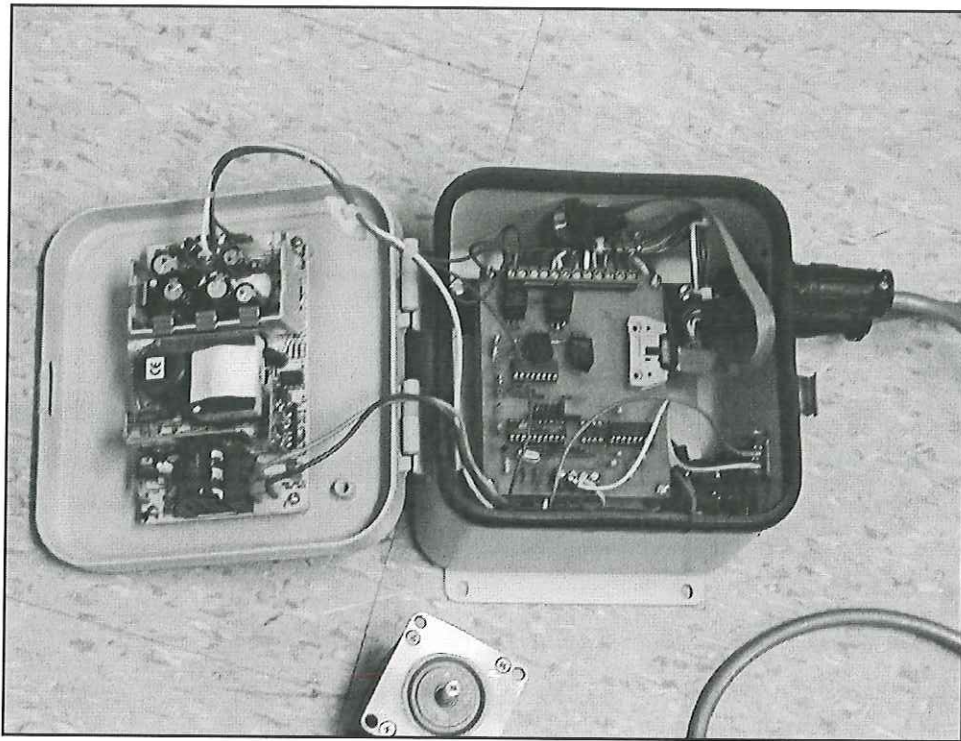


Figura 19. Caja del controlador dual de motores de pasos.

### 5.3.2 Características generales del controlador.

Esta es la primera versión de este controlador de motor de pasos, en la cual se implementaron las funciones básicas:

- **Modificar el modo de operación**
- **Variar la velocidad máxima**
- **Activar rampa**
- **Activar eco**

A continuación se da una explicación más detallada de estas características:

**a) Modificar el modo de operación (únicamente por programación).** Se refiere al encendido del motor, en “**modo-off**” sólo se activan las bobinas del motor cuando este se va a mover (des-energizándolo cuando está estático), la desventaja de este modo es que pierde completamente la torca; sin embargo, el motor no se calienta. En “**modo-on**”, el motor siempre se mantiene encendido, aun cuando esta estático, en ningún momento se pierde la torca, aunque sufre un pequeño calentamiento. Al inicio del programa toma el “modo-off”, aunque después se puede modificar por programación,

**b) Variar la velocidad máxima (únicamente por programación).** Por medio de un mando que se describe en la siguiente sección, se puede modificar la velocidad máxima del motor, la cual está expresada en pasos por segundo (PPS), el valor inicial es de 200 PPS,

**c) Activar rampa (únicamente por programación).** Se activa solamente por programación, el programa inicializa con la rampa no activada, la rampa ayuda a disminuir los errores debidos a la inercia del sistema,

**d) Activar eco (únicamente por programación).** Se activa solamente por programación, el programa inicializa con “eco inactivo”. Es importante activarlo, cuando se va a trabajar con dos o más controladores conectados en “cadena de margaritas” utilizando el puerto serie RS-232, y

**e) Modo del paso (solo por programación).** Se activa solamente por programación, el programa inicializa con paso completo, dejándose la opción de configurar el controlador a medio paso, para obtener el doble de resolución.

### 5.3.3 Características eléctricas del controlador.

En la tabla 2, se muestran algunas de las características más importantes del controlador, entre las que destaca el intervalo tan amplio de voltaje de alimentación, el cual se debe al hecho de utilizar dispositivos FET's como amplificadores de corriente, los cuales al operar como interruptores disipan muy poca energía.

**Tabla 2. Características del controlador dual.**

<b>Características eléctricas</b>	
Velocidad máxima	400 PPS
Resolución	0.9 grados / cuenta @ PC
Repetibilidad	1 Cuenta
Corriente máxima	3 Amperes nominal
Voltaje máxima	48 Vcd
Velocidad de comunicación	1200 Bps a 9600 Bps

Todas las líneas de potencia son opto acopladas por medio de un acoplador cuádruple (PS2501-4), y posteriormente amplificadas en corriente por un transistor FET (IRF-740), véase el diagrama esquemático en el apéndice B. Lo que lo hace un circuito sencillo, de fácil mantenimiento y sumamente confiable e inmune al ruido eléctrico

A continuación se discute el segundo elemento del sistema propuesto para la medición de la geometría de los tejos del TIM.

## **6. SENSOR DE DISTANCIA ÓPTICO SIN CONTACTO**

### **6.1 Descripción.**

En esta sección se describe el principio de operación de un CCD como elemento fundamental, el principio de operación así como su integración al sistema de medición.

### **6.2 Dispositivo acoplado por carga (CCD).**

Es un dispositivo opto-electrónico, formado por un arreglo de detectores de luz, con los cuales forma una imagen, existe una gran variedad de CCD's, normalmente se clasifican por las dimensiones del arreglo (lineales, cuadrados o rectangulares), sensibilidad al espectro de luz (ópticos, infrarrojos, etc.) y por su velocidad de adquisición.

Existe también de diferentes grados, dependiendo de la uniformidad y linealidad de su sensibilidad, los de mayor grado o calidad son los de uso militar, los cuales están restringidos, salvo ciertas excepciones que se utilizan con fines científicos; y los comerciales que generalmente son de menor calidad.

En la Figura 20, se muestra un bosquejo de la teoría de operación de un CCD de 3x3 elementos o foto detectores, se observa como se va almacenando los fotones de luz convirtiéndolos en carga eléctrica.

La figura muestra la forma de lectura del CCD, la cual se basa en dos registros de corrimiento (vertical y horizontal), los cuales se encargan de recorrer la carga de cada uno de los foto detectores a un único pozo de salida, en este punto la carga eléctrica se convierte a voltaje a través de un capacitor; posteriormente se acondiciona la señal para alimentar al convertidor analógico digital. De esta manera si se lleva el conteo de los registros de corrimiento y el control del convertidor analógico a digital, se obtienen la matriz de datos correspondiente a los foto detectores del CCD.



Figura 20. Teoría de operación de los CCD's.

Otra clasificación no menos importante puede ser el número de salida analógicas y fases de control que puede tener el CCD, ya que de estas variables se deriva en gran parte la velocidad de muestreo del mismo.

### 6.2.1 Características de los CCD.

A continuación se presentan las características generales de los detectores CCD's, y posteriormente daremos las características específicas del detector utilizado en este trabajo.

**Número de elementos.** Nos indica el tamaño de la matriz de los foto-detectores.

**Dimensiones de los elementos.** Indica la geometría y las dimensiones de cada foto-detector, normalmente este valor es del orden de micrómetros.

**Tamaño del pozo.** Se refiere a la capacidad de almacenamiento de carga de cada foto-detector, normalmente esta característica se expresa en número de carga de electrones.

**Corriente oscura.** Es la carga que se va almacenando en los foto-detectores en ausencia de luz, este dato se expresa en unidad de carga por tiempo (p. ej.  $5 e^-$ /hora, lo que indica que se almacenará una carga equivalente a 5 electrones en una hora).

**Eficiencia cuántica.** Nos indica el porcentaje de energía en forma de fotones, que transformara en carga eléctrica, este parámetro es adimensional. Se expresa en porcentaje.

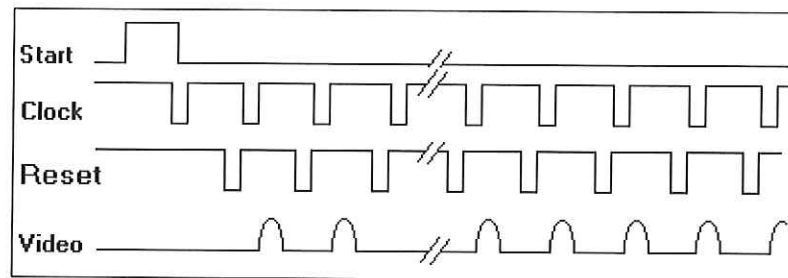
**Respuesta espectral.** Nos indica el intervalo de longitudes de onda a los cuales va a responder el CCD, este parámetro normalmente se expresa en forma de grafica, en función de la longitud de onda y de la eficiencia cuántica del detector.

### 6.2.2 Lectura del CCD.

Nos enfocaremos sobre la lectura de los CCD lineales (en especial al CCD lineal utilizado en nuestro proyecto de trabajo), los cuales sólo tienen un vector de foto detectores y por ende un solo registro de corrimiento.

Utilizamos el CCD **RL1024G** de la compañía **Eg&G Reticon**, el cual es un CCD lineal de 1024 elementos y un solo canal de salida.

En la Figura 21 se muestra la temporización de las señales de reloj necesarias para llevar a cabo la lectura del CCD utilizado, se da un pulso de inicio (**Start**) y posteriormente empieza la secuencia de lectura de cada foto detector (**Clk**), después de cada corrimiento de carga y de la digitalización, se limpia el capacitor de salida que almacena la carga que proviene del foto detector, para esto se utiliza la línea (**Reset**).



**Figura 21. Señales de temporización del CCD RL1024G.**

En la Tabla 3 se muestran los valores de voltaje de los pulsos de temporización, donde las líneas “Start” y “Clk” tienen niveles de voltaje similares a los niveles TTL, mientras que la línea “Reset” tiene una excursión más grande (-10 a 5 Volts), esto es con el fin de descargar más rápido al capacitor de salida del CCD.

**Tabla 3. Nivel de señales de las líneas de control.**

	<b>VOL (Volts)</b>	<b>VOH (Volts)</b>
<b>Start</b>	0.7 V máximo	4.9 V mínimo
<b>Clock</b>	0.7 V máximo	4.9 V mínimo
<b>Reset</b>	-10 V máximo	4.9 V mínimo
<b>Video</b>	0 V mínimo	350 mV máximo

En la siguiente figura se muestra la respuesta espectral del CCD RL1024G, ya con la ventana de cuarzo, que hace la función de un filtro óptico, el cual deja pasar solamente el intervalo de luz visible.

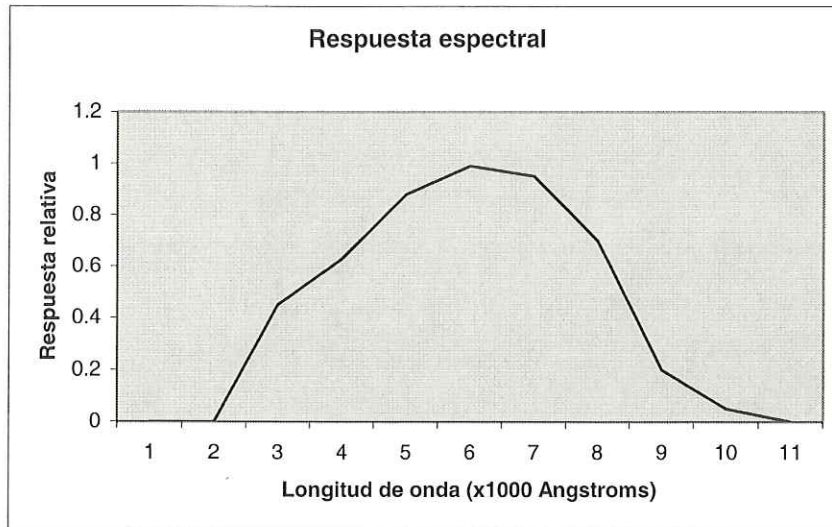


Figura 22. Respuesta relativa en función de la longitud de onda.

Posteriormente se verá más a detalle las características de este componente, profundizaremos en las características del CCD lineal y veremos con más detalle el método de lectura utilizado.

### 6.2.3 Generación de secuencia de lectura y digitalizado.

Para realizar la temporización de control y la digitalización utilizamos una PC con una tarjeta de adquisición de señales analógicas y salidas digitales.

La tarjeta de adquisición utilizada es de la compañía **Advantech** modelo **PCL-818HG**, la cual tiene las siguientes características: 16 líneas digitales de entrada, 16 líneas digitales de salida, 1 contador, 1 temporizador, 1 interrupción externa y 16 entradas analógicas digitalizadas a 12 bits con una frecuencia máxima de conversión de 200 KHz.

La Figura 23 muestra el diagrama de funcionamiento de la tarjeta de adquisición.

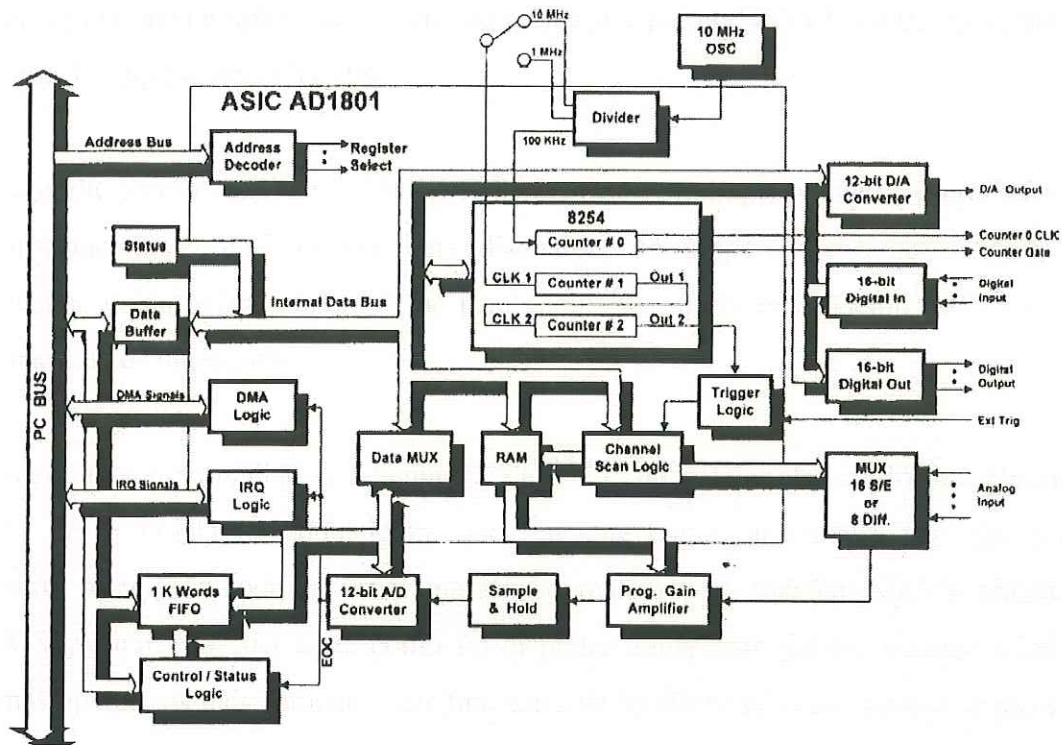


Figura 23. Diagrama a bloques del esquema de funcionamiento de la tarjeta PCL-818HG.

En la Figura 24, se muestra un bosquejo del sistema de lectura del CCD.

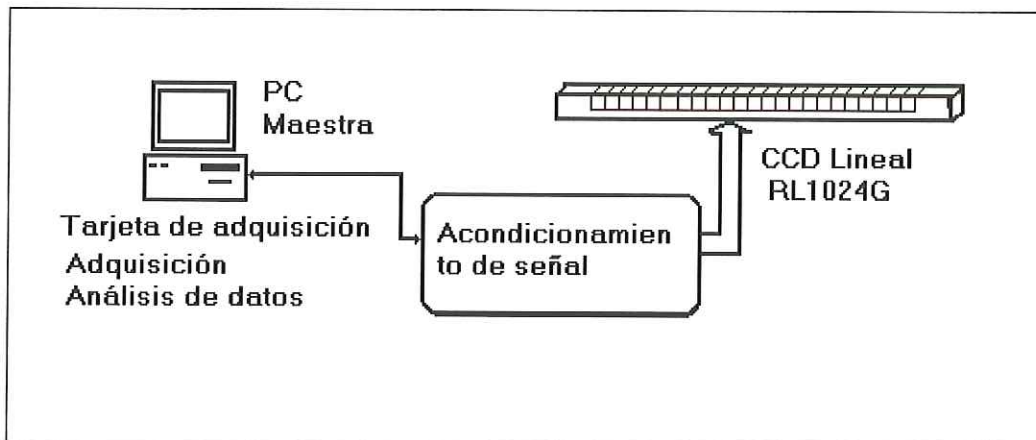


Figura 24. Esquema de lectura del CCD lineal.

Además de la tarjeta de adquisición se realizó una etapa de acondicionamiento de señales, la cual se encarga de acoplar las señales digitales de la secuencia de lectura; así como la salida analógica que entrega el CCD, ambas son modificadas en sus niveles de voltaje y

(rotado 45 grados respecto de la dirección de los rayos incidentes) en el cual se reflejan hasta llegar al punto **B** que se encuentra en el plano de observación, tal como se muestra en la siguiente figura.

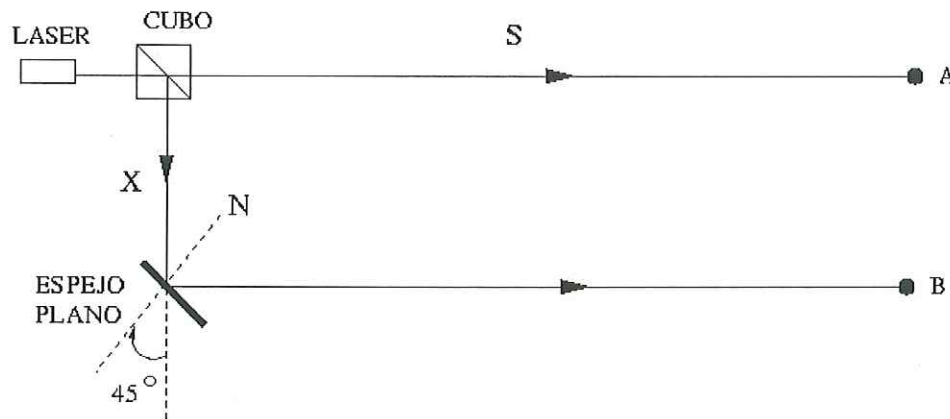


Figura 25. Esquema del medidor de distancias (calibración inicial).

Donde **S** es la distancia que se desea conocer, **X** es la distancia entre el centro del cubo y el centro del espejo plano, **A** y **B** son dos puntos en el plano de observación en donde llegan los rayos de luz.

De esta manera, rotando el espejo plano, podemos hacer coincidir los puntos **A** y **B**, y calcular la distancia **S**, la cual está en función del ángulo del espejo plano.

La función del CCD, es la tomar una serie de imágenes al engrane-motor que mueve el espejo plano, y por medio de un análisis matemático calcular su movimiento angular con una alta precisión.

### 6.3.2 Mecánica y óptica asociada al detector.

Para realizar los primeros experimentos se diseñó y construyó un sistema mecánico que integrara los elementos ópticos necesarios, así como la electrónica de lectura del CCD, a continuación muestra el bosquejo y se describe cada uno de los elementos que lo componen (Figura 26).

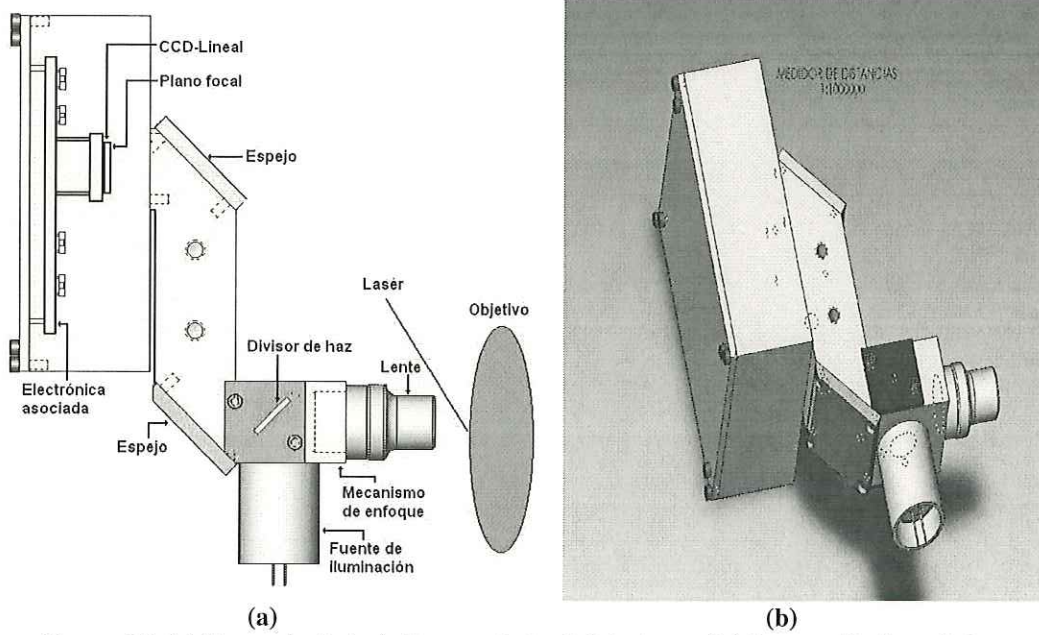


Figura 26. (a) Bosquejo de la óptica asociada al detector, y (b) Proyección isométrica.

- **Lente o microscopio.** Es el elemento que converge la imagen del objetivo al detector, a su vez es el elemento que define el campo visual que observaremos.
- **Mecanismo de enfoque.** Consta de una rosca fina, con el fin de ajustar la distancia focal de la lente al objetivo.
- **Divisor de haz.** La función de este elemento es la de desviar una parte del haz de la fuente de iluminación al objetivo.
- **Espejos.** Sirven para doblar el haz del objetivo, con el fin de hacer más compacto el sensor de distancias.
- **CCD Lineal.** Es el detector, y debe de estar en el plano focal, donde convergen los haces de luz provenientes del objetivo.
- **Electrónica asociada.** Son los amplificadores de bajo ruido que deben estar lo más cerca del detector, para evitar efectos indeseables por ruido e interferencia.

Como fuente de iluminación se utiliza un diodo LED de alta intensidad, alimentado por una fuente de corriente constante, para mantener la iluminación lo más estable posible.

En el capítulo siguiente, se estudia la propuesta de medición, así como el análisis matemático de la incertidumbre de medición.

## 7. ANÁLISIS DE LA TECNICA DE MEDICIÓN

### 7.1 Descripción.

Para determinar la distancia,  $S$ , usando el arreglo mostrado en la Figura 27, consiste en hacer que los rayos que llegan al punto  $B$  sean desviados hasta el punto  $A$ , esto se logra rotando el espejo plano. De tal manera que se tendría un triángulo rectángulo, del cual conocemos  $X$  y podemos conocer el ángulo del rayo a partir de conocer el ángulo de la montura del espejo plano, ver Figura 30.

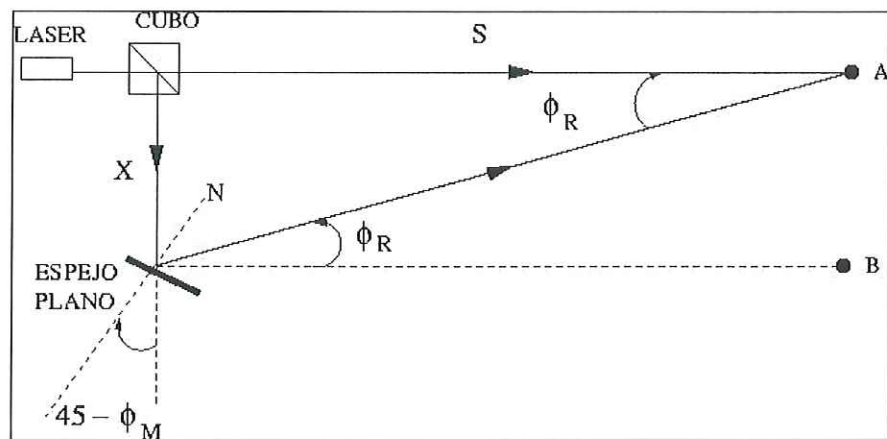


Figura 27. Arreglo experimental para la medición de distancias.

Donde  $\Phi_R$  es el ángulo formado entre los rayos que pasan directamente por el cubo y los rayos que son reflejados por el espejo plano,  $\Phi_M$  es el ángulo medido en la montura rotatoria en la cual se encuentra el espejo plano.

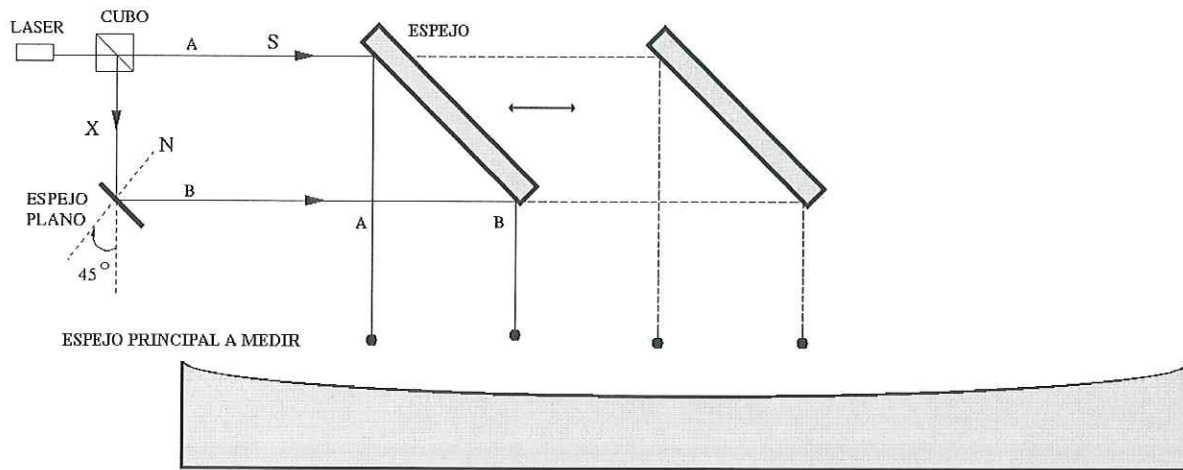
De la Figura 27 podemos ver que la distancia  $S$  puede determinarse usando la siguiente relación,

$$S = \frac{X}{\tan \Phi_R} \quad (7.1)$$

$\Phi_M$  es el ángulo que realmente medimos y de la Figura 27 podemos ver que está relacionado con el ángulo del rayo  $\Phi_R$  de acuerdo con la ley de reflexión, dada por

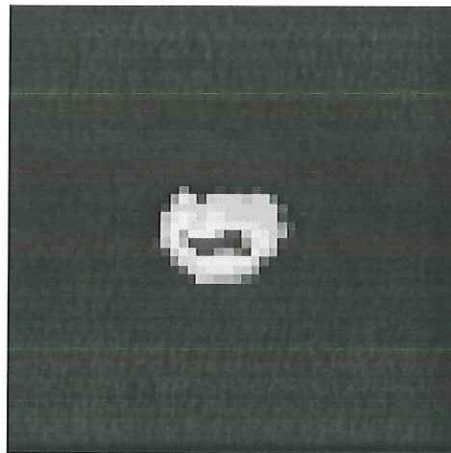
$$\Phi_R = 2 \Phi_M \quad (7.2)$$

Por cuestiones de espacio, se agregó un espejo plano al sistema, con el fin de mantener la mayor parte del medidor de distancia a un lado del espejo a medir, y muestrear las profundidades del espejo recorriendo sólo un espejo plano sobre el espejo principal, el cual dobla el haz de luz sin modificar el principio de operación. Dicho esquema se muestra en la Figura 28. Una de las ventajas de este método es el de minimizar la catenaria del sistema mecánico que soportará el espejo plano, esto debido a que soporta menos masa.



**Figura 28.** Arreglo propuesto para la medición de la profundidad del espejo.

Una cámara digital toma la imagen del haz incidente **A** sobre el espejo a medir, por medio de dos “obturadores” se deja pasar solamente uno de los rayos (**A** o **B**) para su incidencia sobre el espejo a medir; y por medio del cálculo del centro de irradiancias (“centroide”) de cada uno de los haces reflejados determina con gran exactitud cuanto convergen en el mismo punto.



**Figura 29.** Imagen obtenida del haz incidente sobre el espejo.

El cálculo del centro de masa de la imagen esta dado por la siguiente ecuación:

$$C_x = \frac{\sum_{x,y} x.I(x, y)}{\sum_{x,y} I(x, y)} \quad (7.3)$$

$$C_y = \frac{\sum_{x,y} y.I(x, y)}{\sum_{x,y} I(x, y)} \quad (7.4)$$

donde  $C_x$  indica el centro en el eje X,  $C_y$  en el eje Y,  $I(x,y)$  indica el valor de la intensidad en el cada punto. Se realizo una rutina en lenguaje C++ que realiza esta rutina y determina la distancia entre los dos haces incidentes sobre el espejo.

## 7.2 Análisis de la propagación de error.

Para realizar la propagación de error es necesario buscar los extremos de las variables involucradas, es decir: Supongamos que se hace un conjunto de mediciones y que la incertidumbre de cada medición puede expresarse con la misma probabilidad. Además, estas mediciones se utilizan para calcular la distancia y también deseamos estimar la incertidumbre en los resultados calculados, basados en las incertidumbres de las mediciones primarias.

El resultado  $R$  es una función de las variables independientes;  $x_1, x_2, \dots, x_N$  o sea

$$R = (x_1, x_2, \dots, x_N) \quad (7.5)$$

sea  $W_R$  la incertidumbre en el resultado y  $W_1, W_2, \dots, W_N$  las incertidumbres de las variables independientes respectivas, si éstos tienen la misma probabilidad, entonces la incertidumbre en el resultado, tomando esta probabilidad, está dado por

$$W_R = \sqrt{\left(\frac{\partial R}{\partial x_1} W_1\right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial x_2} W_2\right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial R}{\partial x_N} W_N\right)^2} \quad (7.6)$$

En nuestro caso  $S$  está dada por la ecuación (7.1), y las variables involucradas son  $X$  y  $\Phi_R$ .

Por lo que iniciaremos obteniendo la derivada respecto de la primera variable en este caso respecto de  $X$ , y se tiene

$$\frac{dS_1}{dX} = \frac{1}{\text{Tan}.\Phi_R} \quad (7.7)$$

donde  $dS_1$  es el error de medición que se tiene dado un error  $dX$ .

En forma análoga para la segunda variable se obtiene la derivada de  $S$  con respecto a  $\Phi_R$  y se tiene,

$$\frac{dS_2}{d\Phi_R} = \frac{X}{\text{sen}^2\Phi_R} \quad (7.8)$$

donde  $dS_2$  es el error de medición que se tiene dado un error angular  $d\Phi_R$ .

En términos del ángulo de la montura las ecuaciones (7.7) y (7.8) pueden ser escritas como:

$$\frac{dS_1}{dX} = \frac{1}{\text{Tan}.2\Phi_M} \quad (7.9)$$

y

$$\frac{dS_2}{d\Phi_M} = \frac{2X}{\text{sen}^2 2\Phi_M} \quad (7.10)$$

Respectivamente.

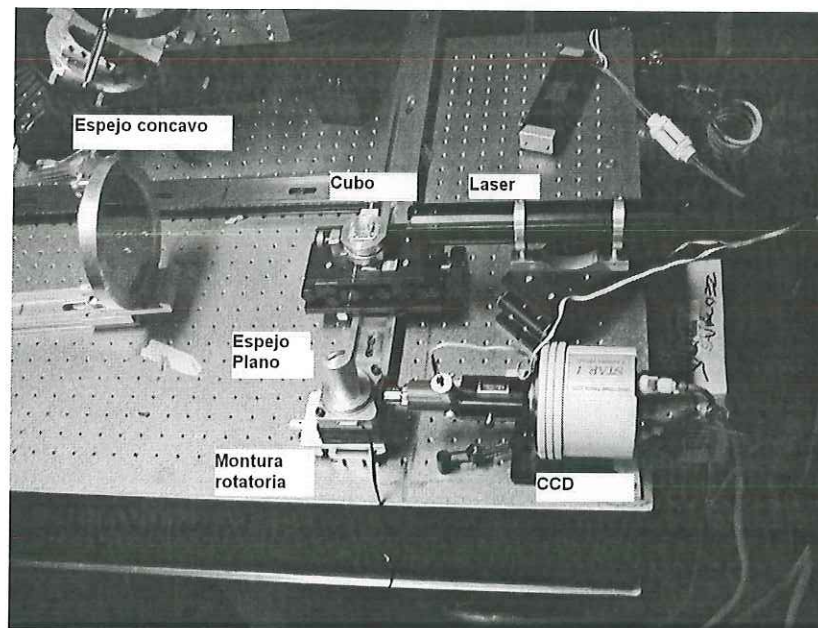
La incertidumbre total en la medida está dada por

$$dS = \sqrt{(dS_1)^2 + (dS_2)^2} \quad (7.11)$$

La distancia medida con la correspondiente incertidumbre es

$$S \pm dS \quad (7.12)$$

En la Figura 30 se muestra el primer prototipo realizado en laboratorio, claramente se puede observar como se utiliza una sola fuente de luz y los diferentes componentes que integran el sistema de medición.



**Figura 30. Primer prototipo del medidor de distancia.**

### 7.3 Medición angular por desplazamiento de imágenes utilizando correlación<sup>4</sup>.

Hemos caracterizado un sistema rotatorio comercial, el cual es controlado a través de la computadora y hemos usado la correlación de imágenes para calcular el movimiento angular en la montura.

En el apéndice D, se muestra el tipo de actuador, así como su controlador (controlador de picomotores modelo 8801) y la interfaz electrónica que lo interconecta con la computadora principal.

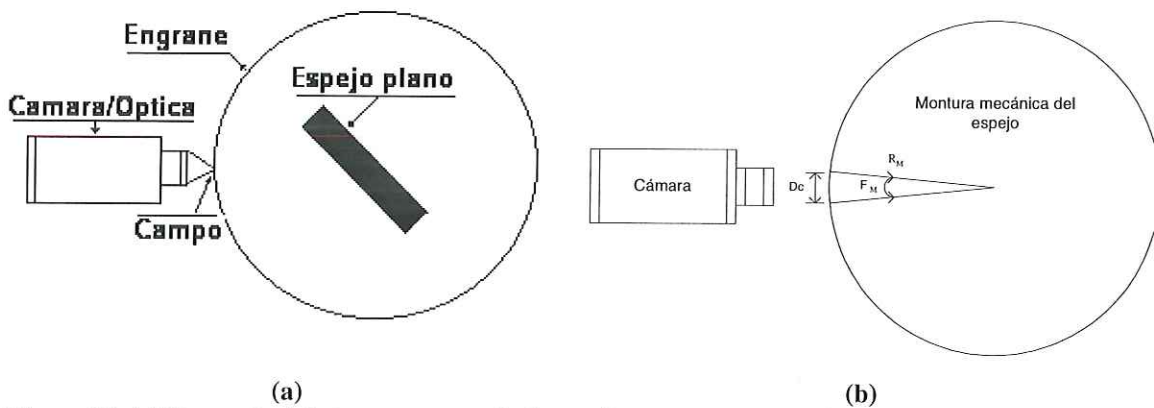


Figura 31. (a) Bosquejo del sistema motor, óptico y cámara de adquisición, y (b) Esquema del campo tomado por la cámara.

El proceso es el siguiente: Se toma una imagen de los dientes del engrane del sistema motor rotatorio para cada movimiento de éste, ver Figura 32.a y 32.c. Obviamente la segunda imagen presenta un desplazamiento respecto de la primera, en la Figura 32.b y 32.d se muestra la gráfica de los píxeles del mismo renglón para cada imagen, y en la Figura 32.e se muestran ambas gráficas simultáneamente con lo que deja en evidencia el desplazamiento en píxeles entre ellas. Las imágenes son tomadas con una cámara CCD por lo que ésta usa un sistema de lentes por medio de la cual se logra que todos los rayos de luz que vienen de la zona muestreada lleguen al plano del CCD, este sistema de lentes también cumple otra función que es la de amplificar la zona muestreada por lo que debe de considerarse la escala

de placa o campo visual. La mayor diferencia obtenida en píxeles es traducida de acuerdo con la escala de placa usada, a su correspondiente valor en milímetros, y con este valor es posible calcular el movimiento angular de la montura a través de la siguiente relación,

$$\Phi_M = \text{Tan}^{-1} \frac{D_C}{R_M} \quad (7.13)$$

donde  $D_C$  es la diferencia entre las dos imágenes medida en milímetros obtenida de la correlación,  $R_M$  es el radio de la montura rotatoria, tal como se muestra en la Figura 31.b.

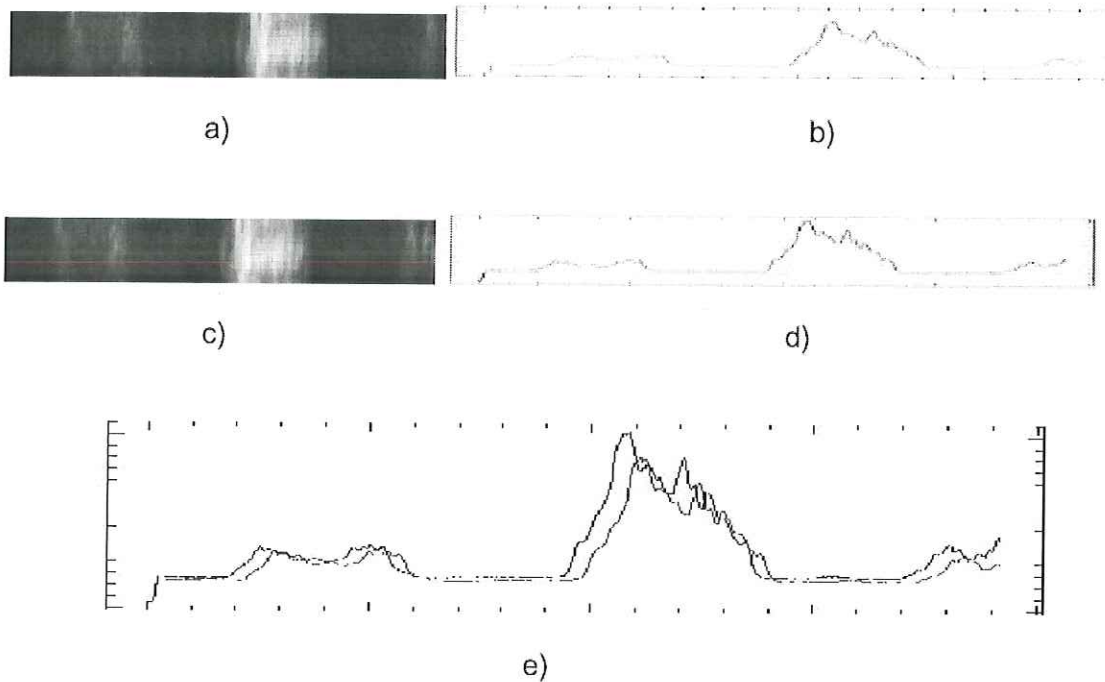


Figura 32. a) Imagen inicial, b) gráfica de una línea de píxeles de la imagen inicial, c) Imagen después del movimiento, d) gráfica de una línea de píxeles de la imagen después del movimiento, y e) gráfica de una línea de píxeles de ambas imágenes que muestra el desplazamiento entre ellas.

### 7.3.1 Consideraciones de la escala de placa (campo visual).

Es importante comentar que la resolución lineal que se puede tener en la medición de desplazamientos, depende de que tan pequeño es el ángulo  $\Phi_M$ , que se pueda medir. Esta

medida está en función de la escala de placa que se observa. Para lo cual se propone como lente un microscopio **10X**.

### 7.3.2 Análisis de la correlación.

La correlación es una función estadística que permite comparar dos vectores y obtener, mediante un cociente llamado “**coeficiente de correlación**”, el índice de semejanza entre los dos.

Al utilizar este coeficiente para determinar si dos imágenes son semejantes se superan limitantes como el cambio de intensidad entre una y otra, ya que lo que se compara es la “**estructura**” o relación de formas y no los valores de intensidad de los píxeles.

Para calcular el coeficiente de correlación, los paquetes de procesamientos de imágenes utilizan tres o cuatro técnicas, las cuales son<sup>10</sup>:

- **Discreta.** Con esta técnica, el coeficiente de correlación, se obtiene calculando la convolución discreta entre las dos imágenes. Es una técnica muy eficiente para imágenes pequeñas y es fácil de implementar en un programa.
- **Fourier.** El coeficiente de correlación con la técnica de Fourier se obtiene de forma similar que la discreta, con la diferencia que las operaciones de convolución entre las imágenes se realizan por la transformada de Fourier. Esta técnica es la que ofrece mayor precisión, sin embargo, requiere mayor tiempo de computo que cualquier otra.
- **Diferencia.** Con esta técnica, el coeficiente de correlación se obtiene calculando la función de error entre dos imágenes. Esta técnica es muy rápida, pero ofrece baja precisión.

- **Binaria.** Esta técnica es, en esencia, igual que la discreta, con la diferencia que los píxeles de las imágenes tienen valores en base binaria, es decir, 1 ó 0 y las operaciones se realizan con lógica binaria.

En la Tabla 4, se muestran las características de tiempo de cálculo y error. Se utilizó el paquete de análisis de imágenes IRAF<sup>11</sup>. En la Tabla 4 el error representa la diferencia entre las medidas de desplazamiento al cambiar la referencia entre las dos imágenes y está dado en fracciones de píxel, debido a que se utiliza un método de interpolación. El valor que toma “x” en segundos depende de la velocidad del procesador utilizado para el cálculo.

**Tabla 4. Comparación entre técnicas.**

<b>Técnica</b>	<b>Tiempo de cálculo</b>	<b>Error</b>
Fourier	12x	0.0000
Discreta	6x	0.0029
Diferencia	5x	0.0132

En los resultados se observa que la mejor técnica, en términos de la precisión, es la de Fourier; sin embargo, el tiempo de cálculo que requiere es muy grande. La más rápida es la técnica de diferencia, pero también es la que presenta el mayor error. Y la técnica discreta, que utiliza la mitad del tiempo que la de Fourier, tiene un error del orden de milésimas de píxel.

Estas características, además de su simplicidad de programación, hacen a la técnica de correlación discreta la más indicada para esta aplicación.

Con este método podremos obtener mayor resolución, ya que el método implícitamente elimina los errores que se pudieran filtrar por ruido eléctrico, malas lecturas o variaciones en la intensidad de la iluminación; además, cualquier patrón de imagen sirve para calcular el corrimiento de la misma.

### 7.3.3 Magnitud y sentido de desplazamiento.

Como se mencionó en la sección anterior, el cálculo del coeficiente de correlación representa el índice de semejanza entre las imágenes, sin embargo, por si solo no dice la magnitud del desplazamiento entre ellas. Para poder determinarla se realiza una secuencia de corrimientos en una de las imágenes y en cada una se calcula el coeficiente de correlación entre la imagen desplazada y la de referencia. En estos corrimientos que denominamos **lag**, se alcanzará uno que sea similar al desplazamiento entre los objetos de las imágenes, en el cual el coeficiente de correlación se aproximará a 1 y entonces **el desplazamiento queda dado por el valor, en píxeles, de este corrimiento.**

Al realizar esta secuencia de corrimientos de píxel, en píxel se genera una curva de correlación. Esta curva se caracteriza en que, alrededor del punto máximo se forma el llamado **pico de correlación**, el cual está constituido por una serie de puntos que corresponden a los corrimientos cercanos al valor del desplazamiento. En la Figura 33 se muestran dos señales con un pequeño desfase y la grafica de la correlación, donde muestra el pico de correlación.

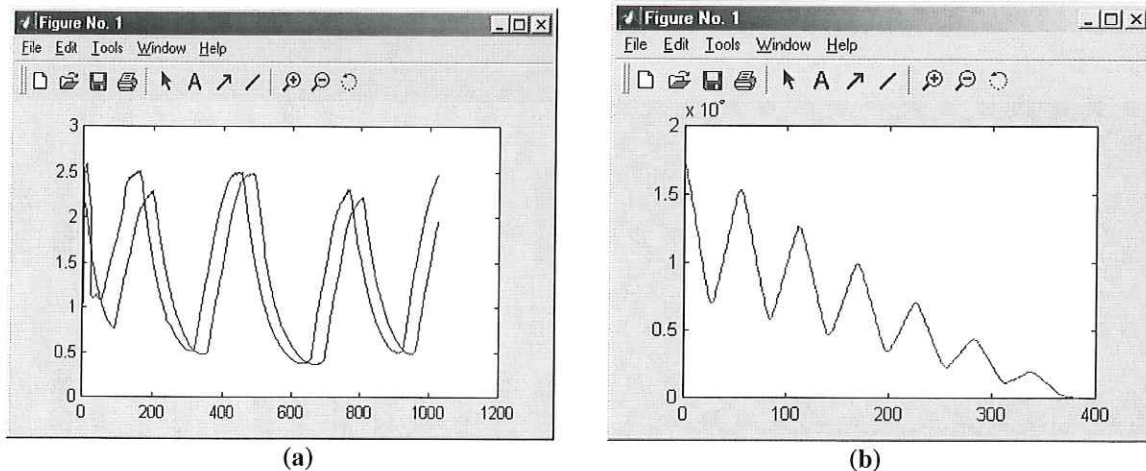


Figura 33. (a) imagen inicial con una imagen tomada después de un movimiento,  
(b) Resultado de la correlación de las dos señales.

### 7.3.4 Búsqueda del pico de correlación por análisis de mínimos cuadráticos.

Este método consiste en analizar los datos adyacentes al pico de mayor intensidad del resultado de la correlación, ajustándolos a una curva de segundo orden (parábola) y encontrando el punto máximo de la función.

Realizando el análisis con 20 puntos se tiene un sobre muestreo, con lo cual ganamos precisión y confiabilidad, ya que una mala lectura no altera significativamente el resultado del análisis.

De la ecuación general de una parábola.

$$y = a x^2 + b x + c \quad (7.14)$$

$$y = y_0 + \beta (x - x_0)^2 \quad (7.15)$$

Reacomodando la ecuación (7.14) de la forma de la ecuación (7.15), obtenemos:

$$y_0 = C - B^2/4a \quad (7.16)$$

$$\beta = A \quad (7.17)$$

$$x_0 = -B/2a \quad (7.18)$$

Donde  $Y_0$  nos indica el punto mas alto de la parábola, y  $X_0$  su correspondiente valor en el eje X, que corresponde al foto detector.

A continuación se presenta el procedimiento matemático para obtener la ecuación de la parábola basándose en un número "n" de puntos X, Y.

$$a x_1^2 + b x_1 + c = y_1$$

$$a x_2^2 + b x_2 + c = y_2$$

.

$$a x_n^2 + b x_n + c = y_n$$

Reacomodando en forma matricial de la forma  $\mathbf{Ax} = \mathbf{y}$ , tenemos:

$$\begin{bmatrix} x_1^2 & x_1 & 1 \\ x_2^2 & x_2 & 1 \\ x_3^2 & x_3 & 1 \\ \cdot & \cdot & \cdot \\ x_n^2 & x_n & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \\ \cdot \\ y_n \end{bmatrix} \quad (7.19)$$

Multiplicamos ambos lados de la ecuación por  $\mathbf{A}^T$ , para obtener una matriz cuadrada, quedando de la forma:

$$\mathbf{A}^T \mathbf{Ax} = \mathbf{A}^T \mathbf{y} \quad (7.20)$$

$$[\mathbf{A}^T \mathbf{A}]\mathbf{x} = \mathbf{A}^T \mathbf{y} \quad (7.21)$$

Despejamos la variable incógnita  $\mathbf{A}$ , multiplicando por  $[\mathbf{A}^T \mathbf{A}]^{-1}$  en ambos lados:

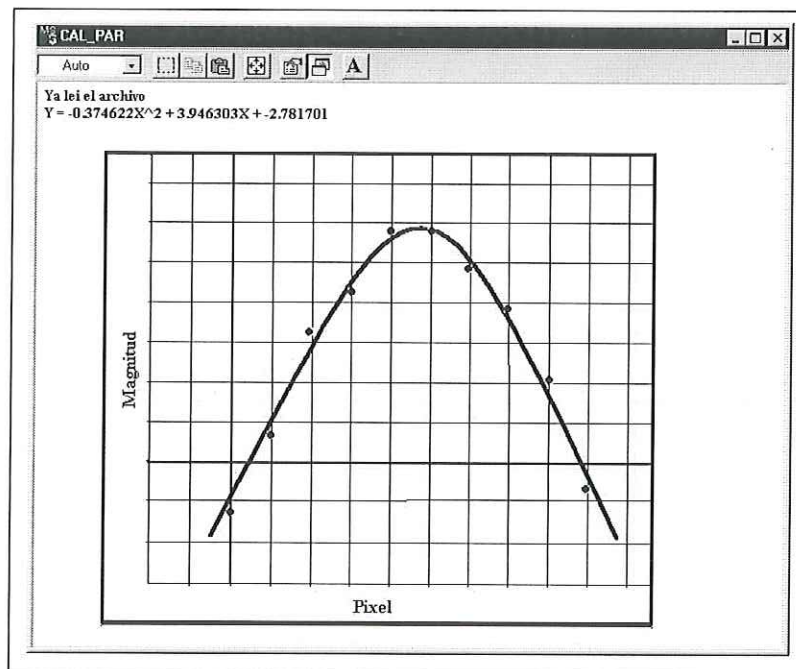
$$[\mathbf{A}^T \mathbf{A}]^{-1} [\mathbf{A}^T \mathbf{A}]\mathbf{x} = [\mathbf{A}^T \mathbf{A}]^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{y} \quad (7.22)$$

$$\mathbf{x} = [\mathbf{A}^T \mathbf{A}]^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{y} \quad (7.23)$$

Resolvemos la multiplicación de matrices y obtenemos, el vector  $\mathbf{x}$ , que corresponde a los valores  $a$ ,  $b$  y  $c$ , de la ecuación de la parábola, los sustituimos en las ecuaciones (7.14) y (7.16) y obtenemos el punto máximo de la parábola.

La Figura 34 muestra un ejemplo de una aproximación de una serie de puntos, el programa de interfaz gráfico fue exclusivamente realizado para las pruebas del algoritmo. El programa fue realizado bajo plataforma DOS, en el cual se muestran los puntos y la aproximación de la parábola. El programa se llama “*cal\_par.exe*” y como argumento se le da el nombre de un archivo tipo texto que contenga la serie de puntos *x,y*, de la forma:

**C:\cal\_par.exe *archivo\_xy.dat***



**Figura 34. Ajuste de una parábola a una serie de puntos.**

# 8. INTEGRACIÓN, CARACTERIZACIÓN Y ALMACENAMIENTO

## 8.1 Integración.

En la Figura 35 se muestra un bosquejo del sistema completo, en donde una Computadora Personal (PC) lleva el control sobre el medidor de distancia óptico, compuesto por el controlador de CCD lineal, controlador de picomotores<sup>12</sup> (ver apéndice D), cámara del telescopio y la tarjeta de adquisición de video; y sobre el sistema de posicionamiento polar, el cual denominamos controlador de motores.

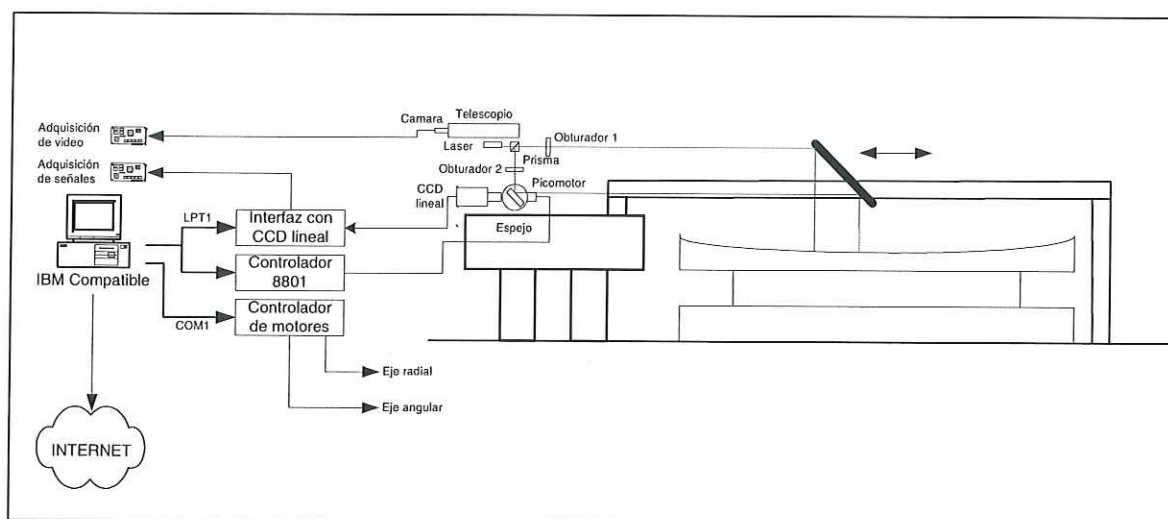


Figura 35. Diagrama general a bloques del sistema de control y almacenamiento.

Como se mencionó en el capítulo anterior, la etapa de digitalización de la lectura del CCD lineal se lleva a cabo con una tarjeta de adquisición, la cual tiene una velocidad máxima de muestreo de 200 KHz, lo que limita a obtener solamente 195 lecturas del CCD por segundo, en el mejor de los casos, debido a que el número total de elementos del CCD son 1024 y la velocidad de lectura es de 200 KHz.

### **8.1.1 Funcionamiento general.**

Basándose en la Figura 35, el sistema empieza la primera medición con el espejo giratorio a 45° grados, posteriormente se empieza a mover el espejo giratorio y se toma una serie de imágenes con el obturador 2 abierto, hasta que este punto cae en el campo del telescopio, cerca de donde coinciden las dos trayectorias de los haces de luz. Cuando los dos haces de luz están cerca, se empieza a tomar una serie de imágenes alternando los dos obturadores y analizando los centros de masa de cada una de las imágenes y desplazando el espejo giratorio; hasta hacer coincidir los dos haces.

## **8.2 Adquisición de video de la cámara del telescopio.**

La sección de adquisición de imágenes de la cámara del telescopio nos permite observar los haces de luz proyectados en el espejo, para calcular el centroide de cada uno.

Para conseguir esto se desarrolló un manejador de dispositivo (*device driver*) para una tarjeta digitalizadora ("frame grabber") de imágenes de video ya que no existe para el sistema operativo linux, también se desarrolló un programa que adquiere una imagen y la guarda en un archivo. Además, cuenta con dos controladores de obturadores para tomar la luz incidente sobre el espejo, en sus dos diferentes trayectorias.

Esta sección consta de dos elementos fundamentales: 1) la tarjeta digitalizadora de video, y 2) la cámara digital. A continuación se proponen las siguientes marcas y modelos:

Tarjeta digitalizadora de video para PC ducto ISA.

Marca: Imagenation

Modelo: Cx-100-10

Cámara digital

Marca: Pulnix

Modelo: TM-72EX

La tarjeta digitalizadora genera imágenes de alta calidad de video, resolución de 512x486 píxeles con 256 niveles de gris, desbalance de nivel ("offset") y ganancia programable.

La cámara se basa en un CCD rectangular de 768(H) x 493(V) elementos, píxeles de  $11\mu\text{m}$  x  $13\mu\text{m}$ , ajuste de ganancia gama (AGG), capacidad de integración en el CCD y sensibilidad de 0.5 lux.

En la Figura 36 se muestra la respuesta espectral relativa de la cámara.

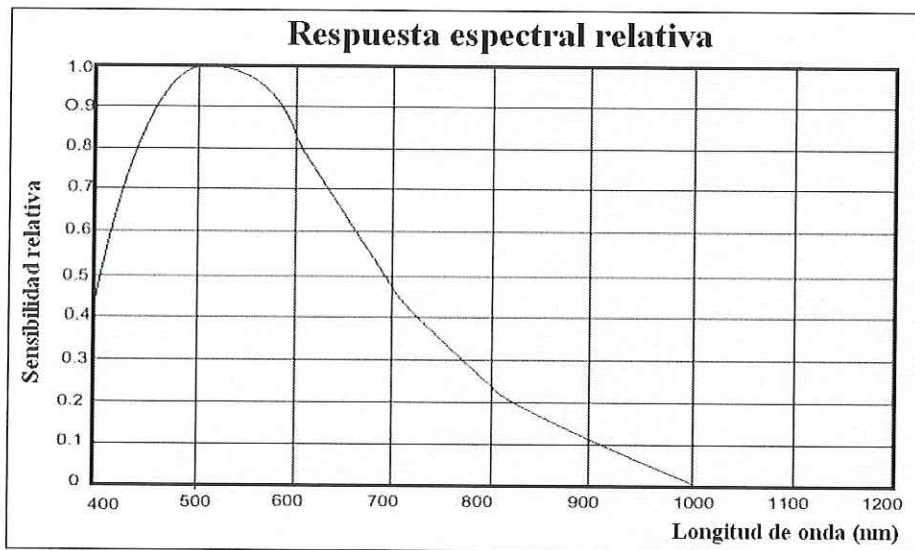


Figura 36. Respuesta espectral vs. Sensibilidad relativa de la cámara TM-72EX.

### 8.3 Integración de los programas desarrollados.

Se desarrolló una serie de programas que controlan cada una de las secciones del sistema, los cuales se dividieron en tres clases: programas de control de periféricos, programas de análisis de imágenes o datos y programa de interfaz con el usuario.

Utilizando las características del sistema operativo LINUX, todos los programas se pueden acceder por medio de un solo programa de despliegue.

#### **Programa de correlación de imágenes (“correla”)**

Este programa lee dos archivos de datos, correspondientes a dos imágenes del CCD lineal y calcula por medio del análisis de correlación, el desplazamiento en píxeles de una imagen con respecto a la otra. Toma como argumento el nombre de las dos imágenes y retorna el desplazamiento entre ellas en píxeles.

```
>correla imagen1.dat imagen2.dat  
2.567931
```

#### **Programa de adquisición de la cámara (“lee\_camara”)**

Es un programa desarrollado en ANSI C, que toma una imagen de la cámara y la almacena en disco duro, en formato “fit”. Se le da como argumento el nombre del archivo y el tiempo de exposición.

```
>lee_camara salida.fit 100  
1
```

#### **Programa de control del CCD lineal (“lee\_ccd”)**

El programa genera un archivo en formato ASCII correspondientes a los 1024 elementos del CCD lineal, recibe como argumento el nombre del archivo de salida y el tiempo de exposición expresado en milisegundos, fue desarrollado en lenguaje ANSI C.

```
>lee_ccd salida.dat 200  
1
```

#### **Programa de control del picomotor (“pico\_mot”)**

Desarrollado en ANSI C, genera una secuencia de movimiento a través del puerto paralelo LPT1 que indica al controlador 8801 el sentido y la magnitud del movimiento del picomotor que mueve al espejo giratorio. Como argumento se le indica la magnitud del movimiento, en pasos.

```
>pico_mot_100
```

### Programa de control del sistema de posicionamiento polar (“aserie”)

Es un programa que transmite una cadena de caracteres por el puerto serie y espera la respuesta del controlador de motores de pasos. Este programa fue desarrollado en lenguaje ANSI C. Utiliza como puerto del control el COM1; sin embargo, puede configurarse cualquier otro puerto serie de salida. En la tabla 4 se muestran los posibles mandos que acepta el programa como argumento:

Tabla 4. Mandos de control del programa del sistema de posicionamiento.

Argumento	Descripción
<b>inicializa</b>	Inicializa los dos ejes.
<b>eje1=xxx</b>	Mueve el eje 1, a la posición descrita por xxx.
<b>eje2=xxx</b>	Mueve el eje 2, a la posición descrita por xxx.
<b>alto</b>	Aborta cualquier proceso de movimiento.
<b>pos</b>	Solicita el estado actual del sistema de posicionamiento.

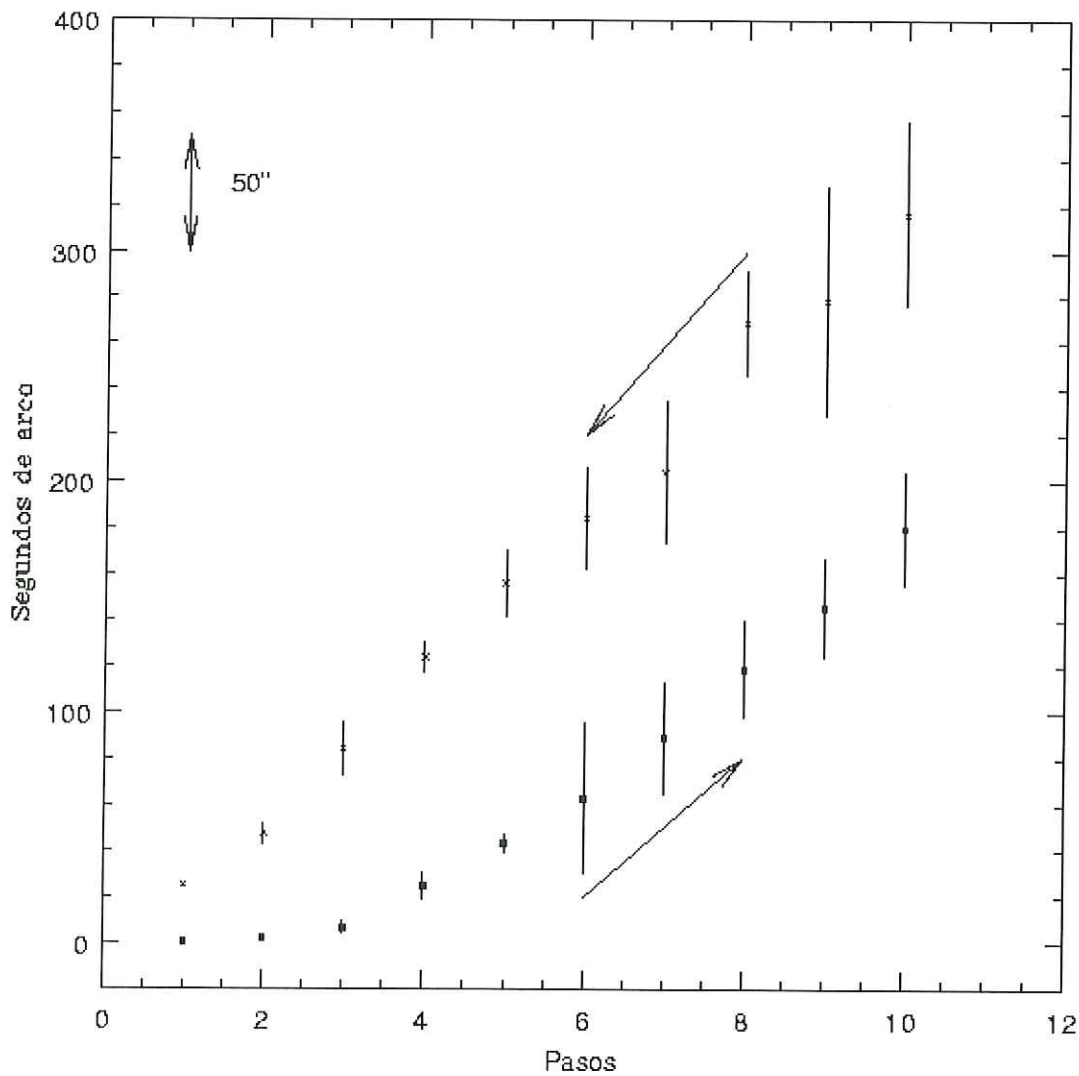
El eje 1 corresponde al movimiento angular, mientras que el eje 2 al movimiento radial. La magnitud de los movimientos esta expresada en pasos de 5  $\mu\text{m}$ .

```
>aserie "pos"
23400 12500
```

## 8.4 Caracterización del sistema rotatorio.

Como parte fundamental de este trabajo, se caracterizó la rotación del engrane de un actuador (picomotor) utilizando el controlador 8801 de New Focus<sup>12</sup>. En la Figura 37 se muestra el error en segundos de arco (1/3600 grados) obtenido para diferentes movimientos de este engrane, analizado en movimientos ascendentes y descendentes, lo cual deja en evidencia la histéresis del sistema rotatorio. Para la construcción de esta gráfica se realizaron 100 movimientos de 1 paso para cada movimiento; se tomaba una imagen y se realizaba la correlación entre dos imágenes consecutivas obteniendo así la diferencia entre

ellas, se obtuvo la diferencia en píxeles promedio y su correspondiente valor angular así como el error angular estimado de esta serie de medidas. Este proceso fue repetido para movimientos de: -10, -9,...,9, 10 pasos. Como se puede ver de la gráfica mostrada, en la Figura 37, los errores son más grandes cuanto mayor es el número de pasos empleado en el movimiento.



**Figura 37. Muestra los errores angulares obtenidos en la montura rotatoria para movimientos de diferentes pasos, y muestra la presencia de histéresis del sistema rotatorio.**

De la medición angular hemos encontrado que el ángulo,  $\Delta\Phi_M$ , más pequeño que se puede medir es de  $1''$  arco (fue obtenido para movimientos de 1 paso), por lo que una medición angular puede expresarse como:

$$\Phi_M \pm 1'' \quad (8.1)$$

De la grafica de la Figura 37 es claro que sólo con desplazamientos de un paso se tiene el mínimo de error, lo cual es una limitante para muestreos de baja resolución espacial.

## 8.5 Almacenamiento de datos.

Los datos obtenidos se almacenan en disco duro para su análisis posterior.

### 8.5.1 Formato de almacenamiento.

El formato de almacenamiento es en código ASCII, por medio de coordenadas polares (ángulo y radio) y un eje Z, donde la coordenada Z corresponde a la profundidad del elemento óptico, lo que se traduce en el dato de curvatura.

El formato de almacenamiento es de la forma:

Alfa	Radio	Z
0	0	34.5
0	10	35.2
0	20	37.8
0	30	41.0
0.5	0	34.5
0.5	10	35.2
0.5	20	37.8
0.5	30	41.0

Donde el primer dato corresponde al ángulo de rotación del espejo; el segundo dato es el radio o distancia del centro del espejo al punto de medición, y el tercer dato es la profundidad del espejo.

## 9. RESULTADOS, MEJORAS AL SISTEMA Y CONCLUSIONES

### 9.1 Resultados experimentales.

Se realizó la medición de la distancia a un espejo esférico cóncavo, utilizando el arreglo experimental mostrado en la Figura 30 de la pagina 60.

Basándonos en el arreglo mostrado en la Figura 27, se correlacionaron 10 imágenes del CCD, obteniéndose un desplazamiento de 326.3429 píxeles que corresponde a 1.7086 milímetros por la escala de placa, la cual se expresa de la forma:

E. P. = Tamaño angular del objeto / Tamaño lineal de la imagen

El diámetro del engrane-motor del picomotor es de 56.6884 milímetros, por lo que el desplazamiento corresponde a un ángulo de  $3.4538^\circ$  (espejo plano,  $\Phi_M$ ) y por tanto se tiene que el ángulo del rayo reflejado es de  $6.9076^\circ$  ( $\Phi_R$ ). Ajustando una distancia  $X=120$  milímetros y utilizando la relación 7.1, obtenemos la medida,

**S = 990.5249 milímetros.**

### 9.1.1 Cálculo de la incertidumbre.

De la medición angular hemos encontrado que el ángulo,  $d\Phi_M$ , más pequeño que se puede medir es de  $1''$  arco (equivalente a  $\pi / (180 \cdot 3600)$  radianes, obtenido para movimientos de 1 paso), por lo que una medición angular puede expresarse como:

$$\Phi_M \pm 1''$$

Del arreglo experimental hemos encontrado que el error  $dX$  que se tiene en la medición de  $X$  es de 0.001 milímetros, o bien puede expresarse por,

$$X \pm 1 \text{ micrómetro}$$

Ya conociendo los valores de  $d\Phi_M$  y  $dX$  podemos sustituirlos en las ecuaciones (7.9) y (7.10) respectivamente y podemos conocer  $dS_1$  y  $dS_2$  para una distancia  $X$  y un ángulo dado.

Tomando en cuenta la incertidumbre en la medición de acuerdo a los datos usados de  $X$  igual 120 milímetros y al ángulo de la montura  $3.4538^\circ$ , obtenemos:

$$dS_1 = \frac{dx}{\tan 2\Phi_M} = \frac{1 \times 10^{-6}}{\tan 2 \cdot 3.4538} = 8.2543 \times 10^{-6}$$

$$dS_2 = \frac{d\Phi_M \cdot 2X}{\sin^2 2\Phi_M} = \frac{\pi \cdot 2 \cdot 120 / (3600 \cdot 180)}{\sin^2 2 \cdot 3.4538} = 0.0804420$$

Sustituyendo estos valores en la ecuación (7.11) obtenemos la incertidumbre total. Por lo que podemos escribir la medición de la forma:

$$S = 990.5249 \pm 0.0809 \text{ milímetros}$$

Para este caso el error obtenido corresponde al 0.008% de la medición.

Para comprobar la medición obtenida se usó una cinta métrica para realizar la medición y se obtuvo 990.50 milímetros.

### **9.1.2 Dependencia del error de medición contra la distancia.**

En la Figura 38 se muestra una gráfica que relaciona el error de medición,  $\Delta S$ , en dependencia con la distancia que se desea medir  $S$ , y podemos ver que cuanto mayor es la distancia que se desea medir mayor es la incertidumbre que se obtiene. Pero hay que notar que cuanto mayor es el valor de  $X$ , entonces disminuye la incertidumbre, en los casos en que la distancia a medir es 50 metros obtenemos 200 mm (para  $X=120$  mm) y 10 mm (para  $X=1200$  mm) que corresponden al 4% y 0.02% respectivamente de la distancia medida, también hay que notar que para la medición de distancias inferiores a 20 metros cualquiera de los valores de  $X$  presenta una incertidumbre pequeña del orden de 0.05% .

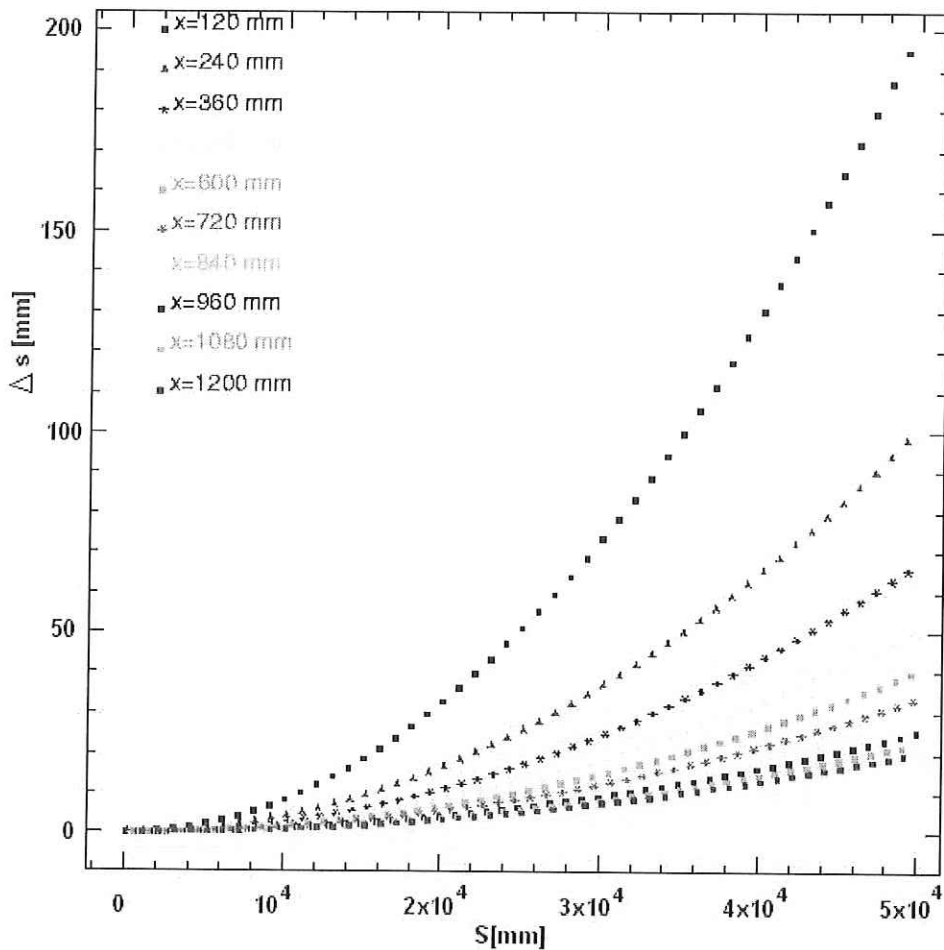


Figura 38. Gráfica que muestra los valores de la incertidumbre obtenida para diferentes valores de  $X$  y para diferentes distancias de medición.

## 9.2 Mejoras al sistema.

A continuación se proponen una serie de puntos para la mejora del sistema.

### 9.2.1 Tiempo de procesamiento.

Para disminuir el tiempo de procesamiento es necesario utilizar un procesador más rápido que permita disminuir el tiempo de cálculo matemático. Para este fin, se ha considerado como una opción sustituir la PC por un DSP (Digital Signal Processor, por sus siglas en

ingles), el cual permite optimizar los cálculos tanto por la frecuencia de reloj, como por la capacidad de realizar algunas operaciones aritméticas en paralelo.

Para cumplir con el punto anterior, se propone el uso del DSP ADSP-21061 producido por la compañía Analog Devices, el cual contiene una memoria interna bi-puerto, esta característica permite leer y escribir de forma simultanea, para aumentar la velocidad del manejo de datos, y un procesador independiente para el manejo del ducto de datos, integrado todo lo anterior en un encapsulado. Fabricado con tecnología CMOS tiene un tiempo de procesamiento de 20 nseg a 50 MIPS (Millones de Instrucciones Por Segundo)

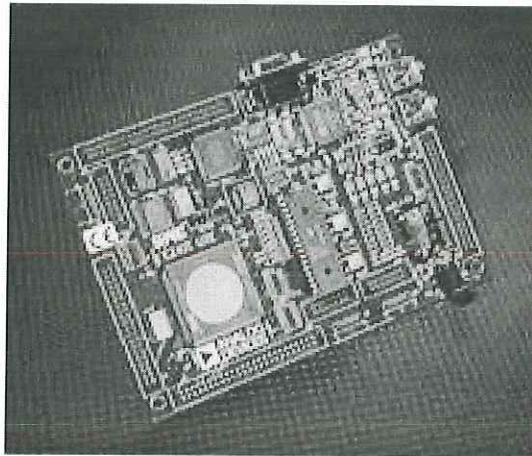


Figura 39. Sistema de desarrollo ADSP-21061, desarrollado por la compañía Analog Device.

### 9.2.2 Ruido de lectura del detector.

Para disminuir el ruido de lectura del detector lineal, se recomienda bajar su temperatura de operación al menos hasta 0 °C, para lo cual se propone el uso de una celda “peltier” acoplada por un “dedo frío” a la base del detector. Con lo anterior disminuirá el ruido al menos 25 cuentas de valor cuadrático medio (RMS).

Para este punto se propone el modelo CP0.8-7-06L de la compañía MELCOR, la cual puede crear una diferencia de temperatura de hasta 67° centígrados entre las dos caras de la celda<sup>F</sup>. La Figura 40 muestra la celda propuesta.

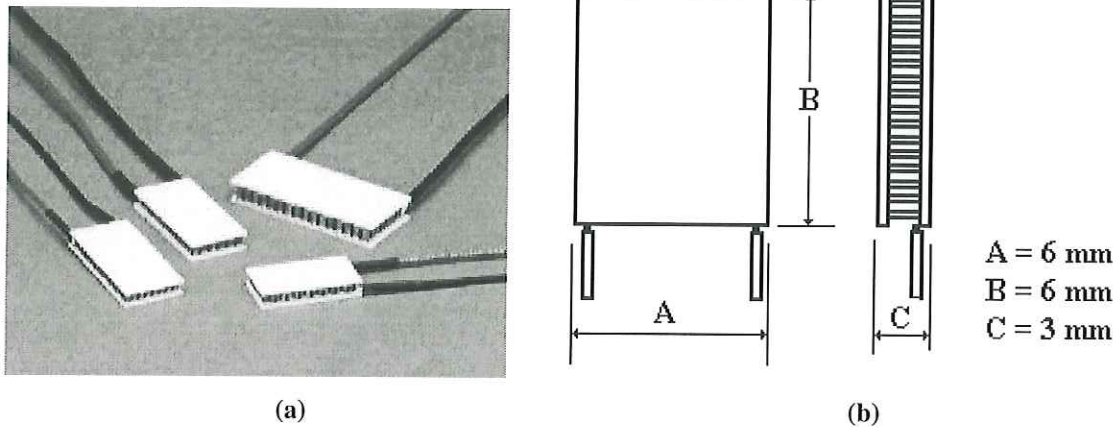


Figura 40. (a) fotografías de las celdas termoeléctricas, y (b) dimensiones de la celda propuesta.

### 9.3 Conclusiones.

Este trabajo abarcó el desarrollo de un sistema para medir la geometría de un elemento óptico, su construcción a nivel prototipo y su evaluación, así como una serie de propuestas para su mejoramiento. Durante el desarrollo se estudiaron el principio de funcionamiento y los componentes que lo integran.

Durante el desarrollo de este trabajo se estudio las bases fundamentales de la óptica, así como algunas disciplinas de la electrónica, como: electrónica digital y analógica, electrónica de potencia, programación de bajo y alto nivel, y procesamiento de datos e imágenes. Todo lo anterior enriqueció ampliamente el conocimiento y la experiencia académica.

Las ventajas más relevantes de este medidor son: a) no se requiere ir al plano de observación, b) no esta en contacto con lo que se desea medir, y c) permite medir distancias pequeñas y grandes

Por último se llego a la conclusión de que si es posible medir la geometría de un elemento óptico con una alta resolución y sin hacer contacto con el objetivo.

La puesta experimental completa del sistema, implica un trabajo multidisciplinario (mecánicos, electrónicos y ópticos), dada la magnitud del proyecto en cuanto a recursos humanos y económicos se planea la puesta en operación hasta fines del 2005, y el trabajo de tesis en general está terminado. La prueba que se tiene de que esta propuesta funciona son los resultados obtenidos para una superficie pequeña.

## **10. REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFÍA**

## Referencias.

- A** Bosquejo del TIM, generado por el departamento de Mecánica de Precisión del Instituto de Astronomía de la UNAM (IA, UNAM).
- B** Telescopio de 2.12 metros del Observatorio Astronómico Nacional, ubicado en las instalaciones de San Pedro Mártir en Baja California, cortesía del departamento de mecánica de precisión del IA, UNAM.
- C** Para más información de KEYENCE consulte la pagina <http://www.keyence.com/products/measuring/lc/lc.html>.
- D** Para mas información de AEROTECH consulte la pagina <http://www.aerotech.com/products/transducers/lzr.html>.
- E** Para más información sobre el decodificador de cuadratura consulte la pagina <http://www.cs.dartmouth.edu/~robotlab/robotlab/courses/cs54-2001s/pdf/hct12000.pdf>
- F** Para más información consulte la pagina <http://www.melcor.com/cpseries.html>

## Bibliografía.

- 1** Ehrmann K, Ho A. y Schindhelm K  
Measurement Science and Technology, **9**, 1259-1265, (1998).
- 2** “**Optical shop testing, Second Edition**”  
Daniel Malacara  
John Wiley & Sons, Inc, U.S. 1991.  
ISBN: 0-471-52232-5
- 3** R. Kingslake, Optics in Photography (ed. SPIE, Washington), 258-280 (1992).
- 4** M. Núñez-Alfonso, E. Luna-Aguilar, F. Quirós, et al.  
SOMI XVII, **1-9** (2002).
- 5** F Quirós, et al.  
Reporte Técnico publicado en el Instituto de Astronomia, UNAM, RT-2004-06 (2004).

**6 “C++ Iniciación y referencia”**

Luis Joyanes Aguilar, Héctor Castán Rodríguez  
Ed. Osborne McGraw-Hill, España 1999.  
ISBN: 84-481-2363-8

**7 “Practical programming in TCL and TK. Third Edition”**

Brent B. Welch  
Ed Prentice may PTR.  
ISBN: 0-13-022028-0

**8 “The 8051 Microcontroller, Architecture, Programming and Applications”.**

Kenneth J. Ayala.  
Western Carolina University.

**9 “PCL-818HG”. High-performance DAS card with programmable gain.**

User’s manual. Advantech Inc.

**10** Wells L., Rectifying and Registering images with IRAF, NOAO, 1994.

**11** IRAF (del inglés Image Reduction and Astronomical Facility), desarrollado por la asociación: Nacional Optical Astronomical Observatorios

**12** F Quirós, E. Luna, Reporte Técnico publicado en el Instituto de Astronomía, UNAM, CI-2002-02, (2002).

**APÉNDICE A**

**RUTINAS DEL PROGRAMA DE ANALISIS**

**EN C++**

```

//Programa en C++ que correlaciona dos vectores de datos y entrega como resultado el desplazamiento
//entre los dos vectores (imágenes lineales)
//Fernando Quiros Parra
//Ultima modificacion    20-febrero-2004
#include <dos.h>
#include <string.h>
#include <stdlib.h>
#include <stdio.h>
#include <conio.h>

```

```

int trae_datos(char *nombre, double *datos, int cuantos);
int guarda_datos(char *nombre, double *datos, int cuantos);
double corre(double *d1, double *d2, double *out, int cuantos, int lim);

```

```

int main(int argc, char *argv[])
{
    int cuantos= 384, lim=50;
    double dat1[500];
    double dat2[500];
    double out1[110];
    if(argc != 6){
        printf("Error.\n");
        printf("corre ima1.dat imag2.dat sal.dat cuantos lim\n");
        return 0;
    }
    cuantos = atoi(argv[4]);
    lim = atoi(argv[6]);
    trae_datos(argv[1], dat1, cuantos);
    trae_datos(argv[2], dat2, cuantos);
    printf("%f\n",corre(dat1, dat2, out1, cuantos, lim));
    guarda_datos(argv[3], out1, cuantos);
    return 0;
}

```

```

double corre(double *d1, double *d2, double *out, int cuantos, int lim){
    int i,j,k,ri, donde=0;
    double c0[500], c1[500], cv[500], cor[110], *ptr= out;
    double a,b,c,s0,max=0;
    ri = 2*lim + 1;
    for(i=0; i<cuantos+ri; i++){
        c0[i]=0.0;          c1[i]=0.0;          cv[i]=0.0;
    }
    for(i=0; i<cuantos; i++){
        c0[i+lim] = d1[i];          c1[i+lim] = d2[i];
    }
    for(j=-lim; j<=lim; j++){
        for(k=lim; k<=(cuantos+ri-lim-1); k++)          cv[k] = c1[j+k];
        cor[j+lim]= 0;
        for(i=0; i<=cuantos+ri; i++)          cor[j+lim]+= c0[i]*cv[i];
    }
    max=0;
    for(i=0; i<=ri; i++){
        *ptr = cor[i];          //graba el vector
        ptr++;          //al vector de salida
        if(cor[i] > max){

```

```

                max = cor[i];
                donde = i;
            }
        }
        a= cor[donde-1];
        b= cor[donde];
        c= cor[donde+1];

        s0= 0.5*(c-a)/(2*b-c-a);
        max= s0+donde-lim;
        return max;
    }
}

int trae_datos(char *nombre, double *datos, int cuantos){
    FILE *archivo;
    char buf[30];
    int i;
    float d1;
    double *ptr= datos;

    if ((archivo = fopen(nombre, "r")) != NULL){
        for(i=0; i<cuantos; i++){
            if(!fread(buf,17,1,archivo)) break;
            sscanf(buf, "%f", &d1);
            *ptr = (double) d1;
            ptr++;
        }
        fclose(archivo);
    }
    else {
        printf("No pude crear el archivo %s\n", nombre);
        return 0;
    }
    return 1;
}

int guarda_datos(char *nombre, double *datos, int cuantos){
    FILE *archivo;
    int i;

    if ((archivo = fopen(nombre, "w+")) == NULL) {
        printf("No pude crear el archivo %s\n", nombre);
        return 0;
    }
    for(i=0;i<cuantos;i++)
        fprintf(archivo, "%09.f\n", datos[i]);

    fclose(archivo);
    return 1;
}
}

```

```

//Programa en C++ que toma una serie imagenes del CCD lineal y las graba en una serie de archivos
//se le da como argumentos, tiempo de exposici3n y numero de imagenes
//Fernando Quiros Parra
//Ultima modificacion    20-abril-2004
#include <dos.h>
#include <stdlib.h>
#include <stdio.h>
#include <conio.h>

#define PIXELES    1024
#define PTO_LPT    0x378    // puerto lpt1
union tipo_char
{
    unsigned char p;
    struct {
        unsigned hab_h: 1;
        unsigned hab_m: 1;
        unsigned rd_cad: 1;
        unsigned spare: 1;
        unsigned hab_l: 1;
        unsigned reset: 1;
        unsigned clk: 1;
        unsigned start: 1;
    }bit;
} corto;
union tipo_entero{
    unsigned int dato;
    struct {
        unsigned char b_l;
        unsigned char b_h;
    }byte;
} entero;

unsigned int vec_in[1030];
void borra_ccd(void);
void lee_ccd(void);

void inicia_pto(void);
int guarda_imagen(void);
unsigned int lee_cad(void);
void ret_useg(int d);

int main(int argc, char *argv[])
{
    int flag=1; cuenta= 0, t_int=100, cuantos=20;

    if(argc != 3){
        printf("Error.\n");
        printf("expone cuantos t_int\n");
        return 0;
    }
    cuantos = atoi(argv[1]);
    t_int = atoi(argv[2]);
    inicia_pto();
    borra_ccd();

```

```

while(flag){
    if(kbhit()
        flag = 0;

    lee_ccd();
    delay(t_int);
    guarda_imagen();
    cuenta++;
    if(cuenta == cuantos)
        flag = 0;
}
corto.bit.start = 0;      corto.bit.clk = 1;      corto.bit.reset = 0;
outputb(PTO_LPT, corto.p);
}
void inicia_pto(void){
    corto.bit.hab_l = 1;      corto.bit.hab_m = 1;
    corto.bit.hab_h = 1; corto.bit.rd_cad = 1;
    corto.bit.start = 0;      corto.bit.clk = 1;      corto.bit.reset = 0;
    outputb(PTO_LPT, corto.p);
}
void borra_ccd(void){
    int i;
    corto.bit.start = 1;
    outputb(PTO_LPT, corto.p);
    ret_usec(0);

    corto.bit.reset = 1;
    outputb(PTO_LPT, corto.p);
    ret_usec(2);

    corto.bit.reset = 0;
    corto.bit.clk = 0;
    outputb(PTO_LPT, corto.p);
    ret_usec(0);

    corto.bit.start = 0;
    outputb(PTO_LPT, corto.p);
    ret_usec(0);

    corto.bit.clk = 1;
    outputb(PTO_LPT, corto.p);
    ret_usec(0);
    for(i=0;i<1024;i++){
        corto.bit.reset = 1;
        outputb(PTO_LPT, corto.p);
        ret_usec(2);

        corto.bit.reset = 0;
        corto.bit.clk = 0;
        outputb(PTO_LPT, corto.p);

        corto.bit.clk = 1;
        outputb(PTO_LPT, corto.p);
    }
}

```

```

void lee_ccd(void)
{
    int i;
    unsigned int vi;

    corto.bit.start = 1;
    outportb(PTO_LPT, corto.p);
    ret_useg(0);

    corto.bit.reset = 1;
    outportb(PTO_LPT, corto.p);
    ret_useg(2);

    corto.bit.reset = 0;
    corto.bit.clk = 0;
    outportb(PTO_LPT, corto.p);
    ret_useg(0);

    corto.bit.start = 0;
    outportb(PTO_LPT, corto.p);
    ret_useg(0);

    corto.bit.clk = 1;
    outportb(PTO_LPT, corto.p);
    ret_useg(0);
    for(i=0;i<1024;i++){
        corto.bit.reset = 1;
        outportb(PTO_LPT, corto.p);
        ret_useg(3);

        corto.bit.reset = 0;
        corto.bit.clk = 0;
        outportb(PTO_LPT, corto.p);

        corto.bit.clk = 1;
        outportb(PTO_LPT, corto.p);

        vi = lee_cad();
        vec_in[i]=vi;
    }
}

int guarda_imagen(void){
    FILE *archivo;
    int i;
    char nombre[100];
    static int cual=0;

    cual++;
    sprintf(nombre,"d:\\dat-ccd\\dat%02i.dat",cual);
    if ((archivo = fopen(nombre, "w+")) == NULL) {
        printf("No pude crear el archivo %s\n", nombre);
        return 0;
    }
    for(i=0;i<1024;i++)

```

```

        fprintf(archivo,"%03u\n", vec_in[i]);

        fclose(archivo);
        return 1;
    }
    void ret_useg(int d){
        int i;
        for(i=0; i< d; i++)
            inportb(PTO_LPT);
    }
    unsigned int lee_cad(void){
        unsigned char tmp;
        corto.bit.rd_cad = 0;           //bajo el cs
        outportb(PTO_LPT, corto.p);

        corto.bit.hab_l = 0;           //leo el nibble_low
        outportb(PTO_LPT, corto.p);
        tmp = inportb(PTO_LPT+1);
        tmp = (tmp >> 3) & 0x0f;
        entero.byte.b_l = tmp;
        corto.bit.hab_l = 1;

        corto.bit.hab_m = 0;           //leo el nibble_med
        outportb(PTO_LPT, corto.p);
        tmp = inportb(PTO_LPT+1);
        tmp = (tmp << 1) & 0xf0;
        entero.byte.b_l |= tmp;
        corto.bit.hab_m = 1;

        corto.bit.hab_h = 0;           //leo el nibble_high
        outportb(PTO_LPT, corto.p);
        tmp = inportb(PTO_LPT+1);
        tmp = (tmp >> 3) & 0x03;
        entero.byte.b_h = tmp;
        corto.bit.hab_h = 1;

        corto.bit.rd_cad = 1;           //regreso los bits de control a 1
        outportb(PTO_LPT, corto.p);
        return entero.dato;
    }
}

```

**APÉNDICE B**

**DIAGRAMA ESQUEMÁTICO Y DISTRIBUCIÓN DE**

**COMPONENTES DEL CONTROLADOR DE**

**MOTORES DE PASOS**

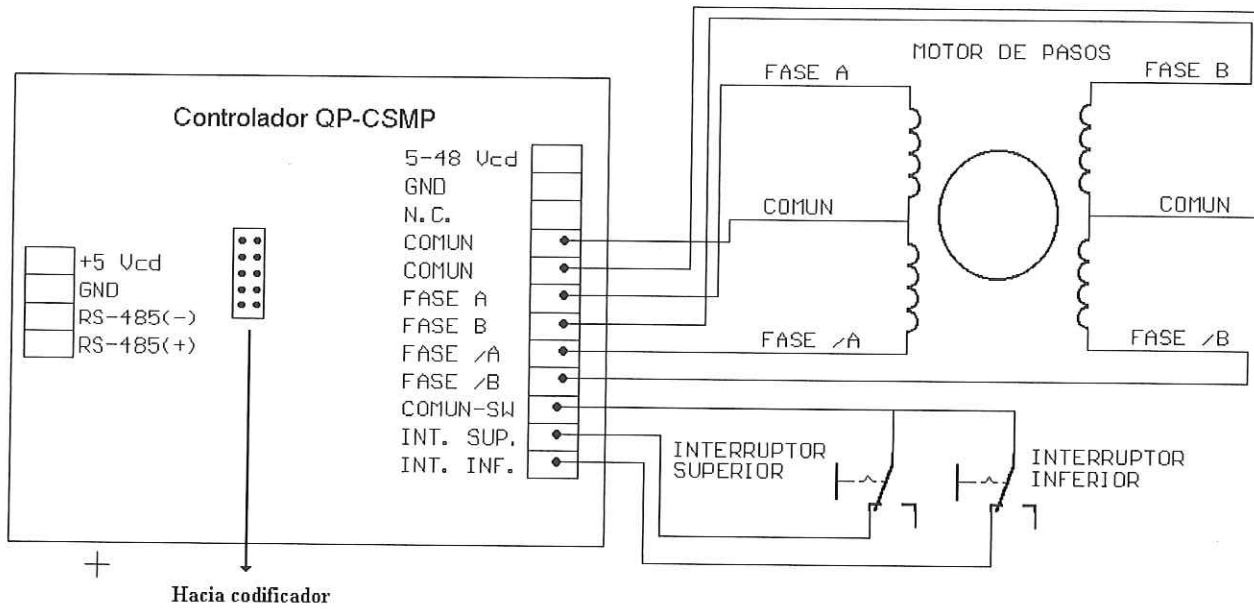


Figura B.1. Diagrama de conexión del motor de pasos al controlador.

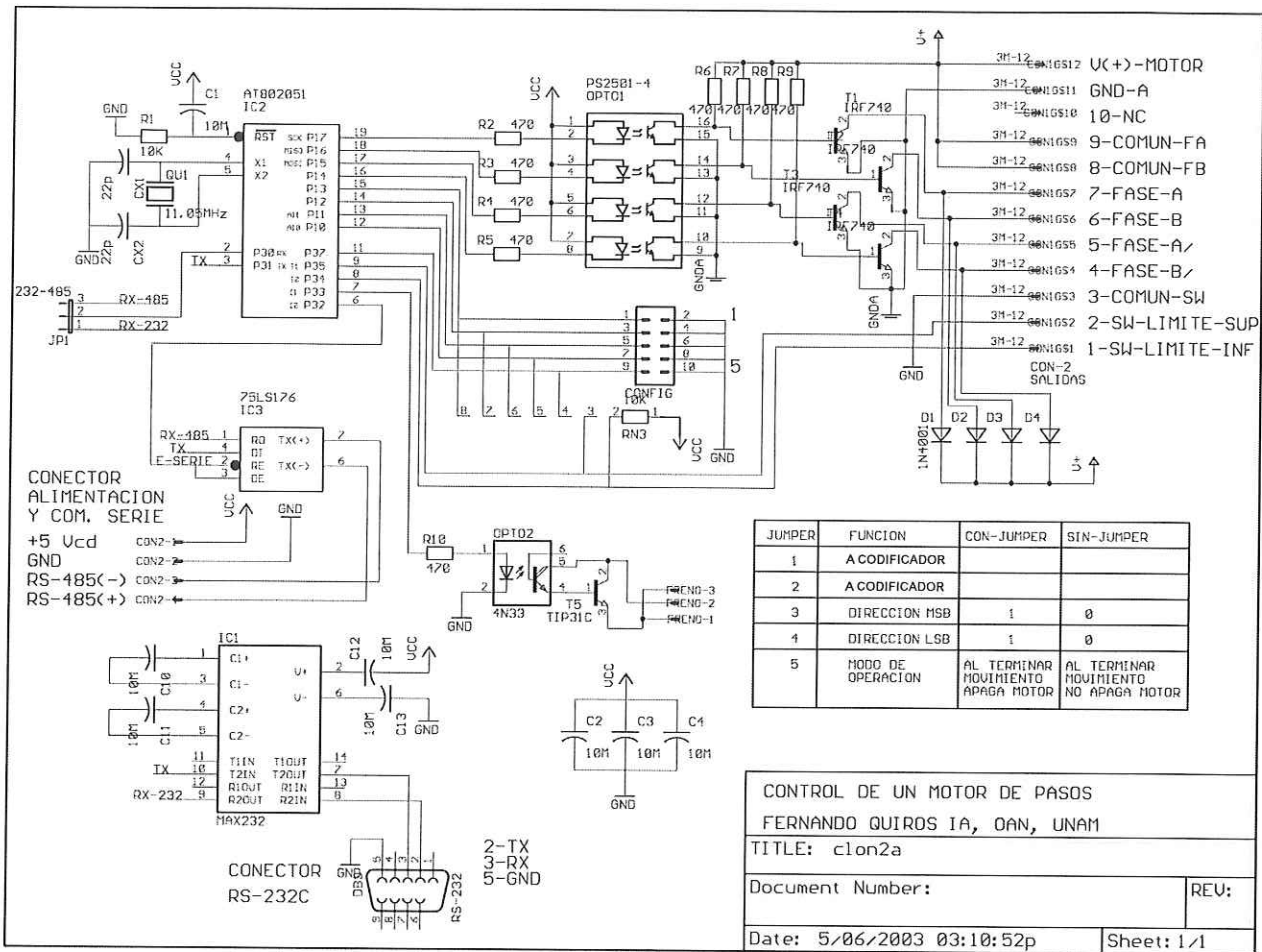


Figura B.2. Diagrama esquemático del controlador de motores de pasos.

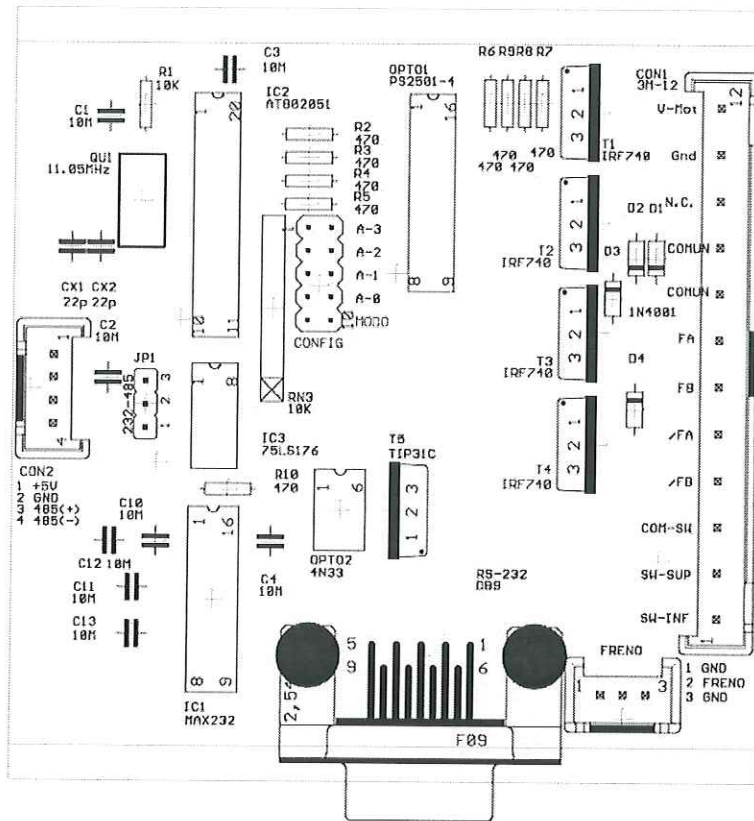


Figura B.3. Distribución de componentes del controlador de motores de pasos.

**APÉNDICE C**

**PROGRAMA EN ENSAMBLADOR DEL  
CONTROLADOR DE MOTORES DE PASOS**

En la figura C.1 se muestra el esquema del programa del controlador, el cual se basa en un interrupción a 400 Hz que sincroniza la temporización de las secuencias de movimiento de los motores.

La rutina principal revisa constantemente el estado del puerto serie y decodifica la información para activar los procesos de las tareas correspondientes.

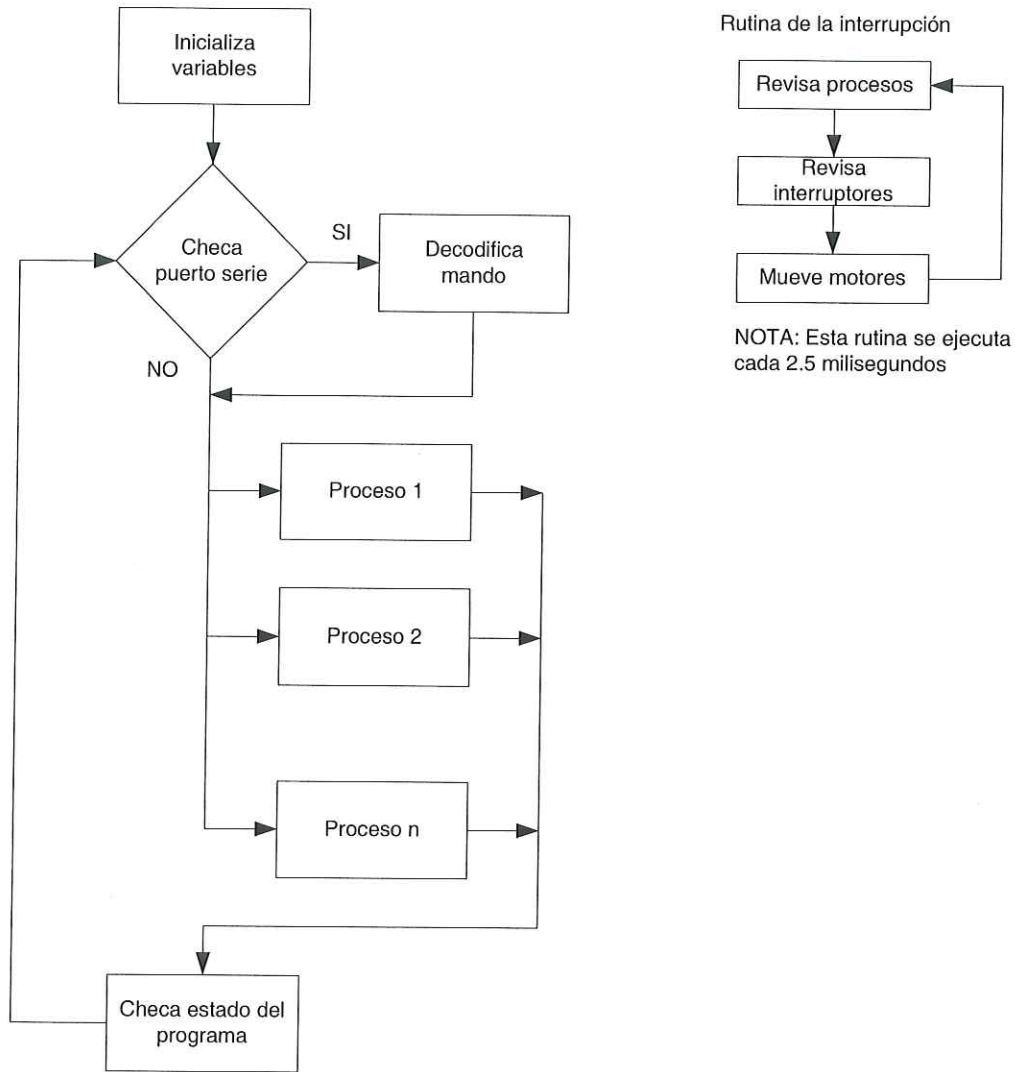


Figura C.1. Diagrama a bloques del programa en ensamblador del controlador de motores de pasos.

```

; CONTROL DE UN MOTOR DE PASOS
; 4 BITS DE FASES
; 4 BITS DE DIRECCION
; DOS SW LIMITES
; UN BIT DE FRENOS
; FERNANDO QUIROZ , 25 DE MAYO DE 1998

```

```

$MOD2051
$title(PROGRAMA PRUEBA)
$PAGEWIDTH(132)
$DEBUG
$OBJECT
$NOPAGING
$INCLUDE(mod-21.H)

```

```

ORG 00H
LJMP INICIO

```

```

ORG 0BH
JMP INT_INTERNA

```

```

ORG 23H
JMP INT_SERIE

```

```

ORG 40H
INT_SERIE:

```

```

PUSH ACC
PUSH PSW
PUSH 00H
PUSH 01H

```

```

JNB RI,FIN_INT_SERIE
CLR B_HAY_C
JNB B_INI,INT_SERIE_00
CLR RI
MOV A,SBUF
MOV DATA_C,A
CJNE A,#',FIN_INT_SERIE
CLR B_INI
LJMP FIN_INT_SERIE

```

```

INT_SERIE_00:

```

```

JNB B_IDE,INT_SERIE_0
CLR RI
MOV A,SBUF
MOV DATA_C,A
CJNE A,#DATA_IDE,INT_SERIE_DECEPCION
CLR B_IDE
LJMP FIN_INT_SERIE

```

```

INT_SERIE_0:

```

```

JNB B_ADR,INT_SERIE_1
CLR RI
MOV A,SBUF
MOV DATA_C,A
CJNE A,DATA_ADD,INT_SERIE_DECEPCION
CLR B_ADR
LJMP FIN_INT_SERIE

```

```

INT_SERIE_1:

```

```

CLR RI
MOV A,SBUF
MOV RI,A
MOV DATA_C,A
CJNE A,#',INT_SERIE_2
LJMP FIN_INT_SERIE_F

```

```

INT_SERIE_2:

```

```

MOV A,D_CTA
ADD A,#BUF

```

```

MOV R0,A
MOV A,RI
MOV @R0,A
INC D_CTA
LJMP FIN_INT_SERIE

```

```

FIN_INT_SERIE_F:

```

```

CLR HAY_MSG

```

```

INT_SERIE_DECEPCION:

```

```

MOV D_CTA,#00H
SETB B_INI
SETB B_ADR
SETB B_IDE

```

```

FIN_INT_SERIE:

```

```

POP 01H
POP 00H
POP PSW
POP ACC
RETI

```

```

INT_INTERNA:

```

```

CLR IE.1
PUSH ACC
PUSH PSW
PUSH 00H
PUSH 01H

```

```

LCALL CHECA_SW
LCALL CHECA_MODAL
LCALL MOTOR1

```

```

MOV C,B_E_M
CPL C
MOV FRENO,C

```

```

MOV A,MASC_1
ORL A,#0FH
PI,A

```

```

FIN_CLK:

```

```

MOV TH0,TIMH
MOV TL0,TIML

```

```

POP 01H
POP 00H
POP PSW
POP ACC
SETB IE.1
RETI

```

```

MOTOR1:

```

```

JB B_E_M,FIN_MOTOR1
JB B_RAMPA,MOTOR1_SIN

```

```

INC D_RCTA
MOV A,D_RCTA
CJNE A,D_RDIV,FIN_MOTOR1
MOV D_RCTA,#00H

```

```

INC D_RPULSO
MOV A,D_RPULSO
CJNE A,#INTERVALO,MOTOR1_SIN
MOV D_RPULSO,#00H
DEC D_RDIV
MOV A,D_RDIV
CJNE A,#00H,MOTOR1_SIN
MOV D_RDIV,#01H

```

```

MOTOR1_SIN:
MOV A,MASC_1
ANL A,#0FH
MOV MASC_1,A
JB B_D_M,MOTOR1_IZQ
; SE SELECCIONA EL PASO COMPLETO/MEDIO
MOV R1,#04H
MOV R0,#DATOS
JB B_PASO,MOTOR1_DER
MOV R1,#08H
MOV R0,#DATOS2

MOTOR1_DER:
INC EDO_1
MOV A,EDO_1
CJNE A,01H,MOTOR1_1
MOV EDO_1,#00H

MOTOR1_1:
MOV A,R0
ADD A,EDO_1
MOV R0,A
MOV A,@R0
ANL A,#0F0H
ORL A,MASC_1
MOV MASC_1,A
LCALL INC_DIR_M
LCALL DEC_DIF_M
JMP FIN_MOTOR1

MOTOR1_IZQ:
; SE SELECCIONA EL PASO COMPLETO/MEDIO
MOV R1,#03H
MOV R0,#DATOS
JB B_PASO,MOTOR1_IZQ_0
MOV R1,#07H
MOV R0,#DATOS2

MOTOR1_IZQ_0:
DEC EDO_1
MOV A,EDO_1
CJNE A,#0FFH,MOTOR1_2
MOV EDO_1,R1

MOTOR1_2:
MOV A,R0
ADD A,EDO_1
MOV R0,A
MOV A,@R0
ANL A,#0F0H
ORL A,MASC_1
MOV MASC_1,A
LCALL DEC_DIR_M
LCALL DEC_DIF_M

FIN_MOTOR1:
RET

INICIO:
LCALL CONFIGURA
LCALL FUNCION00

LOOP:
JB B_HAY_C,LOOP_1
SETB B_HAY_C
JB B_ECHO,LOOP_1
MOV R5,DATA_C
LCALL MANDA_CAR

LOOP_1:
LCALL FUNCION
JB HAY_MSG,LOOP
SETB HAY_MSG

JB B_HAY_C,LOOP_2
SETB B_HAY_C

JB B_ECHO,LOOP_2
MOV R5,DATA_C
LCALL MANDA_CAR

LOOP_2:
LCALL DECODIFICA
LJMP LOOP

FUNCION:
JB F02,FN04
LCALL FUNCION02
FN04: JB F04,FIN_FN
LCALL FUNCION04
FIN_FN: RET

CONFIGURA:
LCALL INI_VARS
LCALL CHECA_ADD

MOV TL1,#0FDH
MOV TH1,#0FDH
ORL TMOD,#20H
SETB TCON.6
MOV TH0,#0EDH
MOV TL0,#0FFH
ORL TMOD,#01H
SETB TCON.4 ; TIMER 0 RUN

MOV SCON,#50H
CLR IP.4
SETB IE.4 ; INT DEL SERIE
SETB IE.1 ; HAB. INT. DEL TIMER 0
SETB IE.7 ; INICIA LAS
INTERRUPCIONES
RET

MANDA_CAR:
SETB SERIE
CLR IE.7 ; DESAHB INTS
MOV A,R5
MOV SBUF,A
AQUI_M: JNB TI,AQUI_M ; DAR TIEMPO PARA
CLR TI
SETB IE.7 ; HAB INTS
CLR SERIE
RET

DECODIFICA:
MOV A,BUF
CJNE A,#'0',DECOD_01
LCALL FUNCION00
RET

DECOD_01:
MOV A,BUF
CJNE A,#'1',DECOD_02
SETB B_E_M
SETB B_D_M
SETB B_TOCO
SETB F02
SETB F04
RET

DECOD_02:
MOV A,BUF
CJNE A,#'2',DECOD_03
MOV D_RCTA,#00H
MOV D_RPULSO,#00H
MOV D_RDIV,#NUM_ESCALONES
SETB B_TOCO
CLR F02

```

```

    RET
DECOD_03:
    MOV     A,BUF
    CJNE   A,#'3',DECOD_04
    MOV     R5,BUF+2
    MOV     R6,BUF+3
    LCALL  CONV_ASCII_HEX
    MOV     DIRH,05H
    MOV     R5,BUF+4
    MOV     R6,BUF+5
    LCALL  CONV_ASCII_HEX
    MOV     DIRL,05H
    RET

DECOD_04:
    MOV     A,BUF
    CJNE   A,#'4',DECOD_05
    MOV     R5,BUF+2
    MOV     R6,BUF+3
    LCALL  CONV_ASCII_HEX
    MOV     POSH,05H
    MOV     R5,BUF+4
    MOV     R6,BUF+5
    LCALL  CONV_ASCII_HEX
    MOV     POSL,05H
    LCALL  DIF_1
    MOV     D_RCTA,#00H
    MOV     D_RPULSO,#00H
    MOV     D_RDIV,#NUM_ESCALONES
    CLR     F04
    RET

DECOD_05:
    MOV     A,BUF
    CJNE   A,#'5',DECOD_06
    MOV     R5,BUF+2
    MOV     R6,BUF+3
    LCALL  CONV_ASCII_HEX
    MOV     DATA_T2,05H
    MOV     R5,BUF+4
    MOV     R6,BUF+5
    LCALL  CONV_ASCII_HEX
    MOV     DATA_T1,05H

    MOV     A,DIRL
    ADD     A,DATA_T1
    MOV     POSL,A
    MOV     A,DIRH
    ADDC   A,DATA_T2
    MOV     POSH,A

    LCALL  DIF_1
    MOV     D_RCTA,#00H
    MOV     D_RPULSO,#00H
    MOV     D_RDIV,#NUM_ESCALONES
    CLR     F04
    RET

DECOD_06:
    MOV     A,BUF
    CJNE   A,#'6',DECOD_07
    MOV     R5,BUF+2
    MOV     R6,BUF+3
    LCALL  CONV_ASCII_HEX
    MOV     DATA_T2,05H
    MOV     R5,BUF+4
    MOV     R6,BUF+5
    LCALL  CONV_ASCII_HEX
    MOV     DATA_T1,05H
    MOV     A,DIRL
    CLR     C

    SUBB   A,DATA_T1
    MOV     POSL,A
    MOV     A,DIRH
    SUBB   A,DATA_T2
    MOV     POSH,A

    LCALL  DIF_1
    MOV     D_RCTA,#00H
    MOV     D_RPULSO,#00H
    MOV     D_RDIV,#NUM_ESCALONES
    CLR     F04
    RET

DECOD_07:
    MOV     A,BUF
    CJNE   A,#'7',DECOD_08
    MOV     D_RCTA,#00H
    MOV     D_RPULSO,#00H
    MOV     D_RDIV,#NUM_ESCALONES

    CLR     B_D_M
    CLR     B_E_M
    RET

DECOD_08:
    MOV     A,BUF
    CJNE   A,#'8',DECOD_09
    MOV     D_RCTA,#00H
    MOV     D_RPULSO,#00H
    MOV     D_RDIV,#NUM_ESCALONES
    SETB   B_D_M
    CLR     B_E_M
    RET

DECOD_09:
    MOV     A,BUF
    CJNE   A,#'9',DECOD_0A
    MOV     R5,BUF+2
    MOV     R6,BUF+3
    LCALL  CONV_ASCII_HEX
    MOV     TIMH,05H
    MOV     R5,BUF+4
    MOV     R6,BUF+5
    LCALL  CONV_ASCII_HEX
    MOV     TIML,05H
    RET

DECOD_0A:
    MOV     A,BUF
    CJNE   A,#'A',DECOD_0B
    CLR     IE.1

    SETB   B_ECHO
    MOV     A,BUF+2
    CJNE   A,#'0',DECOD_0A_0
    SETB   B_HAY_C
    CLR     B_ECHO

DECOD_0A_0:
    SETB   B_RAMPA
    MOV     A,BUF+3
    CJNE   A,#'0',DECOD_0A_1
    CLR     B_RAMPA

DECOD_0A_1:
    SETB   B_PASO
    MOV     A,BUF+4
    CJNE   A,#'0',DECOD_0A_2
    CLR     B_PASO

DECOD_0A_2:
    MOV     A,BUF+5
    CJNE   A,#'1',DECOD_0A_21
    JB     B_ON_M,DECOD_0A_21
    SETB   B_ON_M

```

```

        MOV     MASC_1,#33H
        JMP     DECOD_0A_3
DECOD_0A_21:
        CLR     B_ON_M
DECOD_0A_3:

        SETB   IE.1
        RET

DECOD_0B:
        MOV     A,BUF
        CJNE   A,#B',DECOD_0C
        MOV     R5,BUF+2
        MOV     R6,BUF+3
        LCALL  CONV_ASCII_HEX
        MOV     POSH,05H
        MOV     R5,BUF+4
        MOV     R6,BUF+5
        LCALL  CONV_ASCII_HEX
        MOV     POSL,05H
        MOV     D_RCTA,#00H
        MOV     D_RPULSO,#00H
        MOV     D_RDIV,#NUM_ESCALONES
        SETB   B_TOCO
        CLR     F02
        CLR     B_INI_SIGUE

DECOD_0C:
FIN_DECOD:
        RET

; RETORNA LA POSICION
FUNCION00:
        CLR     IE.1
        MOV     R5,#'
        LCALL  MANDA_CAR
        MOV     R5,#DATA_IDE
        LCALL  MANDA_CAR
        MOV     R5,DATA_ADD
        LCALL  MANDA_CAR

        MOV     R5,#'0'
        LCALL  MANDA_CAR
        MOV     R5,#'5'
        LCALL  MANDA_CAR

        MOV     R5,DIRH
        LCALL  CONV_HEX_ASCII
        LCALL  MANDA_CAR
        MOV     05H,06H
        LCALL  MANDA_CAR
        MOV     R5,DIRL
        LCALL  CONV_HEX_ASCII
        LCALL  MANDA_CAR
        MOV     05H,06H
        LCALL  MANDA_CAR

        MOV     R5,#'1'
        JB     SW_I,FUNCION00_0
        MOV     R5,#'0'
FUNCION00_0:
        LCALL  MANDA_CAR
        MOV     R5,#'1'
        JB     SW_S,FUNCION00_1
        MOV     R5,#'0'
FUNCION00_1:
        LCALL  MANDA_CAR

        MOV     A,#00H

        JNB    B_ECHO,FUNCION00_2
        ORL    A,#08H
FUNCION00_2:
        JNB    B_RAMPA,FUNCION00_3
        ORL    A,#04H
FUNCION00_3:
        JNB    B_PASO,FUNCION00_4
        ORL    A,#02H
FUNCION00_4:
        JNB    B_ON_M,FUNCION00_5
        ORL    A,#01H
FUNCION00_5:
        MOV     R5,A
        LCALL  CONV_HEX_A
        LCALL  MANDA_CAR

        MOV     R5,#';'
        LCALL  MANDA_CAR
        SETB   IE.1
RET

; DETIENE CUALQUIER OPERACION
FUNCION01:
        SETB   B_E_M
        SETB   B_D_M
        SETB   B_TOCO
        SETB   F02
        SETB   F04
FIN_FUNCION01:
        RET

; INICIALIZA EL EJE, BUSCA EL ORIGEN
FUNCION02:
        JNB    B_TOCO,FN021
        SETB   B_D_M
        CLR    B_E_M
        JNB    SW_I,FIN_FN02
        MOV     A,#05H
        MOV     B,#00H
        LCALL  SOFTIME
        CLR    B_TOCO
        MOV     D_RCTA,#00H
        MOV     D_RPULSO,#00H
        MOV     D_RDIV,#NUM_ESCALONES
FN021:
        CLR    B_D_M
        CLR    B_E_M
        JB     SW_I,FIN_FN02
        SETB   B_TOCO
        SETB   B_E_M
        SETB   F02
        CLR    IE.1
        MOV     DIRL,#00H
        MOV     DIRH,#00H
        SETB   IE.1
        JB     B_INI_SIGUE,FIN_FN02
        SETB   B_INI_SIGUE
        LCALL  DIF_1
        MOV     D_RCTA,#00H
        MOV     D_RPULSO,#00H
        MOV     D_RDIV,#NUM_ESCALONES
        CLR    F04
FIN_FN02:
        RET

; REDEFINE LA POSICION
FUNCION03:
        MOV     R5,BUF+2

```

```

MOV R6,BUF+3
LCALL CONV_ASCII_HEX
MOV DIRH,05H
MOV R5,BUF+4
MOV R6,BUF+5
LCALL CONV_ASCII_HEX
MOV DIRL,05H
RET

; MUEVE A ...
FUNCION04:
CLR B_E_M
CLR IE.1
MOV A,DIFL
ORL A,DIFH
SETB IE.1
JNZ FIN_FN04
SETB B_E_M
SETB F04
FIN_FN04:
RET

INI_VARS:
SETB B_D_M
SETB B_E_M
CLR SERIE
SETB B_INI
SETB B_IDE
SETB B_ADR
SETB HAY_MSG
SETB B_CHK
SETB B_TOCO
SETB F02
SETB F04
SETB B_INI_SIGUE
CLR FRENO

;B_ECHO=1 SIN ECHO 0=CON ECHO
CLR B_ECHO
SETB B_HAY_C
MOV DATA_C,#00H

;B_RAMPA=1 SIN RAMPA 0=CON RAMPA
SETB B_RAMPA

;B_PASO=1 PASO COMPLETO 0=MEDIO PASO
SETB B_PASO

;B_ON_M=1 SIN APAGAR 0=APAGANDO MOTOR
MOV C,ON_M
MOV B_ON_M,C

; POR DEFAULT EMPIEZA LA INT A 200 Hz
MOV TIMH,#TIM20H
MOV TIML,#TIM20L

; DATOS PARA INICIALIZAR LA RAMPA
MOV D_RCTA,#00H
MOV D_RPULSO,#00H
MOV D_RDIV,#NUM_ESCALONES
MOV D_CTA,#00H
MOV DIRH,#00H
MOV DIRL,#00H
MOV DIFH,#00H
MOV DIFL,#00H
MOV POSH,#00H
MOV POSL,#00H
MOV EDO_1,#00H
MOV DATOS,#EDO1
MOV DATOS+1,#EDO2
MOV DATOS+2,#EDO3
MOV DATOS+3,#EDO4
MOV DATOS2,#EDO_01
MOV DATOS2+1,#EDO_02

MOV DATOS2+2,#EDO_03
MOV DATOS2+3,#EDO_04
MOV DATOS2+4,#EDO_05
MOV DATOS2+5,#EDO_06
MOV DATOS2+6,#EDO_07
MOV DATOS2+7,#EDO_08
MOV MASC_1,#33H
RET

DEC_DIF_M:
MOV A,DIFL
CLR C
SUBB A,#01H
MOV DIFL,A
MOV A,DIFH
SUBB A,#00H
MOV DIFH,A
RET

INC_DIR_M:
MOV A,DIRL
ADD A,#01H
MOV DIRL,A
MOV A,DIRH
ADDC A,#00H
MOV DIRH,A
RET

DEC_DIR_M:
MOV A,DIRL
CLR C
SUBB A,#01H
MOV DIRL,A
MOV A,DIRH
SUBB A,#00H
MOV DIRH,A
RET

;ENTREGA LA DIFERENCIA ENTRE LA POS
REQUERIDA Y LA POS ACTUAL
;LA DIFERENCIA ABSOLUTA LA ALMACENA EN DIFL
Y DIFH
DIF_1:
MOV A,DIRL
CLR C
SUBB A,POSL
MOV DIFL,A
MOV A,DIRH
SUBB A,POSH
MOV DIFH,A
SETB B_D_M
MOV A,DIFH
ANL A,#80H
JZ FIN_DIF_1

CLR B_D_M
MOV A,DIFL ;SI LA
DIFERENCIA CPL A ; SE
LE SACA EL
MOV DIFL,A
MOV A,DIFH
CPL A
MOV DIFH,A
MOV A,DIFL
ADD A,#01H
MOV DIFL,A
MOV A,DIFH
ADDC A,#00H
MOV DIFH,A
FIN_DIF_1:

```

```

RET

CHECA_SW:
    JB     B_E_M,FIN_CHECA_SW
    JNB    B_D_M,SW_SUP
SW_INF:  JNB    SW_I,FIN_CHECA_SW
    JNB    F02,FIN_CHECA_SW
    SETB   B_E_M
    SETB   F04
    JMP    FIN_CHECA_SW
SW_SUP:  JNB    SW_S,FIN_CHECA_SW
    SETB   B_E_M
    SETB   F04
FIN_CHECA_SW:
    RET

CHECA_ADD:
    CLR    A
    JB     SW_D0,CHECA_ADD_1
    ORL    A,#01H
CHECA_ADD_1:
    JB     SW_D1,CHECA_ADD_2
    ORL    A,#02H
CHECA_ADD_2:
    JB     SW_D2,CHECA_ADD_3
    ORL    A,#04H
CHECA_ADD_3:
    JB     SW_D3,CHECA_ADD_4
    ORL    A,#08H
CHECA_ADD_4:
    ANL    A,#0FH
    MOV    R5,A
    LCALL CONV_HEX_A
    MOV    DATA_ADD,R5
    RET

CHECA_MODAL:
    JNB    B_E_M,FIN_CHECA_MODAL
    JB     B_ON_M,FIN_CHECA_MODAL
    MOV    A,MASC_1
    ANL    A,#0FH
    MOV    MASC_1,A
    MOV    EDO_1,#00H
FIN_CHECA_MODAL:
    RET

$INCLUDE(mio.asm)
END

```

## **APÉNDICE D**

# **CONTROL DEL MANEJADOR DE PICOMOTORES MODELO 8801, POR MEDIO DE UNA PC BAJO PLATAFORMA DOS Y LINUX**

En este apéndice se describe el funcionamiento de la interfaz de control de un controlador de picomotores comercial. El controlador multiejes modelo 8801, controla tres ejes por cada puerto, aceptando hasta 24 picomotores individuales. Utiliza un cable telefónico estándar de 6 líneas, estilo RJ11.

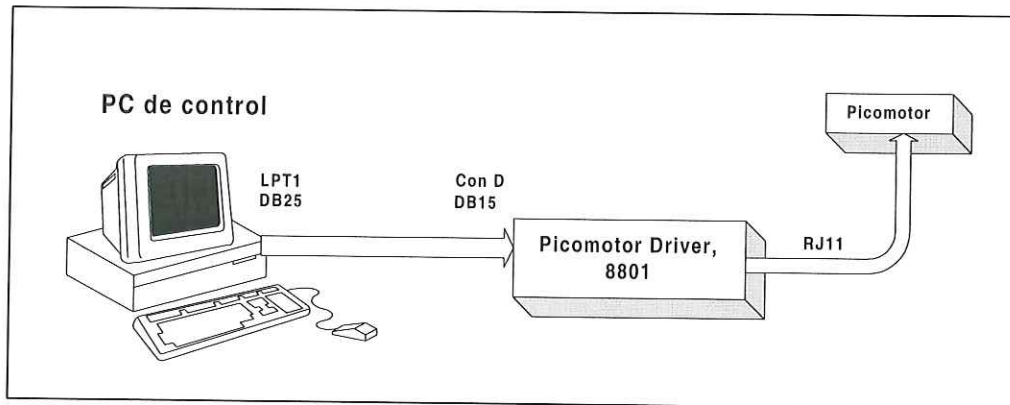


Figura D.1. Esquema del control.

### Manejador de picomotores modelo 8801, NewFocus Inc.

El picomotor usa un transductor piezoeléctrico para girar un tornillo, lo que resulta en un movimiento lineal incremental de menos de 30 nm y una carrera limitada por la longitud del tornillo. Estos dispositivos vencen fuerzas menores a 22 N (5 lb.).

### Principio de operación del picomotor.

El revolucionario principio de operación del picomotor se basa en el principio de fricción estática y dinámica. Dos mandíbulas apresan un tornillo de 80 vueltas por pulgada, y el transductor piezoeléctrico desliza las mandíbulas en direcciones opuestas.

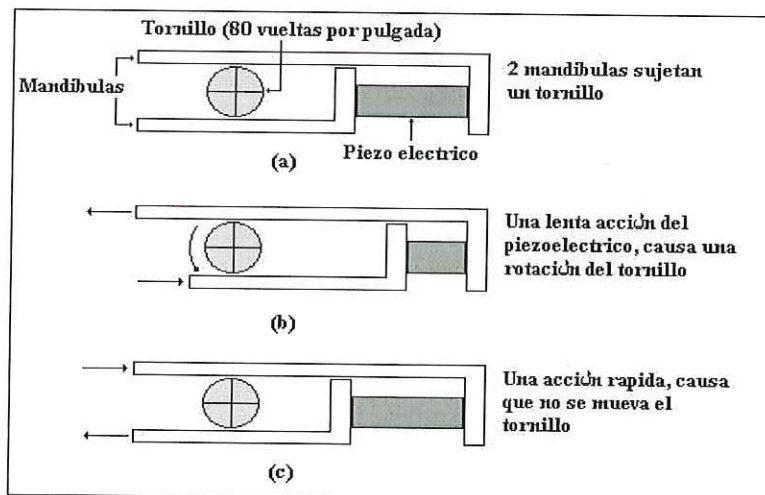


Figura D.2. Figura esquemática del principio de operación del picomotor.

Una compresión lenta del piezoeléctrico (véase sección b de la Figura D.2) causa la rotación del tornillo, ya que la mandíbula inferior mueve el tornillo en sentido contrario a las manecillas del reloj; esto es, produce una fricción estática alta, mientras que una expansión rápida del piezoeléctrico (sección c de la Figura D.2) no causa rotación, ya que la fricción de la mandíbula inferior al estar en movimiento es baja (fricción dinámica baja). Bajo el mismo principio, si expandimos el piezoeléctrico lentamente, y lo contraemos rápidamente, haremos girar el tornillo en sentido de las manecillas del reloj.

El voltaje necesario para contraer el piezoeléctrico es aproximadamente 120 volts, el cual los produce el controlador, así como la secuencia necesaria para el cambio de sentido.

**Resolución del paso y repetibilidad.**

El picomotor no es un motor de pasos; ya que utiliza un mecanismo de fricción, lo que ocasiona que no produzca pasos idénticos. A pesar de que el tamaño del paso varía ligeramente de pulso a pulso, esta variación siempre será menor a 30 nm.

**Puerto de control digital.**

El controlador 8801 posee un puerto de control digital (tipo DB9), el cual provee un par de entradas digitales para su control (paso y dirección) para cada canal A, B y C. Véase la Figura D.3.

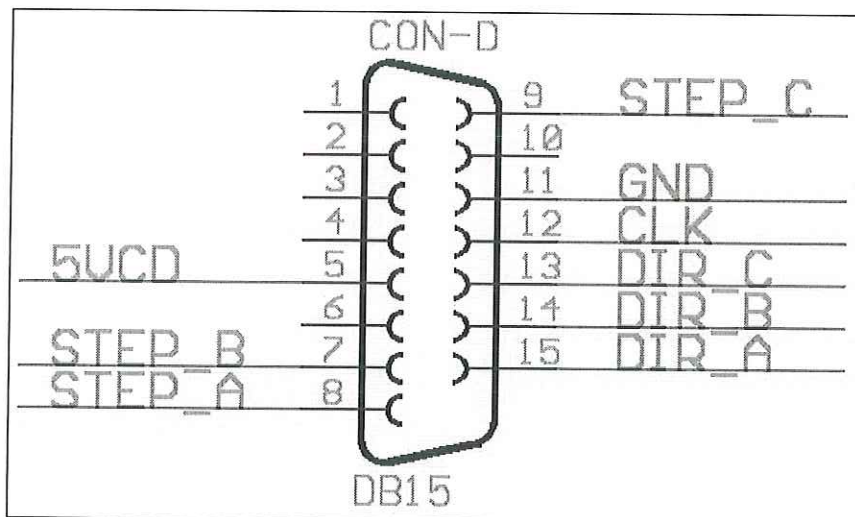


Figura D.3. Líneas de control digital del controlador.

**Líneas de dirección.** DirA, DirB y DirC son entradas digitales para los canales A, B y C respectivamente. Un nivel alto (+5 Volts) en la línea indica una rotación en sentido a las manecillas del reloj (CW); una entrada digital baja (0 Volts) indica una rotación en contra de las manecillas del reloj (CCW). Para una buena sincronización se debe mantener la línea en un solo estado mientras se dan los pulsos en una sola dirección, para asegurar que un paso fue correctamente completado, no se debe cambiar la dirección en los próximos 1.5 ms después de que se dio el paso.

**Líneas de pulso.** Las líneas de pulso deben ser inicializadas a 5 volts; un flanco de bajada en estas líneas, inicializa el movimiento del paso en picomotor. La máxima velocidad que soporta el controlador es de 1 KHz, mandar los pulsos a una velocidad mas alta no incrementa la velocidad del motor, por el contrario ocasiona la perdida de pulsos. Para garantizar un buen funcionamiento, el ancho mínimo del pulso debe ser de 20 nanosegundos de acuerdo al manual "User's guide picomotor drivers and motorizad products" de la compañía New Focus, Inc.

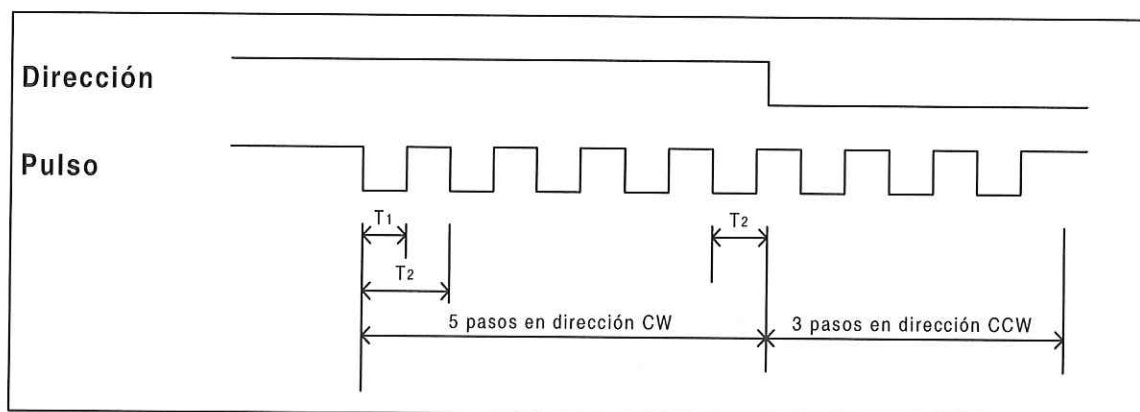


Figura D.4 Diagrama de tiempos de una secuencia de pasos.

$T_1$	20 nanosegundos mínimo.
$T_2$	1 milisegundo mínimo.
$T_1$	1.5 milisegundo mínimo.

## Manejo desde una PC.

La generación de las fases se realizó a través del puerto paralelo LPT1, el cual en su configuración estándar maneja 8 líneas TTL de salida.

## Programas de interfaz.

Se realizaron dos programas de control, uno para en lenguaje C++ compilado con BorlandC 3.1 para el sistema operativo DOS; y el segundo en lenguaje ANSI C para el sistema operativo LINUX, ambos manejan la secuencia de pulsos a través del puerto paralelo (LPT1).

Los programas son similares en su estructura de control y el manejo de los argumentos, solo difieren en el manejo de puertos y rutinas de retardo (véase el apéndice A). A continuación se

muestra un ejemplo de cómo se deben dar los argumentos (Windows bajo una ventana de DOS y en LINUX bajo una terminal o consola):

```
">pico pasos_eje1 pasos_eje2 pasos_eje3"
```

Los argumentos *pasos\_eje1*, *pasos\_eje2*, *pasos\_eje3*, deben ser números enteros, dentro de un intervalo de -2147483647 a 2147483648. Si no se dan los argumentos correctos el programa desplegará los siguientes mensajes:

```
>pico  
Faltan argumentos ...!!!  
Pico step1 step2 step3
```

### Como compilar el programa de control para LINUX.

Para realizar esta operación se debe tener la contraseña de *superusuario*, con el fin de poder brindarle al programa los atributos de manejo de puertos. Desde una terminal o consola entrar como superusuario, después dar los mandos de compilación y cambio de propiedades, como se muestra a continuación:

```
]$ su  
Password:*****  
]$ gcc -O2 -I /usr/src/linux/include -o pico pico.c  
]$ chown root.bin pico  
]$ chmod +s pico
```

De esta forma el usuario del programa no tiene que tener la clave de superusuario, ya que el programa contiene las propiedades para acceder los puertos de control.

## Programa en lenguaje C++ (Sistema Operativo MS-DOS).

```
#include <dos.h>
#include <stdlib.h>
#include <stdio.h>
#include <conio.h>
#define puerto 0x378
void main(int argc, char *argv[])
{
    long step1=0, step2=0, step3=0;
    unsigned char dir1=1, dir2=1, dir3=1;
    unsigned char byte;
    if(argc != 4){
        printf("Faltan argumentos ...!!\n");
        printf("picomot step1 step2 step3\n");
        return; }
    step1 = atol(argv[1]); step2 = atol(argv[2]); step3 = atol(argv[3]);
    if(step1 >=0) dir1=1; else dir1=0;
    if(step2 >=0) dir2=1; else dir2=0;
    if(step3 >=0) dir3=1; else dir3=0;
    step1=labs(step1); step2=labs(step2); step3=labs(step3);
    do{
        byte=0xff;
        if(dir1 == 0) byte = byte & 0xfe; //clarea el bit0
        if(dir2 == 0) byte = byte & 0xfd; //clarea el bit1
        if(dir3 == 0) byte = byte & 0xfb; //clarea el bit2

        if(step1 > 0){
            step1--;
            byte = byte & 0xf7; //clarea el bit3
        }
        if(step2 > 0){
            step2--;
            byte = byte & 0xef; //clarea el bit4
        }
        if(step3 > 0){
            step3--;
            byte = byte & 0xdf; //clarea el bit4
        }
        outportb(puerto, byte);
        delay(1);
        byte = byte | 0x08; //set bit3
        byte = byte | 0x10; //set bit4
        byte = byte | 0x20; //set bit5
        outportb(puerto, byte);
    }while ((step1+step2+step3) != 0 );
}
```

## Programa en ANSI C (Sistema Operativo Linux).

```
#include <stdlib.h>
#include <stdio.h>
#include <asm/io.h>

#define puerto 0x378

int main(int argc, char *argv[]) {
    long step1=0, step2=0, step3=0;
    unsigned char dir1=1, dir2=1, dir3=1;
    unsigned char byte;
    unsigned int resp=0;
    int fd, ret, i;

    if(argc != 4){
        printf("Faltan argumentos ...!!\n");
        printf("picomot step1 step2 step3\n");
        return; }

    resp = ioperm(puerto, 1, 1);
    if (resp == -1)
        printf("No hay permiso de acceder el pto. (%d)\n", puerto);

    step1 = atol(argv[1]);
    step2 = atol(argv[2]);
    step3 = atol(argv[3]);

    if(step1 >=0)    dir1=1;
    else            dir1=0;
    if(step2 >=0)    dir2=1;
    else            dir2=0;
    if(step3 >=0)    dir3=1;
    else            dir3=0;

    step1=labs(step1);
    step2=labs(step2);
    step3=labs(step3);

    do{
        byte=0xff;
        if(dir1 == 0)    byte = byte & 0xfe;    //clarea el bit0
        if(dir2 == 0)    byte = byte & 0xfd;    //clarea el bit1
        if(dir3 == 0)    byte = byte & 0xfb;    //clarea el bit2

        if(step1 > 0){
            step1 = step1 - 1;
            byte = byte & 0xf7;                //clarea el bit3
        }
        if(step2 > 0){
            step2 = step2 - 1;
            byte = byte & 0xef;                //clarea el bit4
        }
        if(step3 > 0){
```

```

        step3 = step3 - 1;
        byte = byte & 0xdf;           //clarea el bit4
    }
    outb(byte, puerto);
for (i=0;i<1000;i++) outb(byte, puerto);

    byte = byte | 0x08;               //set bit3
    byte = byte | 0x10;               //set bit4
    byte = byte | 0x20;               //set bit5
    outb(byte, puerto);

    for (i=0;i<1000;i++) outb(byte, puerto);
}while ((step1+step2+step3) != 0 );
return 0;
}

```