



UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE LA MIXTECA

“Construcción de un sistema de dos grados de libertad para la evaluación de superficies reflectoras utilizando la prueba de Ronchi”

Tesis para obtener el grado de:

Maestro en Robótica

Presenta:

Yara Pérez Maldonado

Asesores:

Dr. Agustín Santiago Alvarado

Dr. Jorge González García

Dr. Vitaliy Rybak

Huajuapán de León, Oaxaca.

Noviembre del 2013

**Tesis presentada en Noviembre de 2013 ante los
siguientes sinodales:**

Dr. Agustín Santiago Alvarado.

Dr. Aníbal Arias Aguilar.

Dr. Santiago Omar Caballero Morales.

M.C. Fermín Hugo Ramírez Leyva

Director de tesis:

Dr. Agustín Santiago Alvarado.

A mis padres Araceli y Luis con todo mi Amor

Agradecimientos

A Dios por permitirme concluir con satisfacción este proyecto.

A mis padres Araceli y Luis por apoyarme incondicionalmente, además de ser un ejemplo de esfuerzo y superación en mi vida.

A mis hermanos Luis Uriel y Wendy por ser mis cómplices y motivo de inspiración para superarme y seguir adelante.

A Wilebaldo por estar a mi lado y brindarme ánimos siempre.

A mis abuelos Aurea, Delia, Isauro, Luis y Álvaro por su ejemplo de esfuerzo trabajo y amor.

Al Dr. Agustín, al Dr. Jorge y al Dr. Vitaliy por permitirme colaborar con ellos.

A los sinodales por el tiempo y esfuerzo invertido en la revisión de este trabajo.

A la Universidad Tecnológica de la Mixteca

Al Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica

A la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla

Resumen

Se propone el desarrollo de un sistema de dos grados de libertad semiautomático para la evaluación de la forma de superficies ópticas en la etapa de pulido, mediante la prueba de Ronchi. El sistema debe ser capaz de alinear un probador de Ronchi a la superficie que se encuentra en proceso de fabricación, además de generar y capturar la imagen del ronchigrama. Con esto, se pretende optimizar el proceso de evaluación de la superficie y por tanto emplear menor tiempo en su fabricación.

El trabajo comprende el diseño del control de un sistema de rieles de dos grados de libertad, que permite la alineación semiautomática del probador de Ronchi con la superficie en proceso de producción. Para ello, se emplean las Marcas Visuales Informativas que permiten ubicar el sistema de coordenadas de la superficie óptica con respecto al sistema de coordenadas básico del sistema de rieles. Posteriormente, se utilizará un software que capture la imagen del ronchigrama de la superficie a evaluar para en lo futuro procesarla.

Índice General

Agradecimientos	VII
Resumen.....	IX
Lista de Figuras.....	XV
Lista de Tablas	XIX
Introducción	1
Capítulo 1. Preliminares	3
1.1 Planteamiento del problema.....	3
1.2 Justificación.....	5
1.3 Hipótesis.....	6
1.4 Objetivos	7
1.4.1 General	7
1.4.2 Específicos.....	7
1.5 Metodología	7
1.6 Limitaciones.....	9
Capítulo 2. Marco teórico.....	11
2.1 Conceptos de Óptica.	11
2.1.1 Pulido de Superficies.....	11
2.1.2 Prueba de Ronchi.....	15
2.2 Algoritmos genéticos.	18
2.3 Sistemas Robóticos.	21
2.3.1 Tipos de Robot.	22

2.3.2 Tipos de Motores.	25
2. 4 Marcas Visuales Informativas.	27
Capítulo 3. Sistema de 2GDL.	29
3.1 Requerimientos del Sistema	29
3.2 Productos en el mercado.....	30
3.3 Prototipos Mecánicos.	32
3.2 Acoplamiento de las señales.....	42
3.2.1 Selección del motor.....	43
3.2.3 Control del motor	49
Capítulo 4. Funcionamiento del sistema.	53
4.1 Diseño de las MVI.....	54
4.2 Calibración de la cámara CCD	60
4.3 Programas para emplear las MVI.	63
Capítulo 5. Implementación del Sistema.....	67
5.1 Verificación de los componentes.....	67
5.2 Integración del sistema.	71
5.3 Programa principal.	73
Capítulo 6. Pruebas y análisis de resultados.	81
Capítulo 7. Conclusiones y trabajos a futuro.	91
Bibliografía.....	95
Anexos.....	99
Anexo 1. Programa de detección de las MVI.....	99
Anexo 2. Programa que calcula las coordenadas.	104

Anexo 3. Función para capturar la imagen y para realizar la binarización de la imagen.	106
Anexo 4. Función para mover los motores.	107
Anexo 5. Programa principal.	110
Anexo 6. Manual de usuario.	113
Introducción.....	113
Objetivos del sistema.....	113
Requerimientos del sistema.....	113
Guía de Uso.	113
Soporte técnico.	122

Lista de Figuras.

Fig. 1. Proceso metodológico para la realización de esta tesis.	8
Fig. 2. Diagrama que muestra el proceso de fabricación de una superficie óptica.....	11
Fig. 3. Pulido de una superficie; a) Superficie Irregular; b) Material excedente; c) Superficie con perfil deseado.....	13
Fig. 4.a) Esquema de una máquina pulidora; b) Máquina de pulido clásico.	14
Fig. 5. a) Herramientas de desgaste; b) Máquina pulidora.	15
Fig. 6 Ronchigramas experimentales obtenidos de a) una superficie esférica y b) de una superficie elíptica.	16
Fig. 7. a) Esquema de un probador de Ronchi; b) Probador de Ronchi.	16
Fig. 8. Ronchigrama ideal colocado en la superficie bajo prueba.	17
Fig. 9. Individuo genético binario.....	19
Fig. 10 Robot cartesiano.	23
Fig. 11 Robot cartesiano XY	24
Fig. 12 Robot cartesiano 400XR.....	24
Fig. 13 Robot Cartesiano XRS	24
Fig. 14. Diagrama de una Marca Visual Informativa representada por centroides circulares de diferentes diámetros.	28
Fig. 15 Sistema de movimiento lineal de marca Velmex.	30
Fig. 16. Sistema LTS	31
Fig. 17 Sistema Parker.	31
Fig. 18. Guía cuadrada que venden en la compañía OpencncMéxico.	32
Fig. 19 Diseño de la propuesta 1 señalando los rieles inferiores y superiores	33
Fig. 20 Carros de la propuesta 1.	34
Fig. 21 Plataforma donde se colocarán los rieles inferiores y la superficie óptica.....	34
Fig. 22 Ejes y en cuales se colocará un motor.	35
Fig. 23 a) Deformación centrada. b)Deformación lateral	36
Fig. 24 Propuesta 2 con Guías cuadradas.	37

Fig. 25 Motores y Tornillos embalados de la propuesta 2.	38
Fig. 26 a) Deformación centrada. b) Deformación lateral	39
Fig. 27 Esquema de la comunicación entre la PC y el motor.....	43
Fig. 28 Muestra el diagrama de masas y distancias del sistema.	44
Fig. 29 a) Diagrama de un motor a pasos bipolar; b) Secuencia para el giro del motor	50
Fig. 30 Circuito para el control de un motor bipolar.....	50
Fig. 31 Conexión de Jumpers cruzados para recibir y enviar datos vía UART.	51
Fig. 32. Esquema del funcionamiento general del sistema.	54
Fig. 33. Ejemplo de una MVI.....	55
Fig. 34 MVI utilizadas para tomar un objeto (Imagen tomada en el Laboratorio de Robótica Inteligente de la UTM).	56
Fig. 35. Diseño de las MVI en CorelDraw.....	58
Fig. 36 a) MVI colocadas alrededor de una superficie óptica, b) Ronchigrama esperado... 58	
Fig. 37 Muestra el tablero de ajedrez en varias posiciones.	62
Fig. 38 Toolbox_Calib de Matlab.	62
Fig. 39 Cámara CCD desfasada del eje óptico de la superficie bajo prueba.....	64
Fig. 40 Diferencia de los centroides de la imagen y el rectángulo formado por los 4 vértices.	65
Fig. 41 Diagrama del programa de corrección de coordenadas.	66
Fig. 42. a) Rieles inferiores; b) Rieles superiores.	67
Fig. 43 Partes mecánicas del sistema que permiten el movimiento.	68
Fig. 44. Montura para sostener al probador de Ronchi y componentes.	69
Fig. 45. a) Montura para colocar la superficie óptica b) Ranuras para colocar la montura.	69
Fig. 46. Circuitos electrónicos de la etapa de potencia de los motores.	70
Fig. 47 Microcontroladores conectados a la PC.....	71
Fig. 48. Diagrama a bloques de la integración del sistema.	72
Fig. 49. Sistema implementado.	72
Fig. 50. Colocación del láser.	73

Fig. 51. MVI colocadas en la montura. En la vista trasera se observa las líneas de guía para colocar las MVI.	74
Fig. 52. Posición de Home del sistema.	74
Fig. 53. Muestra la fuente de alimentación.	75
Fig. 54 Diagrama de flujo del funcionamiento del programa principal.	76
Fig. 55. Colocación de la rejilla en el probador.	78
Fig. 56. Ruta de acceso al “Demo” del programa IC Capture.	78
Fig. 57. Programa Demo “IC Capture”.....	79
Fig. 58 Programa en espera de instrucciones.	79
Fig. 59. Muestra el cambio de exposición en la imagen.	80
Fig. 60 a) Ronchigrama de referencia; b) Ronchigrama obtenido con el sistema.	82
Fig. 61 a) Ronchigrama de referencia; b) Ronchigrama obtenido posicionando al sistema exactamente en donde se debería ver el patrón.	82
Fig. 62 Montura de aluminio que sostenía a la superficie bajo prueba.	83
Fig. 63 Adaptación que se le realizó al mecanismo.	84
Fig. 64 a) Ronchigrama de referencia; b) Ronchigrama obtenido con el sistema.	85
Fig. 65 Patrón de referencia Centrado.	85
Fig. 66 Ronchigrama sin corrección de pasos.	86
Fig. 67 Ronchigrama con corrección de pasos.	86
Fig. 68 Superficie posicionada en el extremo izquierdo.	87
Fig. 69. a) Ronchigrama Ideal; b) Ronchigrama sin corrección de pasos; c) Ronchigrama con corrección de 5 pasos a la izquierda.	87
Fig. 70. Superficie posicionada en el extremo derecho.	88
Fig. 71 a) Ronchigrama Ideal; b) Ronchigrama sin corrección de pasos; c) Ronchigrama con corrección de 3 pasos a la izquierda.	88
Fig. 72. Tope colocado como referencia para poder colocar la superficie óptica siempre a la misma distancia a partir del tope.	90

Lista de Tablas.

Tabla 1. Clasificación general de los robots.....	22
Tabla 2 Robots cartesianos comerciales	24
Tabla 3 Análisis FODA para la propuesta 1.....	40
Tabla 4 Análisis FODA para la propuesta 2	41
Tabla 5.Lista de motores a pasos comerciales	48
Tabla 6. Información de las superficies a evaluar.	57
Tabla 7. Parámetros de la cámara CCD IMAGINSOURCE.	63
Tabla 8. Formato para introducir los valores ideales de la superficie bajo prueba.....	75

Introducción

A lo largo de la historia, el hombre ha ido buscando la sustitución de los instrumentos de trabajos artesanales por máquinas, con la finalidad de eficientar el proceso de elaboración de los productos, además de estandarizarlos y producir productos terminados de manera confiable, económica y de alta precisión en un menor tiempo.

La automatización permite la habilitación de las máquinas para seguir una secuencia determinada de operaciones con poca o nula intervención humana, utilizando dispositivos que realizan y controlan los procesos de fabricación [1]. El automatizar un proceso implica: reducir la intervención humana, incrementar la calidad del producto, incrementar la productividad, incrementar la eficiencia, reducir los riesgos y accidentes, simplificar el trabajo y reducir los productos defectuosos.

Hoy en día tecnológicamente es posible automatizar o semiautomatizar casi todos los procesos artesanales [1]. En México no todas las instituciones educativas cuentan con el recurso económico y capital humano para invertir en la tecnología necesaria para realizar la automatización. Tal es el caso del proceso de pulido clásico de superficies ópticas reflectoras en los talleres de óptica institucionales.

El pulido clásico es considerado un proceso artesanal que depende en gran parte de la experiencia y la habilidad del técnico que va a fabricar la pieza [2]. Si el técnico en cuestión tiene poca experiencia, el proceso de fabricación se realizará lentamente, de manera contraria el proceso de fabricación se realizará de una manera más eficiente. Es importante recalcar que las máquinas pulidoras con las que cuentan los talleres de óptica están hechas para producir esferas, por lo tanto la experiencia y la habilidad del técnico es fundamental para generar una pieza, sobre todo si se quiere obtener otra forma diferente a esta. Por ello, es importante la semiautomatización del proceso de pulido clásico de superficies reflectoras. Así el proceso de producción no dependerá totalmente de la habilidad y experiencia del técnico en cuestión, se agilizará su fabricación, y se reducirían los defectos en la fabricación.

El proceso de pulido es la última etapa del proceso de fabricación de superficies, en el cual se da el acabado fino y el desgaste de la superficie es mínimo, ya que se emplean pulidores con partículas finas. Este proceso consiste en tallar la superficie durante un tiempo (el que el técnico considere necesario), posteriormente se detiene la máquina, se desmonta la pieza para verificar su acabado y forma, mediante la aplicación de una prueba óptica.

Una de las pruebas ópticas más simples y baratas que se emplean en los talleres de óptica es: la prueba de Ronchi, la cual consiste en colocar una rejilla de líneas verticales paralelas cercana al centro de curvatura de la superficie (pieza) e iluminar con una fuente puntual, colocada también cerca del centro de curvatura. La imagen de la rejilla superpuesta con la rejilla misma produce un patrón de franjas, que dependiendo de la forma de este patrón, se puede determinar de manera cualitativa la forma de la superficie [3]. Durante el proceso de fabricación del espejo (superficie reflectora), la prueba de Ronchi va guiando el proceso de pulido ya que es aplicada varias veces, y de esta manera permite conocer: 1) la forma de la superficie después de un determinado tiempo de pulido y 2) si se requiere aplicar otra etapa de pulido en una zona del espejo para obtener la forma deseada.

Para hacer más eficiente el proceso clásico de pulido descrito previamente, se propone un sistema semiautomático que permita realizar la prueba de Ronchi sin necesidad de realizar la alineación manual. El sistema de dos grados de libertad que se está proponiendo desarrollar alineará el probador de Ronchi y la cámara Charge Coupled Device (CCD) con el eje de la superficie bajo prueba en posición horizontal, posteriormente se capturará el ronchigrama para que se pueda evaluar. Con esto se pretende disminuir el tiempo de fabricación, al mejorar la etapa de verificación de la calidad del acabado de la superficie y reducir la dependencia de la habilidad del técnico para la alineación de la superficie bajo prueba.

Capítulo 1. Preliminares

1.1 Planteamiento del problema.

El proceso de pulido clásico en México, depende directamente de la experiencia del técnico, el decide dependiendo de la superficie a fabricar qué área de esta superficie se empieza a pulir y cuando es necesario aplicar las pruebas ópticas para verificar su forma. También depende, de que tan hábil sea para interpretar los resultados de la prueba óptica que realiza, y así poder determinar la forma de la superficie en proceso de fabricación.

Existen varias pruebas ópticas que son empleadas en los talleres de óptica para conocer o cuantificar el error entre el perfil real y el perfil requerido de una superficie, algunas de estas pruebas son las pruebas interferométricas, con las cuales se puede obtener un patrón de franjas (abiertas o cerradas) llamado interferograma, el cual se puede obtener mediante los siguientes interferómetros: el interferómetro de Fizeau, el interferómetro de Newton, el Interferómetro de Twyman Green [3] etc. Otros tipos de pruebas son las llamadas pruebas geométricas dentro de las cuales se tiene a la prueba de Ronchi [3], siendo esta última la más ocupada por que solo requiere de una fuente puntual y una rejilla impresa, es decir, es económica de implementar ya que no se requiere de equipo sofisticado, además de que le permite al técnico realizar la prueba sin necesidad de despegar la superficie de la herramienta de soporte [4].

Para realizar la prueba de Ronchi se desmonta la pieza de la máquina de pulido y se coloca en una nueva montura para alinearla manualmente a un probador de Ronchi posicionándolo cerca del centro de curvatura y sobre el eje óptico de la superficie bajo prueba. El probador de Ronchi consta de una fuente extendida (LED) y una rejilla (con franjas paralelas transparentes y oscuras). El técnico observa a través de la rejilla el número de franjas y la deformación de éstas para interpretar cualitativamente que errores tiene la superficie en evaluación [3]. Por lo tanto, si el probador de Ronchi no se encuentra correctamente alineado podría no verse con nitidez las franjas. Además, la cantidad de error en el espejo podría ser mal interpretado por el técnico.

Los problemas que se encuentran en los talleres de óptica al aplicar la prueba de Ronchi, son:

- Alineación manual. El técnico realiza la alineación utilizando un tripié o montura robusta para fijar el probador de Ronchi cerca del centro de curvatura.
- Evaluaciones cualitativas. La cantidad de error en la superficie es interpretada por el técnico, de acuerdo a su experiencia.

Investigadores de la Universidad Tecnológica de la Mixteca, en colaboración con personal del taller de óptica del Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica (INAOE) y personal del taller de óptica de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla (BUAP) se encuentran desarrollando un proyecto apoyado por el Programa de Mejoramiento del Profesorado (PROMEP) donde requieren un sistema que pueda alinear un probador de Ronchi en un plano horizontal a superficies con diámetros de 5 a 10 cm y radios de curvatura paraxial de 20 a 70 cm. A partir del vértice de la superficie bajo prueba, el sistema deberá desplazarse en un rango de 0 a 70 cm sobre el eje óptico de la superficie y 50 cm perpendicular a este, con una precisión en milímetros. El diseño del sistema se realizará con la técnica Despliegue de Función de Calidad (QFD) y se deberá ajustar a un presupuesto de 15,000 pesos asignado por parte del proyecto financiado por PROMEP.

Para dar solución al problema de alineación en la prueba de Ronchi y a los requerimientos del proyecto, se propone realizar un sistema semiautomático que alinea los componentes que son: un probador de Ronchi y cámara Charge Coupled Device (CCD), al eje óptico de una superficie bajo prueba. El sistema semiautomático capturará el ronchigrama (imagen) de una superficie reflectora en proceso de pulido, con diámetros de 5 a 10 cm y radios de curvatura paraxial de 20 a 70 cm. El sistema de 2 grados de libertad (GDL) debe ser capaz de alinear y posicionar el probador de Ronchi cerca del centro de curvatura de la superficie de trabajo (pudiéndose desplazar de esa posición 70 cm), capturar el ronchigrama y entregar dicha imagen en formato digital. Se le llama semiautomático porque el técnico necesita desmontar la pieza y posicionarla dentro de la montura del arreglo de la prueba de Ronchi.

1.2 Justificación.

La fabricación de superficies ópticas con máquinas de pulido clásico es un proceso artesanal, y depende en gran medida de la experiencia y habilidad del técnico para conocer la forma de las superficies mediante la aplicación de pruebas ópticas.

La prueba comúnmente usada en los talleres de óptica mexicanos es la prueba de Ronchi, porque es económica, fácil de implementar y provee el contraste necesario para poder capturar la imagen con una cámara CCD. Para ello se requiere que el probador de Ronchi se encuentre alineado con la superficie bajo prueba, para así garantizar que las desviaciones que aparecen en los ronchigramas capturados sean debido a los defectos de la superficie y no a un mal posicionamiento, sobre exposición o mala alineación con la superficie.

La propuesta que se hace en este trabajo, considera la importancia de la alineación y que depende de la experiencia del técnico que la realice. Por lo que, se tendrá que implementar un mecanismo que permita alinear de manera semiautomática un probador de Ronchi con la superficie bajo prueba y que permita capturar el ronchigrama.

Los robots cartesianos son utilizados comúnmente en la industria para desarrollar tareas de “pick and place”, posicionamiento, etc. Este tipo de robots consta de tres articulaciones prismáticas que le otorgan al robot tres grados de libertad, que permiten posicionarlo en cualquier parte de su rango de trabajo [5].

Por ello para realizar dicha alineación, se propone un sistema de dos grados de libertad, utilizando dos articulaciones prismáticas que permiten el posicionamiento en un plano [5]. A este sistema se le colocará una montura con la cámara y el probador de Ronchi, los cuales se encontrarán a la misma altura que el eje óptico de la superficie. Luego se utilizarán Marcas Visuales Informativas (MVI) para la alineación horizontal de los componentes con el eje óptico de la superficie bajo prueba. A continuación se presentan los pasos generales que realizará el sistema:

1. Se realiza la captura de las marcas MVI.

2. La información de las marcas MVI es enviada a un programa de corrección de coordenadas. El cual da como resultado la posición a la que se debe colocar el probador de Ronchi.
3. Esta información se le envía a la Interfaz que acopla las señales de la PC a los motores. Está realiza el ajuste de posición de la montura con los motores.
4. Una vez alineado y posicionada la montura, se captura la imagen.

Al implementar el sistema semiautomático para la evaluación de la forma de superficies en la etapa de pulido, se obtendrán las siguientes ventajas:

- Reduce la dependencia de la habilidad del técnico para alinear la superficie.
- Disminuir el tiempo de aplicación de la prueba óptica. Esto mediante la semiautomatización de la alineación del probador de Ronchi con la superficie.
- Facilidad para realizar evaluaciones simultaneas durante el proceso de pulido.

Estas ventajas impactan directamente en el tiempo de producción, en la optimización del proceso de fabricación y en la reducción de costo en el proceso de producción. Por ello, se cree que es un proyecto viable porque optimiza el proceso de pulido de superficies ópticas en los talleres ópticos mexicanos.

1.3 Hipótesis

¿Será posible semiautomatizar el proceso de evaluación de una superficie reflectora en la etapa de pulido con la prueba de Ronchi incorporando un sistema que haga la alineación de las componentes ópticas? Se cree que si es posible, utilizando un sistema de rieles guiado por Marcas Visuales Informativas, para alinear y posicionar un probador de Ronchi con el eje óptico de una superficie bajo prueba. Para comprobar la alineación del sistema con el método propuesto, se capturará el ronchigrama y se evaluará utilizando el método de medición de los centros de las franjas.

1.4 Objetivos

1.4.1 General

Realizar un sistema para implementar la prueba de Ronchi que sea capaz de alinear un probador de Ronchi con una superficie reflectora bajo prueba que se encuentra en etapa de pulido de manera semiautomática, generando y capturando el ronchigrama.

1.4.2 Específicos

- Construcción de un sistema de dos grados de libertad (2GDL).
- Calibración de la cámara CCD.
- Desarrollar el control de un sistema de rieles para la alineación semiautomática del eje de un probador de Ronchi con el eje óptico de la superficie bajo prueba, utilizando MVI.
- Realizar la verificación de alineación de una superficie que se encuentra bajo evaluación con la prueba Ronchi, mediante la captura de patrones aplicándoles el método de medición de los centros de las franjas sobre el eje X.

1.5 Metodología

El problema a resolver en este proyecto de investigación consiste en la alineación de un probador de Ronchi y una superficie óptica bajo prueba utilizando un sistema de 2GDL y la evaluación cuantitativa del alineamiento de una superficie óptica al capturar un ronchigrama. El proceso metodológico a seguir comprende varias etapas, que se presentan a continuación:

- Primero, realizar una revisión bibliográfica y el estado del arte de los temas que intervienen para dar solución a la problemática planteada.
- Segundo, desarrollar propuestas del sistema de dos grados de libertad con componentes comerciales. El cual debe cumplir con los requerimientos iniciales para realizar la prueba, dando las características y limitaciones mecánicas que el sistema tendrá. Se elegirá el servomotor que tenga las características necesarias para

mover el sistema y se realizará el acoplamiento necesario de las señales entre los servomotores y la computadora.

- La tercera etapa consiste en la Calibración de la cámara CCD IMAGINSOURCE. Para ello se utilizará el Toolbox_Calib de Matlab [6].
- La cuarta etapa abarca el diseño de las MVI a emplear y la alineación del Probador de Ronchi y la cámara CCD utilizando las MVI. Después de realizar la calibración de la cámara, se desarrollará un programa que a través del procesamiento de imágenes, la cámara CCD detecte la MVI para poder posicionarse junto con el probador de Ronchi cerca del centro de curvatura de la superficie a evaluar, utilizando el sistema de 2GDL.
- La última etapa consiste en verificar la alineación del probador de Ronchi con la superficie bajo prueba mediante la captura de un ronchigrama aplicándole posteriormente el método de medición de los centros de las franjas, en el eje X.

Estas etapas son mostradas en la figura 1.

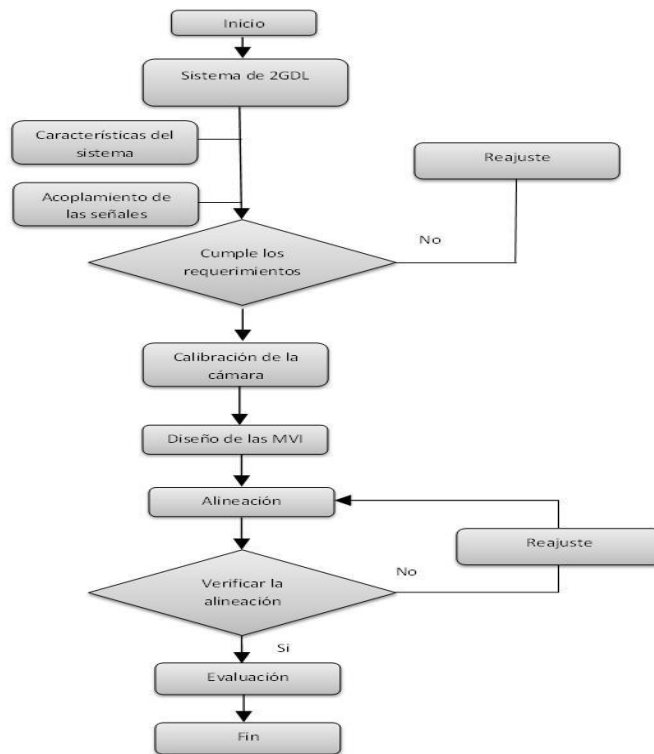


Fig. 1. Proceso metodológico para la realización de esta tesis.

1.6 Limitaciones.

- La superficie óptica a probar se tiene que centrar a la misma altura que la montura donde se encuentra el probador de Ronchi y la cámara, porque el sistema de rieles solo cuenta con dos grados de libertad, y no se podrá corregir errores de altura ni la inclinación para encontrar el eje óptico.
- La herramienta de soporte junto con la superficie bajo prueba se desmonta de la superficie y se lleva a otro sistema.
- El técnico debe dar los datos de entrada de la superficie deseada, como son: las características de la superficie deseada, diámetro, radio de curvatura paraxial, constante de conicidad, etc.
- El técnico debe alinear previamente la superficie bajo prueba de tal manera que garantice que el eje óptico de la superficie coincida con la perpendicular al plano de las marcas.

Capítulo 2. Marco teórico.

2.1 Conceptos de Óptica.

Los orígenes de la óptica provienen [7] desde la antigua Mesopotamia (3000 a.C.), cuando el arqueólogo Beck en 1928 encuentra lentes biconvexas que fueron utilizadas como objetos sagrados para encender fuego. El erudito árabe Ibn el-Heintham (Alhazen) considerado el padre de la óptica, fue el primero en evocar la posibilidad de auxiliar al ojo por medio de una lente óptica preparada con esa intención, además de que trabajó en la ley de la reflexión, poniendo los ángulos de incidencia y reflexión que hacen los rayos incidentes y reflejados en el mismo plano normal de la interfaz. Además estudió los espejos esféricos y parabólicos y describió detalladamente el ojo humano [8].

Desde entonces se han venido desarrollando técnicas para que una superficie óptica tome la forma una deseada (cóncava, convexa, biconvexa,..). En la antigüedad solían hacerse de metal brillante, una mezcla de cobre y estaño. Además su fabricación no tenía un proceso establecido, sino que se realizaban a prueba y error, en muchas ocasiones sin conocer con exactitud las propiedades ópticas de la superficie generada.

2.1.1 Pulido de Superficies.

Actualmente existen varias técnicas para producir superficies ópticas [3], la gran mayoría de ellas siguen un proceso estándar descrito en la figura 2 [4].

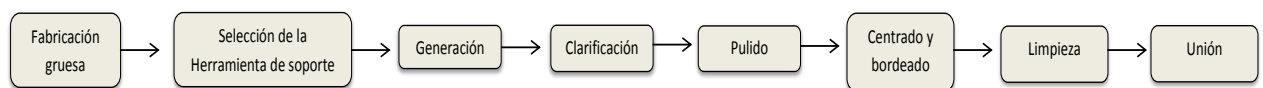


Fig. 2. Diagrama que muestra el proceso de fabricación de una superficie óptica.

- Fabricación gruesa /Tosca. En esta etapa se escoge el material óptico con el que se va a trabajar. Este puede tener muchas formas como láminas, bloques, tiras,

prensados y barras; se debe escoger la forma de acuerdo a lo que se va a fabricar, es decir, lo que más facilite la obtención final de la forma de la pieza a producir. Después se corta la pieza, por lo general con unos milímetros de tolerancia o con la dimensión final.

- **Herramienta de Soporte.** En esta etapa se considera con que se va a sostener la pieza durante el proceso de fabricación. Los Factores que se deben considerar al momento de elegir el soporte son: tamaño de la pieza, la forma, el grosor, el coeficiente de expansión, la dirección y la magnitud de las fuerzas aplicadas. La herramienta de soporte debe ser resistente y debe soportar los tratamientos que se le aplicarán a la superficie óptica. Por lo general, la herramienta de soporte está fabricada de aluminio, acero, hierro u otro material resistente. Para sostener la pieza a la herramienta de soporte se utilizan adhesivos, ceras o accesorios mecánicos en el borde.
- **Generación:** En esta etapa se transforma la pieza rápidamente en su forma casi terminada, es decir, la pieza es mecanizada típicamente con herramientas de diamante para dar las dimensiones finales, con una tolerancia de 1-0.1mm.
- **Clarificación:** El paso anterior deja una capa con fracturas en la superficie, estas son removidas por medio de la técnica de clarificación. Consiste en frotar la pieza y la herramienta entre sí, mientras que un abrasivo se mantiene entre ellos para brindar a la superficie óptica un acabado con tolerancias de 1-5 μm .
- **Pulido:** Las superficies ópticas se pulen para generar una superficie deseada con una precisión que generalmente varía de 0.1 a 0.005 μm [4]. En esta etapa se le proporciona la forma a la superficie óptica (en concordancia con la especificaciones dadas en el diseño).
- **Centrado y Boreado:** Esta etapa consiste en hacer coincidir los ejes ópticos de las superficies; una vez centrada la pieza se cortan los bordes para proporcionar biseles, protección y dar el diámetro final.
- **Limpieza:** Los elementos finales se deben limpiar para eliminar cualquier residuo del terreno de juego, adhesivo o cera y los compuestos de pulido. Generalmente se limpian con baños de alcohol metílico o acetona.

- Unión: Frecuentemente las lentes y prismas se unen con otras para formar dobletes o tripletes. Estas uniones generalmente se realizan utilizando una resina sintética sellada con luz ultra violeta.

Como ya se mencionó anteriormente, la etapa de pulido, es en la que se obtiene la forma final de la superficie óptica. Para verificar que esta superficie se encuentre dentro de las tolerancias y con la forma deseada se le aplican pruebas ópticas. En este proyecto se va a realizar la semiautomatización de esta etapa; particularmente la parte de evaluación de una superficie aplicando la prueba de Ronchi, por ello a continuación se hablará específicamente de esta etapa y de dicha prueba óptica.

Pulido Clásico de Superficies.

El pulido óptico consiste en remover una cantidad de material de una superficie irregular para obtener una superficie con perfil deseado (ver figura 3). En la actualidad existen diversas técnicas que van desde el pulido clásico, pasando por el pulido con tecnología láser, chorro abrasivo de agua [9], tecnología FreeForm [10], hasta utilizando tecnologías avanzadas como QED [11]. Estos métodos de pulido son utilizados en diferentes países, compañías e instituciones según su desarrollo tecnológico; pero en las instituciones educativas en México como son la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla (BUAP) y el Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica (INAOE) se sigue utilizando el método de pulido clásico (considerado un proceso de pulido artesanal) [2].

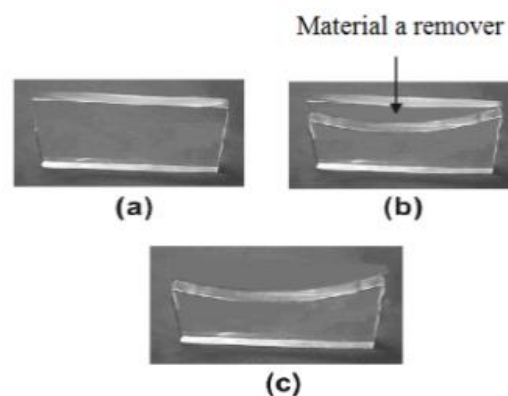


Fig. 3. Pulido de una superficie; a) Superficie Irregular; b) Material excedente; c) Superficie con perfil deseado.

El pulido clásico se realiza con la ayuda de una máquina pulidora (ver figura 4a), la cual consta de una herramienta de pulido, una herramienta de soporte donde se coloca la superficie a pulir y un brazo pulidor que permite posicionar la herramienta de pulido en diferentes puntos de la superficie de trabajo [2].

El funcionamiento de la máquina consiste en rotar la superficie de trabajo sobre un eje de giro (que pasa por la herramienta de soporte) y tallar contra esta una herramienta de desgaste colocada en el brazo de la máquina pulidora, colocando entre estas dos partes, un abrasivo que por lo general es un compuesto de óxido de cerio con agua. En la figura 4b se muestra una imagen de una máquina real que se encuentra en la Facultad de Ciencias Físico Matemáticas de la BUAP [2].

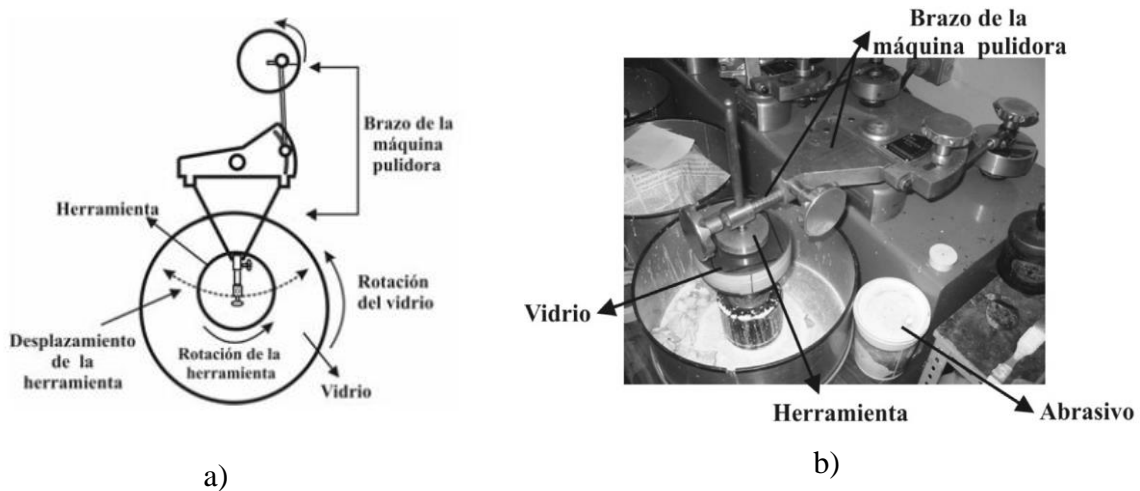


Fig. 4.a) Esquema de una máquina pulidora; b) Máquina de pulido clásico.

El brazo de la máquina pulidora realiza un movimiento oscilatorio y es posible colocarle pesas que incrementan la presión para aumentar el desgaste (ver figura 5b). La herramienta de desgaste (ver figura 5a) puede ser sólida, anular y de pétalo; estas herramientas están hechas de brea. Las herramientas sólidas y anular generalmente desgastan una pequeña zona de la superficie y son más chicas que ésta, mientras que la herramienta de pétalo generalmente se utiliza para desgastar toda la superficie al mismo tiempo y es del mismo tamaño que el de la superficie.

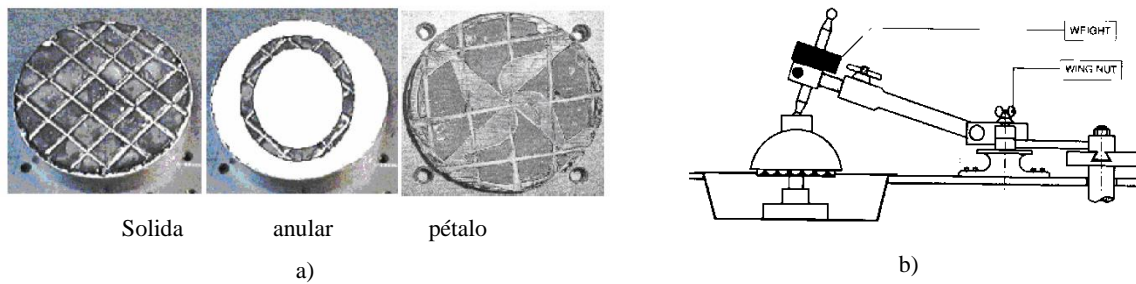


Fig. 5. a) Herramientas de desgaste; b) Máquina pulidora.

El proceso de pulido clásico consiste principalmente en:

1. Colocar y alinear la pieza de trabajo con cera en la herramienta de soporte.
2. Elegir y montar la herramienta de desgaste que se va a utilizar en el brazo de la máquina y colocarla en el área de la superficie que se desea pulir.
3. Aplicar el abrasivo, poner a trabajar la máquina un determinado tiempo.
4. Desmontar la pieza de trabajo, verificar su acabado y forma mediante la aplicación de una prueba óptica.
5. Repetir los pasos 2, 3 y 4 hasta que se obtenga la forma deseada dentro de un margen de tolerancia aceptable.

Este proceso depende directamente de la experiencia del técnico, el decide dependiendo de la superficie a construir que área de esta superficie empieza a pulir y cuando es necesario aplicar las pruebas ópticas. También depende de la habilidad del técnico para interpretar la prueba óptica que realiza y así poder determinar cuál es la forma de la superficie en proceso de fabricación.

2.1.2 Prueba de Ronchi.

La prueba de Ronchi es una de las más utilizadas en los talleres de óptica porque es económica de implementar y calcula el error de la superficie a partir de una superficie deseada o ideal [12]. Esta prueba consiste en generar un patrón de franjas a partir de la proyección de una rejilla compuesta de franjas oscuras y brillantes sobre una superficie bajo prueba, y dependiendo de la forma que adquieran éstas, (como puede observarse en la figura 6), será la forma que tenga la superficie óptica [13]. Los patrones de franjas

mostrados en la figura 6 son llamados patrones de Ronchi, también conocidos como ronchigramas.

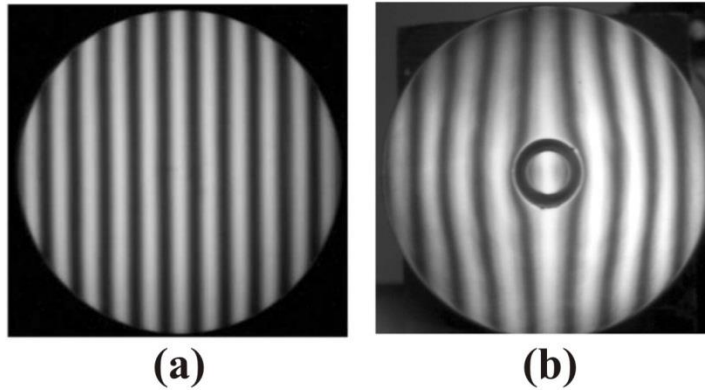


Fig. 6 Ronchigramas experimentales obtenidos de a) una superficie esférica y b) de una superficie elíptica.

Para realizar esta prueba se utiliza una fuente puntual y una rejilla impresa con franjas transparentes y oscuras (ver figura 7a). En la figura 7b se muestra un probador de Ronchi ocupado en el taller de óptica en el INAOE.

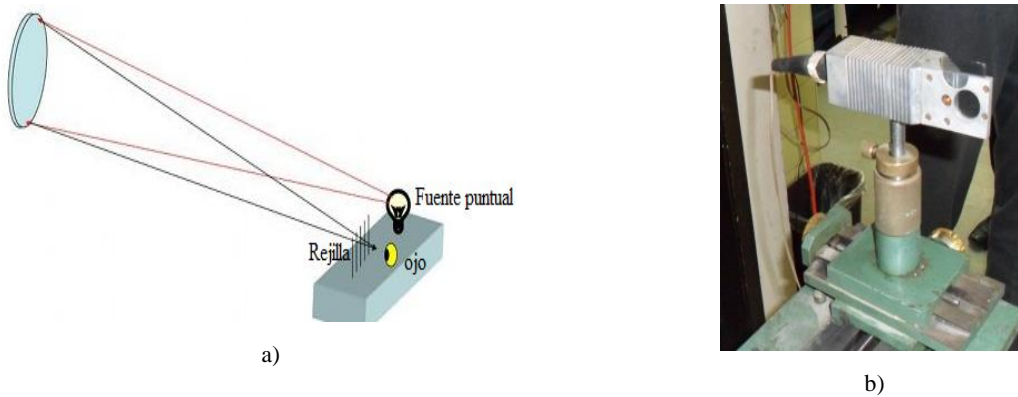


Fig. 7. a) Esquema de un probador de Ronchi; b) Probador de Ronchi.

Pasos para la aplicación de la prueba de Ronchi [14]:

1. Generar en la computadora el ronchigrama de la superficie ideal a fabricar considerando la posición de la rejilla con respecto a la superficie.
2. Desmontar la herramienta de soporte y colocarla verticalmente en una montura.
3. Alinear manualmente el probador de Ronchi colocándolo a la distancia especificada en el paso uno que se encuentra cerca del centro de curvatura.

4. Observar a través de la rejilla el número de franjas y la deformación de estas, comparándolas con el ronchigrama ideal, de manera cualitativa. En esta parte dependiendo de esta distorsión, el técnico toma la decisión de continuar con el pulido o continuar con el paso 5.
5. El ronchigrama ideal simulado se genera en forma de plantilla y se coloca sobre la superficie bajo prueba y se superpone con el producido experimentalmente (ver figura 8). Se observan cualitativamente las desviaciones entre estos patrones y se determina si estas se encuentran dentro de las tolerancias establecidas.



Fig. 8. Ronchigrama ideal colocado en la superficie bajo prueba.

Cuando la prueba de Ronchi es aplicada experimentalmente, las posiciones de los centros de las franjas pueden ser medidos con sus respectivos ordenes de interferencia (X_i, m_i) donde X_i la distancia del eje óptico a la franja y m_i es el orden de la franja, esto se logra aplicando un ajuste gaussiano al perfil de irradiancia de cada franja [13]. Las posiciones teóricas de las franjas con sus respectivos ordenes de interferencia (\hat{x}_i, m_i) pueden obtenerse a partir de la fórmula de Malacara [12], mediante la cual se obtiene la aberración transversal y esta expresada como:

$$T(\rho) = \frac{(l_f + l_r - 2z) \left[1 - \left(\frac{dz}{d\rho} \right)^2 \right] + 2 \frac{dz}{d\rho} \left[\rho - \frac{(l_r - z)(l_f - z)}{\rho} \right]}{\frac{l_f - z}{\rho} \left[1 - \left(\frac{dz}{d\rho} \right)^2 \right] + 2 \frac{dz}{d\rho}} \quad (1)$$

Donde ρ es la distancia del eje óptico al punto sobre la superficie; Z es la sagita de la superficie; l_r es la distancia del vértice de la superficie a la rejilla; y l_f es la distancia del plano imagen al vértice de la superficie.

Por lo tanto, para calcular el error en la superficie de un espejo bajo prueba, aplicando la prueba de Ronchi, se minimiza la ecuación de la suma de errores al cuadrado de las posiciones experimentales y simuladas.

$$S_0 = \sum_{i=1}^{N_p} (X_i - \hat{x}_i)^2 \quad (2)$$

La ecuación 2 es la ecuación utilizada como función de aptitud (o también llamada de costo) para aplicar algoritmos genéticos como método de optimización para cuantificar el error en la superficie [12].

Mediante el uso de la ecuación 2 y aplicando algoritmos genéticos se cuantificará el grado de alineación del sistema propuesto, mediante el cálculo del orden de interferencia no entero que compensa la falta de alineación en el ronchigrama experimental [13].

2.2 Algoritmos genéticos.

Los algoritmos genéticos han sido empleados con éxito para resolver problemas de optimización en óptica, dando excelentes resultados por ejemplo, al calcular la forma óptima de una herramienta de pétalo para producir el desgaste deseado [15], o para diseñar una lente o espejo para aplicaciones de concentración solar minimizando la aberración esférica [16]. Dado el éxito obtenido al resolver este tipo de problemas de optimización con algoritmos genéticos, ésta técnica será empleada para conocer los centros de las franjas y ver si están alineados en la pupila de salida, es decir en el ronchigrama capturado. Por lo que a continuación se describe esta técnica.

Los algoritmos genéticos comienza en la década 50's y 60's, cuando científicos independientes comienzan a estudiar los sistemas evolutivos, para emplearlos como estrategias para resolver problemas de optimización en ingeniería como lo hace la naturaleza [17]. El desarrollo de los algoritmo genéticos se deben en gran medida a John Holland [17], ya que en el año de 1975 en su libro "Adaptation Natural and Artificial

Systems” da a conocer una técnica que imita el funcionamiento de la selección natural introduciendo un algoritmo basado en poblaciones con cruces, mutaciones e inversiones [18].

Los algoritmos genéticos se encuentran dentro de las técnicas de búsqueda global, son algoritmos aleatorios que encuentran soluciones cercanas al óptimo global. Tienen la característica de trabajar con múltiples puntos del espacio a la vez, en general estos algoritmos trabajan sobre una representación de los parámetros del problema y no imponen restricciones sobre convexidad o continuidad [19].

Los algoritmos genéticos son algoritmos de búsqueda basados en la selección natural y la genética natural. Combinan la supervivencia del más apto entre estructuras de secuencias con un intercambio de información estructurado, [18]. En general los algoritmos genéticos trabajan sobre una configuración fija de N individuos, donde el tamaño de la población debe permitir la diversidad de los individuos sin sacrificar la eficiencia computacional, es decir, que no consuman muchos recursos de la computadora ni mucho tiempo de ejecución.

Goldberg [17] en 1989 propuso un Algoritmo genético que se caracteriza por una representación binaria, el cual contiene una cadena binaria que se le llama cromosoma y a cada subcadena (posición en la cadena general) se le denomina gen y al valor dentro de esta posición se le denomina alelo (ver figura 9). Al conjunto de los parámetros representado por un cromosoma en particular recibe el nombre de genotipo. El genotipo contiene la información necesaria para la construcción de la solución del problema denominada fenotipo.

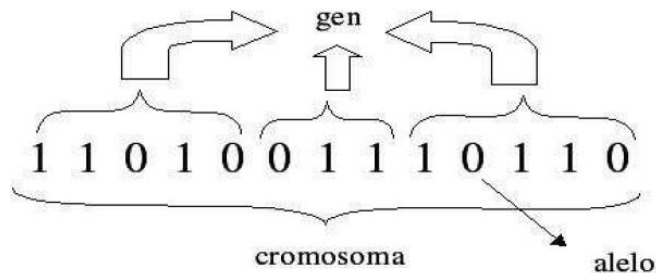


Fig. 9. Individuo genético binario.

A continuación se presenta el procedimiento convencional que sigue un AG para resolver un problema de optimización:

1. El problema a resolver es definido y capturado en una función objetivo que indica la aptitud de cualquier solución potencial.
2. Una población inicial de cromosomas, se selecciona aleatoriamente a partir de un rango factible.
3. Cada cromosoma, en la población es decodificada en una forma apropiada para la evaluación y se le asigna una puntuación, de acuerdo con la función objetivo.
4. Se aplica un método de selección, para escoger a los individuos que van a tener la oportunidad de reproducirse, puesto que se trata de imitar a la naturaleza se le otorga una mayor probabilidad a los individuos más aptos para reproducirse. Por ello, esta selección está relacionada directamente con su puntuación de evaluación o aptitud. Existen diferentes métodos de selección que se pueden aplicar, tales como: selección elitista, selección proporcional a la aptitud, selección por rueda de ruleta, selección escalada, selección por torneo, selección por rango, selección generacional, selección por estado estacionario, selección jerárquica, etc. [18].
5. Con los elementos seleccionados, una nueva población de cromosomas es generada a través de operadores de reproducción. Estos operadores tratan de imitar una reproducción biológica cambiando de diferente manera a los cromosomas para generar una nueva generación, esperando que en ella se encuentre el individuo más apto o sea la solución al problema planteado. Estos operadores pueden ser de cuatro tipos [17] :
 - a. Cruza. Se trata de una reproducción sexual. Donde se genera una descendencia a partir de dos individuos al seleccionar n lugares al azar que sirvan como corte para intercambiar el material genético de dichos individuos.
 - b. Inversión. Este operador invierte el orden de todos los genes comprendidos entre dos puntos seleccionados al azar en el cromosoma [20].

- c. Mutación. Es una reproducción asexual. Donde se produce una variación o alteración de n individuos, esta se puede dar a nivel de un bit o de una cadena generalmente con una probabilidad pequeña.
 - d. Copia. Se trata de una reproducción asexual. Donde un número determinado de individuos pasa sin sufrir alguna alteración a la siguiente generación.
6. El proceso se detiene por las siguientes condiciones:
- a. Se encuentra una solución o un conjunto de soluciones suficientemente buenas para el problema que se desea resolver.
 - b. La población ha convergido.
 - c. Se alcanza el número de iteraciones máximas especificado.

De lo contrario el proceso pasa al paso 3 y el procedimiento se repite.

Para el cálculo del orden de interferencia no entero, el cual será utilizado como parámetro para cuantificar el grado de alineación en la propuesta de tesis, se ha aplicado algoritmos genéticos [12] como método de optimización. El algoritmo genético programado usa una población de 160 miembros, y realiza una búsqueda en más de 160 generaciones. El método de selección utilizado es el denominado tornado. Realiza un cruzamiento en dos puntos utilizando una probabilidad de 0.7 y una técnica de mutación donde todos los genes de cada cromosoma (de 16 bits cada uno) tenían la misma probabilidad de ser mutados. La probabilidad de mutación es la inversa del tamaño de la población. La suma de los errores al cuadrado dada en la ecuación 2 es usada como la función de fitness por el programa de algoritmos genéticos [15] [16].

2.3 Sistemas Robóticos.

Durante la aplicación de la prueba de Ronchi, es muy importante alinear el probador de Ronchi con el eje óptico de la superficie a evaluar; como ya se ha mencionado este es un proceso que se realiza manualmente, y el tiempo que dura depende de la habilidad del técnico que lo realice. De ahí la importancia de usar un sistema para automatizar este proceso de alineación y reducir el tiempo empleado. Por ello, se va a definir ¿qué es un

robot?, ¿cómo se clasifican?, para catalogar en donde se encuentra clasificado el sistema que se va a utilizar, además de los dispositivos que se utilizarán para realizar el control de dicho manipulador.

La robótica se ha convertido en un área clave y estratégica para todo país en desarrollo, es sinónimo de modernización y coadyuva a proporcionar bienestar a la sociedad. Entre las principales áreas que se cultivan en robótica se encuentran [5]: el control de movimiento, diseño de ambientes de programación, inteligencia artificial, sensores, visión, planificación y coordinación, entre otros. Dentro de las aplicaciones en el mundo real se encuentran: tele operación, medicina, juegos, agricultura, operaciones espaciales, manufactura, entre otras [5].

2.3.1 Tipos de Robot.

Una de las características principales de la robótica es que tecnológicamente tiene flexibilidad para automatizar y adaptarse a ambientes laborales y su tendencia siempre está vigente. Existen varias definiciones para describir a un robot, entre ellas se encuentra la adoptada por el Robot Institute of America lo cual establece que [5]:

“Un robot es un manipulador multifuncional reprogramable diseñado para mover materiales, partes, herramientas o dispositivos especializados a través de movimientos programados para la ejecución de una variedad de tareas.”

Actualmente existe una gran variedad de robots que se clasifican de acuerdo a sus características (ver Tabla. 1).

Tabla 1. Clasificación general de los robots.

Tipos de robots		
Móviles	Terrestres: ruedas, patas; submarinos; aeroespaciales	
Humanoides	Diseño complejo	
Industriales	Brazos mecánicos	Robots Manipuladores

Dentro de la clasificación anterior se encuentran los robots industriales, cuya estructura fundamental es la cinemática abierta la cual puede tener diferentes combinaciones de articulaciones rotacionales y prismáticas dando origen a diversos tipos de

robot. Las articulaciones rotacionales generan un movimiento circular en el eje, mientras que las prismáticas generan un movimiento lineal a través del eje. Los robots industriales se pueden clasificar de acuerdo a sus tres primeras articulaciones sin tomar en cuenta su extremo final. En esta clasificación se encuentra el robot cartesiano o también conocido como robot lineal o pórtico (ver figura 10), tiene sus tres articulaciones prismáticas. Se resalta la existencia de este robot, porque es el mecanismo que se va a utilizar en la automatización del proceso de alineación en la prueba de pulido. Se contempla implementar dos articulaciones prismáticas y en lo futuro agregar una tercera articulación. Estas articulaciones van a permitir un desplazamiento en un plano, a través de los dos ejes que lo conforman.

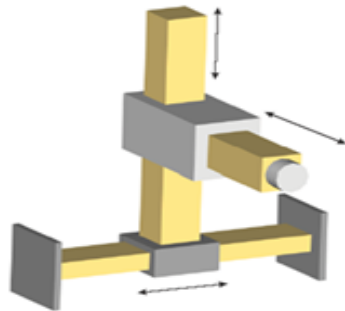

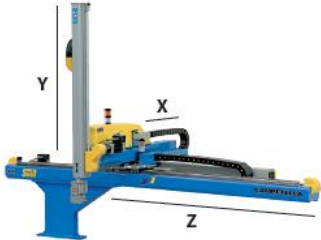



Fig. 10 Robot cartesiano.

En la actualidad existen robots cartesianos comerciales diseñados para aplicaciones industriales. En la tabla 2 se muestran algunos robots del tipo cartesiano que existen en la industria. Estos robots generalmente son utilizados para operaciones de *pick and place*, y su costo es excesivamente elevado. También existen rieles comerciales que realizan el movimiento sobre un eje como son el 400XR Series Precisión Linear Positioners, HD Series Industrial Linear Positioners, los cuales llegan a tener una resolución de hasta $0.5\mu\text{m}$, pero su costo también es elevado [21]. Como se cuenta con un presupuesto limitado a 15,000 pesos se opta por desarrollar un sistema de alineación de 2GDL para reducir significativamente el costó, además para hacerlo accesible a las instituciones educativas mexicanas, y que permita optimizar en cierta mediada la aplicación de la prueba de Ronchi.

Tabla 2 Robots cartesianos comerciales

Marca	Características	Imagen
Shneider Electric	Este robot es un sistema de posicionamiento sobre un plano X-Y, basado en dos ejes de portal accionados por servomotores [22].	 <p data-bbox="954 632 1263 659">Fig. 11 Robot cartesiano XY</p>
CAMPETELLA	Este es un robot destinado al mercado que necesita simplificar operaciones de pick and place [23].	 <p data-bbox="933 1073 1279 1100">Fig. 12 Robot cartesiano 400XR</p>
Screw Driven	Este robot ha sido diseñado para economizar espacio y simplificar tareas de selección, además que puede ser utilizado para automatizar varios tipos de tareas de posicionamiento [24].	 <p data-bbox="943 1478 1273 1505">Fig. 13 Robot Cartesiano XRS</p>

El sistema contará con dos grados de libertad para generar movimientos lineales a través de un plano y así poder alinearse a la superficie óptica bajo prueba. Actualmente existe un sistema motorizado que realiza la captura de ronchigramas para la aplicación del método de corrimiento de fase para el análisis del frente de onda, los motores únicamente mueven la rejilla en la prueba de Ronchi; para aplicar este método y no para la alineación

en la tesis denominada “Automatización de la prueba de Ronchi mediante un dispositivo opto electromecánico para la determinación del frente de onda” desarrollada en el INAOE [25]. En este trabajo, se realiza una alineación previa manualmente.

2.3.2 Tipos de Motores.

Para producir los desplazamientos en un plano, es necesario contar con actuadores eléctricos. Un actuador es capaz de transmitir energía para producir el movimiento del robot. Los actuadores más utilizados para aplicaciones industriales y robóticas, son los servomotores y los motores a pasos.

Servomotores.

La principal ventaja de un servomotor, es la incorporación en los mismos, de un sistema de retroalimentación. Esta información puede ser utilizada para detectar un movimiento no deseado, o para garantizar la exactitud del movimiento ordenado.

Existen dos tipos de servomotores [26]:

- Servo analógico. Estos servomotores se componen, de un motor de corriente continua, un juego de engranajes para la reducción de velocidad, un potenciómetro ubicado sobre el eje de salida (que se usa para conocer la posición) y una plaqueta de circuito para el control.
- Servo digital. Los servos digitales tienen, a diferencia de los analógicos, un microprocesador que se hace cargo de analizar la señal, procesarla y controlar el motor.

La diferencia más grande de rendimiento está en la velocidad de reacción en un mismo lapso, el servo digital puede recibir cinco o seis veces más pulsos de control que un analógico. Como resultado, la respuesta del servo a un cambio en la orden de posición es mucho más veloz [26].

Los servos se utilizan frecuentemente en sistemas de radiocontrol, en robótica, en equipos industriales y comerciales, en las unidades de almacenaje y entrada y salida de datos de grandes sistemas de computación, en los ascensores en edificios, etc.

Motores a pasos.

Un motor a pasos gira un determinado ángulo de forma incremental, lo que le permite realizar desplazamientos angulares fijos muy precisos (pueden variar desde $1,80^\circ$ hasta unos 90°). Estos motores poseen la habilidad de poder quedar enclavados en una posición (si una o más de sus bobinas está energizada) o bien totalmente libres (si no circula corriente por ninguna de sus bobinas) [27].

Según la construcción de las bobinas del estator, existen dos tipos de motores a pasos [27]:

- Unipolares. Se llaman así porque la corriente que circula por los diferentes bobinados siempre circula en el mismo sentido. Tienen las bobinas con un enrollamiento único
- Bipolares. La corriente que circula por los bobinados cambia de sentido en función de la tensión que se aplica. por lo que un mismo bobinado puede tener en uno de sus extremos distinta polaridad (bipolar). Tienen las bobinas compuestas por dos enrollamientos cada una.

Según desde el punto de vista de su construcción, podemos distinguir 3 tipos [27]:

- Reluctancia variable. Su rotor está fabricado por un cilindro de hierro dentado y el estator está formado por bobinas.
- Imán permanente. Su rotor es un imán que posee una ranura en toda su longitud y el estator está formado por una serie de bobinas enrolladas alrededor de un núcleo o polo.
- Los híbridos, serían una combinación de los anteriores, logrando un alto rendimiento a una buena velocidad.

Comúnmente este tipo de motores es utilizado en máquinas industriales, herramientas, en la robótica, para el movimiento de las cámaras etc.

Conforme se obtengan los requerimientos del sistema (medidas exactas, material con el que se van a construir los rieles, montura del probador de Ronchi) y se desarrolle el sistema mecánico, se seleccionará el motor óptimo que cumpla con los requerimientos antes mencionados para realizar este trabajo.

2. 4 Marcas Visuales Informativas.

Para capturar el ronchigrama se debe posicionar el sistema de 2GDL cerca del centro de curvatura de la superficie a evaluar, para ello se utilizan Marcas Visuales Informativas (MVI) que permiten ubicar el sistema de coordenadas de la superficie óptica con respecto al sistema de coordenadas básico del robot. Estas marcas pueden ser fácilmente detectadas por una mono-cámara, además que permiten el control de la posición de un robot [28]. Esto es útil en el proyecto para realizar la alineación del sistema de 2GDL utilizando una cámara de CCD y estas MVI. Por ello se realizará una descripción breve de las características de estas marcas.

Las MVI son marcas circulares que forman un plano convexo, por el momento se utiliza una figura rectangular con dos lados paralelos y uno de longitud conocida [28]. Debido a las características geométricas de la marca, la convexidad, se puede decir que no importa la orientación de la misma.

Los vértices en las MVI pueden ser representados como centroides de las regiones aisladas de una determinada forma y tamaño (ver figura 14) o los puntos de intersección de los segmentos de línea. Durante el procesamiento de imágenes estos cuatro vértices son encontrados y enumerados en el sentido contrario al movimiento de las manecillas del reloj con respecto al vértice distinguido que se utiliza como el origen del sistema de coordenadas (en el extremo inferior izquierdo). El vértice distinguido puede ser marcado de diferentes maneras como el tamaño o con diferentes colores (ver figura 14).

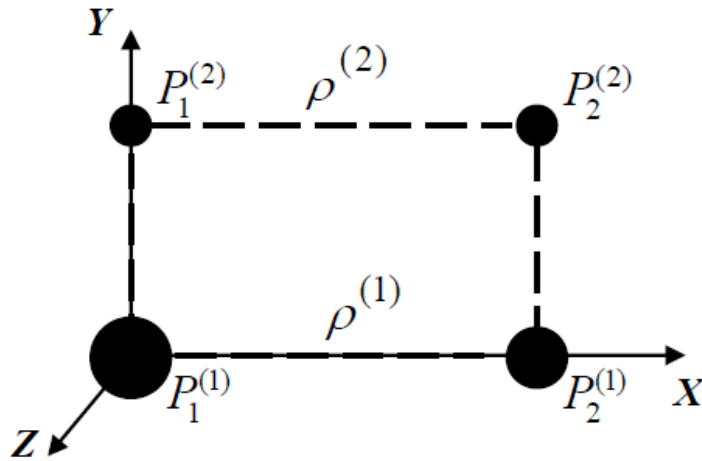


Fig. 14. Diagrama de una Marca Visual Informativa representada por centroides circulares de diferentes diámetros.

Una vez definida la marca se utiliza un algoritmo de procesamiento de imágenes que calcula la posición 3D de los centroides con respecto al sistema de coordenadas de la cámara.

Esta marca nos permite posicionar al robot en las coordenadas deseadas. Aplicando un programa de corrección de coordenada al robot, el cual utiliza como primer parámetro la posición inicial del robot. Una vez encontrada la marca se corrige la posición del robot y se alinea en frente de la superficie óptica y se posiciona cerca del centro de curvatura. Esto a través de la información que proporciona la marca al programa de corrección de coordenadas.

Capítulo 3. Sistema de 2GDL.

3.1 Requerimientos del Sistema

Uno de los objetivos principales de esta tesis es construir un dispositivo que nos permita alinear un probador de Ronchi con una superficie óptica bajo prueba de manera semiautomática. Para lograr este objetivo es fundamental delimitar las necesidades del usuario ya que en base a estas se especifican los requerimientos del sistema que se va a construir. Las necesidades del usuario y los requerimientos del sistema mecánico son:

- El sistema deberá desplazarse 50 cm; a los lados del eje óptico y 70 cm adelante y atrás sobre el eje óptico de la superficie bajo prueba; ya que se requiere evaluar superficies reflectoras con diámetros de 5 a 10 cm y radios de curvatura paraxial de 20 a 70 cm.
- Debe ser capaz de alinear un probador de Ronchi y una superficie óptica con una precisión en milímetros.
- No debe contener piezas sueltas, es decir, todas las piezas deben estar bien colocadas.
- El sistema debe ser lo más ligero posible, es decir, no debe pesar demasiado para facilitar su movilidad.
- El sistema se debe construir con materiales no deformables y resistentes. El material con que se realice el sistema debe ser capaz de aguantar el peso del probador de Ronchi, la lente Zoom y la cámara CCD (que juntos pesan 3 kg) sin deformarse o que esta sea menor a 50 μm .
- Se cuenta con un presupuesto de 15,000 pesos.

3.2 Productos en el mercado

Actualmente ya existen sistemas comerciales que permiten un movimiento lineal sobre un eje. A continuación se presenta una lista de dichos sistemas, las ventajas de acoplar un mecanismo comercial y las desventajas.

- **Sistema XSlide** (ver figura 15). Este sistema es de la marca Velmex es un mecanismo que utiliza un tornillo embalado para generar el movimiento lineal [29]. Las ventajas de utilizar este sistema es: incluye el motor, garantiza una precisión en milímetros, soporta 15Kg. y se venden con diferentes dimensiones lo cual permite cubrir las distancias requeridas. Las desventajas son: venden cada eje por separado, por ello sobrepasa el presupuesto ya que es necesario comprar dos piezas, además de que no lo comercializan en México [29].



Fig. 15 Sistema de movimiento lineal de marca Velmex.

- **Sistema LTS** (ver figura 16). Este mecanismo es de la marca SKF utiliza un mecanismo de correderas dentadas para realizar el movimiento lineal y se puede encontrar proveedores en México, además de que cuenta con una precisión milimétrica y cubre las distancias requeridas. Las desventajas son que no incluye motor, venden por separado la adaptación para el motor, además de que sobrepasa el presupuesto ya que se requiere adquirir cada eje y motor por separado [30].

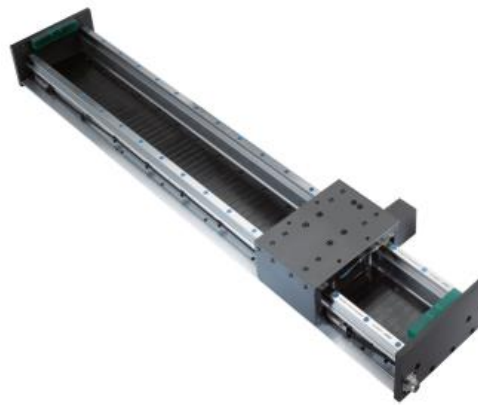


Fig. 16. Sistema LTS

- **Sistema 400LXR** (ver figura 17). Es un riel de la marca Parker que incluye el motor, garantiza una precisión en micras y soporta 1148 kg. no cubre las distancias requeridas ya que da un desplazamiento máximo de 30 cm, sobrepasa por mucho el presupuesto [31].



Fig. 17 Sistema Parker.

- **Distribuidores OPENCNCMEXICO** (ver figura 18). Es una empresa mexicana que opera vía internet y cuenta con los componentes mecánicos, como rieles, correderas, chumaceras, espárragos, etc. Para armar un sistema con movimiento lineal, la desventaja que se tiene con este sistema es que venden todos estos componentes por separado y eso genera que sobrepase el presupuesto, además que algunos componentes tienen la precisión que se requiere y otros no [32].



Fig. 18. Guía cuadrada que venden en la compañía OpencncMéxico.

3.3 Prototipos Mecánicos.

Después de revisar y analizar lo que existe comercialmente, se presentan dos propuestas de sistemas que permiten un movimiento sobre un plano horizontal, desplazando un probador de Ronchi y una cámara CCD a lo largo de los ejes x, y.

Propuesta 1. Esta propuesta fue desarrollada utilizando el software Solid Works^{MR}. Consiste en cuatro rieles, dos carros, una plataforma para colocar las superficies ópticas, ejes de los motores, cuatro correderas y una montura para colocar el probador de Ronchi y la cámara CCD. Esta propuesta va a generar el movimiento lineal de los carros con ayuda de unas correderas que serán tiradas por el eje de los motores.

- Rieles. Simulados de aleación de aluminio 6063 porque es la aleación con la que se elaboraran los rieles conocidos comercialmente como *guía o riel inferior*. Los rieles sirven de guía y apoyo de los carros para realizar el movimiento horizontal, permiten el desplazamiento fluido y guían a los carros para que se muevan solamente sobre un eje ya sea él X o él Y. Un par de rieles se encuentra adherido a la plataforma, mientras el otro par se encuentra adherido a un carro. Como se puede ver en la figura 19 el par de rieles que se encuentra adherido a la plataforma va a permitir que uno de los carros realice un movimiento perpendicular al eje óptico.

Mientras que los rieles que se encuentran adheridos a la superficie del carro, van a permitir un movimiento sobre el eje óptico.

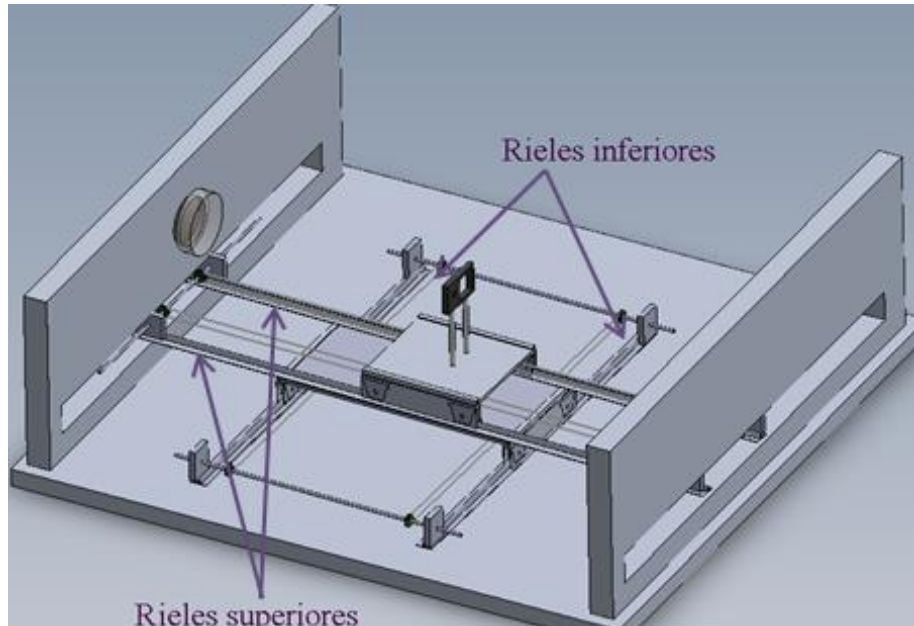


Fig. 19 Diseño de la propuesta 1 señalando los rieles inferiores y superiores

- Carros. Se le llaman carros a las monturas con cuatro ruedas que se encuentra cada uno sobre un par de rieles, simuladas de aleación de aluminio 6030 ya que es el material con el que se fabrica comercialmente las monturas. Éstas comercialmente se les conoce como *perfiles angulares*. Como se ve en la figura 20 el primer carro transporta el segundo par de rieles y el segundo carro transporta a la base donde se coloca el probador de Ronchi y la cámara CCD.

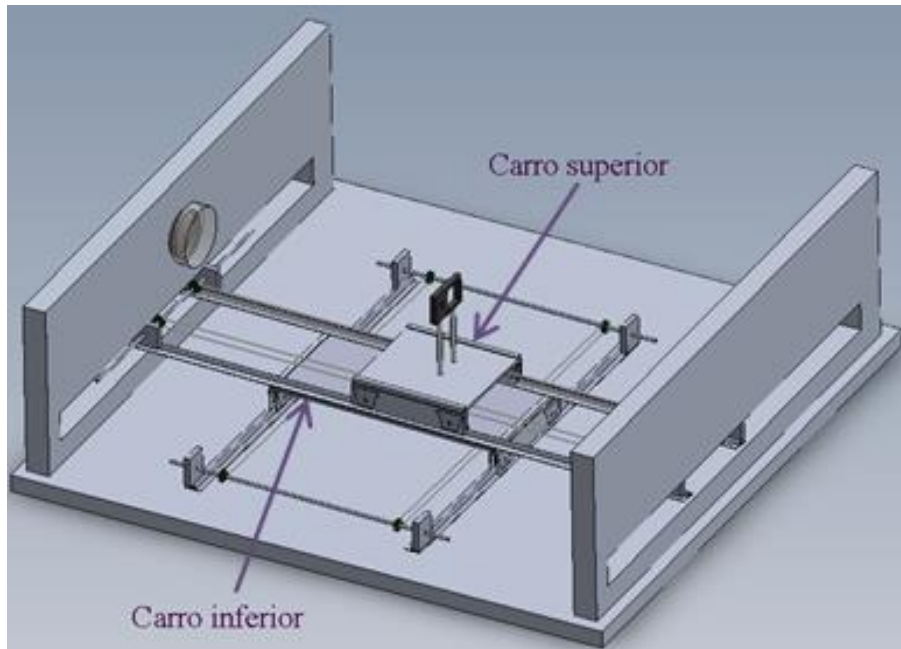


Fig. 20 Carros de la propuesta 1.

- Plataforma. La plataforma se simula de madera ya que de ese material se desea construir. La figura 21 muestra esta plataforma donde se colocan los primeros rieles y los soportes para colocar la superficie óptica, además estos soportes permiten asegurar que se encuentre a la altura adecuada los componentes y cargar los extremos de los segundos rieles, permitiendo tener un sistema cerrado.

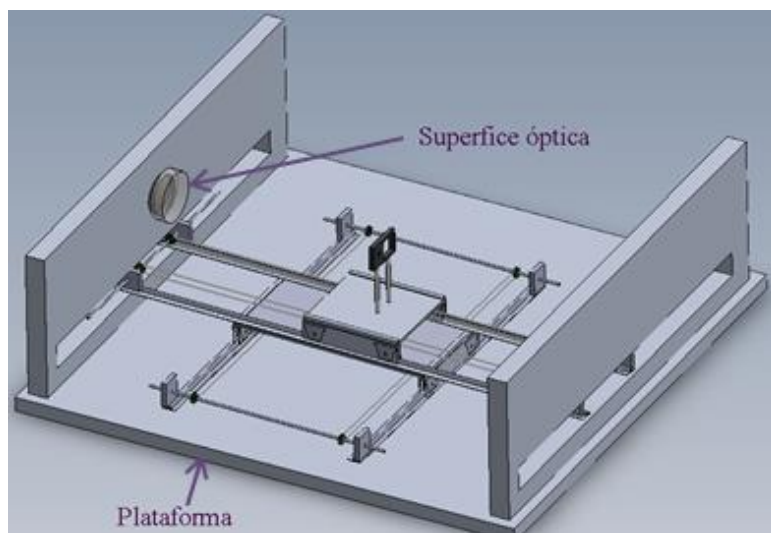


Fig. 21 Plataforma donde se colocarán los rieles inferiores y la superficie óptica.

- Eje de los motores. Simulados de acero inoxidable, porque de este material se fabrican comercialmente. Estos ejes se utilizan en la mayoría de las impresoras de inyección de tinta, de goteo, etc. En el mercado se pueden adquirir en cualquier centro de mantenimiento de impresoras La figura 22 muestra cuatro ejes, que permiten el soporte de las correderas, en la esquina de dos ejes se colocará un motor para generar el movimiento en los ejes para jalar las correderas y así desplazar los carros.

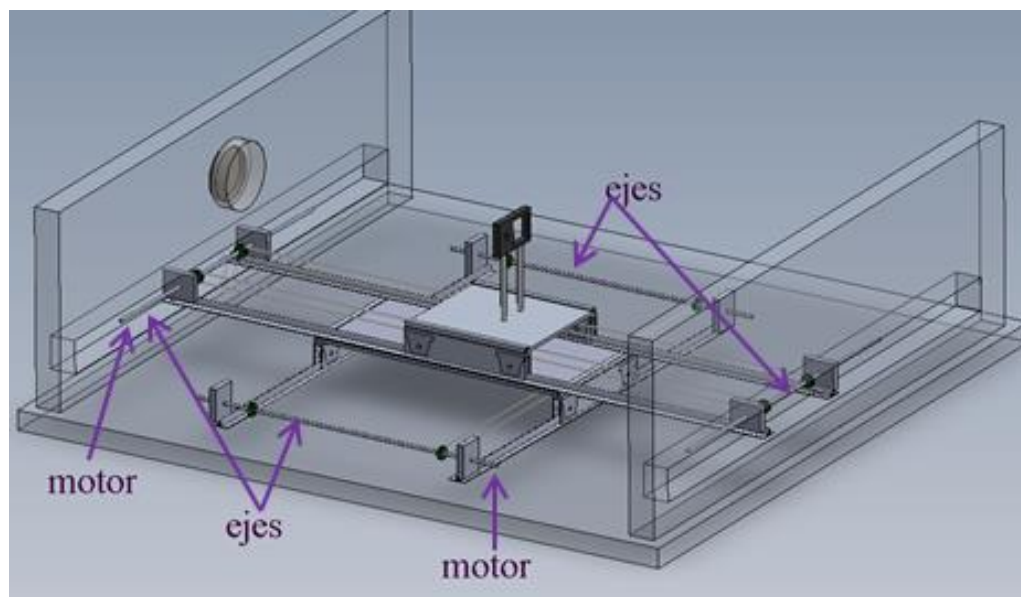


Fig. 22 Ejes y en cuales se colocará un motor.

- Correderas. Estas son bandas dentadas que embonan a los engranes que se encuentran acoplados a los ejes y permiten que el movimiento de los carros sea uniforme, es decir que se muevan al mismo tiempo las cuatro esquinas de un carro. Son simuladas de fibra de vidrio porque de este material las fabrican comúnmente en el mercado. Comercialmente se ocupan para las fotocopiadoras xerográficas y electrostáticas.
- Montura. En ésta se colocará el probador de Ronchi, la cámara CCD y la lente zoom. Está se simula de aluminio porque de este material se pretende fabricar.

Para validar el funcionamiento y comportamiento mecánico del sistema propuesto y ver si no sufre alguna deformación, se realizó una simulación en software Solid Works^{MR}, donde se hizo un análisis estático de cómo se comporta el sistema cuando soporta la carga del peso de las componentes (la cámara CCD, el probador de Ronchi y la montura) en varios puntos críticos, es decir, los puntos en los cuales el sistema presenta menos soportes. En la figura 23 a) se encuentra el sistema centrado y se puede observar como el sistema tiene una deformación máxima de 15 μm cuando se le aplica al carro superior el peso del probador de Ronchi, la cámara CCD, y la lente Zoom que hacen un total de 3kg. Mientras que en la figura 23 b) el carro que lleva la montura se encuentra en uno de los extremos y se puede observar una deformación de 23 μm al aplicarle el mismo peso de 3kg al carro superior. Estas deformaciones obtenidas en los puntos críticos nos dan una idea de cómo se comportará el sistema y vemos que se encuentran dentro de las tolerancia que se requieren del sistema.

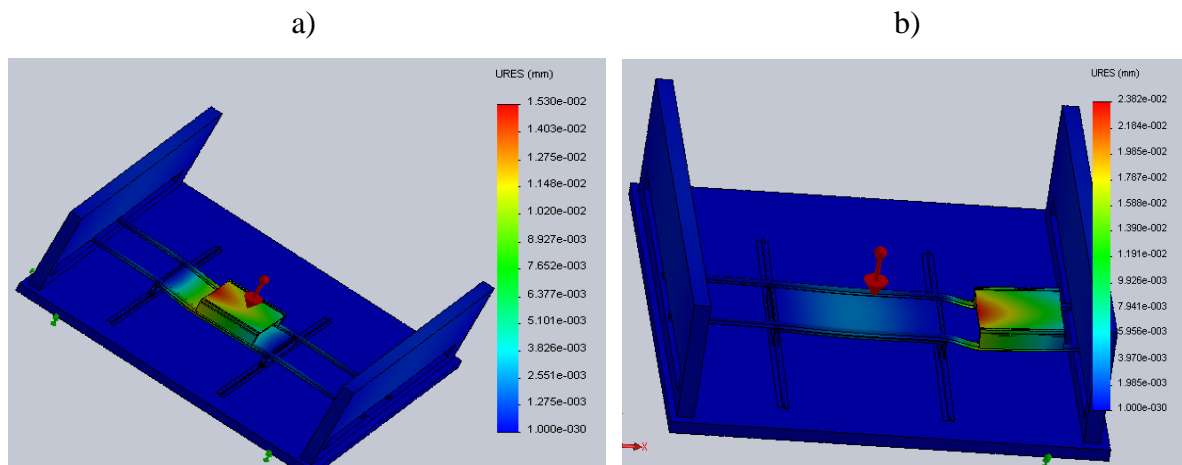


Fig. 23 a) Deformación centrada. b) Deformación lateral

Propuesta 2. Esta propuesta también fue desarrollada utilizando el software Solid Works y consiste en dos guías cuadradas, dos tornillos embalados, dos soportes para tornillos embalados, una plataforma para colocar las superficies ópticas, y una montura para colocar el probador de Ronchi y la cámara CCD. Esta propuesta consiste en hacer girar el eje del motor, donde se encuentra el tornillo embalado para mover los soportes linealmente.

- Guía cuadrada (ver figura 24). Las guías son simuladas de aleación de aluminio 6063 y comercialmente se conocen como *carril de deslizamiento sencillo*. Estas guías se utilizan para que el sistema tenga un movimiento lineal y siga una dirección asignada ya sea en el eje X o en el eje Y. En la figura 24 se puede ver que esta propuesta cuenta con dos guías, la primera carga a la segunda, mientras que la segunda carga al probador de Ronchi la cámara CCD y la lente zoom.

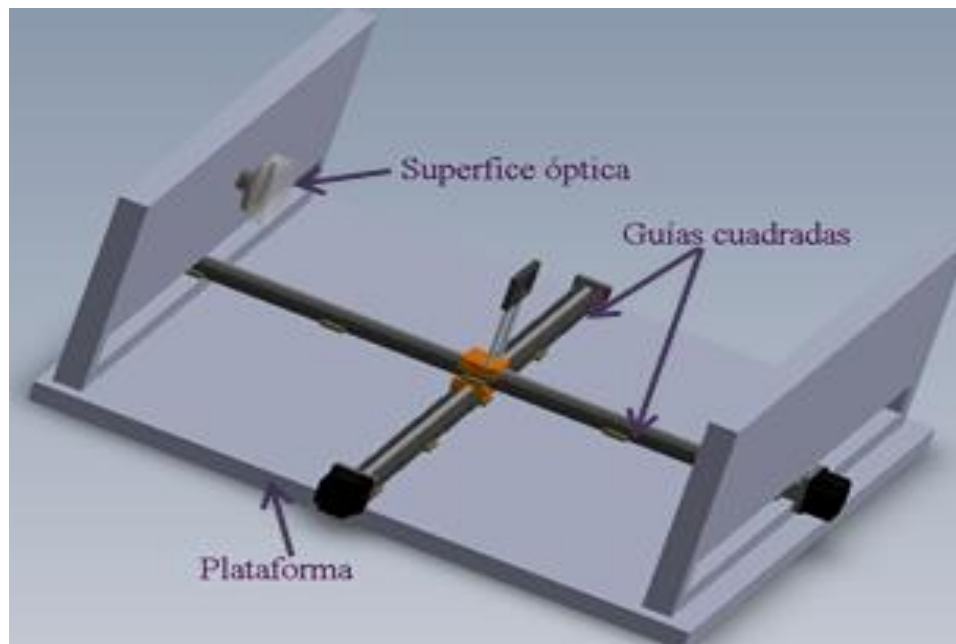


Fig. 24 Propuesta 2 con Guías cuadradas.

- Tornillos embalados. Para su simulación se utilizó la aleación de aluminio 2011 ya que es la que se utiliza para fabricar estos tornillos comercialmente. Ofrecen la oportunidad de desplazar cargas transformando movimiento rotatorio en movimiento lineal. A estos tornillos se les colocará el motor en un extremo para hacerlos girar y así producir el movimiento como se puede ver en la figura 25.

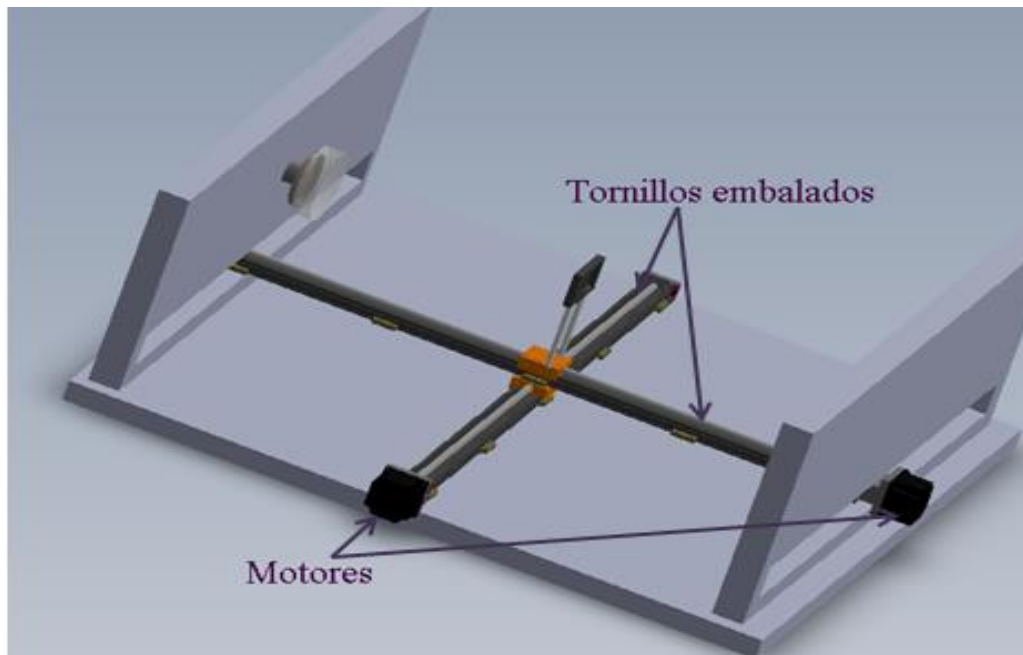


Fig. 25 Motores y Tornillos embalados de la propuesta 2.

- Soportes para tornillos embalados. Comercialmente conocidas como *tuercas con brida para tornillos embalados* y fabricadas con aleación de aluminio 2011. Son las tuercas que se desplazan por el tornillo y a su vez sostienen.
- Plataforma. Se simula de madera porque es del material que se desea construir. En esta se coloca la primera guía y los soportes para colocar la superficie óptica, además estos soportes permiten asegurar que se encuentre a la altura adecuada, permitiendo tener un sistema cerrado.
- Montura. En esta se colocará el probador de Ronchi, la cámara CCD y la lente zoom. Está se simula de aluminio porque de este material se pretende fabricar.

Para validar la deformación de esta propuesta también se realiza una simulación utilizando el software Solid Works, donde se realiza un análisis estático de cómo se comporta el sistema cuando se le aplica el peso que va a cargar (la cámara CCD, el probador de Ronchi y la montura), en varios puntos críticos, es decir, los puntos en los cuales el sistema presenta menos soportes. En la figura 26 a) se encuentra el sistema centrado y se puede observar como el sistema tiene una deformación máxima de 6.14

μm cuando se le aplica el peso de 3kg. Mientras que en la figura 27 b) el sistema se encuentra en uno de los extremos y se puede observar una deformación de 9.9 μm al aplicarle el mismo peso de 3kg al carro superior. Con estas deformaciones obtenidas en los puntos críticos podemos concluir que esta propuesta también se encuentra dentro de los límites de tolerancia, ya que la precisión es en milímetros.

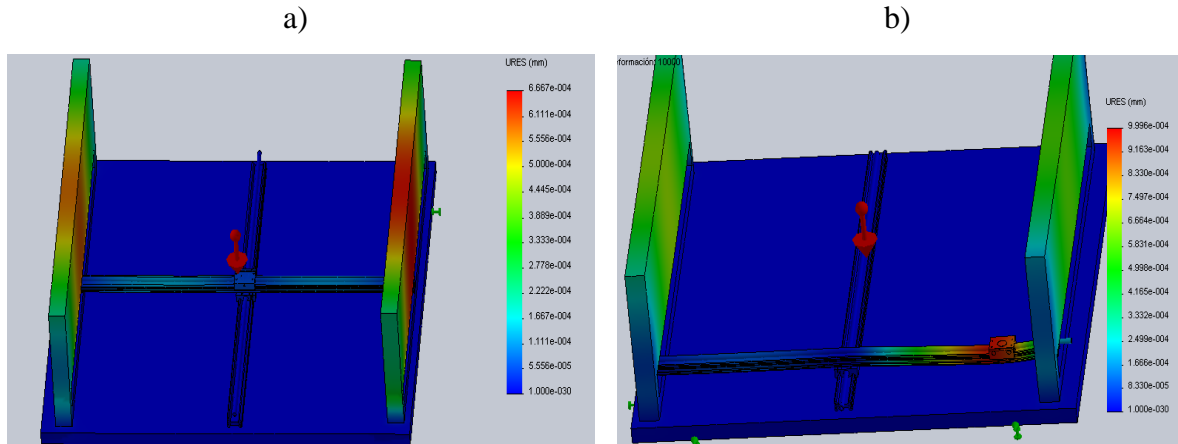


Fig. 26 a) Deformación centrada. b) Deformación lateral

A continuación se realizó un análisis FODA para cada una de las dos propuestas ya que este análisis nos permite observar con claridad los factores internos que intervienen en cada propuesta que son las fortalezas y debilidades; y los factores externos que son las oportunidades y las amenazas. A su vez permite enlistar una serie de estrategias para maximizar las fortalezas y las oportunidades, y para minimizar las debilidades y las amenazas, eso permite obtener conclusiones de cuál de ambas propuestas presenta mayores fortalezas y oportunidades y así tomar la decisión de cual implementar.

Análisis FODA para la propuesta 1

Tabla 3 Análisis FODA para la propuesta 1.

<p style="text-align: center;">Factores internos</p> <p>Factores externos</p>	<p>Lista de Fortalezas</p> <ul style="list-style-type: none"> • Facilidad de manufactura. • Cumple con los requerimientos. • Facilidad de cambiar los motores, anexar más motores si es necesario. • Cuenta con más puntos de apoyo. • Si se requerirá incrementar la precisión se podrá cambiar los motores o las correderas y los engranes sin necesidad de rediseñar los carros. 	<p>Lista de Debilidades</p> <ul style="list-style-type: none"> • Costo de 9,860 pesos. • El diseño es más laborioso ya que lleva más componentes.
<p>Lista de oportunidades</p> <ul style="list-style-type: none"> • Permite adaptaciones. • Disponibilidad de amplia gama de rieles en el mercado. 	<p>Estrategia para maximizar las fortalezas y las oportunidades</p> <ul style="list-style-type: none"> • Realizar una adaptación utilizando 4 motores de poco torque y más económicos. 	<p>Estrategia para minimizar las debilidades y maximizar las oportunidades.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Compensar el presupuesto utilizando motores más económicos. • Utilizar componentes comerciales que sean económicos.
<p>Lista de amenazas</p> <ul style="list-style-type: none"> • Los rieles deben estar bien rectificadas. • Conseguir correderas con precisión milimétrica. 	<p>Estrategia para minimizar las amenazas</p> <ul style="list-style-type: none"> • Mandar a rectificar los rieles. • Buscar en impresoras viejas las correderas y los engranes necesarios. 	<p>Estrategia para minimizar las debilidades y las amenazas.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Ocupar materiales comerciales que estén rectificadas o mandar a rectificar los rieles fabricados.

Tabla 4 Análisis FODA para la propuesta 2

<p>Factores internos</p> <p>Factores externos</p>	<p>Lista de Fortalezas</p> <ul style="list-style-type: none"> • Diseño sencillo. • Cumple con los requerimientos. • Se cuenta con los planos de diseño de un sistema comercial. 	<p>Lista de Debilidades</p> <ul style="list-style-type: none"> • Costo de 8,120 pesos. • No permite modificaciones ni adaptaciones. • Si el tornillo embalado falla o no se encuentra rectificado el sistema no se mueve. • Si se requiere cambiar el motor, se tendría que cambiar el espárrago completo.
<p>Lista de oportunidades</p> <ul style="list-style-type: none"> • Disponibilidad de amplia gama de espárragos en mercado. • Disponibilidad de amplia gama de rieles en el mercado. 	<p>Estrategia para maximizar las fortalezas y las oportunidades</p> <ul style="list-style-type: none"> • Seguir los planos del diseño comercial. 	<p>Estrategia para minimizar las debilidades y maximizar las oportunidades.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Utilizar componentes comerciales para disminuir errores de manufactura.
<p>Lista de amenazas</p> <ul style="list-style-type: none"> • Rieles bien rectificados. • Tornillo embalado rectificado. • El tornillo embalado y la rosca que soporta el peso, es caro. 	<p>Estrategia para minimizar las amenazas</p> <ul style="list-style-type: none"> • Mandar a rectificar los rieles. • Utilizar espárragos comerciales para evitar riesgos. 	<p>Estrategia para minimizar las debilidades y las amenazas.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Utilizar espárragos comerciales para evitar riesgos.

Al revisar las dos propuestas y los análisis FODA de ambas, podemos decir que las dos propuestas cumplen con los requerimientos del sistema. Además, se observan mayores beneficios con la propuesta 1, ya que ofrece piezas modulares que permiten un mayor rango de maniobra al momento de realizar cambios, y permite la opción de experimentar, utilizando motores económicos sin afectar o cambiar el diseño mecánico. En cambio, la propuesta 2 es menos flexible y representa un mayor riesgo si llegará a fallar algún componente, ya que sería necesario cambiar gran parte del sistema.

Una vez ya seleccionado el diseño mecánico que se va a utilizar se debe acoplar los motores con el torque adecuado en el dispositivo para que genere el movimiento lineal y también se debe desarrollar el sistema electrónico que permita accionar los motores desde la computadora. En la siguiente sección se presenta la selección del motor, la selección del micro controlador y la etapa de potencia que permiten la comunicación entre los motores y la PC.

3.2 Acoplamiento de las señales

Para mover el sistema, es necesario generar una fuerza de torsión en el eje del motor donde se encuentran colocadas las correderas, éstas a su vez generarán un movimiento lineal para jalar el carro. Para esto, es necesario indicarle al motor el sentido de giro y la velocidad del movimiento por medio de la PC. En la figura 27, se muestra un diagrama de los dispositivos necesarios para realizar la comunicación de la PC con el motor. Como se puede observar, es necesaria una fuente de alimentación para el motor, un micro controlador para realizar la comunicación y la etapa de potencia para no demandarle demasiada corriente al micro.

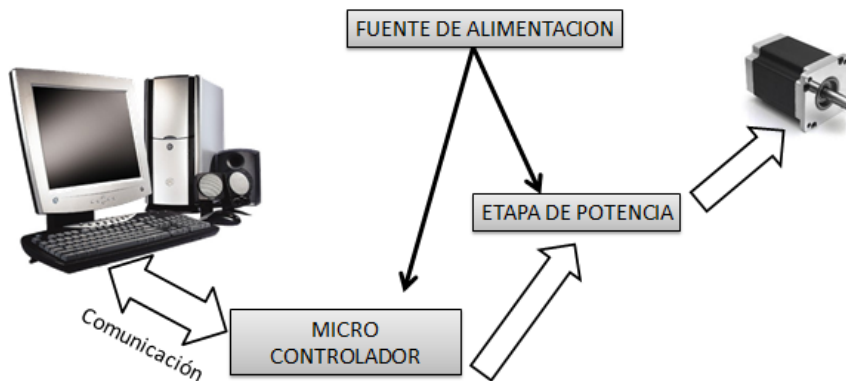


Fig. 27 Esquema de la comunicación entre la PC y el motor.

Para poder seleccionar que micro utilizar y cuál es la etapa de potencia que es necesario desarrollar, se tiene que elegir primeramente el motor que tenga el torque necesario para mover el dispositivo mecánico esto se describe en la siguiente sección.

3.2.1 Selección del motor

La elección del motor más conveniente a utilizar depende de la aplicación realizada. Para esto se deben evaluar los siguientes factores: velocidad, par, resolución, precio y mantenimiento [33].

Los motores a pasos tienen una relación inversa entre la velocidad y el par. Mientras que los servomotores tienen un par constante hasta la velocidad nominal. Como criterio general debe seleccionarse un servomotor cuando la velocidad está por encima de 1000 revoluciones por minuto (RPM) y cuando la resistencia del movimiento no es constante ya que estos motores tienen la capacidad de producir un par pico en periodos cortos de tiempo que es en ocasiones hasta 8 veces su par nominal continuo. Con una velocidad por debajo de 500 RPM los motores a pasos son una buena elección porque producen un par más alto que el servomotor de tamaño equivalente. La resolución es el paso más pequeño al que puede moverse un motor y esta varía dependiendo de las características de cada motor. Respecto al precio, la diferencia se ha ido reduciendo en los últimos años pero aun así los motores a pasos tienden a ser un 10-20 % más baratos que los servomotores [33].

En el sistema que nos encontramos desarrollando se requiere una velocidad menor a los 500 RMP, una resolución de un milímetro o menor, se cuenta con un presupuesto para adquirir dos motores de 2,000 pesos.

Para obtener el par requerido para mover el sistema se calcula el modelo dinámico de éste utilizando la metodología de Euler-Lagrange [34]. Esta metodología analiza el sistema mecánico como un todo viéndolo desde el punto de vista energético, es decir, el lagrangiano es la diferencia de la energía cinética y potencial [5]. La formulación de Euler-Lagrange se expresa de la siguiente forma:

$$L = K - P \quad (3)$$

$$K = \frac{1}{2}mv^2 \quad (4)$$

$$P = \frac{1}{2}mgh \quad (5)$$

Donde P es la energía potencial del robot dada por la masa ‘ m ’, la gravedad ‘ g ’ y la altura ‘ h ’; K es la energía cinética del robot dada por la masa ‘ m ’ y la velocidad ‘ v ’; L representa el lagrangiano que es la diferencia entre la energía cinética y la energía potencial.

La figura 28 representa al sistema de 2GDL en un diagrama de masas y distancias para facilitar la obtención del comportamiento de las energías involucradas en este; el modelo cinemático directo y diferencial. Donde m_1 es la masa de los componentes (cámara, probador de Ronchi, carro superior) con un valor de 3kg; m_2 es la masa del carro inferior y los rieles superiores igual a 4kg; $d_1 = 70$ cm y $d_2=50$ cm que son las distancias que se puede recorrer a lo largo de los ejes.

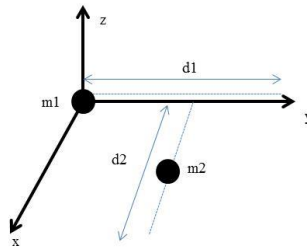


Fig. 28 Muestra el diagrama de masas y distancias del sistema.

Basándonos en la figura 28 se desarrolla el método de Euler-Lagrange para obtener el modelo dinámico que consta de los siguientes pasos:

Paso 1: Obtener el modelo cinemático directo [5]:

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ d_1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$\begin{bmatrix} x_2 \\ y_2 \\ z_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ d_2 \end{bmatrix} \quad (7)$$

Paso 2: Modelo matemático diferencial:

$$v_1 = \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \dot{d}_1 \\ 0 \end{bmatrix} \rightarrow v_1^T v_1 = \dot{d}_1^2 \quad (8)$$

$$v_2 = \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} x_2 \\ y_2 \\ z_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{d}_2 \end{bmatrix} \rightarrow v_2^T v_2 = \dot{d}_2^2 \quad (9)$$

Paso 3. Obtener las energías del sistema. De acuerdo a la figura 28 la energía potencial y cinética para la articulación 1 se expresan como:

$$K_1 = \frac{1}{2} m_1 v_1^T v_1 = \frac{1}{2} m_1 \dot{d}_1^2 \quad (10)$$

$$P_1 = 0 \quad (11)$$

También de acuerdo a la figura 28 la energía potencial y cinética para la articulación 2 se expresan como:

$$K_2 = \frac{1}{2} (m_1 + m_2) v_2^T v_2 = \frac{1}{2} (m_1 + m_2) (\dot{d}_2^2) \quad (12)$$

$$P_2 = 0 \quad (13)$$

Paso 4. Desarrollando la fórmula de Euler-Lagrange, es decir sustituyendo las ec. (10), (11), (12) y (13) en la ec. (3) se obtiene el lagrangiano del sistema dado por la ec. (14)

$$L = (K_1 + K_2) - (P_1 + P_2) \quad (3.1)$$

$$L = \frac{1}{2} m_1 \dot{d}_1^2 + \frac{1}{2} (m_1 + m_2) (\dot{d}_2^2) \quad (14)$$

Paso 5. Obteniendo las ecuaciones del movimiento del sistema. Para esto se desarrollan las derivadas parciales del lagrangiano del sistema con respecto a cada una de las distancias como lo muestran las siguientes ecuaciones:

$$\frac{\partial L}{\partial \dot{d}_1} = m_1 \dot{d}_1 \quad (15)$$

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{d}_1} = m_1 \ddot{d}_1 \quad (15.1)$$

$$\frac{\partial L}{\partial d_1} = 0 \quad (15.2)$$

$$\frac{\partial L}{\partial \dot{d}_2} = (m_1 + m_2) \dot{d}_2 = (m_1 + m_2) \dot{d}_2 \quad (16)$$

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{d}_2} = (m_1 + m_2) \ddot{d}_2 \quad (16.1)$$

$$\frac{\partial L}{\partial d_2} = 0 \quad (16.2)$$

Paso 6. Obteniendo la matriz que representa el modelo dinámico del sistema. Esta matriz contiene las fuerzas requeridas para movilizar cada una de las articulaciones que componen al sistema:

$$F = \frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{d}} = ma \quad (17)$$

$$F_1 = \frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{d}_1} = (m_1) \ddot{d}_1 \quad (17.1)$$

$$F_2 = \frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{d}_2} = (m_1 + m_2) \ddot{d}_2 \quad (17.2)$$

$$\begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_1 \ddot{d}_1 \\ (m_1 + m_2) \ddot{d}_2 \end{bmatrix} \quad (18)$$

A partir del modelo dinámico del sistema representado por la ec. (18). Se calcula las fuerzas requeridas considerando las masas y las aceleraciones del sistema. Como se considera un movimiento uniformemente acelerado para calcular las aceleraciones involucradas se utiliza la fórmula:

$$a = \frac{v_f^2 - v_o^2}{2d} \quad (19)$$

Donde d es la distancia d1 para obtener la fuerza 1 y d2 es la distancia 2 para la fuerza 2; $v_o = 0$ ya que el sistema parte del reposo y se quiere que alcance una v_f de 30 RPM que equivale a 0.0392m/s según la siguiente formula:

$$\frac{(RMP)(2\pi)}{60} * \text{radio en metros} = \frac{m}{s} \quad (20)$$

Sustituyendo en la fórmula 19 nos queda:

$$a_1 = \frac{0.0392^2 - 0}{2(0.7)} = 0.0010976 \quad (19.1)$$

$$a_2 = \frac{0.0392^2 - 0}{2(0.5)} = 0.001536 \quad (19.2)$$

Una vez obtenida las aceleraciones involucradas se sustituyen los valores de masa y aceleración en la ec. (18) que representa el modelo dinámico del sistema. Esto se realiza para obtener la fuerza que se requiere para mover al sistema.

$$\begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 3\text{kg} * 0.001097\text{m/s} \\ (3\text{kg} + 4\text{kg}) * 0.001536\text{m/s} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.003291\text{N} \\ 0.010752\text{N} \end{bmatrix} \quad (18.1)$$

Para obtener el torque necesario en la polea motriz se recurre a la siguiente formula:

$$T = Fd \quad (19)$$

Donde la fuerza es la calculada para cada peso y la distancia el radio de la polea para ejercer el movimiento sustituyendo los valores de fuerza calculados y los radios para cada polea nos queda:

$$\begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.003291\text{N} * 0.03\text{m} \\ 0.010752\text{N} * 0.012\text{m} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.00009873\text{Nm} \\ 0.000129\text{Nm} \end{bmatrix} \quad (19.1)$$

Por cuestiones de diseño se toma el torque mayor requerido y se multiplica por un delta de seguridad para evitar contratiempos. En este caso se escoge el valor de 4 aunque puede ser cualquier otro valor siempre que sea mayor a uno, esto sirve como seguridad para buscar un motor que ofrezca un mayor torque al requerido [35] .Entonces realizando los cálculos queda que $0.000129Nm * 4 = 0.000516Nm$ es el torque mínimo requerido en el sistema.

Una vez ya definidos los requerimientos, se realizó una evaluación de los motores a pasos existentes en el mercado que cubren estas características; a continuación se presentan algunos:

Tabla 5.Lista de motores a pasos comerciales

Modelo	Distribuidor	Características	Imagen
Nema 17	OpenCNCMexico	Costo de \$500 pesos. Disponble en México. Torque de 0.28Nm Resolución de 1.8°	
Nema 23	OpenCNCMexico	Costo de \$680 pesos. Disponble en México. Torque de 2.11Nm Resolución de 1.8°	
39BYGL	Robodacta	Costo de \$600 pesos. Disponble en México. Torque de 0.002Nm Resolución de 1.8°	

57BYGH420	Robodacta	Costo de \$440 pesos. Disponible en México. Torque de 0.9Nm Resolución de 1.8°	
Nema 23	National Instruments	Costo de \$1970 pesos. Disponible en México. Torque de 1.2Nm Resolución de 1.8°	
Nema 34	National Instruments	Costo de \$4520 pesos. Disponible en México. Torque de 4.3Nm Resolución de 1.8°	

Como se puede observar en la tabla existe gran variedad de motores y precios en el mercado y se toma la decisión de comprar un motor NEMA 23 distribuido por OpenCNCMéxico ya que se encuentra dentro del presupuesto, además que en comparación con el resto de los motores ofrece un gran torque a un menor precio.

En la siguiente sección se describe el control del motor y el micro controlador que se va a utilizar.

3.2.3 Control del motor

Como se mencionó con anterioridad se va a utilizar un motor a pasos NEMA 23, este motor es de tipo bipolar (ver figura 29 a). Lo que implica que se deben invertir las polaridades de las terminales de las bobinas 1 y 2 en una determinada secuencia para lograr

un giro a la derecha, y en secuencia opuesta para que gire a la izquierda, esta secuencia se muestra en la figura 29 b.

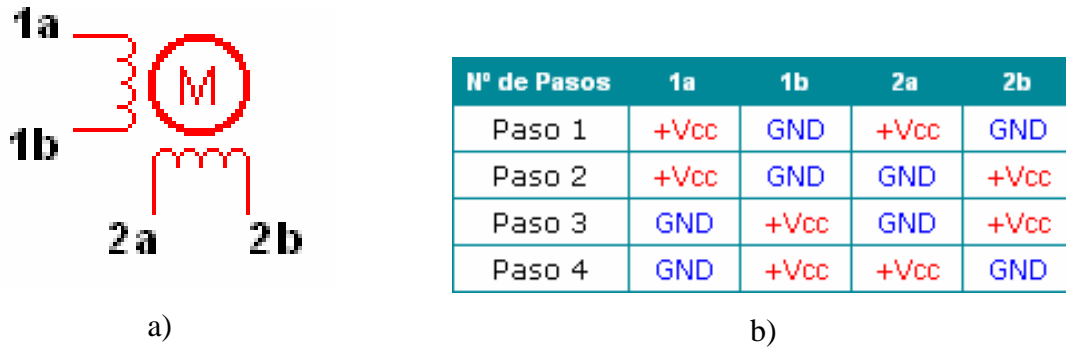


Fig. 29 a) Diagrama de un motor a pasos bipolar; b) Secuencia para el giro del motor

En este caso el control se va a realizar a través de un micro controlador, como este dispositivo entrega muy poca corriente se hace uso de un driver L293B para motores de 4 canales que posee una entrada de alimentación independiente, que alimenta las cuatro terminales de las bobinas de los motores. En la figura 30 se muestra el diagrama electrónico de conexión utilizando el driver L293B, simulado en el software Proteus 7 Profesional.

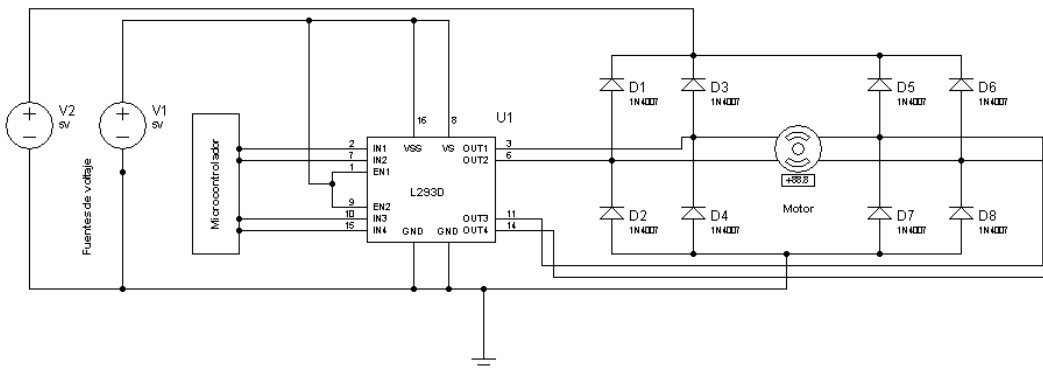


Fig. 30 Circuito para el control de un motor bipolar.

El micro controlador que se va a utilizar es el M430G2553, de la familia MSP430 de Texas Instruments [36]. Es un micro controlador con un conjunto reducido de

instrucciones de 16 bits diseñado especialmente para aplicaciones que requieran un muy bajo consumo de energía, tales como dispositivos portátiles. Además ofrece una herramienta de desarrollo Code Composer Studio 5.3.0 que permite programar todos los dispositivos de la familia MSP430XXXX, en un lenguaje de alto nivel C o C++, generando un código compacto y de rápida ejecución; también permite ejecutar paso a paso el programa en tiempo real desde la PC, consultar o modificar los registros del micro, establecer una comunicación serial entre el dispositivo y la PC vía USB a través de un puerto COM emulado.

Para controlar la velocidad y el sentido de giro del motor, se utiliza una comunicación serial asíncrona a través de la PC y el micro controlador, para esto se requiere configurar este dispositivo en los pines P1.1 y P1.2 en modo de recibir datos (RX) y enviar datos (TX) respectivamente, conectando de manera cruzada como se muestra en la figura 31.

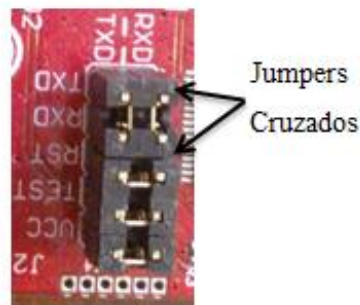


Fig. 31 Conexión de Jumpers cruzados para recibir y enviar datos vía UART.

Para establecer correctamente la comunicación, la Guía de Usuario especifica que es necesario configurar los registros P1SEL, P2SEL2, UCA0CTL1, UCA0BR0, UCA0BR1, UCA0MCTL, UCA0CTL1, BCSCTL1, DC0CTL, desde software con los siguientes valores:

- BCSCTL1= CALBC1_1MHZ y DC0CTL=CALDC0_1MHZ para seleccionar el DC0 como fuente de reloj a 1MHz.
- P1SEL=BIT1+BIT2 y P2SEL2= BIT1+BIT2 para habilitar los puertos 1 y 2 para comunicación serial.

- UCA0CTL1|=UCSSEL_2, UCA0BR0=104, UCA0BR1=0,
UCA0MCTL=UCBRS0, UCA0CTL1 &= ~UCSWRST, configura el reloj a 1 MHZ

A continuación se muestra el programa que configura estos registros y contiene la secuencia para el movimiento de un paso del motor bipolar. Este programa es descargado al micro y recibe de la PC como entrada una letra en mayúscula del ‘A’ al ‘D’, donde ‘A’ representa el paso 1, ‘B’ el paso 2, ‘C’ el paso 3 y ‘D’ el paso 4 del motor.

```
#include <msp430.h>
void main(void)
{WDTCTL = WDTPW | WDTHOLD;
P1DIR |= 0x0F; // Activar P1.0, P1.1, P1.2 ... P1.6 como salida
P2DIR |=0x0F; // Activar P2.0, P1.1, P2.2 ... P2.5 como salida
BCSCTL1 = CALBC1_1MHZ;
DCOCTL = CALDCO_1MHZ; // Configurar el DCO como fuente de reloj a 1MHZ
P1SEL = BIT1 + BIT2 ; // P1.1 = RXD, P1.2=TXD
P1SEL2 = BIT1 + BIT2 ; // P1.1 = RXD, P1.2=TXD
UCA0CTL1 |= UCSSEL_2; // SMCLK
UCA0BR0 = 104; // 1MHz 9600
UCA0BR1 = 0; // 1MHz 9600
UCA0MCTL = UCBRS0; // UCBRSx = 1
UCA0CTL1 &= ~UCSWRST;
IE2 |= UCA0RXIE; // Habilitando la interrupción USCI_A0 RX
__bis_SR_register(LPM0_bits + GIE); }
#pragma vector=USCIAB0RX_VECTOR
__interrupt void USCI0RX_ISR(void)
{while (!(IFG2&UCA0TXIFG)); // USCI_A0 TX buffer listo?
UCA0TXBUF = UCA0RXBUF; // carácter recibido
if(UCA0RXBUF == 'A')
{P2OUT = 0x09;} // Activar la máscara 1001 en el P2.
if(UCA0RXBUF == 'B')
{P2OUT = 0x0A;} // Activar la máscara 1100 en el P2.
if(UCA0RXBUF == 'C')
{P2OUT = 0x06;} // Activar la máscara 0110 en el P2.
if(UCA0RXBUF == 'D')
{P2OUT = 0x05;}} // Activar la máscara 0101 en el P2.
```

Capítulo 4. Funcionamiento del sistema.

El sistema debe realizar el procedimiento que muestra la figura 32, para capturar el ronchigrama de una superficie bajo prueba. Como se puede observar, primero tiene que reconocer las MVI, para obtener la posición de estas e información de la superficie óptica. Después tiene que procesar la información, corregir la imagen y posicionar la cámara y el probador de Ronchi en el eje óptico. Una vez realizado esto, identifica que superficie óptica es la que se está evaluando y se coloca cerca del centro de curvatura en una posición determinada, para por ultimo capturar el ronchigrama generado.

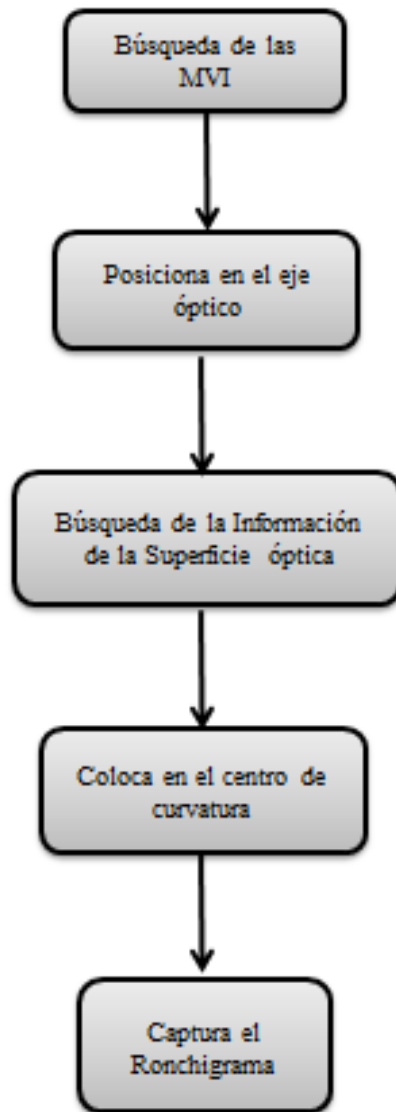


Fig. 32. Esquema del funcionamiento general del sistema.

Para poder llevar a cabo el procedimiento mencionado, es necesario primeramente diseñar las MVI para cada una de las superficies a evaluar, por ello en el siguiente bloque se describe el funcionamiento y diseño de las mismas.

4.1 Diseño de las MVI

Las MVI tienen como objetivo proporcionar información de la posición y orientación de la cámara con respecto a la marca, e información de las características del objeto, en este caso la superficie óptica, esta información permite conocer las acciones que debe realizar el

sistema, como por ejemplo colocarse cerca del centro de curvatura de la superficie que se va a evaluar. El que contengan información específica de las superficies implica que cada marca es única para cada una de las superficies que se requiere evaluar.

Las MVI diseñadas son planas, se encuentran presentadas en orientación vertical y pueden ser detectadas fácilmente por un sistema de visión artificial con una cámara monocromática. Estas marcas se componen por cuatro puntos de color negro en un fondo blanco para su fácil detección. Estos puntos conforman los vértices de un cuadrilátero con aristas normales. El origen del sistema de coordenadas de la marca corresponde al punto P_1 que se diferencia del resto con un diámetro mayor. Las distancias de los segmentos de líneas $|\overline{P_1P_2}|$ y $|\overline{P_3P_4}|$, son conocidas e iguales para todas las marcas a diseñar. En la figura 33, se muestra un ejemplo de una MVI con sus componentes.

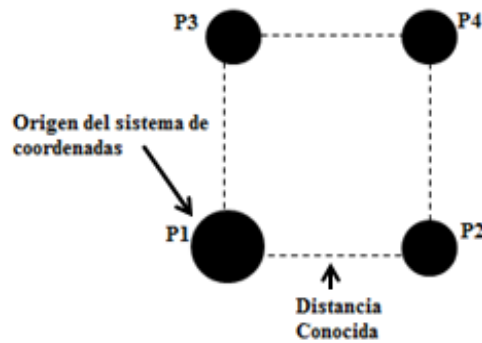


Fig. 33. Ejemplo de una MVI.

Para identificar una marca de otra, se utiliza como factor la distancia vertical del cuadrilátero, es decir la distancia entre los puntos P_1, P_3 o P_2, P_4 . En la figura 34, se puede ver un ejemplo de las diferencias entre una marca que da información de una copa o la marca que da información de una botella, como se puede observar existe una diferencia en la distancia vertical de estas, mientras las distancias horizontales son las mismas, este es un trabajo desarrollado en el laboratorio de Robótica de la UTM donde utilizan las MVI para detectar un objeto y tomarlo con un Robot Power Cube [28].

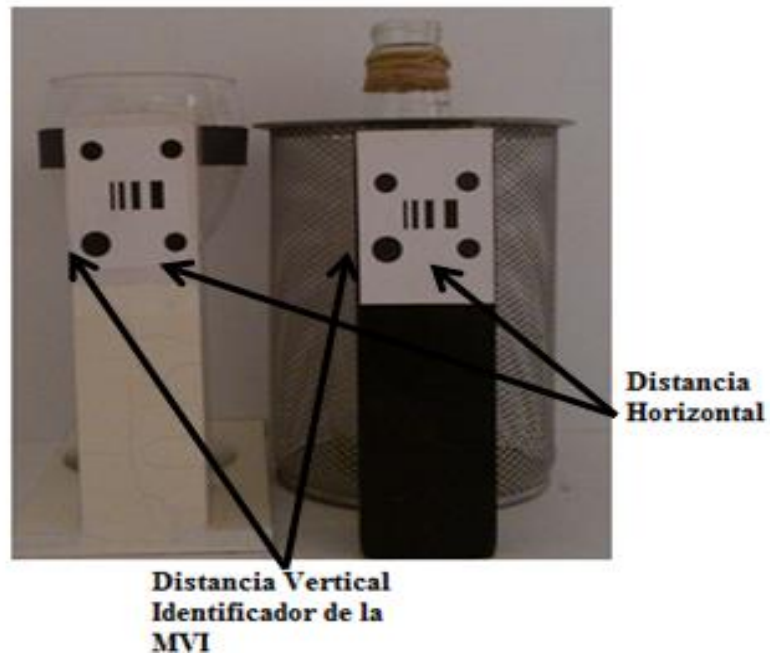


Fig. 34 MVI utilizadas para tomar un objeto (Imagen tomada en el Laboratorio de Robótica Inteligente de la UTM).

A continuación se presenta como ejemplo el diseño de una MVI para una superficie de 5.5 cm de diámetro y 40.1851cm de radio de curvatura paraxial, la cual, al evaluarla el ronchigrama esperado tienen 9 franjas y se encuentra a 38.05 cm de distancia de la superficie. Los datos antes mencionados, es la información que la marca debe proporcionar, además de la posición y orientación de la superficie de la marca con respecto a la cámara. Para que el sistema tenga acceso a esta información, se crea un conjunto de datos como lo muestra la tabla 6, utilizando el software Visual Studio 2008 con el lenguaje C++, donde se puede ver que la primera columna es el ID y es la distancia vertical de la marca para cada una de las superficies ópticas a evaluar, con esto se relaciona una marca en un banco de datos que nos permite tener acceso a la información de la superficie y así conocer a que distancia se tiene que colocar el probador de Ronchi para capturar el ronchigrama con el número correcto de las franjas.

Tabla 6. Información de las superficies a evaluar.

ID (Distancia Vertical de la Marca)	DM (Diámetro de la Superficie)	RC (Radio de Curvatura Paraxial)	NF (Número de franjas del Ronchigrama)	DR (Distancia a la que se debe observar el Ronchigrama)
13 cm	5.5 cm	40.1851cm	9	38.05 cm

En la figura 35 se observa la marca diseñada en el software Corel Draw. Para la superficie descrita con anterioridad, donde se ocupa un cuadrado con las distancias para ubicar correctamente los centroides. Como se puede ver, contiene los cuatro vértices, donde el vértice significativo mide 2 cm de diámetro y es mayor que el resto de los vértices que miden 1 cm de diámetro, esto es igual para todas las marcas.

La distancia horizontal de la marca, se propuso a 15 cm constante para todas; para calcular esto, se midió el alcance de la cámara en la posición que va a capturar las marcas y se obtuvo que la cámara puede capturar como máximo hasta 25 cm de separación horizontal entre los vértices.

La distancia vertical que da la unicidad de la marca en este caso es de 13 cm. Para asignar la distancia vertical, se tomó en cuenta que la superficie mayor es de 10 cm, entonces, se pone una constante de 13 cm de altura entre los vértices, para que cualquier superficie en el rango de 5 a 10 cm de diámetro pueda quedar dentro del cuadrilátero sin problemas. A los 13 cm constantes, se le va agregando medio cm por cada superficie nueva que se agregue al banco de datos, es decir, para esta primera superficie la altura que le corresponde es 13 cm, a la segunda superficie le correspondería 13.5 cm y así sucesivamente. Entonces como la distancia a la que la cámara va a realizar la búsqueda de las MVI es de 51.5 cm, se midió la amplitud vertical de la cámara y se observó que puede capturar como máximo, imágenes hasta de 20 cm de separación entre los vértices, por lo tanto, tiene capacidad para 15 superficies.

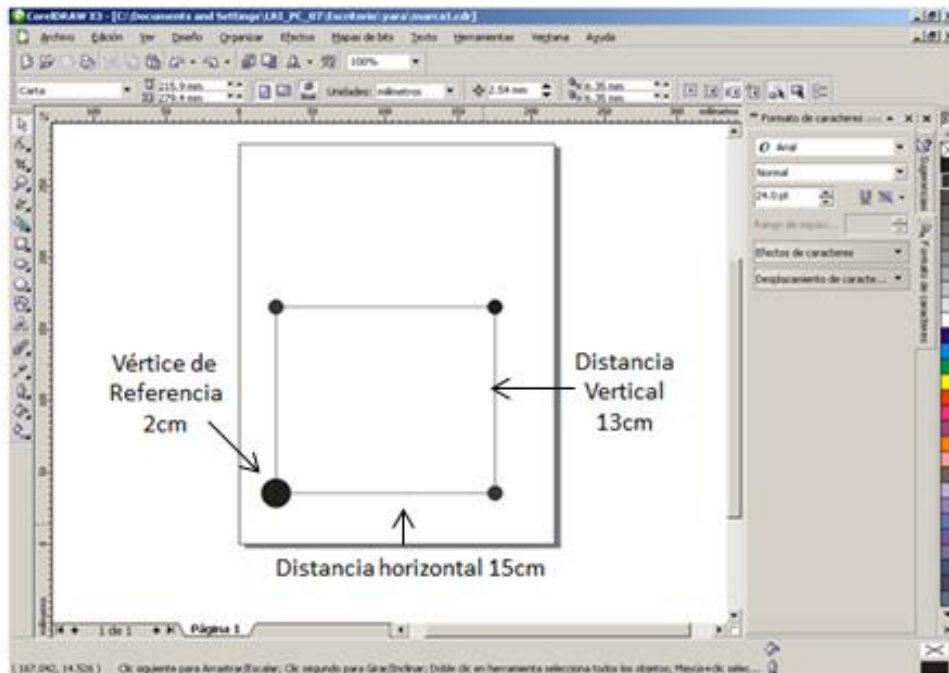
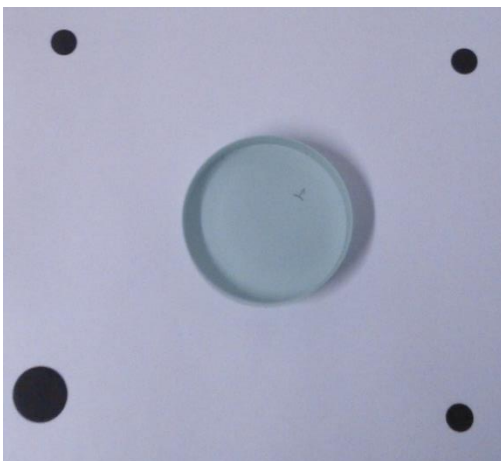
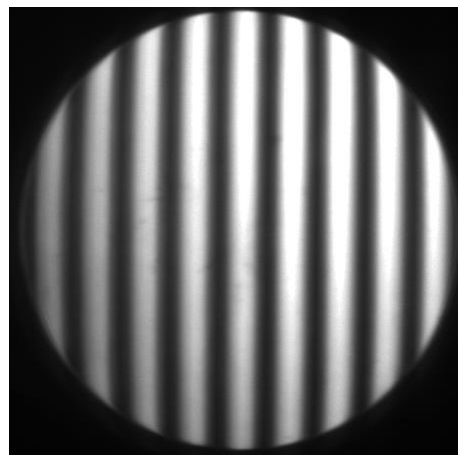


Fig. 35. Diseño de las MVI en CorelDraw.

La MVI ya diseñada se coloca alrededor de la superficie óptica teniendo en cuenta de manera manual que el centro de la superficie coincida con el centro del cuadrilátero de la marca, en la figura 36 a), se observa el ejemplo de la marca colocada alrededor de la superficie descrita anteriormente y en la figura 36 b), se observa el ronchigrama experimental de dicha superficie que se deberá encontrar a la distancia de 38.05 cm.



a)



b)

Fig. 36 a) MVI colocadas alrededor de una superficie óptica, b) Ronchigrama esperado.

Una vez definidas las marcas para las superficies a evaluar, se utiliza un algoritmo de procesamiento de imágenes que calcula la posición 3D de los centroides con respecto al sistema de coordenadas de la cámara. Las coordenadas 3D de los centroides, se calculan utilizando los resultados en la geometría de proyección en perspectiva [37] y se definen con respecto al sistema de coordenadas de la cámara, con el origen en el vértice distinguido y con el eje Z paralelo al eje óptico de la lente de la cámara.

Para el segmento de línea j-ésimo, $j = 1, 2$, las coordenadas 3D de los puntos terminales de dos segmentos paralelos con las longitudes conocidas se calculan como se muestra a continuación:

$$Z_1^{(j)} = \frac{\rho^{(j)} \left[(fb_1 - b_3 x_2^{(j)}) \delta x^{(j)} + (fb_2 - b_3 y_2^{(j)}) \delta y^{(j)} \right]}{(\delta x^{(j)})^2 + (\delta y^{(j)})^2}, \quad (20)$$

donde:

$$\begin{aligned} X_1^{(j)} &= Z_1^{(j)} \frac{x_1^{(j)}}{f} \\ Y_1^{(j)} &= Z_1^{(j)} \frac{y_1^{(j)}}{f} \end{aligned} \quad (21)$$

$$\begin{aligned} X_2^{(j)} &= X_1^{(j)} + \rho^{(j)} b_1 \\ Y_2^{(j)} &= Y_1^{(j)} + \rho^{(j)} b_2 \\ Z_2^{(j)} &= Z_1^{(j)} + \rho^{(j)} b_3 \end{aligned} \quad (22)$$

$(X_1^{(j)}, Y_1^{(j)}, Z_1^{(j)})$ y $(X_2^{(j)}, Y_2^{(j)}, Z_2^{(j)})$ Representan las coordenadas de los puntos terminales $P_1^{(j)}$ y $P_2^{(j)}$ de la imagen del segmento lineal j-ésimo; $(x_1^{(j)}, y_1^{(j)})$, $(x_2^{(j)}, y_2^{(j)})$ son las coordenadas de los puntos terminales de la imagen del segmento j-ésimo; $\rho^{(j)}$ es la longitud del segmento lineal j-ésimo; f es el valor del foco de la lente de la cámara.

b_1, b_2, b_3 son los cosenos directores de un vector unitario cuya dirección coincide con la dirección de los segmentos paralelos y se calculan de la siguiente manera:

$$\begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \end{bmatrix} = \pm \frac{\begin{pmatrix} c_2^{(1)} f \\ -c_1^{(1)} f \\ y_1^{(1)} c_1^{(1)} - x_1^{(1)} c_2^{(1)} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} c_2^{(2)} f \\ -c_1^{(2)} f \\ y_1^{(2)} c_1^{(2)} - x_1^{(2)} c_2^{(2)} \end{pmatrix}}{\left\| \begin{pmatrix} c_2^{(1)} f \\ -c_1^{(1)} f \\ y_2^{(1)} c_1^{(1)} - x_1^{(1)} c_2^{(1)} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} c_2^{(2)} f \\ -c_1^{(2)} f \\ y_1^{(2)} c_1^{(2)} - x_1^{(2)} c_2^{(2)} \end{pmatrix} \right\|} \quad (23)$$

$$c_1^{(j)} = \frac{x_2^{(j)} - x_1^{(j)}}{M_j}, \quad c_2^{(j)} = \frac{y_2^{(j)} - y_1^{(j)}}{M_j}, \quad j=1, 2 \quad \text{son los cosenos directores del vector}$$

unitario j -ésimo cuya dirección coincide con la dirección de la imagen del segmento lineal j -ésimo.

Donde

$$M_j = \sqrt{(x_2^{(j)} - x_1^{(j)})^2 + (y_2^{(j)} - y_1^{(j)})^2}. \quad (24)$$

Con lo descrito anteriormente, el sistema después de detectar la marca y calcular, la posición, orientación y la distancia vertical, podrá realizar una búsqueda en los datos para encontrar la información de la superficie que se va a evaluar y colocar correctamente el probador de Ronchi.

Una vez ya diseñada las MVI de las superficies, es necesario conocer la posición de origen del sistema de 2GDL para realizar las correcciones pertinentes en las imágenes capturadas, por ello en el siguiente apartado se describe el procesos de calibración de la cámara CCD.

4.2 Calibración de la cámara CCD

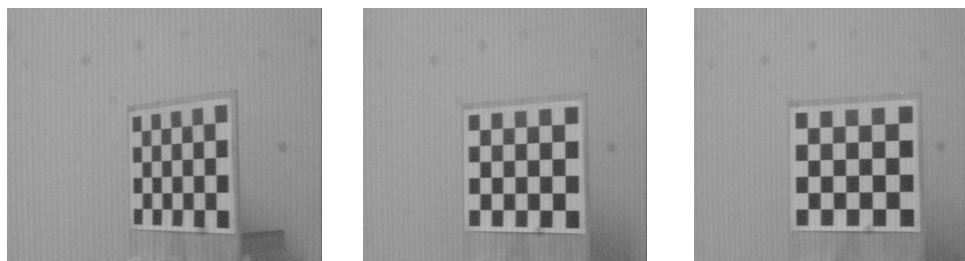
Las MVI son detectadas mediante una cámara CCD IMAGESOURCE, las imágenes obtenidas por la cámara pueden tener distorsiones, para corregir dicha distorsión es necesario conocer la información métrica de la cámara que va a ser utilizada, para ello se

necesita aplicar algún proceso de calibración a la cámara. Existen varias técnicas para calibrar una cámara e inferir esta información, desde imágenes captadas por cámaras no calibradas, a través de procesos iterativos de auto calibración o el antiguo proceso de calibración de los 3 puntos [38]. El proceso de calibración de cámara, abre la posibilidad de realizar aplicaciones efectivas en visión, tal como realidad aumentada, reconocimiento, seguimiento y reconstrucción 3D, los cuales se basan en el conocimiento de calibración y pose (es la posición y orientación de un objeto) de la cámara [39].

La idea principal tras los procesos de calibración de cámara, es describir el modelo de proyección que relaciona los sistemas de coordenadas bidimensional y tridimensional que permiten obtener los parámetros de la cámara. En esencia el proceso de calibración de cámara consiste en, determinar la geometría y características internas de la cámara, parámetros intrínsecos (tamaño horizontal y vertical de los píxeles o aspecto proporcional, coordenadas de proyección del centro óptico, largo focal), y los parámetros extrínsecos (rotación y translación), que representan la localización y orientación (pose) de la cámara relativa a una imagen en un sistema de coordenadas [39].

Para la calibración de la cámara CCD que se va a utilizar se hace uso del toolbox_calib de Matlab [6]. A continuación se describen los pasos que se realizaron para calibrar la cámara IMGENSOURCE y obtener los parámetros extrínsecos e intrínsecos de ésta:

1. Se capturaron diferentes posiciones y orientaciones de un tablero de ajedrez con la cámara como lo muestra la figura 37. Estas posiciones y orientaciones son las que indican el manual de usuario del toolbox_calib de Matlab.



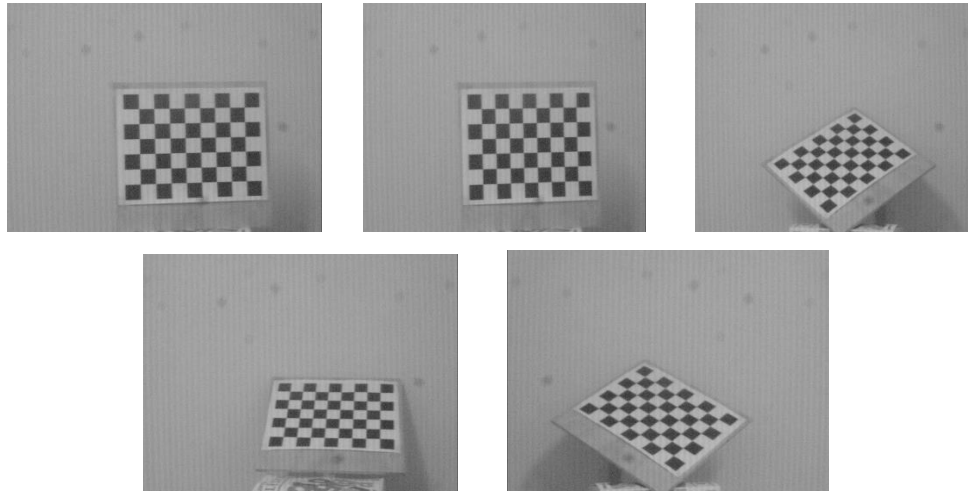


Fig. 37 Muestra el tablero de ajedrez en varias posiciones.

2. Se ejecutó la función “calib_gui” en Matlab y aparece la ventana que se muestra en la figura 38. De esta ventana se seleccionó el botón “images names”, para introducir el nombre de las imágenes que se tomaron en el paso anterior y el formato.



Fig. 38 Toolbox_Calib de Matlab.

3. Después se seleccionó el botón “Extract grid corners” donde se introdujeron el tamaño de los cuadros de ajedrez y también el número de cuadros que existe horizontal y verticalmente. Después de esto el programa pidió que de cada imagen la selección de la esquina superior izquierda, después la esquina superior derecha, después la esquina inferior derecha y la esquina inferior izquierda.
4. Una vez que se realizó esto con las imágenes se selecciona el botón “Calibration” y el programa automáticamente procesó las imágenes y realizó

la calibración. Como resultado de esto se obtuvieron los parámetros de la cámara que se muestran en la tabla 7.

Tabla 7. Parámetros de la cámara CCD IMAGINSOURCE.

Distancia focal	$fc = [3443.95 \ 3336.78] \pm [523.11 \ 381.51]$
Punto principal	$cc = [321.60 \ 290.81] \pm [511.69 \ 266.40]$
Inclinación	$\alpha_c = [0.00] \pm [0.00] \Rightarrow$ ángulo del pixel = 90.00
Distorsión	$kc = [0.47, 1.42, -0.046, -0.10, 0.00] \pm [0.94, 4.92, 0.07, 0.13, 0.0]$
Error en el pixel	$err = [1.75408 \ 1.05419]$

4.3 Programas para emplear las MVI.

Las MVI son centroides en color negro impresos en un papel claro, para detectarlas se utiliza un programa que encuentra las zonas homogéneas en una imagen mediante el uso del algoritmo Run Length Encoding (RLE) [40]. Este algoritmo se basa en el siguiente principio: “Si un símbolo cualquiera se repite n veces consecutivas en la entrada puede ser sustituido por la combinación del símbolo en cuestión y el número de veces que se repite”.

Este algoritmo aprovecha que las imágenes pueden ser representadas en mapas de bits como si de una matriz de puntos se tratara para recorrer cada una de las filas de la imagen en busca de píxeles consecutivos de igual valor. Este algoritmo fue desarrollado e implementado con anterioridad para la detección de las MVI en el artículo [41] y en la tesis en desarrollo que lleva como título “Desarrollo e implementación de un sistema de visión para un robot de servicio en interiores para la detección y reconocimiento de marcas informativas visuales” [42]. Una vez detectada las MVI es necesario calcular las coordenadas en las que se encuentran. A continuación se describe el programa que realiza estos cálculos.

Para calcular las coordenadas de los centroides de los vértices de la MVI detectada se realiza lo siguiente: Para la coordenada en X del centroide se suman cada una de las coordenadas X_f y X_i de los elementos que forman a cada componente y se dividen entre el

total de las coordenadas sumadas. Para la coordenada Y del centroide se suman cada una de las coordenadas Y_f y Y_i de los elementos que forman a cada componente y se dividen entre el total de las coordenadas sumadas. Este programa también fue desarrollado con anterioridad para el cálculo de las coordenadas de los centroides en artículo [41] y en la tesis en desarrollo que lleva por título: “Desarrollo e implementación de un sistema de visión para un robot de servicio en interiores para la detección y reconocimiento de marcas informativas visuales” [42].

Después de encontrar las MVI y calculadas las coordenadas que las representan, se hace uso de un programa para posicionar la cámara CCD en el eje óptico de la superficie a evaluar. A continuación se describe un ejemplo gráfico de la corrección que realiza el programa: Como se observa en la figura 39 la cámara de CCD puede capturar la imagen de las MVI y no encontrarse en el eje óptico de la superficie debido a la apertura del lente de la cámara.

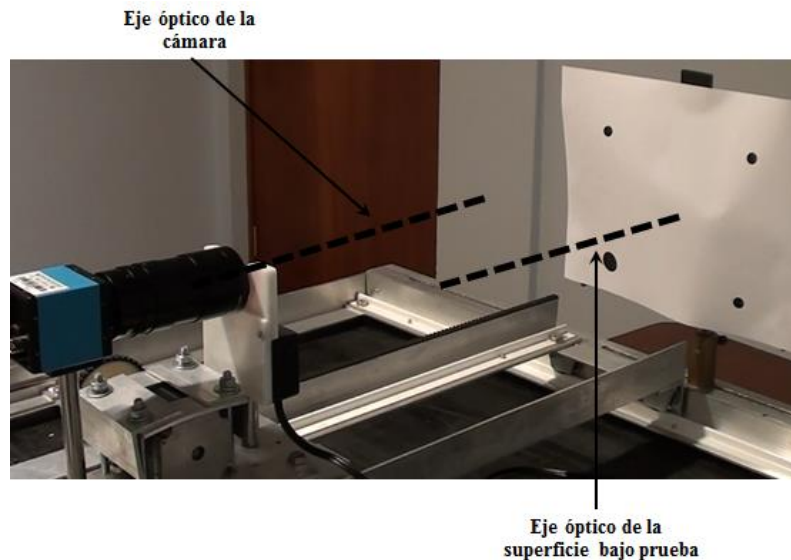


Fig. 39 Cámara CCD desfasada del eje óptico de la superficie bajo prueba.

Para hacer coincidir el eje de la cámara con el eje de la superficie óptica, el programa parte de conocer las coordenadas en píxeles de los cuatro vértices, (calculadas en el programa anterior); después calcula las coordenadas del punto que representa el centro

del rectángulo formado por los centroides. También calcula las coordenadas del centro de la imagen (estas no varían ya que el tamaño de la imagen en pixeles siempre es el mismo). Como se puede observar en la figura 40 existe una diferencia entre estos dos centros, el programa obtiene la diferencia en pixeles de la coordenada X mediante una resta. Este valor es la distancia en pixeles que existe entre los dos puntos, es decir, la distancia que separa al eje de la cámara con el eje de la superficie óptica.

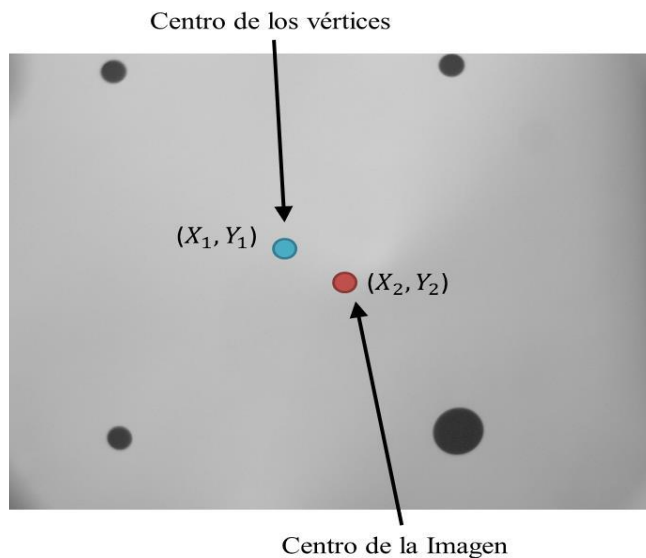


Fig. 40 Diferencia de los centroides de la imagen y el rectángulo formado por los 4 vértices.

Después de esto el programa envía la orden al motor para mover el probador de Ronchi y la cámara CCD la distancia ya calculada y hacer coincidir los dos ejes. A continuación en la figura 41 se presenta el diagrama del funcionamiento del programa de corrección de coordenadas.

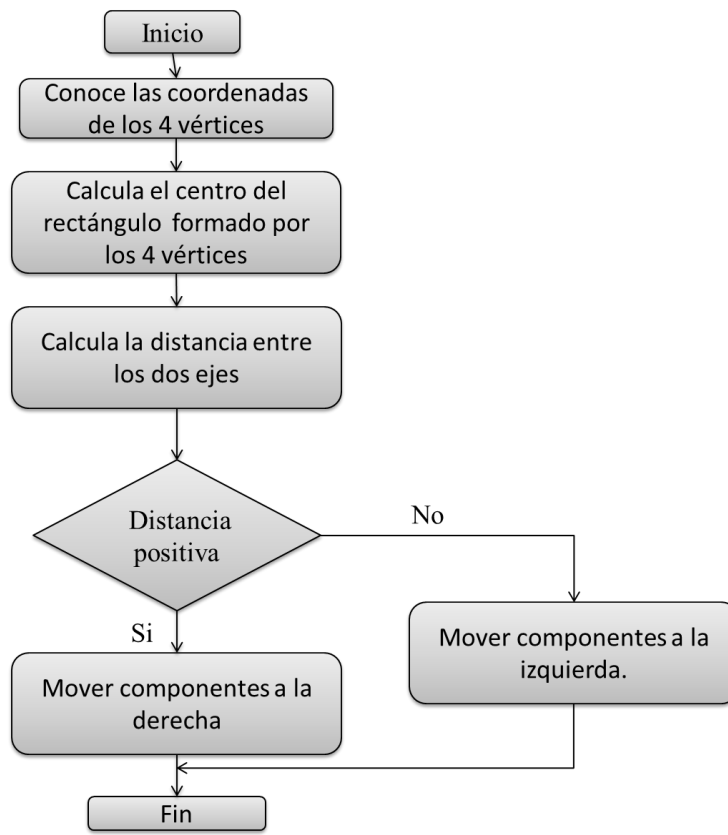


Fig. 41 Diagrama del programa de corrección de coordenadas.

Una vez realizado esto, el programa general obtiene información de la superficie óptica, por medio de las marcas y coloca al probador de Ronchi y a la cámara CCD cerca del centro de curvatura. En el capítulo siguiente se realiza una descripción de las piezas físicas del sistema mecánico y electrónico, además de una descripción del programa principal del funcionamiento del sistema

Capítulo 5. Implementación del Sistema.

5.1 Verificación de los componentes.

En esta sección se describe el sistema desarrollado el cual está compuesto por una parte mecánica y una parte electrónica, para finalmente describir la integración y funcionamiento del sistema completo. El diseño de la parte mecánica consta de 2 rieles superiores, 2 rieles inferiores, ángulos de aluminio para soporte, montura para la superficie óptica y la montura para el probador de Ronchi y la cámara CCD. A continuación se describen los componentes de la parte mecánica.

En la figura 42a se pueden observar los rieles inferiores; estos son rieles comercialmente conocidos como *guía o riel inferior* están sujetos a ángulos de aleación de aluminio 6063 comercialmente llamados *perfiles angulares* aportando rigidez a los rieles comerciales; sobre estos rieles se desplazan las llantas que van sujetas a los rieles superiores. En la figura 42b se pueden observar los rieles superiores, son rieles comerciales también sujetos a ángulos de aluminio, sobre estos rieles se desplazan las llantas sujetas a la montura que transporta el probador de Ronchi, la cámara CCD y el motor.

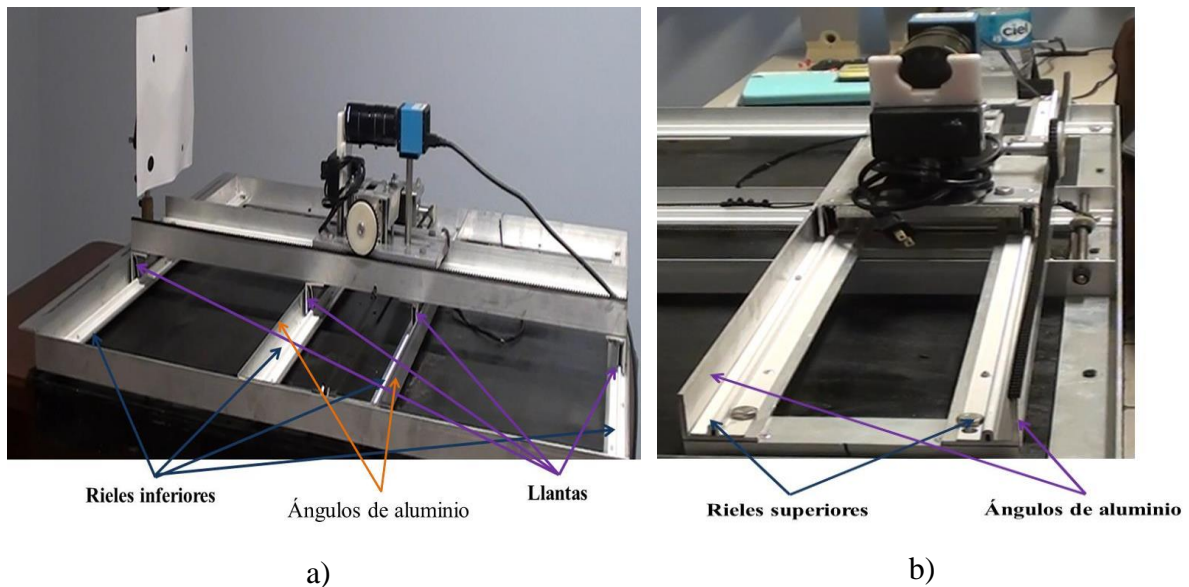


Fig. 42. a) Rieles inferiores; b) Rieles superiores.

Para generar el movimiento lineal del eje inferior, se le coloca una banda dentada comercialmente utilizada para fotocopiadoras xerográficas y electrostáticas, con una distancia entre los dientes de 3.2 mm. Ésta se coloca en el centro de los rieles inferiores y se encuentra sujeta en un extremo al engrane del eje de motor inferior y de otro extremo a un engrane colocado en un eje, como lo muestra la figura 43. En esta figura también se observa la banda dentada para mover la montura donde se coloca el probador de Ronchi y la cámara CCD, ésta tiene las mismas características que la banda descrita anteriormente. Este sistema consta de una banda dentada extendida sobre el ángulo de aluminio del sistema de rieles superiores y de un motor que se encuentra sobre la montura donde se coloca el probador de Ronchi y la cámara CCD; al eje del motor se le coloca una rueda dentada que permite el desplazamiento de los componentes a lo largo del eje.

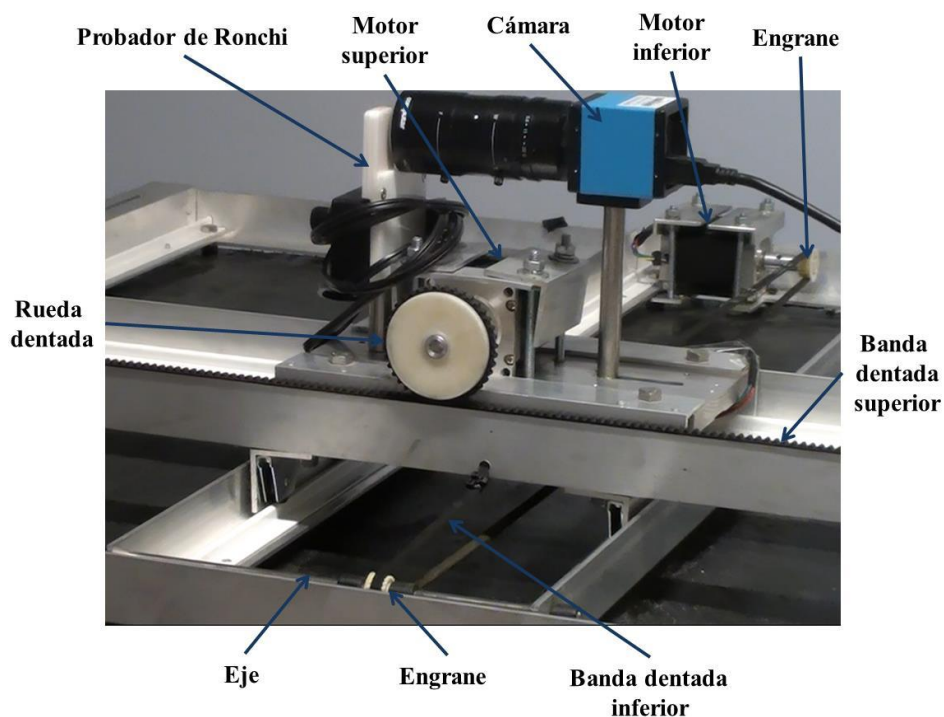


Fig. 43 Partes mecánicas del sistema que permiten el movimiento.

La montura donde se coloca el probador de Ronchi, la cámara CCD y el motor a pasos es de aluminio y en la parte inferior cuenta con llantas para desplazarse sobre los rieles como se observa en la figura 44.

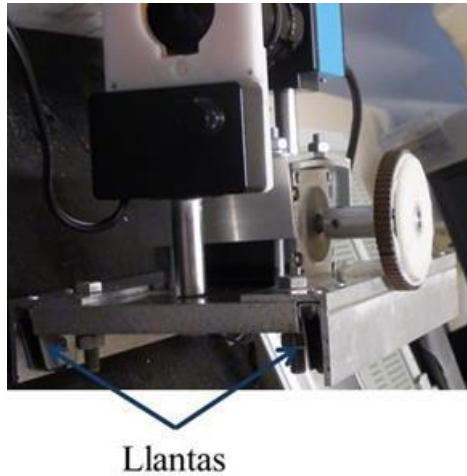


Fig. 44. Montura para sostener al probador de Ronchi y componentes.

La superficie óptica se coloca en una montura como lo muestra la figura 45. Esta montura fue diseñada anteriormente para colocar verticalmente la superficie óptica bajo prueba con movimientos para su centrado y alineación, además permite corregir el error de tilt por medio de unos tornillos; también posee orejas para colocar las MVI. La montura se coloca en un ángulo de aluminio acoplado al sistema, esto permite cerrar el sistema, el ángulo cuenta con tres ranuras para colocar tres monturas y poder evaluar más de una superficie.

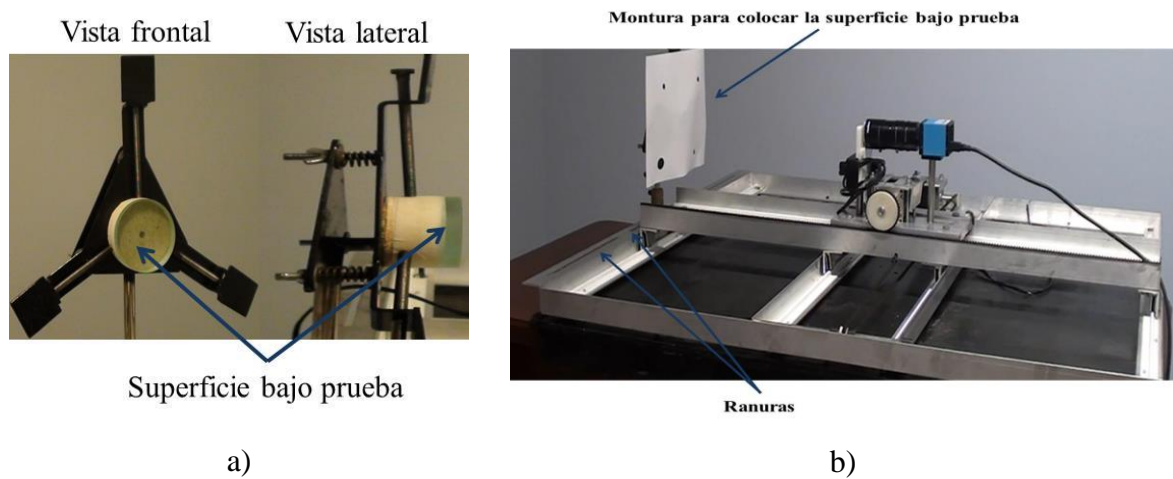


Fig. 45. a) Montura para colocar la superficie óptica b) Ranuras para colocar la montura.

La parte electrónica es la encargada de accionar el movimiento de los rieles mecánicos, mediante el uso de dos motores a pasos Nema 23, dos microcontroladores y su etapa de potencia para cada uno.

Los motores son los encargados de accionar el movimiento lineal en el sistema mecánico. Para ello se desarrolló físicamente el sistema electrónico descrito en la sección 3.2.3 de esta tesis, en la figura 46 se observan los circuitos electrónicos que corresponden a la etapa de potencia de los dos motores; cada uno de ellos corresponde a un motor, el cual se conectan directamente a las bobinas de los motores y a los microcontroladores. La comunicación entre la PC y los motores la realizan los microcontroladores MSP430 conectados vía USB a la computadora, como lo muestra la figura 47.

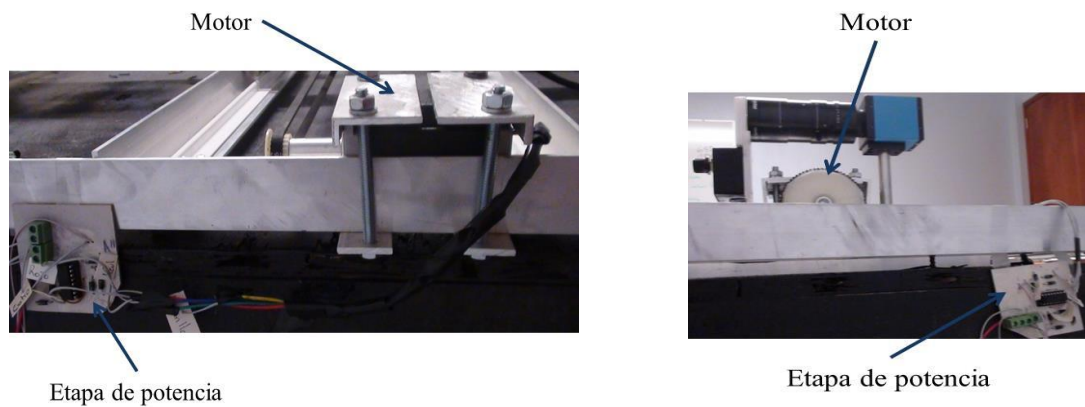


Fig. 46. Circuitos electrónicos de la etapa de potencia de los motores.

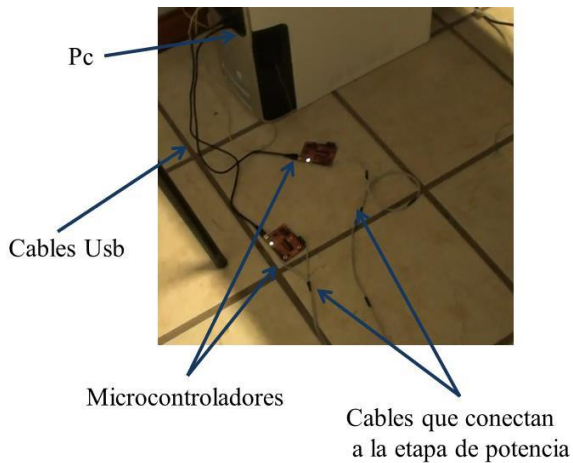


Fig. 47 Microcontroladores conectados a la PC.

Los componentes ya implementados se deben de acoplar para lograr el funcionamiento del sistema, en la sección contigua se explica cómo se integran y se comunican entre ellos.

5.2 Integración del sistema.

Para la integración del sistema se deben enviar instrucciones a los Motores desde la PC a través de los microcontroladores. Los motores se encuentran integrados al sistema mecánico para generar el movimiento vertical y horizontal del probador de Ronchi y la cámara CCD en el sistema de 2GDL. La retroalimentación del sistema existe mediante la cámara conectada a la computadora, de esta manera el sistema busca las MVI colocadas en la superficie óptica. El diagrama que muestra la figura 48 nos da un ejemplo de la integración general del sistema.

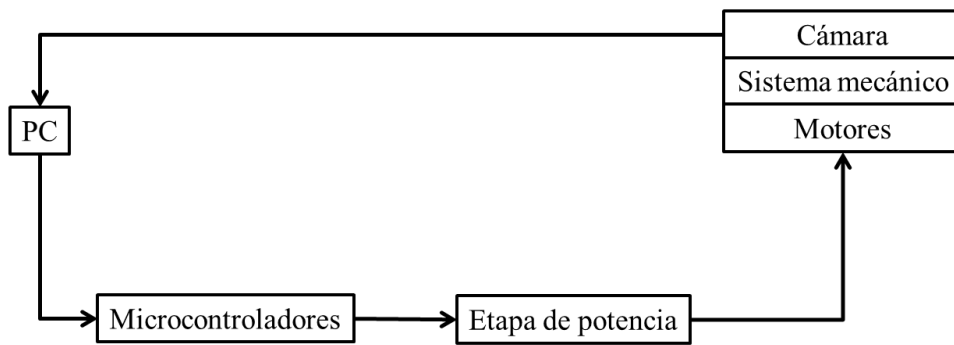


Fig. 48. Diagrama a bloques de la integración del sistema.

La figura 49 nos muestra un panorama general de cómo se encuentra integrado el sistema; como se puede ver las partes mecánicas se encuentran colocadas sobre una plataforma, mientras que las conexiones de los motores con el sistema eléctrico se realizan mediante cables.

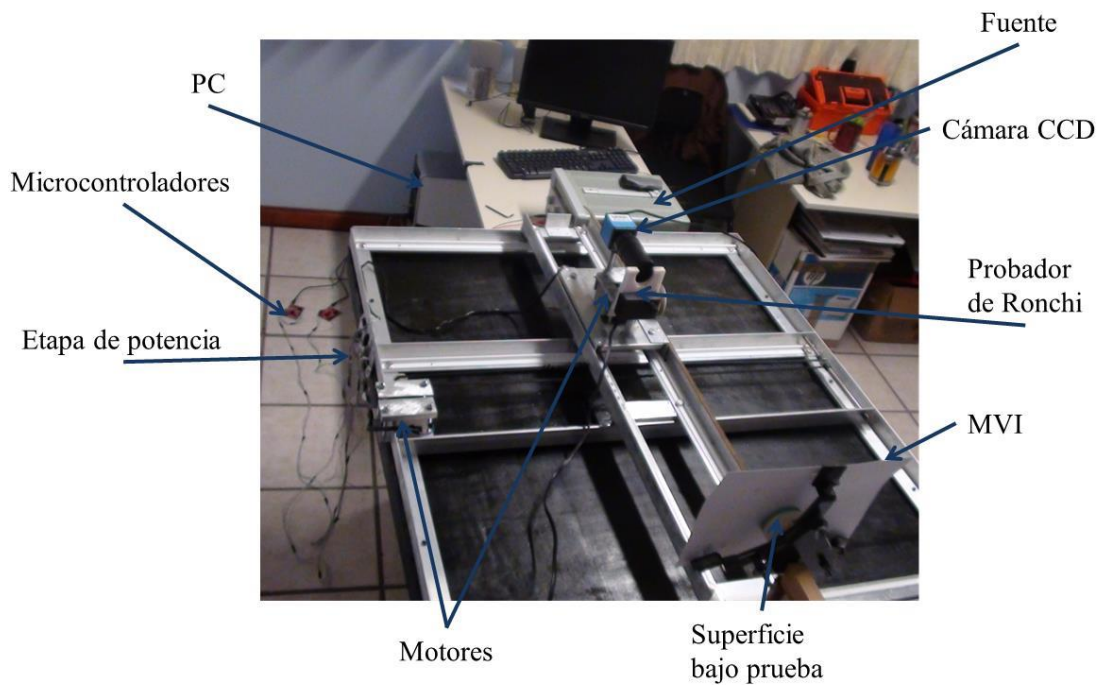


Fig. 49. Sistema implementado.

Los componentes anteriormente descritos ya integrados son controlados por la PC para posicionar el probador de Ronchi y la cámara CCD cerca del centro de curvatura de la

superficie óptica; en la sección siguiente describiremos el programa principal que controla al funcionamiento del sistema para realizar dicha acción.

5.3 Programa principal.

Para poder colocar el probador de Ronchi y la cámara CCD cerca del centro de curvatura de la superficie óptica se desarrolló un programa general que integra los programas descritos en el capítulo 4. Para que este programa funcione correctamente él técnico previamente debe realizar lo siguiente:

1. Colocar la superficie bajo prueba en la montura, asegurando que el eje óptico de la superficie bajo prueba se encuentre horizontalmente. Para esto, el técnico requiere iluminar la superficie con un láser colocado arriba del probador de Ronchi como lo muestra la figura 50 y apuntar a la superficie bajo prueba en el centro, el técnico debe mover los tornillos de la montura lo necesario para que el láser regrese en la misma dirección.

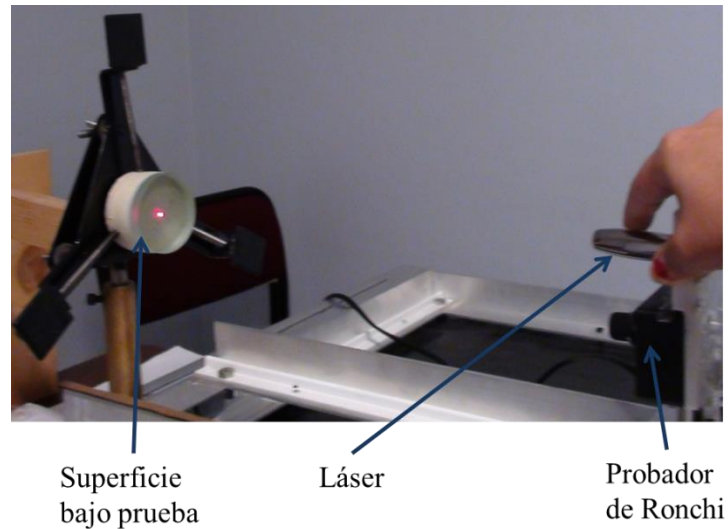


Fig. 50. Colocación del láser.

2. Imprimir las MVI correspondientes a dicha superficie y pegarlas en las orejas de la montura, cuidando que el centro de las marcas coincida con el centro de la superficie, para esto se pueden trazar finamente con una regla líneas en la parte trasera de la hoja que pasen por el centro, esto para ayudar al técnico a colocar las

marcas haciendo coincidir el centro de la marca con el centro de la lente como lo muestra la figura 51.

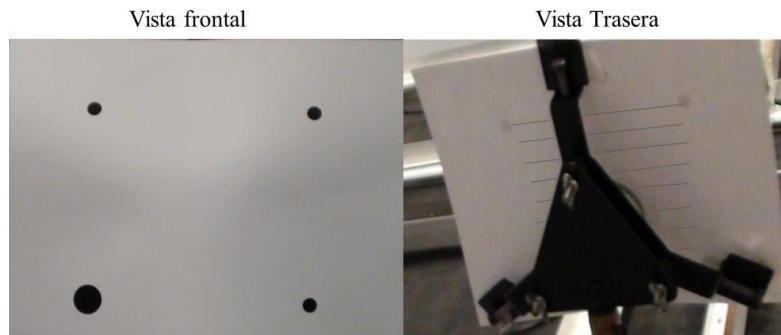


Fig. 51. MVI colocadas en la montura. En la vista trasera se observa las líneas de guía para colocar las MVI.

3. Colocar el sistema en home como lo muestra la figura 52, es decir, recorrer los rieles superiores hasta topar del lado opuesto a donde se encuentra el motor inferior y recorrer la montura donde se encuentra el probador de Ronchi y la cámara CCD hasta topar del lado opuesto de la superficie óptica (en la esquina).



Fig. 52. Posición de Home del sistema.

4. Si no se encuentran dentro del sistema los valores de la superficie a evaluar el técnico deberá introducirlos en la tabla con el formato que se muestra la tabla 8 (ver manual de usuario que se encuentra en el Anexo 6).

Tabla 8. Formato para introducir los valores ideales de la superficie bajo prueba.

ID (Distancia Vertical de la Marca)	DM (Diámetro de la Superficie)	RC (Radio de Curvatura Paraxial)	NF (Número de franjas del Ronchigrama)	DR (Distancia a la que se debe observar el Ronchigrama)
13 cm	5.5 cm	40.1851cm	9	38.2 cm

5. Encender las fuentes de alimentación y verificar que en el tablero se encuentren a 5 Voltios como lo muestra la figura 53.

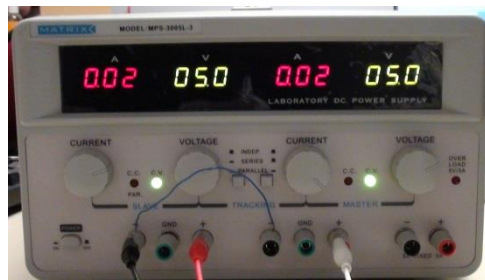


Fig. 53. Muestra la fuente de alimentación.

6. Poner en ejecución el programa (ver manual de usuario que se encuentra en el Anexo 6). Una vez puesto en ejecución el sistema principal funciona, como lo muestra el diagrama de flujo de la figura 54:

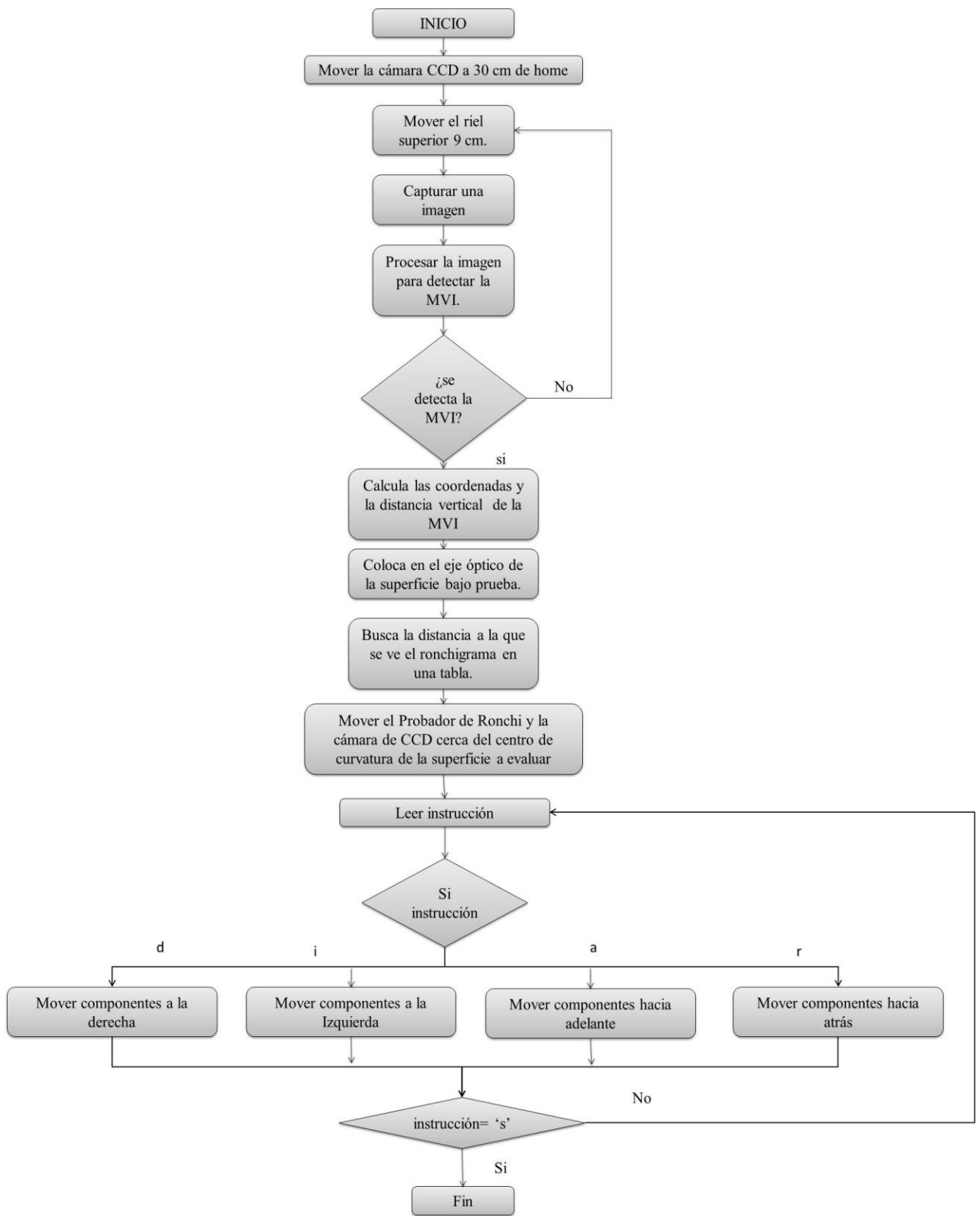


Fig. 54 Diagrama de flujo del funcionamiento del programa principal.

Como se puede observar en el diagrama de flujo de la figura 54, el programa primeramente posiciona al probador de Ronchi y a la Cámara CCD a una distancia de 30 cm con respecto a la posición de inicio del sistema (home), a la cual captura correctamente las MVI (esta distancia fue obtenida experimentalmente).

Después realiza un desplazamiento horizontal de 9 cm, esto nos garantiza que siempre va a tomar un patrón completo de la MVI, ya que la distancia a lo ancho entre un vértice y otro de una MVI es siempre de 15 cm. Una vez recorrido los 9 cm se detiene y captura una imagen, esta imagen es procesada en busca de la MVI, si no la encuentra recorre nuevamente 9 cm, para después detenerse y capturar una nueva imagen para buscar la MVI. El proceso se repite hasta encontrar la MVI.

Una vez encontrada la marca, calcula las coordenadas de los vértices y la distancia vertical entre ellos. Después corrige la posición a la que se encuentra la cámara y la posiciona en el eje óptico de la superficie bajo prueba (programa de corrección de coordenadas). Realizado esto, busca en una tabla la distancia a la que se ve el ronchigrama utilizando la distancia vertical calculada como identificador (la tabla contiene los valores ideales de la superficie bajo prueba). Realizado esto, coloca los componentes cerca del centro de curvatura (distancia a la que se ve el ronchigrama).

Llegado a este punto, el programa despliega una serie de instrucciones que le permiten al técnico hacer correcciones en dado caso que los componentes se encuentren desfasados.

En esta etapa el algoritmo se encuentra a la espera de instrucciones y ahora el técnico debe realizar lo siguiente para poder capturar el patrón:

1. No apagar la fuente de alimentación. Esto permite que los motores sigan energizados y evita que sea fácil moverlos del lugar donde se encuentran.
2. Quitar las marcas de la montura, para descubrir la superficie óptica.
3. Colocar la rejilla en el probador de Ronchi; conectar el probador de Ronchi y encender el led como lo muestra la figura 55.

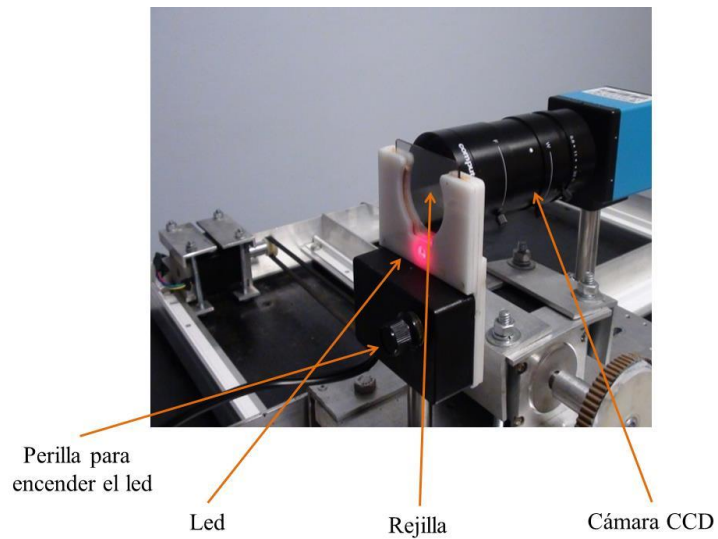


Fig. 55. Colocación de la rejilla en el probador.

4. Acceder al “Demo” del programa “IC capture” de la cámara CCD como lo muestra la figura 56. Aquí el técnico podrá observa la imagen del ronchigrama que está capturando la cámara CCD (ver figura 57).

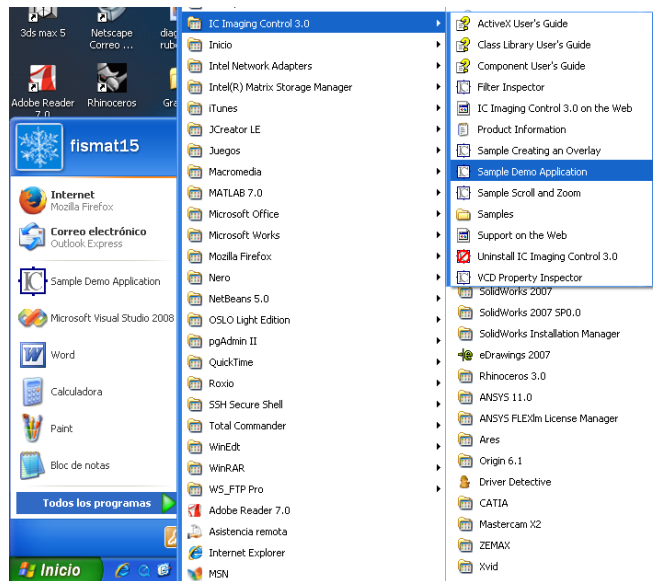


Fig. 56. Ruta de acceso al “Demo” del programa IC Capture.



Fig. 57. Programa Demo “IC Capture”

5. El programa espera indicación del técnico para mover la cámara de CCD y el probador de Ronchi de paso en paso o para terminar como lo muestra la figura 58. Esto si es necesario, es decir, si el técnico según su experiencia considera que el patrón obtenido no es el esperado, por lo cual con un pequeño movimiento a la derecha, izquierda, adelante o atrás, podrá obtener el patrón esperado.

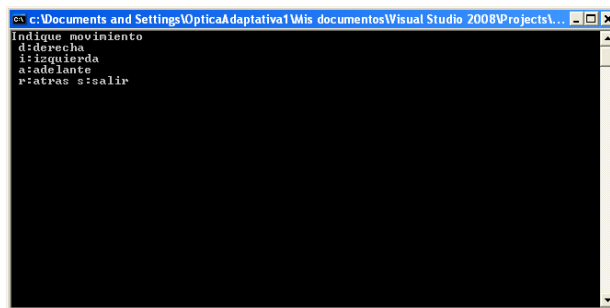


Fig. 58 Programa en espera de instrucciones.

6. El programa Demo de “IC Capture” le permite al técnico modificar el tiempo de exposición de la imagen para cambiar la intensidad de las franjas, esto a través de la ventana de configuración del programa como lo muestra la figura 59. Esto se realiza hasta obtener la intensidad de las franjas deseada.

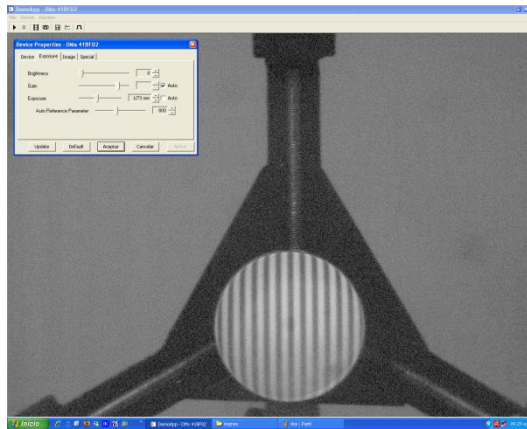


Fig. 59. Muestra el cambio de exposición en la imagen.

7. Una vez que el patrón se encuentra como el técnico lo requiere capturar la imagen con el botón de “snapshot” del programa “IC Capture”.

En el anexo 5, se encuentra el código fuente del programa y una explicación más detallada. El manual de usuario explica más a detalle el funcionamiento del sistema, este se encuentra en el anexo 6.

Capítulo 6. Pruebas y análisis de resultados.

En este capítulo se presentan los resultados que se obtuvieron en las pruebas experimentales con el sistema desarrollado. Las pruebas consistieron en verificar el posicionamiento y el número de franjas en el patrón a capturar, cuantificando la incertidumbre en el posicionamiento para su corrección manual. Se realizaron cinco pruebas que a continuación se describen, para ello se utilizó una superficie óptica con las siguientes características: diámetro de 5.5 cm; radio de curvatura paraxial de 40.1851 cm; distancia a la que se observa el ronchigrama 38.2 cm y se deben observar once franjas.

La prueba uno consistió en colocar la superficie óptica bajo prueba en la montura y alinearla manualmente; después se posiciona manualmente el probador de Ronchi con la rejilla a donde se desea observar el ronchigrama, se realizó una alineación manual moviendo las palomas de la montura donde se coloca la superficie bajo prueba para observar el patrón con once franjas en la cámara CCD y capturar la imagen. La imagen capturada se guardó y se tomó como referencia para compararla con la imagen que se obtuvo posteriormente cuando el sistema se posicionó semiautomáticamente.

Una vez tomada la imagen de referencia se quita la rejilla del probador de Ronchi y se colocan las MVI cuidando que coincida el centro de ellas con el de la superficie bajo prueba en la ordenada X. Después de esto se posicionó el sistema en home y se puso en marcha. Los resultados obtenidos de esta prueba se muestran en la figura 60, donde se observó un patrón muy diferente al patrón de referencia, a pesar de que el sistema llegó cerca del centro de curvatura y del eje óptico.

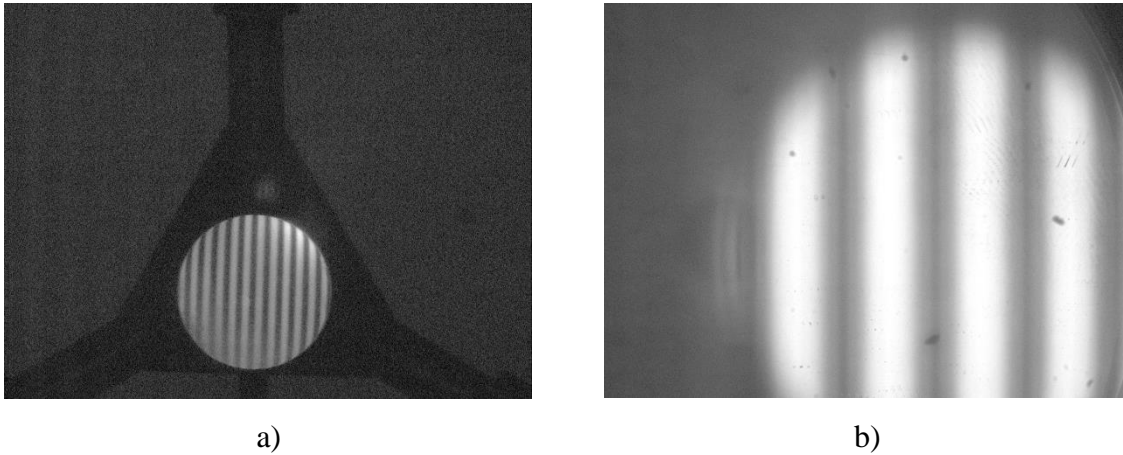


Fig. 60 a) Ronchigrama de referencia; b) Ronchigrama obtenido con el sistema.

Como el patrón tenía un menor número de franjas al de referencia, se realizó una corrección manual, es decir, se movió manualmente el probador y la cámara CCD para posicionarlo exactamente en donde se debía ver el patrón y los resultados obtenidos, se muestran en la figura 61. Lo que se observó en la imagen de la figura 61, nuevamente es un patrón diferente con tres franjas menos al de referencia, esto nos llevó a la conclusión que no se encuentra alineado, es decir, que se había movido la superficie bajo prueba.

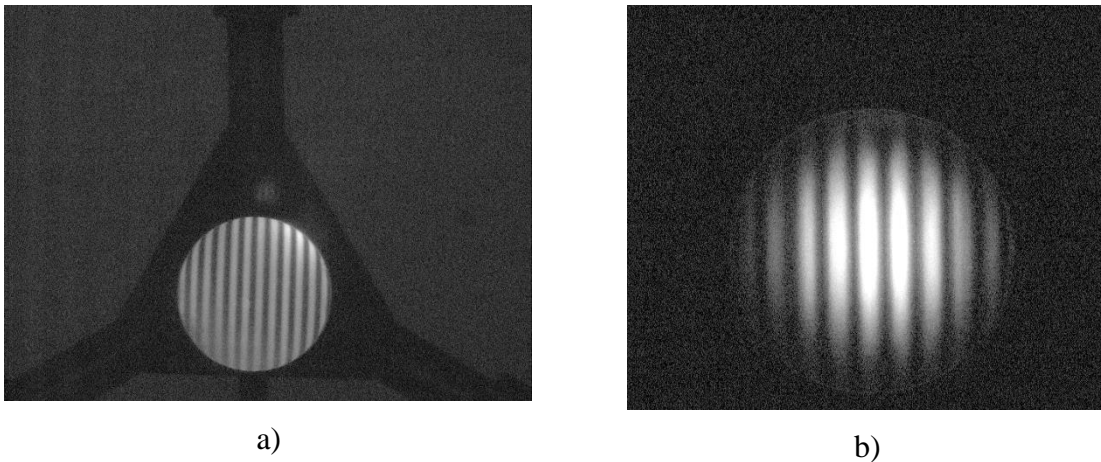


Fig. 61 a) Ronchigrama de referencia; b) Ronchigrama obtenido posicionando al sistema exactamente en donde se debería ver el patrón.

La desalineación de la superficie bajo prueba era provocada por la montura mecánica que la sostiene, ya que le afectaban las vibraciones que genera el motor superior

cuando se pone en movimiento el probador de Ronchi y la cámara CCD. Como se puede observar en la figura 62, la montura se encontraba sobre un ángulo de aluminio sujeto al sistema de 2GDL, el cual cada vez que el motor superior realizaba un desplazamiento adelante o hacia atrás le transmitía vibraciones que se magnificaban en la montura y movían la superficie óptica provocando una desalineación.

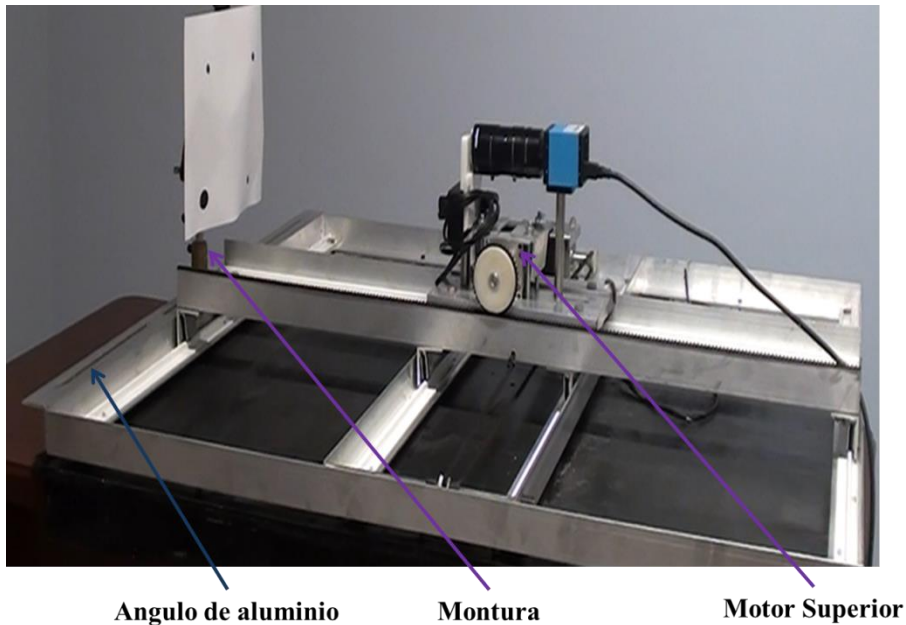


Fig. 62 Montura de aluminio que sostenía a la superficie bajo prueba.

Para resolver este problema que surgió, se decide aislar la montura de la superficie bajo prueba del sistema y sujetarla a la plataforma como lo muestra la figura 63, se colocó una viga de acero al carbono de media pulgada de espesor en la plataforma, y entre la plataforma y la viga, se colocó una cámara de llanta de bicicleta como amortiguador para aislar la montura, y reducir las vibraciones generadas por el movimiento del motor superior. Ahora la montura de la superficie bajo prueba se coloca sobre una base magnética que permite posicionarla a lo largo de la viga (ver figura 63). También se introducía un error en el programa que realiza el posicionamiento, ya que se consideraba como distancia a la que se observa el patrón de Ronchi, aquella medida desde la superficie hasta la lente de la cámara CCD, sin embargo la distancia correcta es desde la superficie bajo prueba, al a rejilla de Ronchi. Una vez corregidos los problemas que se presentaron se realizó la siguiente prueba.

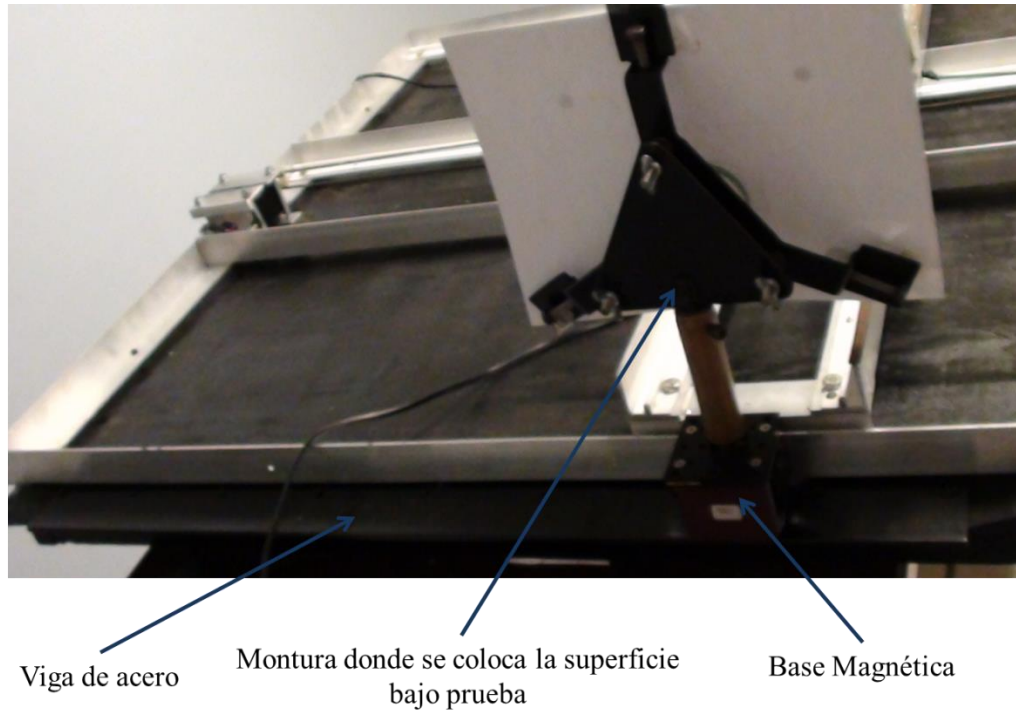


Fig. 63 Adaptación que se le realizó al mecanismo.

La prueba dos consistió en repetir la prueba uno, utilizando las adaptaciones mecánicas (colocando la montura de la superficie en el centro de la viga) y computacionales que se implementaron. Al comparar los ronchigramas obtenidos, como se puede ver en la figura 64, se mejoraron en gran medida los resultados ya que se observó una gran similitud en los patrones, pero aún existe un desfase lateral debido a que el sistema no se coloca exactamente en el eje óptico.

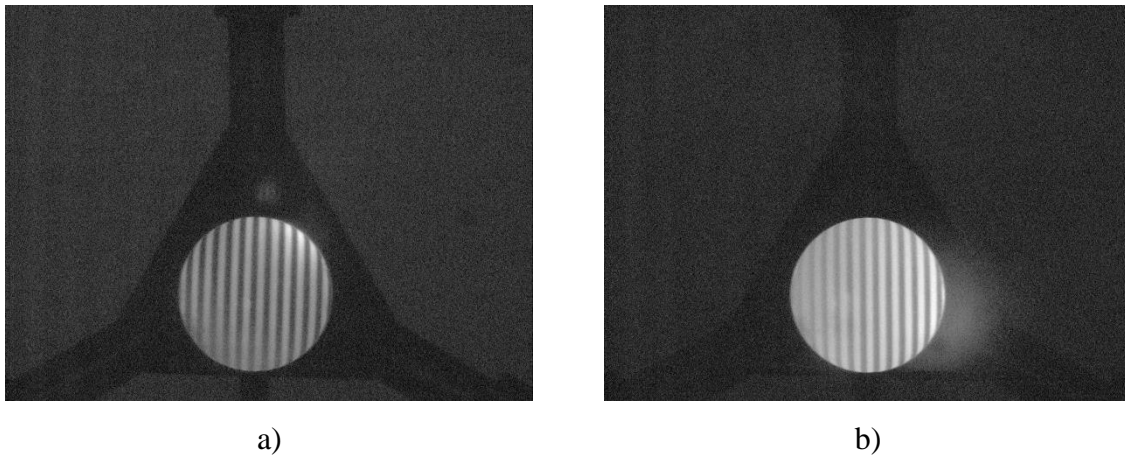


Fig. 64 a) Ronchigrama de referencia; b) Ronchigrama obtenido con el sistema.

Para la prueba tres, se realizó una vez más la alineación manual para obtener un patrón de referencia centrado, es decir, este patrón cuenta con el mismo número de franjas a la derecha y a la izquierda de la franja central como lo muestra la figura 65.

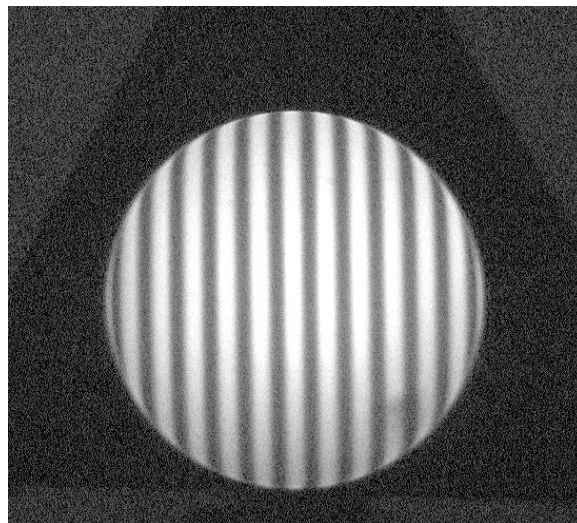


Fig. 65 Patrón de referencia Centrado.

Se colocaron nuevamente las marcas en la montura de la superficie bajo prueba y se posicionó en home el sistema para ponerse en marcha. Una vez que llegó cerca del centro de curvatura, se quitan las marcas y se coloca la rejilla, posteriormente se captura el patrón que es mostrado en la figura 66.

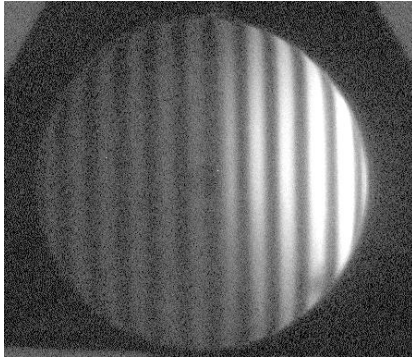


Fig. 66 Ronchigramma sin corrección de pasos.

Como se puede observar, se encuentra más iluminado en la parte derecha de la imagen, esto le indica al técnico que el sistema no se posicionó exactamente en el eje óptico de la superficie bajo prueba, por lo cual, el deberá realizar una corrección manualmente indicándole al motor los pasos que debe mover la montura. El técnico le indica al programa que se mueva cierto número de pasos a la izquierda o a la derecha, hasta encontrar la luz homogénea en la superficie. En esta prueba en específico, se realizaron 6 pasos a la izquierda y se obtuvo el ronchigramma que se muestra en la figura 67. Se observó que es un ronchigramma muy similar al de referencia.

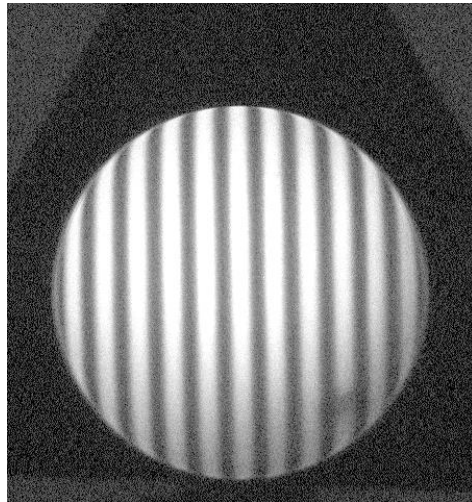


Fig. 67 Ronchigramma con corrección de pasos.

La prueba cuatro consistió en colocar la montura de la superficie bajo prueba en el extremo izquierdo del sistema como se ve en la figura 68, para verificar que el sistema también se alinea al eje de la superficie bajo prueba.

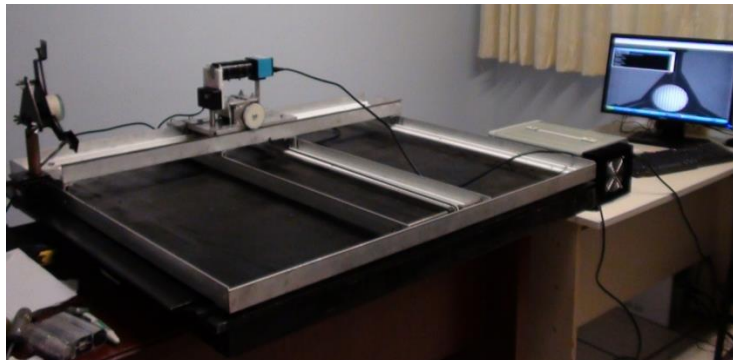
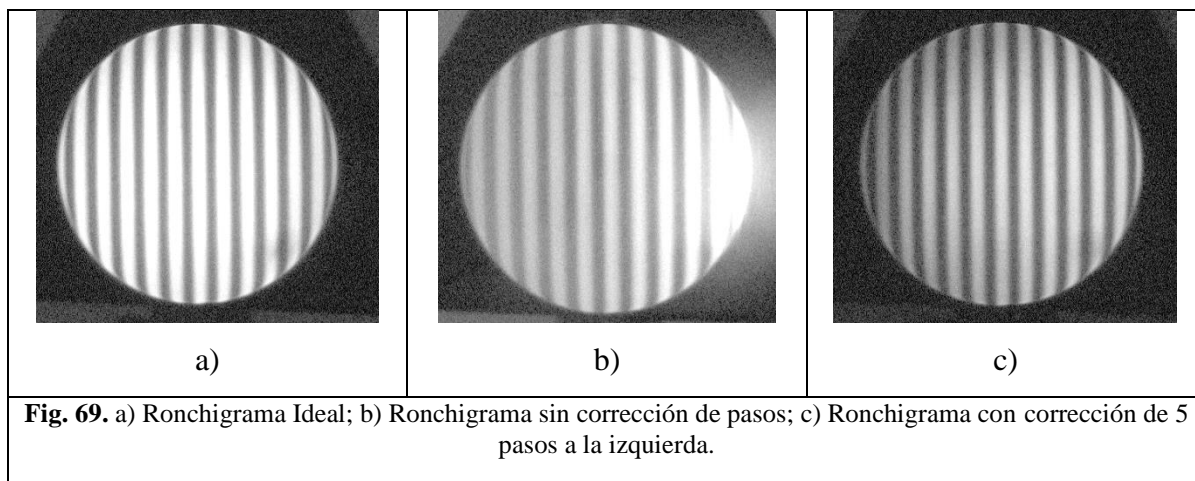


Fig. 68 Superficie posicionada en el extremo izquierdo.

En esta prueba, los resultados obtenidos son mostrados en la figura 69, donde se observó una vez más que el sistema no llega exactamente al eje óptico de la superficie bajo prueba y se realizó una corrección manual de 5 pasos hacia la izquierda.



La prueba cinco consistió en mover la montura ahora al extremo derecho como se ve en la figura 70, nuevamente para verificar que el sistema funciona correctamente en esta nueva posición.

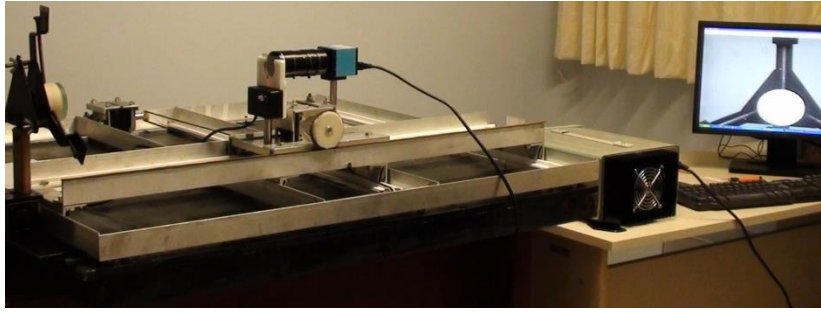
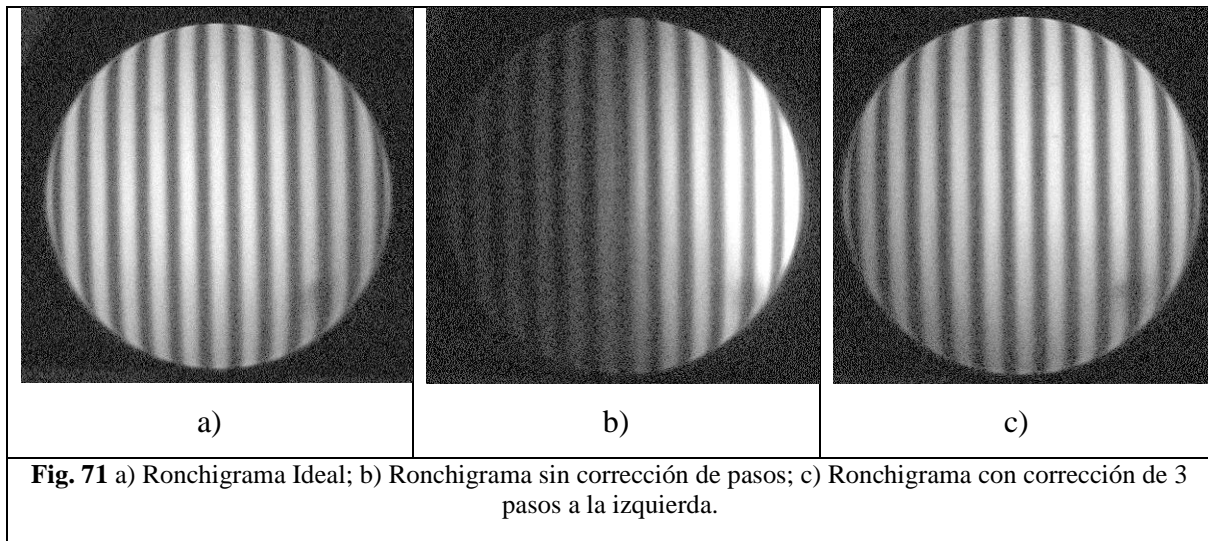


Fig. 70. Superficie posicionada en el extremo derecho.

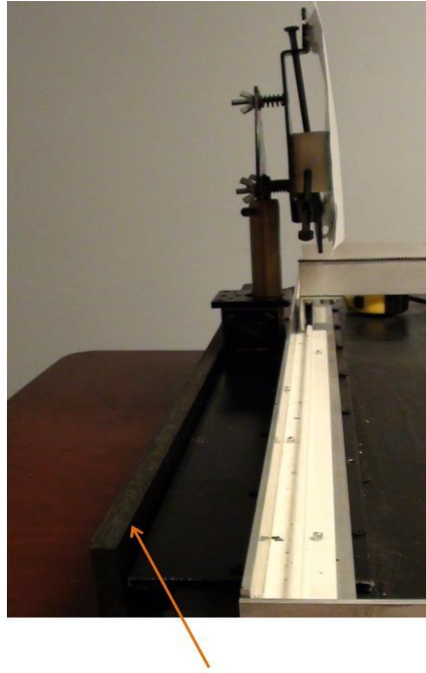
Esta prueba nos arrojó los resultados que se observan en la figura 71, donde una vez más el sistema no llega exactamente al eje óptico de la superficie bajo prueba y se realizó una corrección manual de 3 pasos.



Una prueba más se realizó para verificar cuantitativamente la alineación del sistema. Para ello, se utilizó el método de medición de los centros de las franjas sobre el eje X aplicado al ronchigramma obtenido en la prueba 3 (ver figura 67). Este método realiza un proceso de optimización utilizando algoritmos genéticos para aproximar el error en la superficie bajo prueba y calcula un orden de interferencia no entero 'm' como indicador de que el eje óptico del espejo no cruza por la franja central del ronchigramma [13]. En este caso el valor obtenido de 'm' es: -0.0157165527 por lo que se puede observar la cifra es del orden de centésimas lo que nos indica que el eje óptico de la superficie bajo prueba se

encuentra muy cercano la franja central del ronchigrama generado, es decir, el sistema semiautomático si permite alinear un probador de Ronchi con la superficie bajo prueba.

Analizando por qué sucedió que algunas ocasiones el sistema requiere menos pasos que en otros hacia la derecha o la izquierda, se llegó a la conclusión que depende mucho de la colocación de las MVI, es decir, si el centro de las MVI no coinciden exactamente con el centro de la superficie bajo prueba, dan lugar a estos errores. En este caso, como el sistema es semi automático, el técnico puede realizar esta corrección indicándole al motor los pasos que se debe mover, por medio del programa, ya que este, una vez que llega a la posición, se queda en espera de indicaciones y permite mover los componentes un paso a la vez, a la derecha a la izquierda, adelante o atrás. Otra de las posibles causas que introducen errores en el posicionamiento es que al cambiar la barra de aluminio que tenía unas ranuras para colocar la superficie bajo prueba por una viga de acero, esta última no cuenta con un sistema que permita colocar a la superficie bajo prueba siempre a la misma distancia. Por lo que se implementó un tope que sirva como guía para colocar a la montura de la superficie bajo prueba y que ésta quede a una misma distancia como lo muestra la figura 72.



Tope para colocar la superficie

Fig. 72. Tope colocado como referencia para poder colocar la superficie óptica siempre a la misma distancia a partir del tope.

Capítulo 7. Conclusiones y trabajos a futuro.

En este trabajo se desarrolló un sistema electromecánico semiautomático capaz de realizar la prueba de Ronchi, es decir, el sistema alinea semiautomáticamente un probador de Ronchi con una superficie reflectora bajo prueba que se encuentra en etapa de pulido, generando y capturando el ronchigrama producido. El sistema desarrollado consistió de un sistema de dos grados de libertad, guiado por un programa de control que utiliza Marcas Visuales Informativas (MVI) para su alineación.

El sistema desarrollado logra posicionar el probador de Ronchi cerca del centro de curvatura de la superficie bajo prueba con una precisión de ± 4 milímetros, esto debido a problemas que se presentan en el centrado de las MVI con respecto a la superficie bajo prueba, a las vibraciones presentes en el sistema debidas al motor superior, las cuales desalinean a la superficie bajo prueba. A pesar de estos problemas, el sistema le es funcional al técnico, debido a que puede realizar un ajuste fino manualmente y obtener el patrón deseado. Ya que aprovechando su experiencia, para él es relativamente sencillo saber hacia dónde tiene que mover el probador de Ronchi con solo ver éste, dado que él conoce como debe ser el ronchigrama ideal (el número de franjas deseadas y que se deben observar con la intensidad uniforme). Por ello, si en los resultados el técnico visualiza que el probador de Ronchi se posiciona en un lugar donde el ronchigrama se observa con más intensidad hacia la derecha, entonces el técnico sabe que tiene que mover el probador de Ronchi en sentido contrario. Esta acción la realiza el técnico sin un sistema semiautomático, es decir, cuando alinea manualmente, entonces ahora en vez de realizarlo así, le indica al programa que se desplace paso a paso para el lado requerido.

Las pruebas que se realizaron mostraron que, con las correcciones manuales se puede obtener el patrón deseado (para centrarlo se requirió un ajuste fino en la montura de la superficie utilizando una paloma). Esta corrección se encuentra dentro de lo aceptable del sistema de dos grados de libertad, permitiendo al técnico contar con un sistema

semiautomático para realizar la alineación en la prueba de Ronchi. Además la prueba que se realiza para medir cuantitativamente el posicionamiento del sistema en el eje óptico de la superficie bajo prueba nos muestra un valor muy pequeño, lo que nos indica que se alinea correctamente y le es de gran utilidad al técnico, debido a que, una vez posicionado el sistema facilita la observación del patrón desde la pantalla el cual se puede comparar con el ronchigrama ideal de la superficie cualitativa y cuantitativamente.

Actualmente existe un sistema que realiza la captura de ronchigramas para la aplicación del método de corrimiento de fase, moviendo con motores únicamente la rejilla en la prueba de Ronchi, en la tesis denominada: “Automatización de la prueba de Ronchi mediante un dispositivo opto electromecánico para la determinación del frente de onda” desarrollada en el INAOE [25]. En esta tesis, a diferencia de la antes mencionada, se realiza la alineación del probador de Ronchi y una superficie óptica en proceso de fabricación, por ello podemos decir que este es el primer sistema semiautomático desarrollado en su tipo, para implementar la alineación prueba de Ronchi, y aunque solo puede realizar la prueba en un plano facilita el alineado y captura de los patrones comparado con los procesos manuales que actualmente se realiza en los talleres. Como esta prueba se aplica en todo el proceso de pulido, las primeras inspecciones solo se realizan de manera cualitativa, solamente en la etapa final es cuando el técnico considera que la superficie ya tiene la forma deseada y debe realizar evaluaciones cuantitativas, para lo cual deberá realizar la prueba de manera controlada, es decir, en estas pruebas la colocación de la marca es fundamental y deberá realizarse con precisión.

El posicionamiento del sistema de 2GDL se logra gracias al uso de las MVI implementadas para esta aplicación, junto con la combinación de un sistema electromecánico sencillo y barato comparado con los sistemas mecánicos de rieles existentes en el mercado

Para mejorar el comportamiento del sistema, se propone a futuro modificaciones mecánicas a componentes del sistema como: mejorar la montura donde se coloca la superficie bajo prueba por una que permita las correcciones de tilt y que le afecten menos las vibraciones del sistema. También se puede incorporar una montura robusta donde se

coloquen las MVI y no sean afectadas por las vibraciones, ya que por mínimas que sean estas, introducen errores de alineación.

Bibliografía

- [1] E. Moreno García, "Automatización de procesos industriales", Valencia: Servicio de Publicaciones Camino de Vera, 1999.
- [2] A. Cordero Dávila y J. González García, "Análisis y diseño de una herramienta porosa a partir de herramientas anulares y de pétalo para el pulido clásico de superficies ópticas", Temas de Ciencia y Tecnología, vol. 11, nº 32, pp. 3-11, 2007.
- [3] D. Malacara, "Optical Shop Testing", 3 ed., New Jersey: A John Wiley & Sons, Inc., Publication, 2007.
- [4] D. A. a. J. Burge, "Optical Fabrication The Handbook of Optical Engineering", p. 36.
- [5] F. Reyes Cortés, "Robótica, Control de robots manipuladores", Puebla : Alfaomega, 2011.
- [6] California Institute of Technology, "Computational Vision", 2011. [En línea]. Disponible en: http://www.vision.caltech.edu/bouguetj/calib_doc/. [Último acceso: Agosto 2013].
- [7] P. M. Jiménez, «Página Web del departamento de Física aplicada de la Universidad de Córdoba,» Universidad de Córdoba, [En línea]. Available: <http://rabfis15.uco.es/lvct/tutorial/39/historia.htm>. [Último acceso: 04 Agosto 2012].
- [8] E. Hecht, Óptica, Madrid: Wesley Iberoamericana, 2000.
- [9] A. H. Velasco, Software de simulación de pulido de superficies ópticas utilizando el método clásico, Huajuapán de León Oaxaca: Universidad Tecnológica de la Mixteca, 2005.
- [10] G. M. C., "Imagen óptica, Manufactura", Augen Ópticos S.A de C.V, [En línea]. Disponible en: <http://www.imagenoptica.com.mx/pdf/revista47/tecnologia.htm>. [Último acceso: 8 8 2012].
- [11] Q. Technologies, "QED Technologies", [En línea]. Available: <http://qedmrf.com/about-qed>. [Último acceso: 25 Agosto 2012].

- [12] A. Cordero Dávila y J. González García, "Surface evaluation with Ronchi test by using Malacara formule, genetic algoritms and cubic splines, International Optical Desing", vol. 7652, p. 6, 2010.
- [13] A. Cordero Dávila, J. Gonzales García y I. Leal Cabrera, "Local and global surface errors evaluation using Ronchi test, without both approximation and integration", pp. 4817-4823, 2011.
- [14] M. E. Percino Zacarías, Entrevista, "Aplicación de la prueba de Ronchi en el Taller de Óptica del INAOE". Julio 2012.
- [15] J. González García, A. Cordero Dávila, I. Leal Cabrer, C. I. Robledo Sánchez y A. Santiago Alvarado, "Calculating petal tools using genetic algoritms", Appl Opt, vol. 45, nº 24, pp. 6126-6136, 2006.
- [16] J. González García, S. Vázquez Montiel, A. Santiago Alvarado, A. Cordero Dávila y G. Castro González, "A proposede desing and fabrication of lenses and mirrors from a set of pherical rings that produce desired energy distributions for solar energy applications", Elsevier Solar Energy, vol. 86, pp. 2205-2216, 2009.
- [17] P. T. Rodríguez-Piñero, "Introducción a los algoritmos genéticos y sus aplicaciones", Paseo de los Artilleros s/n Madrid 28032.
- [18] M. Gestal Pose, "Introducción a los algoritmos genéticos", Coruña: Tecnologías de la Informacion y Comunicaciones.
- [19] E. A. Torres, "Análisis y Diseño de Algoritmos Genéticos Paralelos Distribuidos", Málaga: Universidad de Málaga, 1999.
- [20] O. Robles, D. García y O. Gomez, "Algoritmo evolutivo multimodal para minimizar una función de dos variables".
- [21] Motion Control Systems, North America, Parker, [En línea]. Disponible en: http://www.parkermotion.com/products/Linear_Motor_Positioners____30_32_80_56_7_29.html. [Último acceso: 22 Diciembre 2012].
- [22] Schneider Electric, "Guía aplicativa Robot Cartesiano XY", [En línea]. Disponible en: http://www.equiposdidacticos.com/img/desarrollos/MESAXY_WEB.pdf.

- [Último acceso: 22 10 2012].
- [23] Campetella Robotic Center, "Campetella", [En línea]. Disponible en: www.campetella.it. [Último acceso: 12 Octubre 2012].
- [24] Screw Driven, "Automation tables", [En línea]. Disponible en: <http://emotionamerica.com/attachments/File/Cartian.pdf>. [Último acceso: 22 10 2012].
- [25] B. Cabrera Pérez, "Automatización de la prueba de Ronchi mediante un dispositivo opto electromecánico para la determinación del frente de onda", Puebla,Puebla: INAOE, 2011.
- [26] E. . J. Carletti, "Servomotores características básicas", [En línea]. Disponible en: http://robots-argentina.com.ar/MotorServo_basico.htm. [Último acceso: 15 02 2013].
- [27] Upv, "Motores a pasos", [En línea]. Disponible en: <http://server-die.alc.upv.es/asignaturas/lased/2002-03/MotoresPasoaPaso/Motorespasoapaso.pdf>. [Último acceso: 21 01 2013].
- [28] V. Rybak, «Environment infrastructure and multi-sensor integration for autonomous service robotics,» *International journal of circuits, System and signal prosesing*, vol. 5, n° 3, pp. 201-211, 2011.
- [29] Velmex Inc.co, "Velmex", [En línea]. Disponible en: http://www.velmex.com/xslide/motor_xslide.html. [Último acceso: 22 02 2013].
- [30] SKF, "SKF", [En línea]. Disponible en: <http://www.skf.com/group/products/linear-motion/linear-guides-and-tables/linear-tables/driven-tables/profile-rail-guide-tables-lts-linear-motor-driven/index.html>. [Último acceso: 22 02 2013].
- [31] Parker, "Parker motion", [En línea]. Disponible en: http://www.parkermotion.com/products/Linear_Motor_Positioners____30_32_80_56_7_29.html. [Último acceso: 5 03 2013].
- [32] OpencncMéxico, "OpencncMéxico", [En línea]. Disponible en: http://www.opencncmexico.com/index.php?main_page=contact_us. [Último acceso: 05 03 2013].

- [33] Techno.Inc., "Linear Motion System", [En línea]. Disponible en: http://www.technocnc.com/eBlasts/Linear_Motion/Article1-Stepper_or_Servomotor.htm. [Último acceso: 22 Diciembre 2012].
- [34] J. Cavajal, "Modelamiento y Diseño de Robots Industriales", Colombia, 207.
- [35] R. L. Norton, "Diseño de máquinas", Pearson educación, Prentice Hall,, 1999.
- [36] Texas Instruments, "ti_launchpad", [En línea]. Disponible en: www.ti.com. [Último acceso: Marzo 2013].
- [37] R. M. Haralick y L. G. Shapiro, "Computer and Root Vision", vol. 2, Addison-Wesley Publishing Company, 1993, p. 630.
- [38] R. Haralick, C. Lee, K. Ottenberg y N. Nolle, "Re-view and analisis of solutions of the three point", International Journal of Computer Vision, vol. 13, n° 3, pp. 331-356, 1994.
- [39] D. Arcena Pizarro, P. Campos y C. Luis Tozzi, "Comparación de Técnicas de Calibración de Cámaras Digitales", Fac.Ing., vol. 13, n° i, pp. 57-67, 2005.
- [40] R. Haralick y L. Shapiro, "Computer and Robot Vision", Addison-Wesley, vol. 1, 1992.
- [41] V. Rybak y . D. R. Vásquez-Hernández, "Herramientas para adaptar el entorno a las capacidades de un robot de servicio en interiores", de 3er. Congreso Nacional de Mecatrónica, Mexico,Hidalgo,Pachuca, 2009.
- [42] V. Rybak y D. Vásquez, "Local Structuring of Unstructured Service Robots Enviroment" de 2o. Congreso Nacional y 1er. Congreso Internacional de Computación e Informática, Cd. Del Carmen, Campeche, México. , 2010.
- [43] V. Rybak y A. G. Rivera Morán, "Nueva técnica para calibración de los parámetros de distorsión de la lente de una cámara digital", Somi, Leon, Guanajuato, 2005.
- [44] V. Rybak, "Herramientas para construir sistemas estereoscópicos canónicos usando cámaras comerciales", Congreso Nacional de Mecatrónica, pp. 25-27, 2009.
- [45] R. Willson, "Modeling and Calibration of Automated Zoom Lenses", PhD thesis, Carnegie Mellon University, 1994, pp. 1-177.

Anexo 1. Programa de detección de las MVI.

Este programa fue desarrollado por el autor Dante Raúl Vásquez [41,42] Técnico del laboratorio de robótica inteligente de la Universidad Tecnológica de la Mixteca. Este programa consiste en detectar las zonas homogéneas de una imagen para etiquetarlas. En esta tesis se adapta como una función que recibe como entrada una imagen y regresa el número de zonas homogéneas en la imagen, las MVI empleadas son 4 centroides en una hoja blanca, por lo que el programa retorna 4 zonas homogéneas que las representan. El código fuente de esta función es el siguiente:

```
/*Función para etiquetar las zonas homogéneas*/
int componentLabeling(vector<int*> *pCoord, map<int, vector<int*>> *cC, int numbOfComponent, int x, int
tot)

{
    //Declaración de las variables locales
    int *tempCoor, *tempC2, i;
    map<int, vector<int*>>::iterator itMap;
    vector<int*> components, components1;
    vector<int*>::iterator itVect, iteC, itC;
    vector<int*>::iterator itVect_aux;
    //Buscamos en tres posiciones x-1, x y x+1
    for(i=0,--x; i < 3; i++, x++)
        { //Buscamos en todos los componentes previos (linea previa)
            for(itVect=pCoord->begin(); itVect < pCoord->end(); itVect++)
                { tempCoor = (int*)(*itVect); //Componente de la linea previa
                    if((tempCoor[Xi] <= x) && (x <= tempCoor[Xf]))
                        { //Encontramos un componente para el x dado
                            if(numbOfComponent != tempCoor[N])
                                { //Si el numero de componente actual difiere del de la linea previa
                                    if(numbOfComponent != 0){ //Es necesario renombrar
                                        for(iteC = pCoord->begin(); iteC != pCoord->end(); iteC++)
                                            { //Buscamos en la fila previa el componente
```



```

tempC2=(int*)(*iteC);
// a ser renombrado
if(tempC2[N] == numbOfComponent)
{ //Encontramos componente
tempC2[N] = tempCoor[N];
//Cambiamos su etiqueta y buscamos si tiene mas elementos
if( (itMap = cC->find(numbOfComponent)) != cC->end() )
{ //Buscamos a los componentes de numbOfComponent
components = (*itMap).second;
//Guardamos esos componentes
cC->erase(numbOfComponent);
//Borramos la entrada en el mapa
if( (itMap = cC->find(tempCoor[N])) != cC->end() )
{ //Si ya existe una entrada para tempCoor[N]
components1 = (*itMap).second;
//Guardamos los componentes de tempCoor[N]
for(itC=components.begin(); itC != components.end(); itC++)
components1.push_back((*itC));
//Copiamos los componentes de numbOfComponent a tempCoor[N]
cC->erase(tempCoor[N]); //Borramos la entrada tempCoor[N]
cC->insert(pair<int, vector<int*>>(tempCoor[N],components1));
}
}
}
}
}
numbOfComponent = tempCoor[N]; //cambiamos el numero del componente actual
}
//break; //se quita: no es necesario
} //encontramos componente
} //busqueda en linea previa
} //fin de busqueda en las 3 posiciones
if(numbOfComponent == 0) //Si no se encontro ningun numero de componente
if(tot != 0)
numbOfComponent = tot+1;
else
numbOfComponent++;

return numbOfComponent;
}

// función para detectar las zonas homogeneas.
void runLenghtEncoding(map<int,vector<int*>> *conectedComponentsaux, bool dir,IplImage* frameRGB)
{
// variables locales
int x, y, i, j, numbOfComponent, numGlobComp;
bool init = FALSE;
int *coordinates; //Xi, Xf, Y, N
vector<int*> pCoord, cCoord;
map<int, vector<int*>>::iterator itMap;
unsigned char pixel;
vector<int*>::iterator itVect,itVect_aux;
vector<int*> components;

```

```

//Establecemos la direccion de escaneo
if(!dir){//Si dir es falso entonces escaneo horizontal
    x = frameRGB->height;
    y = frameRGB->width;
}else{//Si dir es verdadero entonces escaneo vertical
    x = frameRGB->width;
    y = frameRGB->height;
}
coordinates = new int[4];
for(i=0,numOfComponent=0,numGlobComp=0; i < x; i++){
    for(j=0; j < y; j++)
    { if(!dir)
        pixel = (((unsigned char *) (frameRGB->imageData + i*frameRGB->widthStep))[j]);
        else
            pixel = (((unsigned char *) (frameRGB->imageData + j*frameRGB->widthStep))[i]);
        if( pixel == BLACK) && !init )
        { init = TRUE;//Almacenamos las posiciones iniciales
            coordinates[Y] = i;
            coordinates[Xi] = j;
            coordinates[N] = componentLabeling(&pCoord, conectedComponentsaux,
            numOfComponent, j, numGlobComp);
            numOfComponent = coordinates[N];
        }else if( pixel == WHITE) && init )
        { init = FALSE;//Almacenamos las posiciones finales
            coordinates[Xf] = j-1;
            cCoord.push_back(coordinates);
            if(numOfComponent > numGlobComp)
                numGlobComp++;
            coordinates = new int[4];
            numOfComponent = 0;
        }else if(init)
            { coordinates[N] = componentLabeling(&pCoord,
            conectedComponentsaux, numOfComponent, j, numGlobComp);
            numOfComponent = coordinates[N];
            }
        }
    }//Termina un escaneo
    init = FALSE;
    numOfComponent = 0;
    //Indicamos que aun no se ha asignado un numero al sig. componente
    int *dst;
    for(itVect=pCoord.begin(); itVect < pCoord.end(); itVect++){
        dst = new int[4];
        dst = (int *)*itVect;
        if( (itMap = conectedComponentsaux->find(dst[N])) !=
        conectedComponentsaux->end() )
        { //Ya existe el componente
            components = (*itMap).second;
            components.push_back(dst);
            conectedComponentsaux->erase(dst[N]);
            conectedComponentsaux->insert(pair<int,vector<int*>>(dst[N],components));
        }else{//Creamos un nuevo vector para almacenar el nuevo componente
            vector<int*> *t = new vector<int*>;
            t->push_back(dst);
        }
    }
}

```

```

        conectedComponentsaux->insert(pair<int, vector<int*>>(dst[N],*t));
        //delete(t);
    }
    //delete(dst);
}
pCoord.clear();
//Copiamos cCoord a pCoord
for(itVect=cCoord.begin(); itVect < cCoord.end(); itVect++){
    dst = new int[4];
    dst = (int*)*itVect;
    pCoord.push_back(dst);
    //delete(dst);
}
cCoord.clear();
}
//delete(coordinates);
}

```

//función que detecta las zonas homogéneas como centroides.

```

map<int, double*> calcCentroids(IplImage* frameRGB1)
{/(int t, int l, int minArea, int maxArea, bool show){
    int minArea = 70;
    int maxArea = 1237776;
    unsigned int addX, addY, numbPoints, xmin, xmax, ymin, ymax, i;
    double *centroid;
    map<int, double*>::iterator itCent;
    map<int, vector<int*>> conectedComponents;
    map<int, double*> centroids;
    int area;
    vector<int*>::iterator itVect, itVect_aux;
    vector<int*> components;
    map<int, vector<int*>>::iterator itMap;
    conectedComponents.clear();
    centroids.clear();
    //Encontramos las zonas homogéneas
    runLenghtEncoding(&conectedComponents, FALSE, frameRGB1); //FALSE=Escaneo horizontal
    //this->findHomogeneousZones(&conectedComponents, FALSE, frameRGB);

    if(conectedComponents.size() != 0){
        //Recorremos el mapa para calcular el area de cada componente, si el área esta en el rango adecuado
        //entonces calculamos el centroide del componente
        for(itMap=conectedComponents.begin(); itMap != conectedComponents.end(); itMap++){
            {components = (*itMap).second;
            //Calculamos el área del componente
            for(itVect=components.begin(), area = 0; itVect != components.end(); itVect++){
                {area += ((*itVect)[Xf] - (*itVect)[Xi]) + 1;
                }//fin for
            if((minArea <= area) && (area <= maxArea))
                {//Calculamos el centroide del componente
                    centroid = new double[3];
                    addX = numbPoints = xmax = 0;
                    xmin = 0xFFFF;
                }
            }
        }
    }
}

```


Anexo 2. Programa que calcula las coordenadas.

Este programa fue desarrollado por Dante Raúl Vásquez [41,42] y consiste en calcular las coordenadas correspondientes a los vértices de las MVI. En esta tesis se utilizó con el mismo fin pero como una función que recibe como entrada las zonas homogéneas de una imagen, y regresa las coordenadas en las que se encuentran estas. A continuación se muestra el código fuente de dicha función:

```
double* cuatroCentds(map<int, double*> centds,int crd)
    //Encuentra los cuatro centroides correspondientes
    map<int, double*>::iterator itMap,itMapaux;
    //a los círculos de la marca y establece sus coord.
    double* cordCentds=NULL;
        //para el procesamiento de encontrar cosenos direc.
    double* cordCirc=new double[8];
    double* cordCircFin = new double[8];
    vector<int*> crdsA;
    vector<int*>::iterator itVect,itVect_aux;
    int k=0;
    double maxY=0,minY=479;

    itVect_aux=crdsA.begin()+crd;
    if(centds.size()<4){
        printf("Error: No se encontraron valores de marca (cuatroCentds).\n\n");
        return cordCircFin;
    }
    else{
        for(int d=0;d<2;d++){
            minY=479;
            itMap=centds.begin();
            for(itMap;itMap!=centds.end();itMap++){
                cordCentds=(*itMap).second;
                if(cordCentds[1]<=minY)
                    { //Se encuentra coordenada Y mínima dos veces
                        minY=cordCentds[1];
                        itMapaux=itMap;
                    }
            }
            //fin for
            cordCentds=(*itMapaux).second;
            cordCirc[k]=cordCentds[0];//X
            cordCirc[k+1]=cordCentds[1];//Y
            k+=2;
            centds.erase(itMapaux);
        }
        //fin for
        for(int d=0;d<2;d++){
            maxY=0;
            itMap=centds.begin();
            for(itMap;itMap!=centds.end();itMap++){
                cordCentds=(*itMap).second;
                if(cordCentds[1]>=maxY)
```

```

        { //Se encuentra coordenada Y máxima dos veces
          maxY=cordCentds[1];
          itMapaux=itMap;
        } //fin if
      } //fin for
      cordCentds=(*itMapaux).second;
      cordCirc[k]=cordCentds[0]; //X
      cordCirc[k+1]=cordCentds[1]; //Y
      k+=2;
      centds.erase(itMapaux);
    } //fin for
    //Ordenar centroides // P3-

P4      int i_aux=0;
        double minX=639,maxX=0; //
        |
P2      for(int d=0;d<7;d=d+2){ // P1-

          if(cordCirc[d]<=minX && cordCirc[d+1]<=minY+20){ //se encuentra P3
            minX=cordCirc[d];
            i_aux=d;
          } //fin if
        } //fin for
        cordCircFin[0]=cordCirc[i_aux]; //+(*itVect_aux)[0];
        cordCircFin[2]=cordCirc[i_aux+1]; //+(*itVect_aux)[1];
        minX=639,maxX=0;
        for(int d=0;d<7;d=d+2){
          if(cordCirc[d]>=maxX && cordCirc[d+1]<=minY+20){ //se encuentra P4
            maxX=cordCirc[d];
            i_aux=d;
          } //fin if
        } //fin for
        cordCircFin[1]=cordCirc[i_aux]; //+(*itVect_aux)[0];
        cordCircFin[3]=cordCirc[i_aux+1]; //+(*itVect_aux)[1];
        minX=639,maxX=0;
        for(int d=0;d<7;d=d+2){
          if(cordCirc[d]<=minX && cordCirc[d+1]>=maxY-20){ //se encuentra P1
            minX=cordCirc[d];
            i_aux=d;
          } //fin if
        } //fin for
        cordCircFin[4]=cordCirc[i_aux]; //+(*itVect_aux)[0];
        cordCircFin[6]=cordCirc[i_aux+1]; //+(*itVect_aux)[1];
        minX=639,maxX=0;
        for(int d=0;d<7;d=d+2){
          if(cordCirc[d]>=maxX && cordCirc[d+1]>=maxY-20){ //se encuentra P2
            maxX=cordCirc[d];
            i_aux=d;
          } //fin if } //fin for
        cordCircFin[5]=cordCirc[i_aux]; //+(*itVect_aux)[0];
        cordCircFin[7]=cordCirc[i_aux+1]; //+(*itVect_aux)[1];
    } //fin else
    delete (cordCirc);
    return cordCircFin; }

```

Anexo 3. Función para capturar la imagen y para realizar la binarización de la imagen.

El siguiente código se desarrolló como una función que se utiliza en el programa principal para capturar una imagen con la cámara IMAGENSOURCE, y después realizar la binarización empleando las funciones de OpenCV. Esta función solo se manda a llamar y retorna un archivo de imagen. La función para realizar la binarización de la imagen recibe como parámetros de entrada una imagen y retorna la imagen binarizada. Los códigos de estas se enlistan a continuación:

// Función para capturar una imagen.

```
IplImage* Capturarimagen()
{
    IplImage* imgaux = 0;
    system("C:/WINDOWS/execamara/pruebacamarawin32.exe");
    Sleep(5000);
    system("C:/WINDOWS/execamara/prueba.exe");
    Sleep(5000);
    imgaux = cvLoadImage("C:/Documents and Settings/OpticaAdaptativa1/Mis documentos/Visual
Studio 2008/Projects/pruebaOCV/pruebaOCV/imagen.bmp");
    if(imgaux == NULL)
        printf(" La imagen no se pudo cargar NULL");
    return imgaux;
}
```

// Función para realizar la binarización de una imagen.

```
IplImage* MarcaBinarizada(IplImage* frameaux)
{
    IplImage * framebinarizado;
    framebinarizado=cvCreateImage(cvGetSize(frameaux), IPL_DEPTH_8U, 1);
    //Cambiamos de BGR a escala de grises y se quita distorsión a la imagen.
    cvCvtColor(frameaux,framebinarizado,CV_RGB2GRAY);
    frameaux=framebinarizado;
    cvAdaptiveThreshold(frameaux, framebinarizado, 255, CV_ADAPTIVE_THRESH_GAUSSIAN_C,
CV_THRESH_BINARY, (unsigned char)155);
    return framebinarizado;
}
```

Anexo 4. Función para mover los motores.

Se desarrolló una función que permite mover los motores en diferente sentido, para ello utiliza el puerto serial (emulado en la PC vía USB) y manda al microcontrolador una cadena de caracteres en la secuencia A B C D para mover en un sentido, y en la secuencia D C B A para mover al sentido contrario. El microcontrolador se encuentra previamente configurado para recibir dichas secuencias. La función recibe como parámetros de entrada el motor al cual se le va a aplicar el movimiento y el sentido de giro. El código fuente se muestra a continuación:

```
void Mueve(bool sentido, float cm, string motor)// sentido False=derecha=Adelante True=atrás=izquierda
{
    PORT puerto;
    bool recib;
    char entrada;
    char* Cadena1;
    char* Cadena2;
    char* Cadena3;
    char* Cadena4;
    int i=0;
    float cont1=0;

    if(sentido== true)
    {
        puerto=AbrirSerial(motor,9600);
        while(cont1<cm)
        {
            entrada='D';
            Cadena1=&entrada;
            recib=EnviaSerial(puerto, Cadena1);
            i = 90000000;
            do i--;
            while(i != 0);

            entrada='C';
            Cadena2=&entrada;
            recib=EnviaSerial(puerto, Cadena2);
            i = 90000000;
            do i--;
            while(i != 0);

            entrada='B';
            Cadena3=&entrada;
            recib=EnviaSerial(puerto, Cadena3);
            i = 90000000;
            do i--;
            while(i != 0);

            entrada='A';
            Cadena4=&entrada;
```



```

        recib=EnviaSerial(puerto, Cadena4);
        i = 90000000;
        do i--;
        while(i != 0);
        //printf("%d",cont1);
        cont1++;
    }
    CerrarSerial(puerto);
}
else
{
    puerto=AbrirSerial(motor,9600);
    while(cont1<cm)
    {
        entrada='A';
        Cadena1=&entrada;
        recib=EnviaSerial(puerto, Cadena1);
        i = 90000000;
        do i--;
        while(i != 0);

        entrada='B';
        Cadena2=&entrada;
        recib=EnviaSerial(puerto, Cadena2);
        i = 90000000;
        do i--;
        while(i != 0);

        entrada='C';
        Cadena3=&entrada;
        recib=EnviaSerial(puerto, Cadena3);
        i = 90000000;
        do i--;
        while(i != 0);

        entrada='D';
        Cadena4=&entrada;
        recib=EnviaSerial(puerto, Cadena4);
        i = 90000000;
        do i--;
        while(i != 0);
        //printf("%d",cont1);
        cont1++;
    }
    CerrarSerial(puerto);
}
}

void Paso(bool sentido, string motor,int contpaso)
{
    PORT puerto;
    bool recib;
    char entrada;
    char* Cadena1;
    char* Cadena2;

```

```

char* Cadena3;
char* Cadena4;
int i=0;
puerto=AbrirSerial(motor,9600);
if(sentido== true)
{
switch(contpaso)
{
case 0:{ entrada='D'; break;}
case 1:{ entrada='C'; break;}
case 2:{ entrada='B'; break;}
case 3:{ entrada='A'; break;}
default: break;
}
Cadena1=&entrada;
recib=EnviaSerial(puerto, Cadena1);
i = 100000000;
do i--;
while(i != 0);
}
else
{
switch(contpaso)
{
case 0:{ entrada='A'; break;}
case 1:{ entrada='B'; break;}
case 2:{ entrada='C'; break;}
case 3:{ entrada='D'; break;}
default: break;
}
Cadena1=&entrada;
recib=EnviaSerial(puerto, Cadena1);
i = 100000000;
do i--;
while(i != 0);
}

CerrarSerial(puerto);
}

```

Anexo 5. Programa principal.

El programa principal desarrollado controla el funcionamiento del sistema mecánico permitiendo colocar al probador de Ronchi cerca del Centro de Curvatura de la superficie bajo prueba. Este programa utiliza a las funciones antes descritas. Los comentarios en verde describen cada parte del sistema y que es lo que realiza.

```
int main(void)
{

// Variables locales
IplImage* img = 0;
string motor1="COM3"; // motor de abajo.
string motor2="COM4"; // motor de arriba(probador)
float cmmotor1=0;
float cmmotor2=0;
double cmtabla=0; // represental el valor de equivalencia en la tabla
map<int, double*> Numcentroides; //No. de centroides
double* cordenadas= new double[8]; // coordenadas de los centroides en pixeles
FILE *ftabla; //apuntador para leer la tabla de informacion de las superficies ópticas
float datotabla;
float **tabla;// tabla para almacenar los valores de las superficies ópticas
int conttabla=0;//contador para almacenar en la tabla
float Numsuperficies=0; // contiene el numero de superficies que contiene la tabla
float correccion, auxcorreccion;// contiene los cm que se debe mover el motor 1 para posicionarse en el eje
optico
float restaequivalencia;
char op; //variable para el paso
int contrpaso1=0;
int contrpaso2=0;
int contrpaso3=0;
int contrpaso4=0;
CvPoint pt1, pt2;

//Lectura de la informacion de la superficie óptica

ftabla = fopen("tabla.txt", "r"); //Abrir archivo para lectura
if (ftabla == NULL)
    { printf("Error al abrir el archivo \n");
    }
fscanf(ftabla,"%f",&Numsuperficies);
tabla= new float*[Numsuperficies];
while( !feof(ftabla) )
    { tabla[conttabla]=new float[5];
      fscanf(ftabla,"%f",&datotabla);
        tabla[conttabla][0]=datotabla;
        fscanf(ftabla,"%f",&datotabla);
        tabla[conttabla][1]=datotabla;
        fscanf(ftabla,"%f",&datotabla);
        tabla[conttabla][2]=datotabla;
```

```

        fscanf(ftabla, "%f", &datotabla);
        tabla[conttabla][3]=datotabla;
        fscanf(ftabla, "%f", &datotabla);
        tabla[conttabla][4]=datotabla;
        conttabla=conttabla+1;
    }
//De home mover motor2 30 cm para la captura correcta de las marcas

Mueve(false,(30*40)/16.5,motor2);

// mover 10 cm hasta que en la imagen se encuentren 4 circulos
do
{
    Mueve(true,(11*40)/5.5,motor1);
    cmmotor1=cmmotor1+2;
    //Captura la imagen
    img=Capturarimagen();
    //Binariza la imagen
    img=MarcaBinarizada(img);
    Numcentroides=calcCentroids(img);
} while(Numcentroides.size()!=4);

// Cálculo de las coordenadas de los centroides en pixeles
cordenadas=cuatroCentds(Numcentroides,0);
// El orden es X1 X2 Y1 Y2 X3 X4 Y3 Y4 en coordenadas

//cálculo de la resta de la equivalencia
restaequivalencia=cordenadas[1]-cordenadas[0];
//correccion de cordenadas para posicionarse en el eje optico, el 640 es la mitad del tamaño de la imagen que
mide 1280 pixeles

auxcorreccion=(cordenadas[0]+((cordenadas[1]-cordenadas[0])/2));
if (auxcorreccion<640)
    {
        correccion=(((640-auxcorreccion)*15)/restaequivalencia);
        //Mover motor uno para correccion
        Mueve(false,(((correccion)*40)/5.5),motor1);
    }
else
    {
        correccion=(((auxcorreccion-640)*15)/restaequivalencia);
        //Mover motor uno para correccion
        Mueve(true,(((correccion)*40)/5.5),motor1);
    }

//cálculo de la distancia para buscar en la tabla
cmtabla= (((cordenadas[6]-cordenadas[2])*15)/restaequivalencia);

for(int i=0;i<3;i++)
{ if(tabla[i][0]<=cmtabla && cmtabla< (tabla[i][0]+0.5) )
    cmmotor2=tabla[i][4]; // adquiere el valor en cm a donde posicionarse cerca del centro de curvatura
}

//Mover Motor 2 cerca del centro de curvatura
cmmotor2=(cmmotor2-0.7);

```

```

if(cmmotor2>30)
//Mueve(false,((cmmotor2-270)/1.02)/4,motor2);
{Mueve(false,((cmmotor2-30)*40)/16.5,motor2);
}
else
Mueve(true,((cmmotor2-30)*40)/16.5,motor2);

//Espera instrucciones.
do
{ printf("Indique movimiento \n d:derecha \n i:izquierda \n a:adelante \n r:atrás s:salir \n");
  scanf("%s",&op);
  switch(op)
  {
    case 'd':{ if (contpaso1==4)
                contpaso1=0;
                Paso(false, motor1,contpaso1);
                contpaso1++;
                break;
              }
    case 'i':{ if (contpaso2==4)
                contpaso2=0;
                Paso(true, motor1,contpaso2);
                contpaso2++;
                break;
              }
    case 'a':{ if (contpaso3==4)
                contpaso3=0;
                Paso(false, motor2,contpaso3);
                contpaso3++;
                break;
              }
    case 'r':{ if (contpaso4==4)
                contpaso4=0;
                Paso(true, motor2,contpaso4);
                contpaso4++;
                break;
              }
    default: break;
  }
}while(op!='s');

cvReleaseImage( &img);// se libera la memoria

return 0;
}

```

Anexo 6. Manual de usuario.

Introducción.

El sistema de dos grados de libertad desarrollado para la evaluación de superficies reflectoras utilizando la prueba de Ronchi, está diseñado para técnicos o personas que elaboran superficies ópticas en un taller de óptica y que utilizan la prueba de Ronchi para conocer la forma de la superficie. Este sistema facilita la aplicación de la prueba en una superficie que está siendo fabricada al semiautomatizar la alineación de la prueba de Ronchi utilizando MVI. El sistema esta implementado para evaluar superficies con diámetros de 5 a 10 cm y radios de curvatura paraxial de 20 a 70 cm.

Objetivos del sistema.

- Facilitar la alineación de los componentes de la prueba de Ronchi.
- Semiautomatizar la alineación de la prueba de Ronchi.

Requerimientos del sistema.

- Computadora con los siguientes programas instalados: IC_Capture (los controladores de la cámara CCD IMAGENSOURCE), Visual Studio 2008, Opencv para Visual Studio 2008.
- Físicamente la computadora debe contar por lo menos con 2 entradas USB y la tarjeta para conectar la cámara IMAGENSOURCE.
- La computadora debe contar por lo menos con un procesador de 3GHz y una memoria RAM de 2.5GB.

Guía de Uso.

Una vez que se cuenta con el equipo que cumple con los requerimientos se realizan los siguientes pasos:

1. Encender la Computadora.

2. Conectar el com1 de los microcontroladores en el com1 de la PC y el com2 de los microcontroladores en el Com2 de la PC como lo muestra la Imagen 1.



Imagen 1. Conexión de los microcontroladores.

3. Colocar la superficie bajo prueba en la montura, asegurando que se encuentre el eje óptico de la superficie bajo prueba horizontalmente. Para esto el técnico requiere apuntar con un láser colocado en forma horizontal arriba del probador de Ronchi como lo muestra la Imagen 2 y apuntar a la superficie bajo prueba en el centro, el técnico debe mover los tornillos de la montura lo necesario para que el láser regrese en la misma dirección.

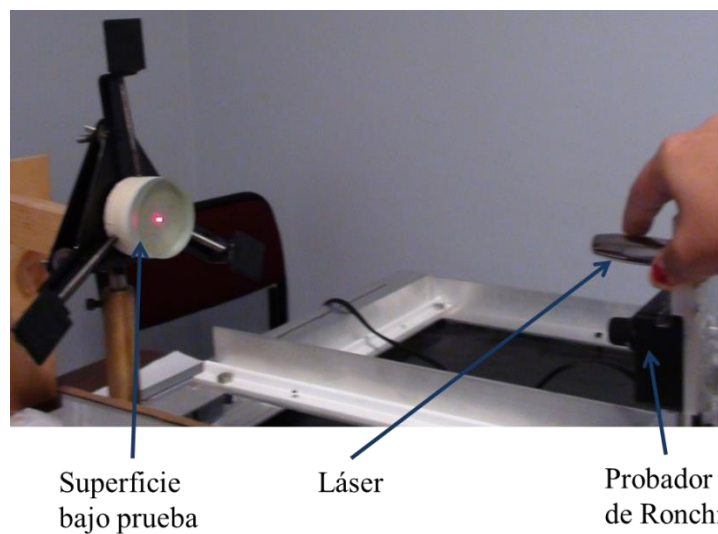


Imagen 2. Colocación del láser.

4. Generar las MVI correspondientes a la superficie a evaluar. Para cualquier superficie la MVI contiene cuatro vértices, donde el vértice significativo mide 2 cm de diámetro y es mayor que el resto de los vértices que miden 1 cm de diámetro. La distancia horizontal de la marca es de 15 cm constate para todas. La distancia vertical que da la unicidad de la marca en este caso va de 13 cm, hasta 20 cm con intervalos de 0.5 cm
5. Imprimir las MVI correspondientes a dicha superficie y colocarlas pegadas en las orejas de la montura, cuidando que el centro de las marcas embone con el centro de la superficie, para esto se pueden trazar finamente con una regla líneas que pasen por el centro, esto para ayudar al técnico a colocar las marcas y que coincida el centro de estas con el centro de la superficie a evaluar como lo muestra la Imagen 3.

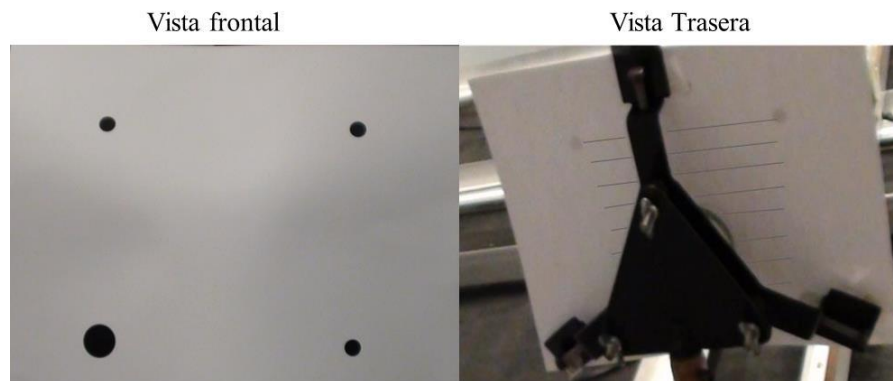


Imagen 3. MVI colocadas en la montura. En la vista trasera se observa las líneas de guía para colocar las MVI.

6. Colocar el sistema en home como lo muestra la imagen 4, es decir, recorrer los rieles superiores hasta topar del lado opuesto a donde se encuentra el motor inferior y recorrer la montura donde se encuentra el probador de Ronchi y la cámara CCD hasta topar del lado opuesto de la superficie óptica.



Imagen 4. Posición de Home del sistema.

7. Introducir los valores ideales de la superficie a evaluar a la tabla. Para ello es necesario acceder a la dirección “C: \principal\principal” y en archivo de texto “tabla.txt” colocar los valores en el siguiente formato que muestra la imagen 5. Como se puede observar la primera fila corresponde al número de superficies que se desea evaluar, las siguientes filas son los valores ideales de cada una de ellas. Estos valores consisten en la primera columna la distancia vertical de las MVI; en la segunda columna es el diámetro de la superficie óptica bajo prueba, la tercera columna es el radio de curvatura, la cuarta columna es el número de franjas del ronchigrama y la quinta columna es la distancia a la cual se debe observar el ronchigrama.

No. De superficies a evaluar.

tabla.txt Bloc de notas				
Archivo	Edición	Formato	Ver	Ayuda
3				
13	5.5	40.1851	9	38.2
13.5	9	65	7	62.3
14	7	30	5	28.5

Distancia vertical de las MVI. Diámetro de la superficie. Radio de curvatura. No. De franjas del Ronchigrama. Distancia a la cual se debe observar el Ronchigrama.

Imagen 5. Formato para introducir los valores al programa.

8. Encender las fuentes de alimentación y verificar que en el tablero se encuentren a 5 volts, como lo muestra la imagen 6. También se debe verificar que se encuentre conectada la tierra de la fuente con la tierra del sistema y la alimentación del sistema eléctrico con el positivo de la fuente.



Imagen 6. Fuente de alimentación y conexiones.

9. Poner en ejecución el programa. Para esto se debe seguir la ruta:
Inicio->Mis Documentos->Visual Studio 2008->Projects->Principal
->Princial->Principal.exe.
10. Una vez que finaliza el programa, muestra la imagen 7 en la pantalla de la computadora. Lo cual indica que se encuentra en espera de instrucciones por si es necesaria una corrección. Para dar estas instrucciones el técnico tiene que visualizar el ronchigrama, y ver si se requieren correcciones. Para ello debe minimizar la ventana mostrada y continuar con los siguientes pasos, es muy importante no salir del sistema de lo contrario no se podrá hacer alguna corrección.



Imagen 7. Programa en espera de instrucciones.

11. El técnico NO debe apagar la fuente de alimentación. Esto permite que los motores sigúan energizados y evita que sea fácil moverlos del lugar donde se encuentran.
12. Quitar las marcas de la montura, para descubrir la superficie óptica.
13. Colocar la rejilla en el probador de Ronchi; conectar el probador de Ronchi a la fuente de alimentación y encender el led como lo muestra la imagen 8.

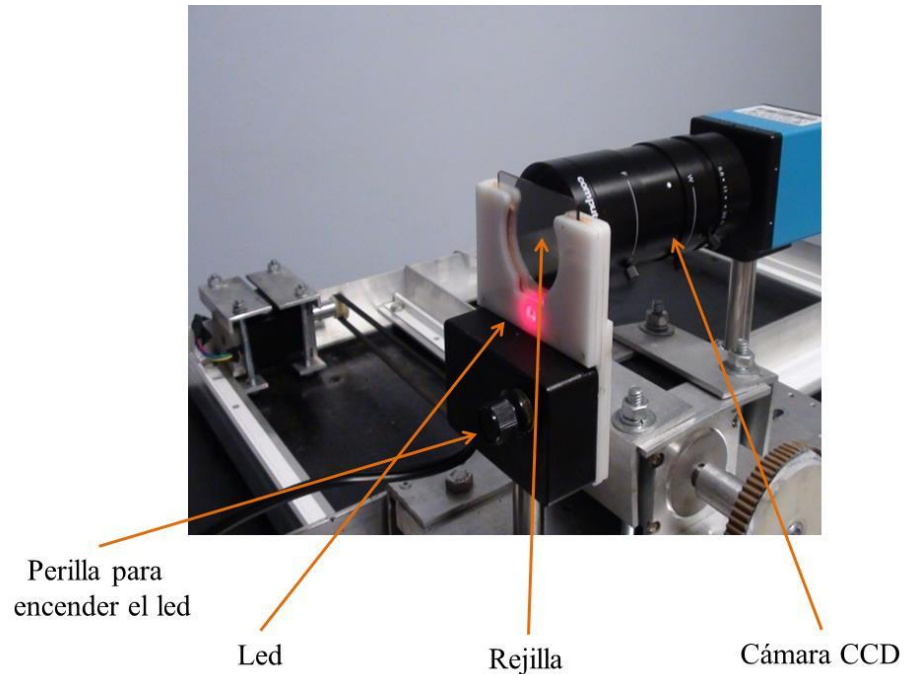


Imagen 8. Colocación de la rejilla en el probador.

8. Acceder al “Demo” del programa “IC capture” de la cámara CCD como lo muestra la Imagen 9. Aquí el técnico podrá observa la imagen de la superficie óptica y el ronchigrama que está capturando la cámara CCD (ver imagen 10).

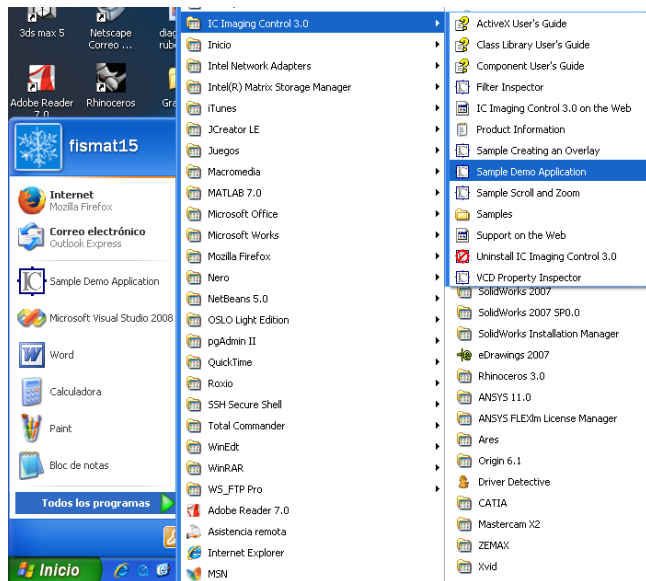


Imagen 9. Ruta de acceso al “Demo” del programa IC Capture.

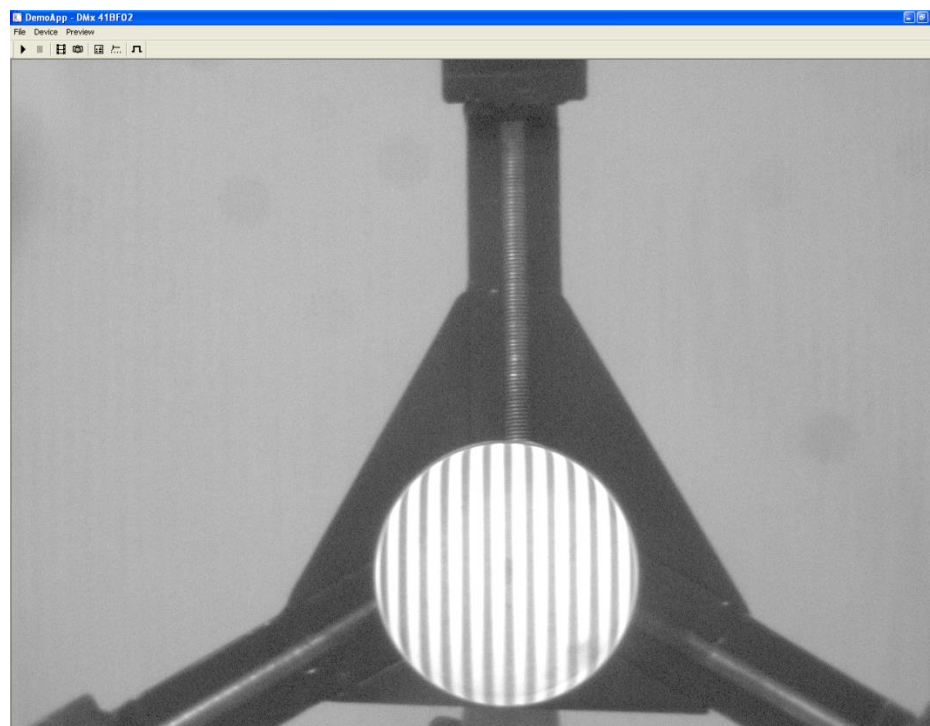
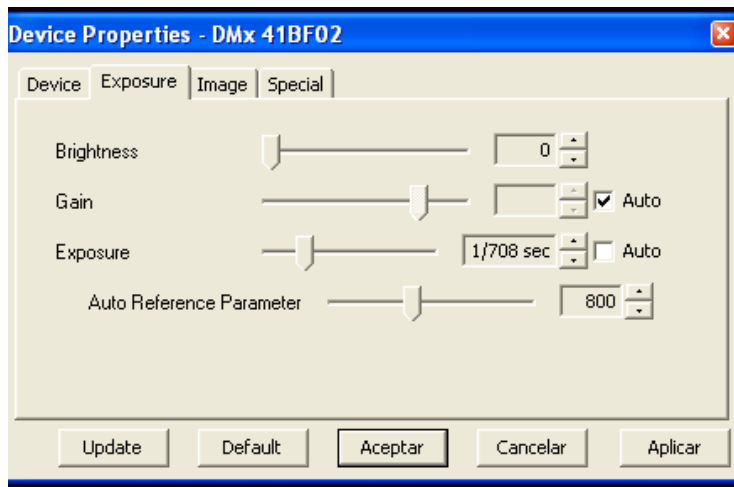


Imagen 10. Muestra la ventana del “Demo” del programa “IC Capture”

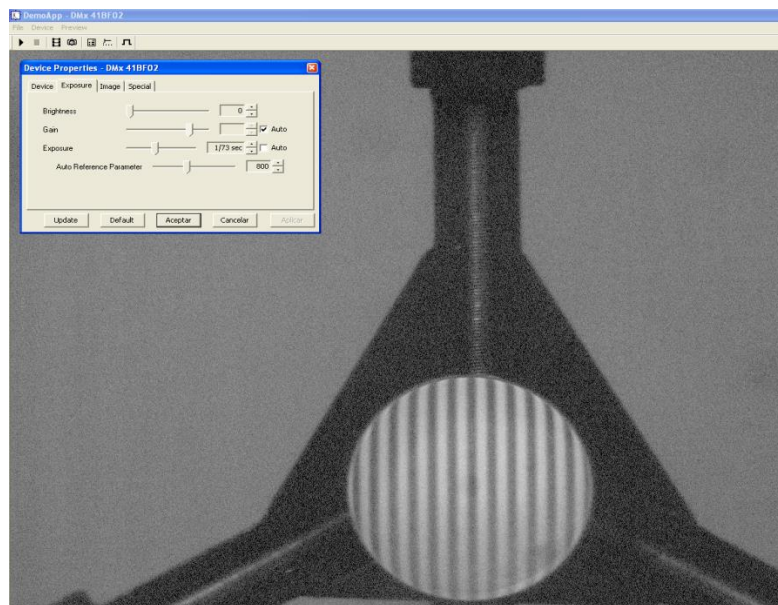
9. Observar la imagen en el programa “Demo” y si es necesario indicarle al programa en ejecución que realice un movimiento a la derecha, a la

izquierda, adelante o atrás, para mejorar la calidad del patrón. La ventaja del programa al dar instrucciones es que le permite al técnico la facilidad de maniobrar el probador de Ronchi y la cámara CCD desde la PC. Tomando como referencia el estar parado de frente a la cámara CCD las instrucciones son las siguientes: introducir el carácter 'd' si se desea mover los componentes a la derecha; introducir el carácter 'i' si se desea moverlos hacia la izquierda, introducir 'a' si se desea moverlos hacia adelante, introducir 'r' si se desea mover los componentes hacia atrás.

10. El programa "Demo" de "IC Capture" le permite al técnico modificar el tiempo de exposición de la imagen para cambiar la intensidad de las franjas, esto a través de la ventana de propiedades del programa como lo muestra la imagen 11 a) en la barra "Exposure". Esto se realiza hasta obtener la intensidad de las franjas deseada como lo muestra la imagen 11 b).



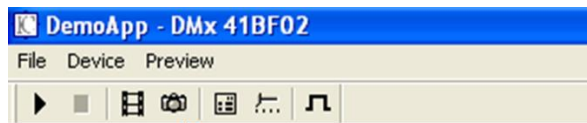
a)



b)

imagen 11. a) ventana para cambiar la intensidad de la imagen; b) ejemplo del cambio de la intensidad de la imagen (comparar con la imagen 10).

11. Una vez que el patrón se encuentra como el técnico lo requiere, se captura la imagen con el botón de Snapshot del programa “IC Capture” como lo muestra la imagen 12.



SnapShot

Imagen 12. Muestra el botón de Snapshot.

12. Finalmente si ya no se requieren dar más instrucciones en la ventana del programa principal se debe insertar carácter 's' para salir del sistema.

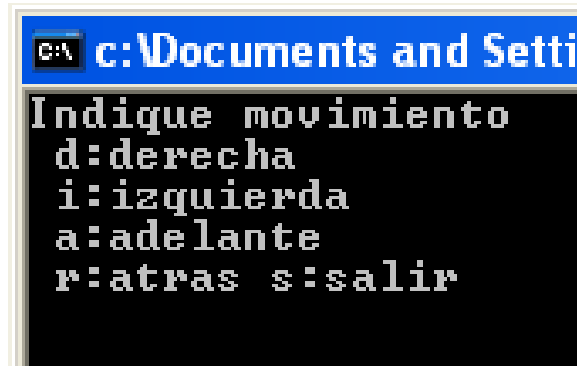


Imagen 13. Programa para terminar el programa

Soporte técnico.

Contacto: Yara Pérez Maldonado.

Correo: shara.luw@hotmail.com.