

Universidad Nacional Autónoma de México

Facultad de Ingeniería
División de Estudios de Posgrado

Método para la medición de la calidad de las superficies ópticas para las lentes del espectrógrafo ESOPO por medio del análisis de imágenes digitaless

T E S I S

que para obtener el grado de:

Maestra en Ingeniería Eléctrica

P R E S E N T A

Rocío del Pilar Soto Astorga

Director: Dr. Alejandro Farah Simón



Ciudad Universitaria, México D.F., 2009

Dedicatoria y Agradecimientos

A Dios que me acompaña.

Dedico nuevamente el trabajo a mi abuelita a quien tanto amo. A mi abuelito que no deja de esperar siempre lo mejor. A mi hermosa madre que siempre trata de ayudarme. A Pablo que me da tanta lata.

Agradezco a mis padres, a los tíos y tías, primos y primas que siempre me han apoyado.

Gracias a mis amigos de siempre Mónica, Mauricio, Angie, Juan, Itzel por estar ahí en todo momento y por el aguante mutuo.

A muchos otros que han compartido parte de ellos conmigo, a Omar, Salvador, Viridiana, Luis, C. Enrique.

Sin olvidar a las personas que conocí en el IA: Ares, Fernando, Misael, Veni, Enrique, Toño. Gracias.

Gracias especiales a Alejandro por la oportunidad de desarrollar este trabajo.

Y gracias a aquellos que forman parte de mi vida y me ayudan a seguir creciendo.

Tabla de Contenido

1 Antecedentes **3**
- 1.1 Justificación del Trabajo . . . 3
- 1.2 Definición del Problema . . . 5
- 1.3 Objetivo general . . . 5
- 1.4 Alcance y limitaciones . . . 5
- 1.5 ESOPO . . . 6
  - 1.5.1 Datos Generales del Diseño Óptico . . . 7
- 1.6 Superficies Ópticas . . . 8
  - 1.6.1 Proceso de fabricación de elementos ópticos . . . 8
  - 1.6.2 Método actual de evaluación de las superficies . . . 11
  - 1.6.3 Trabajos de investigación para la medición de la calidad de superficies . . . 14

2 Marco teórico **17**
- 2.1 Óptica geométrica . . . 17
  - 2.1.1 Reflexión y Refracción . . . 17
  - 2.1.2 Puntos y distancias principales de un sistema óptico . . . 18
- 2.2 Procesamiento Digital de Imágenes . . . 19
  - 2.2.1 Herramientas de procesamiento de imágenes . . . 20
- 2.3 Consideraciones al determinar los defectos en una superficie curva . . . 23
- 2.4 Método utilizado . . . 25
  - 2.4.1 Fuente de radiación . . . 26
  - 2.4.2 La cámara fotográfica . . . 27
  - 2.4.3 Sensor . . . 29

3 Bases para la medición **33**
- 3.1 Diseño y construcción del Cajón de Pruebas . . . 33
- 3.2 Análisis digital de las imágenes . . . 39

3.2.1 Estructuración del código en MATLAB 40
3.2.2 Estructuración del código en C++ 43

4 Diseño del sistema de prueba **47**
4.1 Requerimientos 47
4.2 Especificaciones del sistema de prueba 48
4.2.1 Radiación óptica utilizada 48
4.2.2 Dimensiones de las imperfecciones detectables 48
4.2.3 Tipo de prueba 48
4.2.4 Velocidad de la medición 48
4.2.5 Entorno 48
4.2.6 Características ópticas 48
4.2.7 Dispositivo de detección 49
4.2.8 Comunicación 49
4.2.9 Procesamiento de la imagen 50
4.3 Implementación del sistema 50

5 Resultados **53**
5.1 Imágenes obtenidas 53
5.2 Análisis con C++ 55
5.3 Sistema propuesto 60
5.4 Conclusiones 63
5.5 Trabajo a Futuro 64

A Códigos **69**
A.1 Códigos en MATLAB 69
A.1.1 Conteo de objetos 69
A.1.2 Efecto de la superficie curva 70
A.2 Código en C++ 71

B Especificaciones técnicas de la Cámara **77**
B.1 Especificaciones de la Cámara NIKON D80 [15] 77
B.2 Especificaciones de la Cámara Canon EOS REBEL XTi [16] . 78

Introducción

En esta tesis se presenta el trabajo que realicé en el Instituto de Astronomía de la UNAM sobre la medición de la calidad de la superficie de elementos ópticos utilizando para ello el análisis de imágenes digitales. Este trabajo surge de la necesidad de medir la cantidad de rasguños y hoyos en (conocido como número de *scratch / dig*) para las lentes de ESOPO.

ESOPO es un Espectrógrafo Óptico de Mediana Resolución para el telescopio de 2.1 m del Observatorio Astronómico Nacional en San Pedro Mártir . Este espectrógrafo esta conformado por 24 lentes que van de 70mm a 172mm de diámetro con diversos valores de radios de curvatura. Este proyecto se desarrolla en el Instituto de Astronomía, de la UNAM en sus sedes de Ensenada y Ciudad Universitaria.

Se pretende que este espectrógrafo tenga un carácter general permitiendo llevar a cabo una gran diversidad de proyectos astronómicos que requieran de cobertura espectral en un intervalo óptico amplio, a resolución espectral $500 < R \leq 5000$. Estos proyectos incluyen observaciones de objetos estelares y extendidos, que van desde galaxias externas hasta estrellas y nebulosas en la Galaxia.[1]

Dentro de las pruebas que se tienen que realizar a las lentes de este instrumento se encuentra medir la calidad de la superficie. Actualmente la medición de este parámetro en elementos ópticos se lleva a cabo por medio de la inspección visual lo que provoca problemas de subjetividad en la evaluación. Esto a su vez tiene como consecuencia conflictos entre el fabricante y el cliente.

Una de las complicaciones a enfrentar en este proyecto es el la medición de rasguños y hoyos en superficies con cierto radio de curvatura, así como el diámetro del área efectiva a ser medida. El objetivo de este método de medición es lograr observar y cuantificar al menos imperfecciones en las superficies ópticas con valor de 60/20 (rasguño/agujero) bajo la norma MIL 13830, por medio de una cámara digital y bajo condiciones de contraste específicas ya que esta es la especificación de las lentes de ESOPO.

En la actualidad existen trabajos en proceso de investigación destinados a la cuantificación de la calidad de las superficies ópticas. En ellos se presentan diversos métodos así como dispositivos de medición [2].[3] [4] Entre los inconvenientes de estos trabajos se tienen: el costo elevado de los componentes, la complejidad en posicionamiento y el hecho de que son métodos no adecuados para la medición de superficies esféricas.

Lo que se presenta en este trabajo es una nueva forma de hacer esta metrología de manera más económica y más sencilla. Se busca poder obtener fotografías digitales con la suficiente calidad que permita su análisis por medio del procesamiento digital el cual resulta ser un método simple y económico. Detalles importantes de este método consisten en la elección de la iluminación óptima que resalte las imperfecciones.

El presente escrito está organizado de la siguiente manera: en el primer capítulo se expone la necesidad por la que surge este proyecto. Es por ello que empieza con la descripción del espectrógrafo ESOPO. El método desarrollado en este trabajo surge de la necesidad de este espectrógrafo, por esta razón se enfocó a superficies esféricas con diámetros de entre 5 cm y 20 cm. Sin embargo puede ser aplicado a superficies planas y de otras dimensiones por medio de ajustes. También se explica el proceso de fabricación y estándares de medición de la calidad de las lentes.

Las herramientas teóricas que sirven como base fundamental al desarrollo computacional, diseño del sistema así como entendimiento del fenómeno a ser analizado se estudian en el segundo capítulo.

El tercer capítulo presenta el desarrollo del sistema así como pruebas preliminares de iluminación y disposición del diseño mientras que en el cuarto capítulo se muestra la descripción del diseño final para el sistema utilizado en la medición.

En el quinto capítulo se presenta la implementación y resultados obtenidos por este método.

Capítulo 1

Antecedentes

En este capítulo se expondrá el objetivo y justificación del trabajo así como sus alcances y limitaciones. También se encuentra una breve descripción del proyecto ESOPO debido a que la idea de este trabajo derivó de los problemas que se tienen en la evaluación de sus componentes ópticas. Se describe el proceso de fabricación de las lentes con el fin de notar que en todas las etapas se procura tener una superficie libre de imperfecciones y que sin embargo las mismas herramientas utilizadas pueden ocasionar daño. Se hará ver también la forma en que actualmente se realiza la evaluación de la calidad de superficies ópticas y sus problemas así como algunos trabajos experimentales que se están realizando para evitarlos.

1.1 Justificación del Trabajo

Este trabajo surge de la necesidad de medir el parámetro de Rasguño/Hoyo para las lentes de ESOPO. Las pequeñas imperfecciones en las lentes de los instrumentos astronómicos pueden causar problemas de esparcimiento no deseado de la luz por lo que una imagen se llega a ver borrosa. Esto puede ser de poca relevancia para la imagen de un objeto extendido, pero no para imágenes de objetos puntuales como es el caso de muchas imágenes astronómicas.

Como se muestra en la Figura 1.1, en la parte de la superficie con imperfecciones la reflexión de la luz no se realiza de manera especular sino que incide en ángulos diversos e incluso puede llegar a tener varias reflexiones. Esto provoca pérdida de energía por la luz difusa además de ocasionar la alteración de las imágenes ya que los rayos de un mismo punto objeto no se enfocan en el mismo punto imagen. Esto resulta bastante objetable para

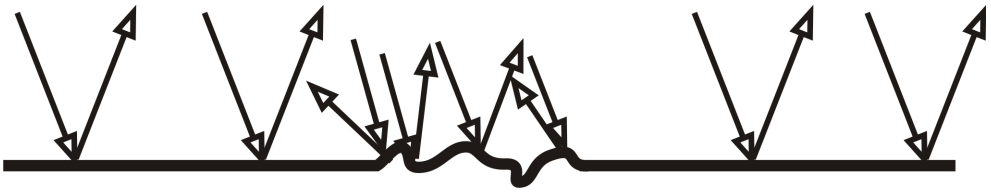


Figura 1.1: Reflexión Difusa

imágenes de objetos lejanos que se encuentran cerca de objetos brillantes ya que impide la distinción del punto de interés.

La calidad cosmética de la superficie describe el nivel de defectos que pueden ser vistos en la superficie de una componente óptica. Los detalles que se observan en la evaluación de la calidad cosmética son entre otros el pulido, ausencia de rasguños, agujeros y tratamiento de los bordes en los elementos ópticos [1]. Estos factores además de intervenir en la calidad cosmética que puede resultar costosa, provocan el esparcimiento de la luz causando efectos funcionales. Por lo general en la actualidad la calidad de la superficie de elementos ópticos comerciales se da bajo los estándares militares de Estados Unidos MIL-0-13830A [6] aunque existen una gran variedad de normas. El surgimiento de nuevas normas se debe a la necesidad de que los defectos queden lo más especificados posible.

Más especificaciones de la importancia funcional de las imperfecciones de la superficie están dadas en el punto 7.4 de la norma ISO 10110-7 [7] . En ella se mencionan problemas funcionales para imágenes tomadas en el plano imagen. También se hace mención en la importancia de imágenes de objetos lejanos que se encuentran en la proximidad de objetos muy brillantes, situación en la cual la calidad de la superficie de la lente puede ser influyente.

La evaluación actual de la calidad cosmética de las superficies se lleva a cabo por inspección visual. Debido a la subjetividad que involucra la aplicación de estándares establecidos en el examen de las superficies, son experimentados inspectores los que realizan la evaluación bajo condiciones estandarizadas. Existen incluso cursos enfocados a la formación de personal capaz de realizar estos análisis [2].

[1] $http://www.mellesgriot.com/products/optics/os_4.htm$
[2] $http://spie.org/x1139.xml?course_id = E0833521$

1.2 Definición del Problema

El problema que busca resolverse en este trabajo consiste en encontrar un método económico, sencillo y objetivo que cuantifique la calidad de las superficies ópticas evaluado en lo que se conoce como número de Rasguño/Hoyo de manera automática. Actualmente, la medición de las imperfecciones en las superficies ópticas se hace de manera relativamente subjetiva. Un especialista en fabricación de lentes es quien otorga la calificación de la calidad de la misma. Con ayuda de lámparas de contraste, a simple vista y con años de experiencia este técnico logra estimar la cantidad de imperfecciones en la superficie de las lentes al compararlas con patrones estandarizados.

Por ello se propone un método para la medición cuantitativa de la calidad de superficies ópticas. Esta medición será automática evitando problemas de subjetividad. Se espera tener también una reducción del tiempo empleado en las mediciones.

1.3 Objetivo general

En esta tesis se busca validar un nuevo método para la medición objetiva de la cantidad de rasguños y agujeros en las superficies ópticas. Este método consiste en la adquisición de fotografías digitales de lentes, éstas fotografías deben contar con el contraste necesario para su posterior procesamiento digital. Se realizarán pruebas que deberán concluir si resulta adecuada la fabricación posterior de un sistema de medición. Este sistema deberá estar basado en los logros de esta tesis así como en la mejora de sus puntos débiles.

Este método deberá ser simple y permitirá tener un registro de la evaluación para el caso en que existieran inconformidades fabricante-cliente. Otro objetivo es el sentar un precedente en este tema para que pueda seguir siendo desarrollado en el Instituto de Astronomía.

1.4 Alcance y limitaciones

El problema a resolver no cuenta con un trabajo previo en el Instituto de Astronomía por lo que el resultado final será la evaluación del método y en su caso la propuesta del diseño de un sistema de medición. Las pruebas se harán utilizando patrones de prueba y dos lentes. Solamente una de estas lentes es del espectrógrafo ESOPO debido a que el sistema de prueba no es lo suficientemente estable aun para sostenerlo. El precio del bloque de vidrio

de estas lentes es aproximadamente de 4000 dólares por lo que su manejo es delicado.

1.5 ESOPO

El propósito básico del proyecto ESOPO [1] es contar con un espectrógrafo moderno y eficiente, que permita llevar a cabo una gran diversidad de proyectos astronómicos que requieran de cobertura espectral en el intervalo óptico amplio, a resolución espectral $500 < R \leq 5000$. Estos proyectos incluyen observaciones de objetos estelares y extendidos, que van desde galaxias externas hasta estrellas en la Galaxia. En suma, se trata de un espectrógrafo de propósito general que debe mejorar la resolución y el cubrimiento espectral, la cobertura de campo y la eficiencia óptica y de operación del espectrógrafo B&Ch, actualmente empleado en ese telescopio.

Algunos proyectos que tienen la necesidad de un mejor espectrógrafo son estudios referentes a fluctuaciones de temperatura en nebulosas planetarias y regiones HII galácticas, galaxias con anillos polares, interacción entre los procesos de formación estelar y material difuso, población estelar y características dinámicas de las galaxias elípticas entre otras investigaciones de gran interés astronómico.

La utilidad del instrumento será tanto mayor cuanto más eficiente y estable sea, mayor cobertura espectral tenga y mejor resolución espacial y espectral alcance. Obviamente, la eficiencia de un espectrógrafo puede incrementarse simplemente aumentando su grado de especialización a costa de su utilidad general, reduciendo por ejemplo el intervalo o la máxima resolución alcanzables. Sin embargo, también es posible –y siempre conveniente– aumentarla mediante la procuración de la mayor estabilidad y repetibilidad del instrumento, que permita la rápida y confiable prerreducción en línea de los datos astronómicos útiles. En muchos casos, esto ahorra al observador la captura y aplicación de imágenes de campos planos, espectros de calibración y distorsión, etc. Para ello se requiere de rigidez del equipo y la reducción, al mínimo, del número de sus partes móviles.

El cubrimiento espectral está limitado principalmente por el tamaño del detector, la posible superposición de órdenes del elemento dispersor y la dispersión espectral empleada. Esta última, a su vez, lo está por el tamaño de la pupila (y, por lo tanto, del instrumento mismo) o por los parámetros ópticos del elemento dispersor, por las dimensiones de cada elemento del detector (el "píxel") y por el muestreo requerido para cada proyecto.

En conclusión, la justificación científica de un espectrógrafo de uso ge-

neral se basa en la amplia utilidad que éste tenga para la investigación astronómica. Para lograrlo, se requiere un instrumento estable (cuyas configuraciones sean repetibles con la máxima exactitud posible), y que simultáneamente tenga el más amplio cubrimiento y la mayor resolución espectrales que el detector y otras componentes lo permitan.

1.5.1 Datos Generales del Diseño Óptico

El diseño óptico se hizo utilizando software especializado en óptica (Zemax®), y bases de datos complementarias, que contienen las características detalladas de los vidrios ópticos comerciales, principalmente de las fábricas Schott® y Ohara®.

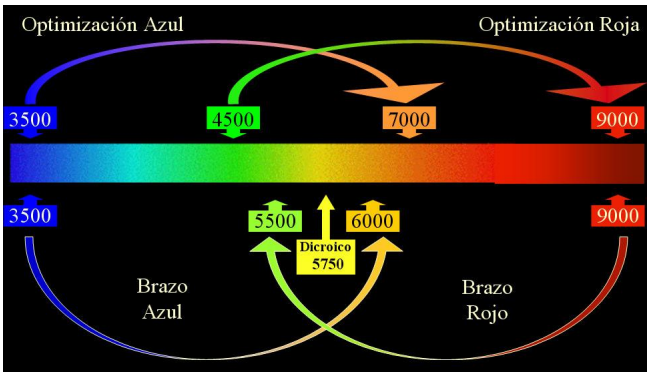


Figura 1.2: Concepto para el cubrimiento espectral de ESOPO en dos brazos

La Figura 1.2 muestra el concepto básico del cubrimiento ó intervalo espectral requerido en ESOPO, dividiendo el instrumento en dos brazos, mediante un dicroico, con un brazo azul optimizado para la octava de 350 a 700 nm y otro brazo rojo optimizado para cubrir la octava de 450 a 900 nm con un traslape significativo. Así, ESOPO consiste en dos espectrógrafos, uno especializado en el azul y otro en el rojo, que pueden utilizarse por separado o combinados para cubrir simultáneamente todo el rango espectral a una resolución mayor que la de las octavas por separado. La Figura 1.3 muestra el diagrama del diseño óptico final de ESOPO. Los números en la imagen muestran los elementos ópticos que son las rendija (1), las rejillas (5 y 10), la lente de campo (2), los colimadores (4 y 9), el dicroico y espejo doblador (3), las cámaras (6, 7, 11 y 12) y los detectores (8 y 13).

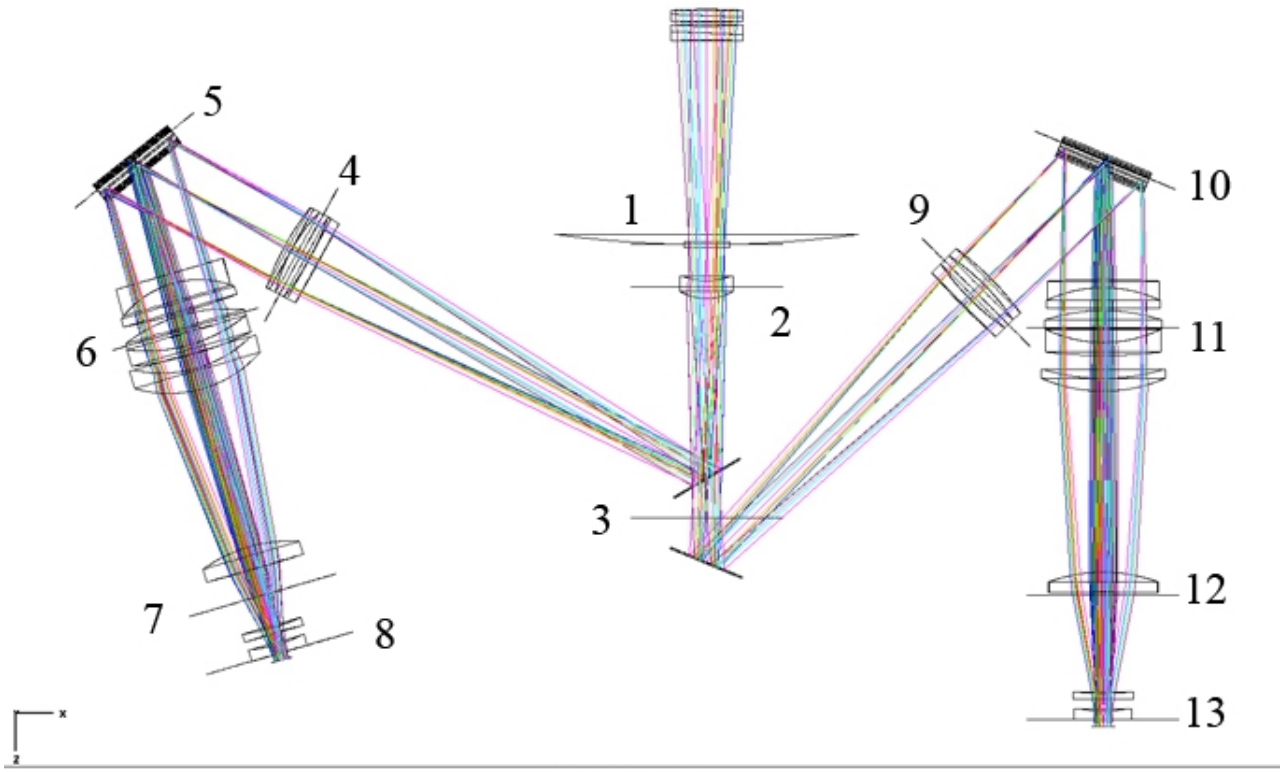


Figura 1.3: Elementos del diseño óptico de ESOPO

1.6 Superficies Ópticas

Las superficies ópticas de ESOPO se someten a una evaluación que revisa que las especificaciones sean cumplidas, tanto en su forma como en su calidad. A continuación se describe el proceso de fabricación de estas lentes así como el método actual de medición.

1.6.1 Proceso de fabricación de elementos ópticos

Dentro de las pruebas de calidad que se realizan en todo proceso de fabricación para los elementos ópticos como son las lentes se encuentran aquellos que tiene que ver con la forma y aberraciones presentes. Existen también los defectos cosméticos que verifica la calidad de las superficies.

Lo que se busca en estas pruebas es ver si el producto final cumple con las tolerancias especificadas por el cliente.La exactitud con la que estos

elementos ópticos son fabricados depende por lo tanto de la exactitud con la que es posible medir sus parámetros.

Los elementos ópticos son fabricados en materiales diversos, la elección del vidrio como material preferente se debe a sus propiedades ópticas y transparencia. Dentro de los catálogos de vidrios existen muchos tipos que son elegidos de acuerdo a sus parámetros dependiendo del propósito del producto final. Los factores involucrados en el proceso de fabricación son principalmente el tamaño de la superficie, la cantidad de elementos que se van a elaborar, la forma y acabado de los mismo. Los pasos más comúnmente utilizados para la fabricación de las lentes se mencionan a continuación [13].

Fabricación inicial del tejo. Al decir tejo nos referimos al trozo de material al que ya se le ha dado la forma burda del elemento a fabricar. La selección del material así como de su forma primaria depende del propósito de la lente. Lo primero que se hace es tomar el bloque inicial y pulir sus superficies revisando al final de este proceso la cantidad de inclusiones, estrías, birrefringencia así como la variación del índice de refracción. El elemento que sirve como soporte en la fabricación de una lente debe ser elegido de manera que no dañe a la lente a lo largo del proceso.

Los métodos actuales comienzan utilizando abrasivo de diamante en un husillo a gran velocidad. Debido a que las fuerzas laterales son grandes la pieza debe estar firmemente sujeta a una base rígida de aluminio, acero, hierro fundido o vidrio.

Posterior a la obtención del tejo los procesos de desbastado y pulido disminuyen los defectos de la pieza, en esas etapas los elementos son nuevamente soportados por resinas o algún otro material viscoso.

Maquinado de diamante y generación de la forma. Luego de haber fijado la pieza a un soporte, se procede al maquinado. Para esto utiliza una variedad de herramientas impregnadas de diamante que logra una forma cercana a la final con el grosor y curvatura suficiente para que pueda ser desbastada, o bien, directamente pulida. Las partículas de diamante eliminan las irregularidades del vidrio en el orden de micrómetros. El cuidado en esta etapa se concentra en no producir daños al componente como son las fracturas bajo la superficie.

Desbastado. Debido a las fracturas que provoca el diamante por su dureza, se necesita un proceso que desbasta por medio de un abrasivo. En este método la pieza y la herramienta se frotan teniendo entre ellos al abrasivo mencionado dando como resultado la remoción del material.

Pulido. El propósito del pulido es llegar a una superficie que cumpla con las especificaciones dadas en función del uso al cual serán destinadas las piezas. Al mismo tiempo se busca que el acabado y el valor de las micro

rugosidades se reduzcan a un valor dentro de las tolerancias.

El proceso de pulido combina el movimiento mecánico y la química para que la superficie alcance un liso de niveles moleculares. El pulido se lleva a cabo mediante una herramienta similar a la del desbastado a excepción de que se recubre de resina o poliuretano. Esta herramienta pasa varias veces sobre la superficie con un líquido específico. Mediante la acción química de este líquido y la acción mecánica en la región que incluye la superficie de la pieza, el líquido pulidor y la herramienta, se produce el pulido de la superficie.

Debido a que el pulido es en parte un proceso químico no existe una sustancia ideal para toda ocasión ya que depende de factores como el nivel de pulido que se requiere y la clase de vidrio con el que se esta trabajando. Algunos de las sustancias utilizadas son óxido de zirconio, óxido de cerio, alúmina y sílice coloidal.

Los factores de control en esta etapa, provienen de la geometría del pulidor, la forma en que repasa la herramienta a la pieza y de la rotación de la mesa. Los valores de los errores en la superficie miden que tanto se aleja la superficie a su valor ideal y esta dado en valores pico-pico o más comúnmente en valores rms. Para medir la figura de la superficie se utilizan métodos interferométricos. Las superficies ópticas de gran calidad generalmente tienen acabados menores a 2 nm, para muchas aplicaciones se llega a alcanzar 1nm rms de rugosidad siendo esto más que adecuado aunque existen superficies muy especiales que requieren alcanzar un valor de 0.2 nm rms implicando un gran esfuerzo en su realización.

Centrado y acabado de las orillas. Después de pulir ambas superficies de una lente, sus orillas son cortadas para formar biseles cilíndricos protectores. Las lentes se alinean en un eje rotatorio por lo que ambas superficies giran teniendo su centro de curvatura en el eje de rotación. La línea que se define mediante los centros de curvatura de las superficies forma lo que es el eje óptico de las lentes.

Limpieza. Las piezas finales deben de limpiarse para remover residuos de resina, cera y componentes del pulido. Esta limpieza se puede hacer pasando cuidadosamente toallitas empapadas de solvente o mediante baños de vapor seguidos de baños ultrasónicos del solvente.

Ensamblado. Las lentes y prismas en ocasiones se unen para formar dobletes o prismas complejos, las superficies unidas se utilizan para compensar efectos cromáticos. La interfaz de la unión trabajará bien ópticamente mientras la capa de cemento sea delgada y el índice de refracción se acople mejor al de los vidrios que une para evitar pérdidas. Dicha interfaz debe de introducir el mínimo de reflexión y esparcimiento.

Tolerancias y fabricación. A continuación se muestra en la tabla 1.1 con medidas típicas de tolerancias. Es evidente que en tolerancias estrechas el costo del producto será mayor debido al trabajo invertido en él.

Parámetro	**Valor típico**	**Precisión**	**Alta Precisión**
Diámetro de la lente	$100\mu m$	$12\mu m$	$6\mu m$
Grosor de la lente	$200\mu m$	$50\mu m$	$10\mu m$
Radio de curvatura	$20\mu m$	$1.3\mu m$	$0.5\mu m$
Cuña (desviación de la luz)	6 arc min	1 arc min	15 arc sec
Irregularidad de la superficie	5 franjas	1 franja	0.25 franja
Acabado de la superficie	5 nm rms	2 nm rms	5 nm rms
Rasguño/Hoyo	160/100	60/40	20/10
Tolerancias dimensionales para elementos complejos	$200\mu m$	$50\mu m$	$10\mu m$
Tolerancias angulares para elementos complejos	6 arc min	1 arc min	15 arc sec
Biseles	± 0.2 mm	± 0.1 mm	± 0.02 mm

Tabla 1.1: Valor típico de tolerancias [13]

1.6.2 Método actual de evaluación de las superficies

Cuando el fabricante termina una lente mide todos su parámetros para cumplir con las especificaciones, sin embargo, al ser entregada es común que el cliente la revise nuevamente y en el caso de no coincidir se puede provocar que la lente no sea aceptada. Estas discusiones entre fabricante y cliente son más difíciles de manejar cuando los defectos son de rasguños y hoyos debido a la subjetividad de su evaluación.

La inspección de la superficie se lleva a cabo por lo general de la siguiente manera: utilizando iluminación difusa el inspector toma con las manos el elemento óptico y comienza a moverlo a fin de encontrar el contraste adecuado que le permita localizar los defectos. Estos defectos son comparados con patrones de rasguños y hoyos que son elaborados en base a los estándares que se mencionan más adelante. Al final el inspector puede elaborar un dibujo de la superficie y dar los resultados.

Estándares utilizados en la evaluación de la calidad de superficies ópticas

La calidad de la superficie se refiere a las características estéticas del elemento óptico evaluado en cuanto a la cantidad de defectos permitidos en dicha superficie.

En ocasiones es posible detectar visualmente una imperfección pero la influencia en el desempeño óptico del elemento resulta dudosa. Es por ello que se han creado estándares que tratan de unificar puntos de vista entre productores y clientes. Sin embargo los estándares no convergen a un óptimo sistema de medición que examine con la severidad necesaria los elementos para el propósito que se les quiere dar[2].

El estándar más usado históricamente para la determinación de la calidad de las superficies es la especificación militar de los EE.UU. MIL-0-13830A (tercera enmienda) [6]. Aunque se tienen otros estándares como el MIL-F-48616 y el DIN 3140 (Deutsche Industrie Norm) en Europa. Actualmente se cuenta también con el estándar ISO 10110 [7]. El Instituto de Astronomía de la UNAM cuenta con patrones de referencia para los estándares MIL-O-13830A e ISO10110.

A continuación se da la definición de número de Rasguño/Hoyo, rasguño y hoyo tal y como son manejados en estas normas.

*Número de Rasguño/Hoyo.*La designación de la medida de la irregularidad del elemento óptico está dada por dos números separados por guión, el primero corresponde al máximo valor permitido para la visibilidad de los rasguños (*scratch*). El segundo se refiere al valor máximo permitido para el diámetro de las hendiduras (*dig*).

Rasguño. Se refiere a cualquier marca o rasguño de una superficie pulida. En principio el número asignado de rasguño tiene que ver con la anchura del mismo siendo medido en decenas de micrómetros.

Sin embargo esta equivalencia se determina solamente por comparación y la apariencia puede depender de varios factores como son los componentes del material, la presencia de algún revestimiento y de la forma en que se esparce la luz. Por esta razón el número dado de rasguño no corresponde forzosamente al ancho del rasguño.

Hoyo. Son los hoyos o muescas que se observan en la superficie. El diámetro esta dado en centésimas de milímetro y es un promedio entre el largo y ancho de la hendidura.

El ojo humano como sensor

Como ya se mencionó anteriormente, las superficies ópticas en la actualidad son inspeccionadas por un experto que compara las imperfecciones con superficies de referencia que se venden comercialmente. La inspección por lo tanto está sujeta a la condición visual de dicho experto. Esta situación

provoca que los resultados que se obtienen de distintas personas puedan diferir bastante ocasionando conflictos fabricante - cliente [5].

Todas las superficies tienen un grado de imperfección y el ojo humano tiene cierta sensibilidad para detectarlos. Las superficies muy dañadas pueden ser desechadas inmediatamente por inspección visual. Sin embargo, las valoraciones subjetivas no son consideradas aceptables en general.

El ojo ha sido utilizado en principio porque es nuestro medio natural de inspección. Las longitudes de onda que causan efecto en los fotoreceptores del ojo son las que conocemos como el rango de lo visible que van del azul al rojo (380- 780 nm). Las radiaciones de alta frecuencia son filtradas por la cornea mientras que las de baja frecuencia no excitan a las células fotoreceptoras del ojo. Así mismo el ojo humano es capaz de trabajar en un rango dinámico amplio que le permite detectar cambios pequeños de intensidad.

La capacidad que tiene un sistema óptico para registrar la información se expresa frecuentemente en términos de la función de transferencia óptica. Esta forma de expresión brinda un tratamiento sencillo utilizando teoría de sistemas lineales. Sin embargo el ojo humano no tiene una respuesta lineal ya que esta varía dependiendo de la zona de ojo en la que se realiza la detección y por elementos externos como es el contraste del patrón incidente.La visibilidad de los objetos cambia entonces en función del tamaño y el contraste de la imagen.

Sin embargo, el ojo siendo un sistema óptico no está exento a las aberraciones como la aberración esférica la cual provoca que los rayos luminosos no atraviesen por el camino axial o paraxial de los lentes, si no que se vaya por la periferia, donde los sensores del ojo no detectan tan bien. Además de que la aberración esférica provoca la disminución del tamaño óptimo de la pupila (2-2.5 mm) lo que da como resultado un deterioro de la imagen por efectos de difracción. La aberración cromática provoca la refracción de la luz varía entre las diversas longitudes de onda de la radiación incidente. Esto afecta en la visión debido a que las células detectores están diseñadas para funcionar mejor a cierto rango de frecuencias. El astigmatismo oblicuo provoca que la imagen se encuentre en puntos de la retina que no son muy sensibles.

Tomando en cuenta lo anterior se mencionan ahora ventajas y desventajas de la inspección visual.

Ventajas de la inspección con el ojo como sensor:

- El ojo humano tiene un amplio rango dinámico, es decir que la diferencia entre la mayor y menor cantidad de luz que puede tolerar el ojo es grande.

- Debido a los efectos de difracción, se pueden detectar cambios de altura de los objetos de pocos nanómetros dentro de un rango amplio de niveles de iluminación
- Los defectos son rápidamente localizados mientras el componente es manipulado.
- Se pueden revisar superficies planas y curvas de la misma manera.
- Una vez detectado el defecto se puede clasificar la imperfección,
- Es más económico que una máquina

Desventajas del ojo como sensor:

- La persona que realiza la inspección debe ser entrenada y adquirir experiencia.
- Se está expuesto a la fatiga visual lo que altera el resultado
- Riesgos inherentes a la manipulación de la pieza.
- La evaluación subjetiva que provoca diferencias entre niveles de tolerancia
- Se necesita también iluminación especial.

De todo esto es fácil concluir que cada persona ve distinto a otra. Es por ello que la evaluación es diferente dependiendo del estado de salud física de cada inspector y del grado de experiencia de cada uno de ellos dando como resultado diversidad de opiniones y la necesidad de contar con un método más objetivo.

1.6.3 Trabajos de investigación para la medición de la calidad de superficies

Se presentan algunos métodos que pueden ser utilizados en la medición de superficies y las desventajas en su uso para este trabajo.

Identificación del daño bajo la superficie en materiales transparentes utilizando un método no destructivo [4]. Este método se basa en la microscopía de reflexión total interna y tiene la ventaja de que puede discernir entre los defectos de la superficie y los que se encuentran dentro del material mediante la manipulación de la polarización de la luz utilizada como fuente. Este método tiene como defecto que el ángulo del

haz incidente debe estar bien posicionado dependiendo de la superficie en la que incide. En este trabajo se utilizaron superficies planas y su aplicación para superficies curvas puede resultar complicada.

Microscopio Digital Comparador de Imagen [5].Este sistema utiliza varios elementos ópticos que sirven de filtrado para la fuente luminosa y el espécimen de prueba se coloca en el camino óptico de la luz. Después de que la luz atraviesa el sistema óptico llega a una cámara digital. La imagen es analizada por medio de su histograma. Se hace lo mismo colocando una superficie de referencia en lugar del sistema de prueba y se compara el contraste obtenido en ambos. La desventaja de éste método radica en que sirve solamente para superficies planas además de que necesita la comparación con patrones de referencia.

Técnica óptica para la detección automática y la medición de los defectos superficiales en cables metálicos delgados [3]. Éste trabajo está basado en las variaciones de intensidad producidas por los defectos en la superficie cuando un cable es iluminado por el haz de un láser en incidencia oblicua. Esta técnica no fue desarrollada propiamente para la medición de superficies ópticas sin embargo fue revisada ya que el método puede adaptarse a esta finalidad. El trabajo me llamó la atención porque muestra buenos resultados que fueron comparados con microscopía electrónica de barrido y microscopía de fuerza atómica. Sin embargo tiene la desventaja de que no ubica la localización del defecto en la superficie.

Capítulo 2

Marco teórico

2.1 Óptica geométrica

En esta sección se mostraran la fórmulas básicas de reflexión y refracción de la luz en una superficie. De esta forma se busca dar a conocer el fenómeno por medio del cual se obtendrán las imágenes a analizar.

2.1.1 Reflexión y Refracción

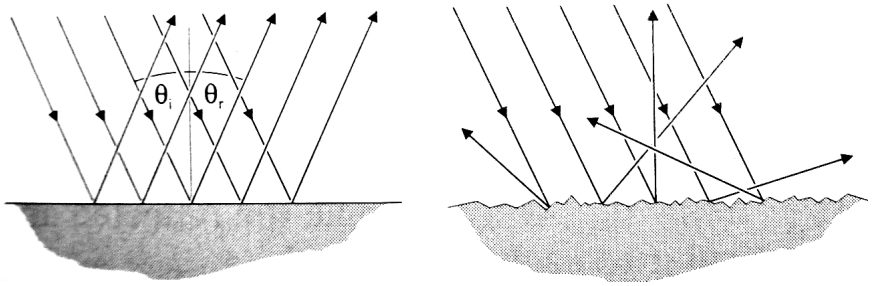
Si se tiene un haz de luz incidiendo sobre una superficie, el hecho de que una parte se transmita al siguiente medio se le denomina refracción. Por otro lado el fenómeno de que parte de la luz regresa al medio de incidencia es denominado reflexión. La reflexión puede realizarse de dos formas[12]:

Reflexión especular. Este tipo de reflexión ocurre en superficies suaves en la que toda la luz reflejada sale en la misma dirección debido a que los rayos llegan con el mismo ángulo en una superficie plana como se muestra en la Figura 2.1a).

Reflexión difusa. Debido a que las superficies tienen cierto grado de rugosidad, la reflexión de todos los rayos de haz de luz no se reflejan en la misma dirección provocando lo que se conoce como luz difusa mostrada en la Figura 2.1b).

Las leyes de reflexión y transmisión de ondas planas se derivan obteniendo la solución de la ecuación de onda bajo condiciones de frontera de los campos eléctrico y magnético en interfaces que separan medios con distintos índices de refracción.

El manejo de la luz como rayos se deriva de tomar como referencia el vector normal al frente de onda. Para sistemas en los que la luz atraviesa medios de índice de refracción diferente se tiene que el fenómeno de refracción



a) b)

Figura 2.1: Reflexión a) especular b) difusa

obedece la siguiente ecuación:

$$n_i sin\theta_i = n_t sin\theta_t \tag{2.1}$$

Mientras que para la reflexión se tiene:

$$\theta_r = \theta_i \tag{2.2}$$

En las que n_i es el índice de refracción del medio incidente, n_t es el índice de refracción del medio al que se transmite la onda luminosa, θ_i es el ángulo de incidencia del rayo con respecto a la normal de la superficie, θ_t es el ángulo del rayo transmitido respecto a la normal a la superficie y θ_r es el ángulo de la onda reflejada con respecto a la normal a la superficie.

Estas ecuaciones son aplicables sin tener que depender de las propiedades electromagnéticas de la onda luminosa. Sin embargo esto solo nos da información geométrica de las ondas incidente y reflejada para conocer la amplitud del haz reflejado y transmitido se resuelven las ecuaciones de Maxwell derivando las ecuaciones de Fresnel.

2.1.2 Puntos y distancias principales de un sistema óptico

En la Figura 2.2 se muestran los puntos y distancias que se utilizan frecuentemente en la descripción de un sistema óptico para el caso de una lente positiva.

Donde: O - Centro de la lente
f - Distancia focal
F_o - Foco objeto, el plano en el que se encuentra es el plano focal frontal
F_i - Foco imagen, el plano en el que se encuentra es el plano focal posterior
x_o - Distancia del punto focal al objeto

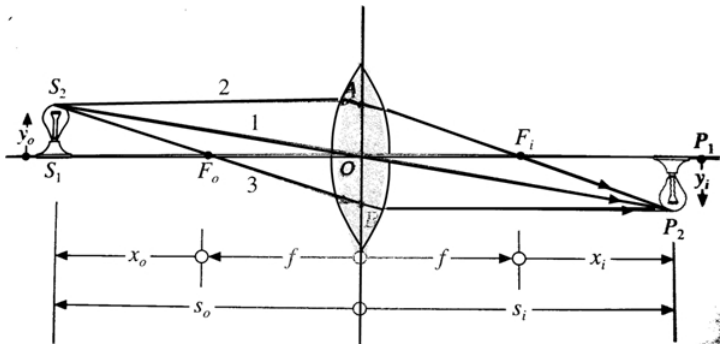


Figura 2.2: Puntos y planos en un sistema de lentes

x_i - Distancia del punto focal a la imagen
s_o - Distancia objeto
s_i -Distancia imagen
y_o - Tamaño del objeto
y_i - Tamaño de la imagen

2.2 Procesamiento Digital de Imágenes

[9] El procesamiento digital de imágenes se refiere a la manipulación de imágenes por medio de una computadora. Debido a que las computadoras trabajan con datos numéricos, la imagen tiene que ser digitalizada. De esta forma la imagen se divide en pequeñas regiones llamadas píxeles cuya intensidad depende del brillo y se especifica en una escala de grises.

Los píxeles tienen una posición específica dentro del arreglo así como también un valor en la escala de grises. Estando de esta forma la imagen puede ser procesada. Durante el procesamiento, los píxeles son modificados por el programador.

Una imagen debe contener información descriptiva del objeto u objetos que representa. A continuación se definen algunos términos utilizados en el ámbito del procesamiento de imágenes.

- Imagen. Es la distribución de materia visible.
- Digital. Se relaciona con el cálculo por medio de métodos numéricos o por unidades discretas.
- Imagen digital. Es la representación numérica de un objeto.

- Procesamiento digital de imagen. El procesamiento digital de imagen comienza con una imagen y regresa una versión modificada de esta. El análisis de imágenes digitales toma una imagen digital traduciéndola en otro elemento como puede ser una serie de datos de mediciones o bien una decisión. Sin embargo actualmente el término de "Procesamiento digital de imágenes" cubre ambas funciones.
- Visión computacional. Concierne al desarrollo de sistemas que pueden interpretar el contenido de escenas naturales.
- Digitalización. Es el proceso de convertir una imagen de su forma original a forma digital. A la acción opuesta es la visualización (*display*).

2.2.1 Herramientas de procesamiento de imágenes

En el procesamiento digital de imágenes existen multitud de herramientas encargadas de modificar una imagen. Entre estas herramientas se encuentran las operaciones morfológicas que se mencionan a continuación debido a que fueron de utilidad en el desarrollo de este trabajo.

Operaciones morfológicas

Morfología matemática se refiere a una herramienta que nos ayuda a extraer información de una imagen. Existen las operaciones morfológicas básicas de erosión y dilatación que se pueden aplicar sobre imágenes binarias directamente y en algunos casos se puede partir de estas operaciones para obtener operaciones más complejas.

Las operaciones morfológicas basan su funcionamiento en un elemento de estructuración que barre la imagen resaltando los detalles de los cuales se desea extraer información. Matemáticamente estas operaciones pueden definirse en términos de la teoría de conjuntos.

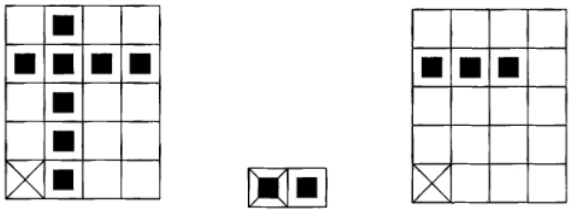
Erosión

La erosión es una operación que "adelgaza" los objetos de una imagen binaria.

La erosión de A por B, se denota como $A \ominus B$. Si tenemos un objeto A y un elemento estructurante B_z cuyo origen ha sido trasladado a la posición z, la erosión de A porB_z está definida por todos los puntos de z tales que B_z está incluida en A. Se puede representar formalmente como:

$$A \ominus B = \{z \mid (B)_z \cap A^c \neq \emptyset\} \tag{2.3}$$

Un ejemplo de erosión se muestra en la Figura 2.3



a) b) c)

Figura 2.3: a)Imagen A; b)Elemento estructurante B; c)Erosión de la imagen A por el elemento estructurante B

Dilatación

Esta operación, como su nombre lo indica se encarga de "hacer crecer" los objetos. Análogamente al caso anterior,la dilatación de A por B, que se denota como $A \oplus B$ consiste en todos los puntos z tales que B_z "toca" a A, esto es:

$$A \oplus B = \{z \mid (\widehat{B})_z \cap A \neq \emptyset\} \tag{2.4}$$

Donde $\emptyset$ es el conjunto vacío y $\widehat{B}$ es el elemento estructurante reflejado, es decir:

$$\widehat{B} = \{w \mid w = -b, \quad para \quad b \in B\} \tag{2.5}$$

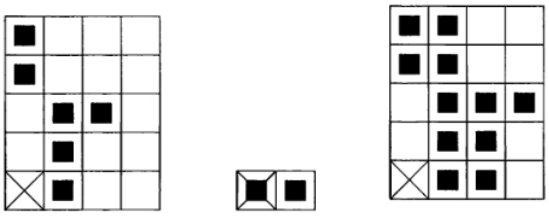
Un ejemplo de dilatación se muestra en la Figura 2.4

Apertura y Cierre

La apertura y cierre son operaciones resultado de la combinación de erosión y dilatación.

La apertura morfológica de A por B y que se denota como $A \circ B$ se trata de una operación de erosión sobre A por B seguida de una dilatación del resultado por B, esto es:

$$A \circ B = (A \ominus B) \oplus B \tag{2.6}$$



a) b) c)

Figura 2.4: a)Imagen A; b)Elemento estructurante B; c)Dilatación de la imagen A por el elemento estructurante B

La apertura morfológica remueve las regiones de un objeto que no contienen al elemento estructural, suaviza el contorno de los objetos rompe las conexiones delgadas y remueve rebabas.

El cierre morfológico de A por B se denota como $A \bullet B$ es una operación dilatación seguida por una erosión:

$$A \bullet B = (A \oplus B) \ominus B \tag{2.7}$$

Como la apertura, el cierre tiende a suavizar el contorno de los objetos. Sin embargo, contrario al caso anterior, esta operación une discontinuidades cercanas, rellena pequeños agujeros y espacios menores que el elemento estructural.

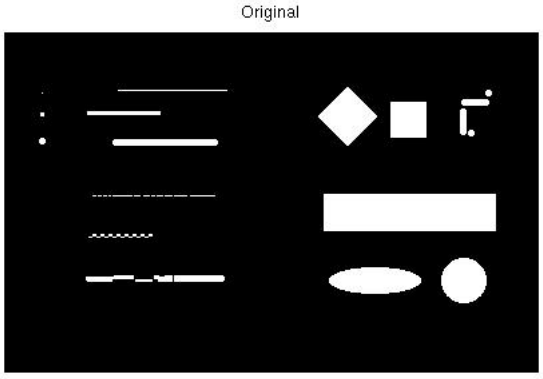


Figura 2.5: Imagen Original

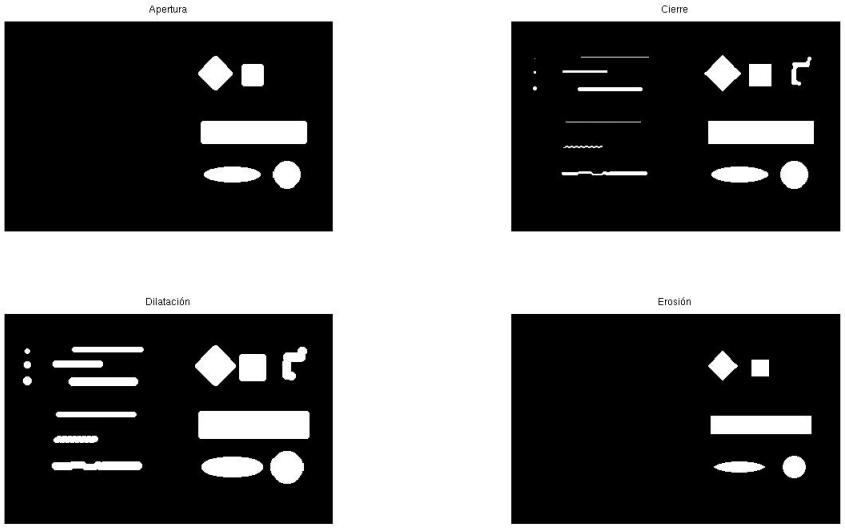


Figura 2.6: Resultado de aplicar las operaciones morfológicas a la imagen de la Figura 2.5

Como ejemplo del efecto de estas operaciones se muestra en la figura 2.6 el resultado de aplicar las operaciones de apertura, cierre, dilatación y erosión a la imagen mostrada en 2.5.

2.3 Consideraciones al determinar los defectos en una superficie curva

Las lentes de ESOPO están diseñadas con diferentes radios de curvatura y tamaños. Estos diferentes valores se muestran en la Tabla 2.1.

La inspección de superficies esféricas conlleva a tener problemas extras a solucionar como son:

- *La determinación del tamaño y la forma real.*La obtención de los parámetros de los defectos por medio de la fotografía de una lente esférica con una curvatura determinada depende de la distancia entre objeto y sensor, así como de la magnificación aplicada.
- *Limites que abarca la toma para los diferentes tamaños de las lentes.* Se busca optimizar el área que abarca la fotografía para poder contar

Lente	**Curvatura superficie izquierda**	**Curvatura superficie derecha**	**Diámetro**
Doblete de campo (azul-rojo)L1	81.7507	Plano	56/70
Doblete de campo (azul-rojo)L2	Plano	70.47	70
Triplete Azul L1	343.98	3526	120
Triplete Azul L2	219.55	343.98	120
Triplete Azul L3	371.465	219.53	120
Primer doblete azul de la cámara L1	Plano	119.63	147
Primer doblete azul de la cámara L2	119.65	1265.3	155
Segundo doblete azul de la cámara L1	217.6	217.6	162
Segundo doblete azul de la cámara L2	217.57	428.4	163
Singlete azul de la cámara 1	143.125	141.6	154/172
Singlete azul de la cámara 3	235.5	914	69/80
Singlete azul de la cámara 2	194.3	Plano	132
Brazo azul de la ventana del criostato	187.07	Plano	66/76
Triplete rojo L1	331.06	1023.06	120
Triplete rojo L2	300.64	331.11	120
Triplete rojo L3	420.5	300.6	120
Primer doblete rojo de la cámara L1	972.4	177.6	147
Primer doblete rojo de la cámara L2	177.62	Plano	150
Segundo doblete rojo de la cámara L1	244.3	171.73	154
Segundo doblete rojo de la cámara L2	171.7	693.9	152
Singlete azul de la cámara 1	251.6	196.9	157/163
Singlete azul de la cámara 2	212.7	Plano	145
Singlete azul de la cámara 3	283	1250	69/79
Brazo rojo de la ventana del criostato	187.07	Plano	66/76

Tabla 2.1: Curvatura de las lentes de ESOPO

con una imagen de suficiente resolución que permita la obtención de defectos pequeños.

- *Heterogeneidad luminosa de la imagen.*Debido a fallas en la alineación

de la cámara con la superficie a ser tomada puede haber heterogeneidad de la iluminación en la imagen lo que mete ruido.

- *Error de perspectiva.* Este se debe a que por la misma falta de perpendicularidad entre el plano del objeto y el plano del sensor óptico, la imagen puede ser captada con cierta distorsión. Esta distorsión depende de la diferencia de ángulo de la posición de la cámara con respecto a su posición ideal.

2.4 Método utilizado

Básicamente lo que se utilizará en este trabajo para resolver el problema planteado es lo que se conoce como visión computacional. La visión computacional es un método utilizado para el análisis de diversos fenómenos en los que sea posible tener un sistema de visión el cual consiste de las siguientes partes:

- Fuente de radiación. En este tipo de sistemas se necesita detectar radiación del objeto de estudio. Esta radiación, que por lo general se encuentra dentro del rango visible, es la que contiente la información a ser analizada.

- Cámara. La cámara es el objeto que recolecta la radiación mencionada.

- Sensor. El sensor de lo que se encarga es de detectar la señal y en su caso transformar la energía recibida en una clase de energía que pueda ser manejada por la unidad de procesamiento.

- Unidad de procesamiento. Se refiere a la parte encargada de la extracción de la información necesaria del objeto.

- Actores. Con actores nos referimos a las personas que evalúan el trabajo y pueden realizar modificaciones en el proceso.

La Tabla 2.2 muestra una comparación de el sistema biológico de visión humana contra un sistema de visión computacional.

De esta tabla se puede ver que la visión computacional puede ser utilizada para la medición como lo hace el ser humano ya que trata de emular algunas de sus funciones como el control de irradiancia y seguimiento entre otras además de contar con ventajas como la linealidad. La visión computacional también esta libre de la subjetividad analizada en 1.6.2.

Tarea	Visión Humana	Visión Computacional
Visualización	Pasiva, Principalmente debida a la reflexión de la luz en superficies opacas	Pasiva y activa (control de iluminación)
Formación de la imagen	Sistema óptico refractivo	Sistemas diversos
Control de irradiancia	Control muscular de la pupila	Aberturas motorizadas, ruedas de filtros y filtros sintonizables
Foco	Control muscular para el cambio de la distancia focal	Autofoco basado en medición de distancias
Resolución de irradiancia	Sensibilidad logarítmica	Sensibilidad lineal
Seguimiento	Movimiento del globo ocular	Barrido y cámaras- robot
Procesamiento y análisis	Jerárquicamente organizado con procesamiento en paralelo masivo	Principalmente procesamiento serial

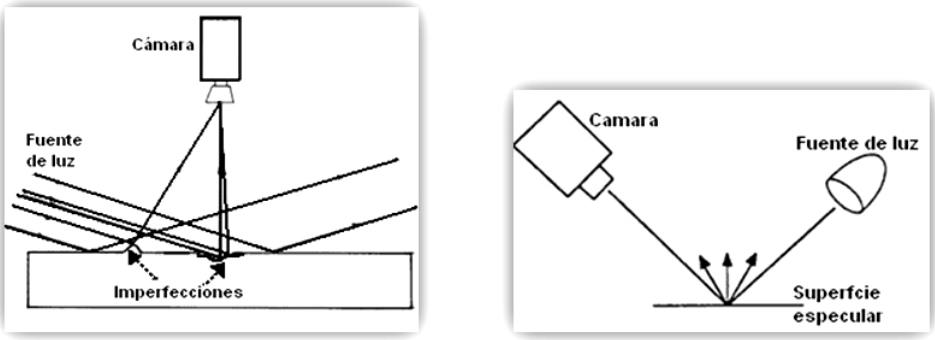
Tabla 2.2: Módulos funcionales de la visión humana y la visión computacional

2.4.1 Fuente de radiación

La iluminación adecuada de un sistema es esencial para la captura de una imagen. La iluminación inapropiada puede llegar a provocar problemas tales como puntos luminosos que esconden datos importantes de la imagen así como también lo pueden hacer las sombras. Otro problema con la mala iluminación es una baja relación señal a ruido. Debido a la importancia de la iluminación se han desarrollado varias técnicas que son usadas dependiendo del propósito de ésta.

Dichas técnicas pueden ser clasificadas de dos maneras. Una de ellas es por dirección de iluminación en las que se encuentran la frontal, posterior, direccional, oblicua, campo claro y campo oscuro (Figura 2.7). La otra clasificación consiste en el tipo de fuente utilizada y son la iluminación difusa, polarizada y colimada.

Las ventajas y desventajas de los tipos de iluminación más utilizados así como las posible aplicaciones de cada uno se muestran en la tabla 2.3



a) b)

Figura 2.7: Campo a) oscuro, b) claro

2.4.2 La cámara fotográfica

En una cámara réflex como son las utilizadas en este trabajo la luz atraviesa los primeros elementos ópticos y se encuentra con el diafragma que se encarga de controlar la cantidad de luz que llega a cada punto de la imagen. Luego del diafragma la luz tiene que atravesar otras lentes y al emerger de ellas choca con un espejo que la conduce al visor. Cuando se toma la fotografía el espejo se mueve y el obturador se abre dejando pasar la luz al dispositivo sensible.

Las características principales de una cámara son la distancia focal del sistema óptico y el rango de razones focales dentro de las que puede operar. Se requiere una distancia focal grande para producir una imagen grande debido a que, en ausencia de aberraciones, la imagen de un objeto lejano que forma un ángulo $\delta\theta$ en el primer punto nodal, tiene dimensiones lineales de $f\delta\theta$.

Un objetivo puede ser muy sencillo y contener sólo una lente. Puede ser también más complejo y tener un gran número de lentes en diversas combinaciones. Las lentes del objetivo, están destinadas a transmitir la imagen real de un objeto al plano focal.

Los objetivos se clasifican en función del su ángulo de campo:
- Normales, con ángulo de (45 °C)
- Teleobjetivos, con un ángulo inferior a los (45 °C)
- Gran angulares, con un ángulo superior a los(45 °C)

Abertura del diafragma

La abertura hace referencia al tamaño de la abertura a través de la cual pasa la luz. Mientras más grande es la abertura, mayor es la cantidad de luz que pasa a través de ella y por lo tanto se tiene una exposición más luminosa. Las aberturas pequeñas se traducen en menor luz y exposiciones más oscuras.

Velocidad de obturación

La velocidad de obturación determina el tiempo que el obturador permanece abierto. Mientras más lenta es la velocidad de obturación, mayor es el tiempo que el CCD queda expuesto a la luz y por consiguiente más luminosa es la exposición. Las velocidades de obturación rápidas significan que el sensor de imagen se expone a la luz durante menos tiempo, produciendo exposiciones más oscuras.

Las velocidades de obturación rápidas y las aberturas grandes congelan los objetos en movimiento y atenúa los detalles del fondo, mientras que las velocidades de obturación lentas y las aberturas pequeñas hacen que los objetos en movimiento aparezcan borrosos acentuando los detalles del fondo

Profundidad de campo

Profundidad de Campo se refiere al rango de distancias dentro de cual los objetos fuera del foco se aprecian enfocados. Las aberturas grandes reducen éste parámetro lo que se refleja en que los objetos fuera de foco se vean borrosos. Las aberturas pequeñas aumentan la profundidad de campo resaltando los objetos delante y detrás del foco.

Sensibilidad ISO

Este valor nos ayuda a determinar la cantidad de luz que es necesaria para exponer correctamente una imagen en el sensor. Cuanto mayor sea la sensibilidad ISO, menos luz se necesitará para realizar la exposición, permitiendo unas velocidades mayores o unas aberturas inferiores.

Los valores más bajos como 100 requieren fuentes de luz más potentes o exposiciones más prolongadas para lograr una exposición óptima. Los valores más altos resultan mucho más sensibles a la luz, permitiendo así exposiciones correctas en un tiempo muy inferior. Estos valores se logran no por un incremento en la sensibilidad de los elementos captores, sino por una amplificación posterior de la señal que estos emiten.

Como estos elementos tienen una emisión de señal de base más o menos fija, al capturar una señal lumínica débil y amplificarla, estamos amplificando también una buena porción de la emisión de datos aleatoria del sensor, con lo que se mezclará una cantidad de señal aleatoria sin contenido a la señal correspondiente a la imagen. Por ello mientras más alta es la sensibilidad ISO, mayor es la probabilidad de que la imágenes sean afectadas por ruido que se manifiesta como píxeles de colores brillantes con esparcimiento aleatorio.

2.4.3 Sensor

Para detección luminosa se pueden utilizar diversos dispositivos detectores. En este caso se utilizó una cámara digital por lo que a continuación se analizará el funcionamiento del CCD y CMOS debido a su uso simple en la adquisición de imágenes en el rango visible.

El dispositivo CCD es un arreglo de elementos fotosensibles hechos a base de semiconductores que hacen uso del fenómeno fotoeléctrico para generar carga. Ejemplo de uno de los elementos que conforman la matriz del dispositivo se muestra en la Figura 2.8

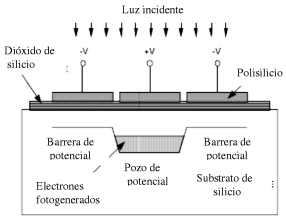


Figura 2.8: Esquema de una célula

La célula sensible mostrada en la figura tiene tres electrodos cuya función es crear barreras de potencial eléctrico variables. La primera barrera formada tiene la función de colectar los electrones generados por la incidencia de fotones en el semiconductor. La variación en el voltaje de los electrodos provoca la transferencia de la carga.

El CCD es un dispositivo lineal (sin que llegue a la saturación) lo que quiere decir que la señal eléctrica producida es proporcional al número de fotones absorbidos.

Para el CCD la carga es transportada a través del arreglo y es leída por una de sus esquinas mediante un convertidor análogo-digital. En los CMOS se tienen varios transistores en cada píxel cuya función es amplificar y mover

la carga de manera que cada píxel se lee individualmente lo que los hace más rápidos.

Otra ventaja consecuencia de que los CMOS tienen la electrónica en el mismo lugar de el píxel es que la carga no tiene que esperar a ser transferida a través del arreglo lo que reduce los efectos del desbordamiento de los electrones. Sin embargo al estar los transistores a lado de cada píxel, el ruido aumenta y la sensibilidad se ve reducida debido a que el área de cada píxel se ve reducida.

Iluminación	Ventajas	Desventajas	Aplicaciones
Frontal direccional (lámparas incandescentes, fuentes láser y arreglos de LED's	Fácil implementación y flexible	La iluminación puede no ser homogénea provocando sombras no deseables	Inspección y medición de objetos planos de acabado mate
Frontal difusa (lámparas fluorescentes, fibra con difusores,lámparas incandescentes con difusores	Es relativamente no direccional, reduce el brillo en superficies especulares, relativamente fácil de implementar	La iluminación es grande, las orillas no se aprecian bien, existe bajo contraste en partes monocromáticas	Medición e inspección de objetos brillantes
Frontal oblicua (guías de fibra óptica, arreglos de diodos, lámparas incandescentes y arreglos alineados de luz)	Muestra la estructura de la superficie y realza la topografía	Se crean "puntos calientes" y sombreado extremo	Identificación de defectos en objetos con intrusiones. Inspección del acabado de objetos opacos
Frontal polarizada (fuente puntual o iluminación frontal difusa, con polarizador en la fuente, con analizador frente a las lentes)	Reduce el brillo	Reduce la cantidad de luz en las lentes	Para inspección de superficies brillantes
Campo claro (fibra óptica, arreglos de LED's)	Alto contraste en detección de orillas	Elimina los detalles de la superficie	Se utiliza frecuentemente para el análisis de superficies rugosas
Campo oscuro(fuente puntual a un ángulo pequeño con respecto a la superficie del objeto)	Ilumina los defectos y provee de alto contraste	No ilumina superficies planas y suaves	Se utiliza para examinar superficies especulares
Posterior difusa(Fuente con difusor tras el objeto)	Fácil implementación, provee alto contraste	No ilumina superficies planas y suaves	Medición de exteriores y ubicación de puntos específicos. Medición de opacidad de materiales translúcidos
Posterior polarizada(iluminación posterior difusa, con polarizador en la fuente, con analizador frente a las lentes)	Resalta defectos de birrefringencia, es relativamente fácil de implementar	Solo es útil para efectos de birrefringencia, las orillas no se ven adecuadamante y necesita espacio detrás del objeto para el iluminador	Para inspección superficies brillantes
Posterior direccional(Fuente puntual con lentes colimadoras detrás del objeto)	Produce siluetas	Debe existir espacio disponible detrás del objeto para el iluminador	Medición de exteriores y ubicación de puntos específicos

Tabla 2.3: Tipos de iluminación

Capítulo 3

Bases para la medición

La metodología que se siguió en esta tesis se explica en el diagrama de la Figura 3.1. Los recuadros azules muestran los pasos en el método que no se lograron terminar por falta de tiempo mientras que los recuadros rojos sí son desarrollados.

A continuación se describiran los puntos que se analizaron en este trabajo de tesis . Primero se verá la construcción del entorno físico que se utiliza para las pruebas donde un aspecto importante es el de la iluminación que permita el mejor contraste posible. Después sigue el procesamiento de la señal que se llevo a cabo.

3.1 Diseño y construcción del Cajón de Pruebas

El cajón de prueba se construyó para limitar la incidencia de luz no deseada durante la realización de las pruebas a la vez que tenía que contar con la iluminación adecuada para un buen contraste de los objetos que se vieran dentro. Se trata de una caja cubierta de negro en su interior con las dimensiones mostradas en la Figura 3.2. El diseño de esta caja se basó en los sistemas típicamente empleados para la mejora del contraste en la inspección visual. [5]

Con base en las características de la iluminación que se vieron en el Capítulo 2, se hicieron varias pruebas buscando la iluminación más adecuada. Estas pruebas fueron con iluminación frontal direccional, iluminación de campo oscuro e iluminación frontal difusa.

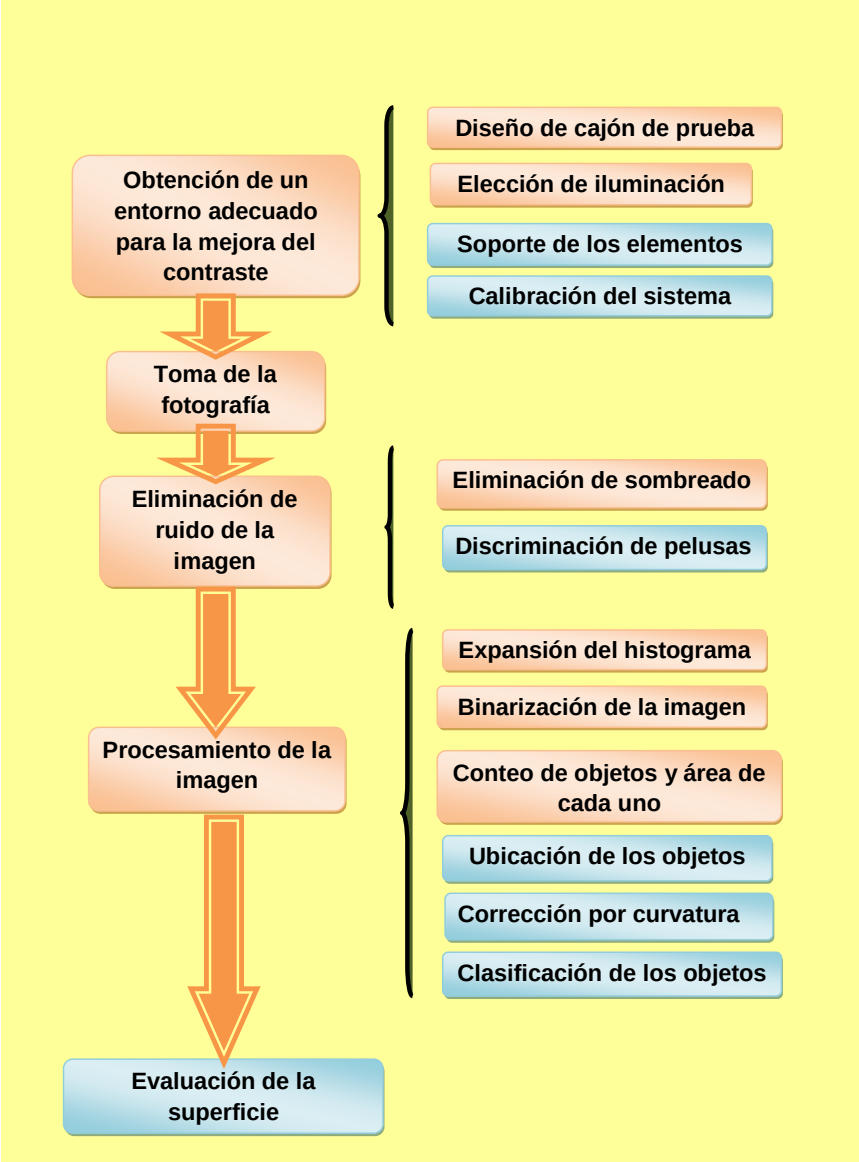


Figura 3.1: Metodología empleada

Iluminación de campo oscuro

En particular para la inspección en superficies no opacas el método de campo oscuro ofrece alto contraste de los detalles internos y superficiales de un

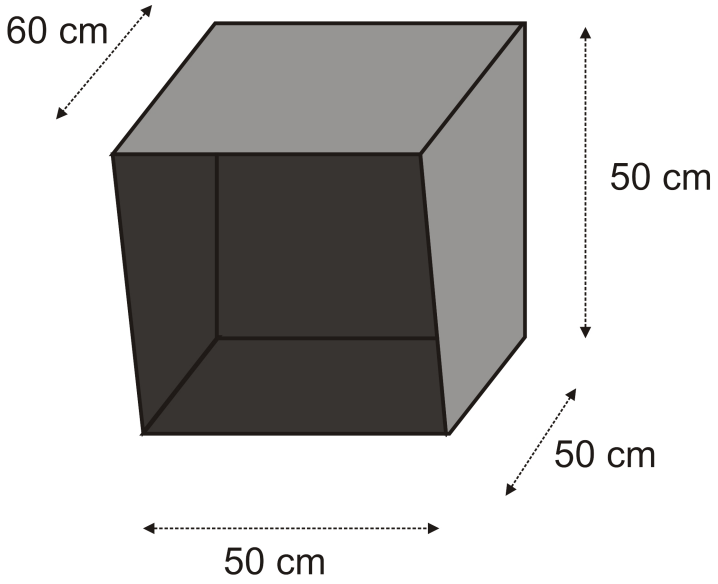


Figura 3.2: Dimensiones del cajón de prueba

elemento. De esta manera resalta rasguños, fracturas y burbujas en objetos claros. Por ello también fue pensada como opción.

En la iluminación de campo oscuro la cámara se localiza en un punto fuera del camino de la luz reflejada por la superficie (Figura 3.3). Si la superficie fuera un espejo perfecto, no habría luz esparcida por lo que la imagen detectada por la cámara estaría uniformemente gris. Sin embargo si la superficie tiene defectos, la luz incidente por la iluminación, se esparce en todas direcciones en esas regiones. La imagen obtenida por la cámara tendrá entonces marcas brillantes. Generalmente este método de iluminación se aplica a superficies que reflejan la luz.

Para obtener esta iluminación se hace incidir luz de alta intensidad directamente sobre el objeto con un ángulo muy pequeño respecto a la superficie donde descansa. De esta manera se logra que las imperfecciones de la superficie interfieran con la trayectoria de la luz produciendo zonas brillantes.

Actualmente esta iluminación se puede conseguir utilizando hileras de LEDs montadas a $75 - 90\,^{\circ}\mathrm{C}$ con respecto al eje óptico o bien anillos de LEDs (Figura 3.4). EL anillo de LEDs tiene la ventaja de poder iluminar áreas en la superficie de una forma tal que no crea sombras no deseadas. Es decir, la luz incide homogéneamente de todas direcciones logrando un gran

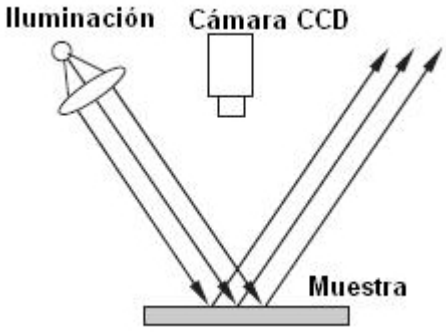


Figura 3.3: Iluminación de campo oscuro

contraste.

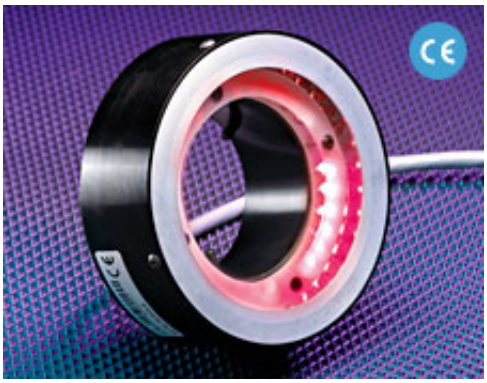


Figura 3.4: Anillo de LEDs para iluminación de campo claro y campo oscuro

La configuración de anillos de LEDs existen para iluminación de campo claro y campo oscuro. Debido al alto precio de estos anillos (836 dólares para un anillo de 10 cm de Edmund Optics, por dar un ejemplo) se intentaron fabricar (Figura 3.5), sin embargo el resultado fue una posición no homogénea en el ángulo al cual se debían encontrar los LEDs, ocasionando puntos de luz inadecuados. Otro problema que tuvo esta iluminación fue su colocación no se tenía una estructura adecuada para el apoyo de este anillo lo que impidió incluso la captura de una imagen.

Se llegó a la conclusión de que para utilizar iluminación de campo oscuro sería necesario comprar el anillo de LEDs. Sin embargo el sistema de medición tendría que contar con partes móviles para el posicionamiento del

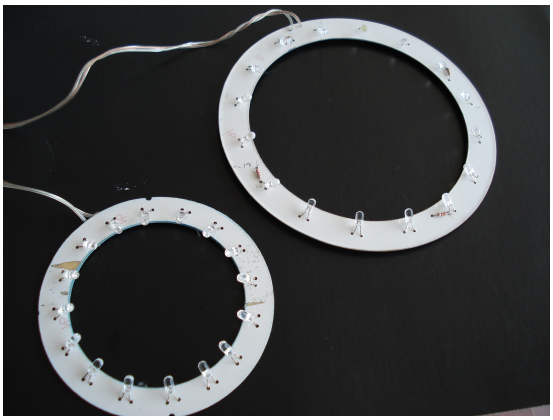


Figura 3.5: Anillos de LEDs

anillo a fin de que pudiera iluminar una superficie esférica (que necesariamente tendría que ser varias tomas debido a la curvatura). Todo esto haría un sistema más complejo y delicado.

Iluminación frontal direccional

La razón de incluir esta iluminación a pesar de no ser la más indicada fue debido a que en la norma MIL-0-13830A se utiliza para la inspección visual. Por lo tanto fue utilizada para conocer el contraste que ofrece en la captación de la imagen por medio de una cámara digital. Para la prueba se colocaron dos lamparas de 40 watts, en cada lado del cajón de pruebas, por lo que la iluminación se hacía incidir sobre la superficie de referencia. Este tipo de iluminación no permitió resaltar detalle alguno en la imagen como se muestra en la Figura 3.6 y ocasionaba también reflejos no deseados.

La imagen que se muestra en la Figura 3.6 se trata de la superficie patrón (1.6.2) de la marca Swissoptics para el estándar DIN 3140 que es equivalente al ISO 10110-7. EL patrón está dividido en once áreas rectangulares, cada una de ellas muestra rasguños asignados a un valor en términos de la norma ISO 10110-7. Es decir, se tienen rasguños cuya área es equivalente a un cuadrado de lado: 1.0 mm, 0.63 mm, 0.4 mm, 0.2 mm, 0.16 mm, 0.1 mm, 0.063 mm, 0.04 mm, 0.025 mm, 0.016 mm y 0.01 mm. Las últimas 5 áreas del patrón tienen un circulo dentro del cual se encuentran los rasguños de comparación. En el caso de los dos más pequeños éstos se encuentras dentro de otro círculo concéntrico más pequeño. Se tiene la siguiente cantidad de rasguños equivalentes para cada valor marcado: 7 para 1.0, 8 para 0.63, 9



Figura 3.6: Imagen del patrón de rasguño iluminada con luz frontal

para 0.4, 9 para 0.2, 8 para 0.16, 7 para 0.1, 6 para 0.063, 5 para 0.04, 4 para 0.025, 3 para 0.016 y 2 para 0.01. Este objeto se seguirá utilizando en futuras imágenes.

Iluminación frontal difusa

Se implementó también la iluminación frontal difusa utilizando lámparas fluorescente de 15 watts. Se instalaron dos tubos fluorescentes de luz fría de 15 watts en una base de madera sujeta en el techo de la caja como se muestra en la Figura 3.7.

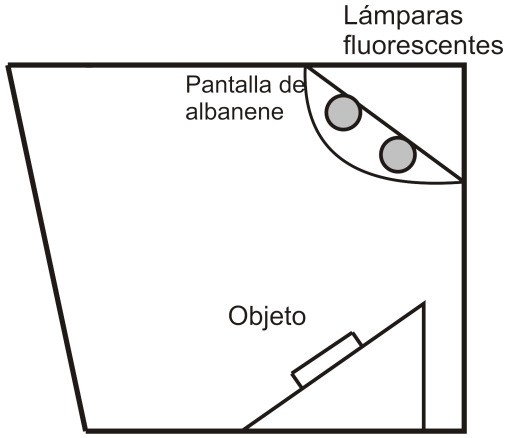


Figura 3.7: Primera configuración de las lámparas

Con esta configuración se tomo la imagen de la Figura 3.8 [1].



Figura 3.8: Imagen del patrón de rasguño iluminada con luz difusa

Al tomar las fotografías en esta configuración se tuvieron reflejos inadecuados e iluminación muy heterogénea ya que había zonas altamente iluminadas y otras muy oscuras. Por este motivo se modificó la disposición del arreglo. Con ese principio se tomó la decisión de cambiar el arreglo dejando estas mismas lámparas. Se tapizó el techo de la caja con aluminio y la disposición de las lámparas se cambió de manera que se dirigieran hacia él con el fin de que la iluminación abarcara la mayor parte posible del cajón como se muestra en la Figura 3.9. Además se agregó la pantalla de albanene con el fin de que la luz se difuminara más. Con esto se logró una iluminación más homogénea que abarcaba mayor área.

Con esta configuración se consiguieron mejores fotografías como es el caso que se muestra en la Figura 3.10 [2].

En este caso, la iluminación es adecuada ya que resalta los detalles de la superficie mostrándolos brillantes en contraste con el fondo oscuro por lo que la iluminación con luz difusa fue elegida para el sistema.

3.2 Análisis digital de las imágenes

En esta parte se analiza la elección del lenguaje de programación con el cual llevar a cabo el análisis de las imágenes. Las opciones que se tomaron en cuenta fueron MATLAB y C++.

[1] f/5.6 de apertura, exposición de 1/3 s, distancia focal de 135.00 mm con 100 ISO.Se puede notar un brillo intenso y muy concentrado en la zona superior ocasionada por el reflejo directo de una de las lámparas

[2] f/5.6 de apertura, exposición de 1/4 s, distancia focal de 135.00 mm con 100 ISO.

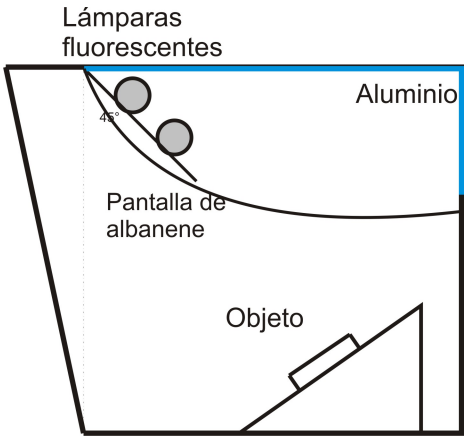


Figura 3.9: Configuración final de las lámparas

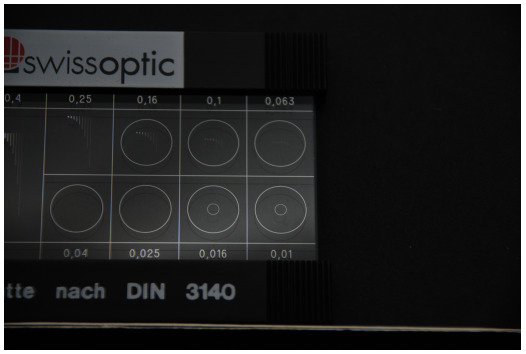


Figura 3.10: Imagen del patrón de rasguño iluminada con luz difusa

3.2.1 Estructuración del código en MATLAB

MATLAB es un lenguaje de alto nivel para desarrollo de algoritmos, visualización de datos, análisis de datos y cómputo numérico. Puede ser utilizado en la resolución de problemas computacionales específicos para ciertos procesos ya que tiene rutinas muy completas en áreas como son el procesamiento de imágenes, comunicaciones, sistemas de control, mediciones, análisis y modelado financiero y biología computacional. Utilizando para todo esto herramientas específicas.

Entre las ventajas que ofrece este programa esta el que es un lenguaje de alto nivel para computación técnica; cuenta con un ambiente de desarrollo para manejo de código, archivos y datos; utiliza herramientas interacti-

vas para exploración interactiva, diseño y resolución de problemas. Cuenta además con una gran variedad de funciones matemáticas; los datos se pueden visualizar en 2-D y 3-D entre otras muchas.

En esta sección se hace un análisis de las imágenes utilizando MATLAB como primera opción de software. MATLAB ofrece diversas herramientas para el procesamiento de imágenes en el *Image Processing Toolbox*. En este trabajo se utilizaron algunas de ellas como son:

– imopen(img,se) - Este comando realiza la operación morfológica de apertura a la imagen *img* por medio del elemento estructurante *se*.

– J=imadjust(I) - Ajusta los valores de intensidad de la imagen *I*. Toma los valores de intensidad más bajos y más altos de la imagen y satura por defecto 1% de los datos alrededor de esos valores para realzar el contraste en la imagen *J*.

– BW=im2bw(img, level) - Convierte la imagen *img* a un formato blanco y negro con un umbral dado en *level*.

– (L,num)=bwlabel(BW,N) - Etiqueta las componentes conexas con L y en *num* contabiliza los objetos.

– stats=regionprops(L,prop) - Obtiene las propiedades de la matriz L obteniendo las propiedades *prop* y lo guarda en el arreglo *stats*.

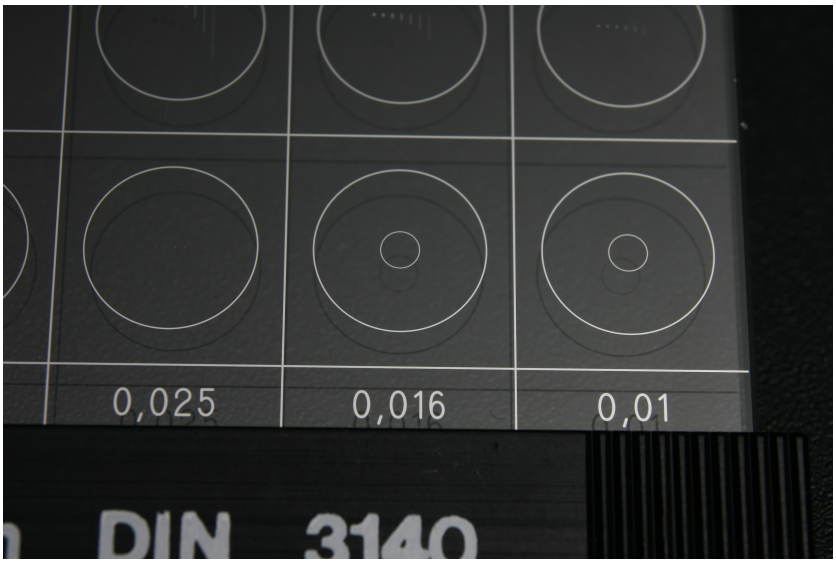
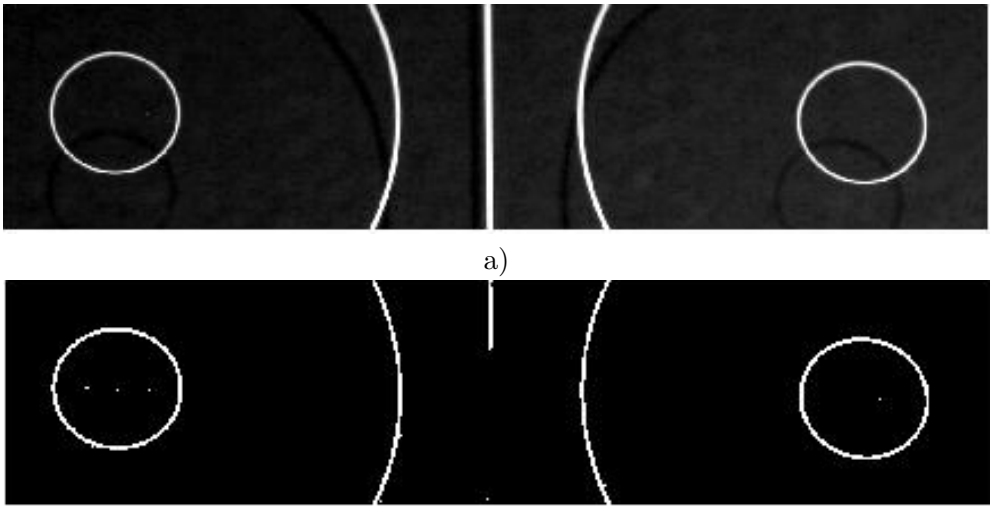


Figura 3.11: Imagen recortada del patrón de rasguño

Se escribió un código en MATLAB con el cual se logró obtener, mediante los comandos arriba mencionados una mejora en la imagen con la cual se

pudieran encontrar el número de objetos y su respectiva área. La imagen mostrada en la Figura 3.11 fue tomada al patrón de referencia DIN 3140 con una Cámara EOS DIGITAL REBEL XTi de Canon [3] con un tiempo de exposición de 1/100 s, apertura f/14.0, ISO 100, una distancia focal de 80 mm y sin uso de flash.

La imagen originalmente de 3888 x 2592 píxeles fue recortada a 1408 x 322 píxeles debido a que MATLAB ocupa demasiada memoria, al extremo de inestabilizar el sistema operativo cuando se utilizaba la imagen con su tamaño original. La imagen utilizada en esta sección se muestra en la Figura 3.12a) donde se muestra el círculo interior de los valores marcados con 0.016 y 0.01.



a)

b)

Figura 3.12: a)Imagen preprocesada en MATLAB, b) Imagen binarizada con MATLAB

Se escribió un código que se anexa en el Apéndice A que permite encontrar el número de objetos en una imagen así como el área de cada uno. La imagen de la Figura 3.12b) se obtiene al binarizar la imagen resultante un filtrado morfológico al canal rojo de la imagen 3.12a). A partir de la imagen binarizada se encuentran los siguientes resultados:

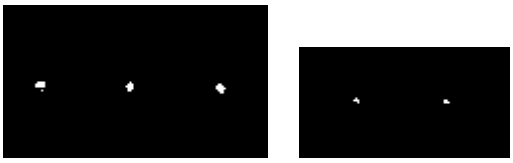
El programa no ubica los elementos por lo que se tomó la parte interna a los círculos menores de la imagen binarizada para ingresarlos a la función

[3]Esta fotografía fue tomada por Carlos Yustis, fotógrafo del Instituto de Astronomía, a quien se le agradece su ayuda

Número de objetos	66
Tamaño de la imagen	453376
Área de los objetos	3187, 1, 1, 14, 1, 1, 1, 2, 1, 1, 1, 3, 2, 1, 13, 2, 2, 6, 1, 1, 2, 1970, 2, 2, 1, 1, 3, 1, 1, 1, 2, 1, 2, 1, 2, 1, 2, 510, 1, 2, 1 ,1, 2, 3, 3, 3, 2, 4, 4, 3, 1, 1, 2, 1, 1, 2, 1953, 1, 1, 1, 1, 9, 1, 3187, 5, 5.

Tabla 3.1: Resultados obtenidos con MATLAB

de conteo de objetos y áreas. Las imágenes recortadas se muestran en la Figura 3.13



a) b)

Figura 3.13: Imagen binarizada de los objetos dentro del círculo con valor a) 0.016 b) 0.01

Para el caso de la Figura 3.13a) se encontraron 18 objetos con valores de 13, 14, 17 píxeles y 15 tuvieron valor de un píxel mientras que para 3.13b) se encontraron dos objetos ambos de 5 píxeles.

El programa en MATLAB ofrece resultados que permiten comparar el área de 0.0001 mm^2 a 5 píxeles y el área de 0.000256 mm^2 a un promedio de 15 píxeles. Sin embargo el código de MATLAB tuvo un manejo ineficiente de memoria que impidió el análisis de imágenes grandes.

3.2.2 Estructuración del código en C++

Debido a que MATLAB no puede manejar imágenes grandes eficientemente C++ es un lenguaje de programación de propósito general. Esto quiere decir que se puede programar cualquier cosa utilizandolo como por ejemplo sistemas operativos y compiladores hasta aplicaciones de bases de datos y procesadores de texto, pasando por juegos, aplicaciones a medida, etc.[14]

Si bien esto puede parecer complicado comenzando desde un principio cada tarea, C++ tiene la propiedad de reutilizar el código en forma de librerías de usuario. Esto es , que los programadores enfocados a tareas específicas crean sus propias librerías especializadas para aquellas cosas que

hacen frecuentemente.Otro punto a favor de C++ es el hecho de que lleva ya varios años funcionando como lenguaje de programación de uso aceptado. Además existen compiladores y librerías gratuitas que pueden descargarse fácilmente de la red.

Una de estas librerías que se puede encontrar de libre acceso es CImg [4]. CImg fue diseñada para desarrollo de algoritmos de procesamiento de imágenes.Entre las ventajas que ofrece son portabilidad, simplicidad, extensibilidad y economía al ser de libre acceso. Funciona rápidamente en su ejecución, sin embargo la programación es más elemental. Utilizando esta librería se implementaron las funciones realizadas en MATLAB para su uso en C++ ya que el manejo de memoria es más adecuado permitiendo el procesamiento de imágenes mayores a las analizadas en MATLAB.

A continuación se describen las funciones realizadas en C++ por medio de las cuales se manipuló la señal para obtener el número de objetos y área cada cada uno.

Disminución de la heterogeneidad de la iluminación en la imagen

Para eliminar la heterogeneidad se utilizó un filtrado morfológico en el cual se aplicó un suavizado que consistió en una apertura morfológica seguida de un cierre morfológico. Esta imagen se toma como un estimado del fondo y es restada de la versión original sumando una constante que en este caso fue el valor medio de los píxeles de la imagen original.

Expansión del histograma

Se trata de una función para expandir los niveles de gris del histograma [5] de una imagen. El histograma se expande a fin de que cubra el rango de valores completo de los niveles de gris. Esto tiene el efecto de incrementar el contraste de una imagen de bajos contraste.

Binarización de la imagen

Para la binarización de la imagen se utilizó el Algoritmo de Ridler -Calvard [11]. En este método, el umbral que decide la intensidad de los píxeles que cambiarań al máximo o al mínimo, se obtiene a través de iteraciones. El método está dado de la siguiente manera:

[4] http://cimg.sourceforge.net/index.shtml

[5] El histograma de una imagen es una función discreta que representa el número de píxeles en la imagen en función de los niveles de intensidad **??**

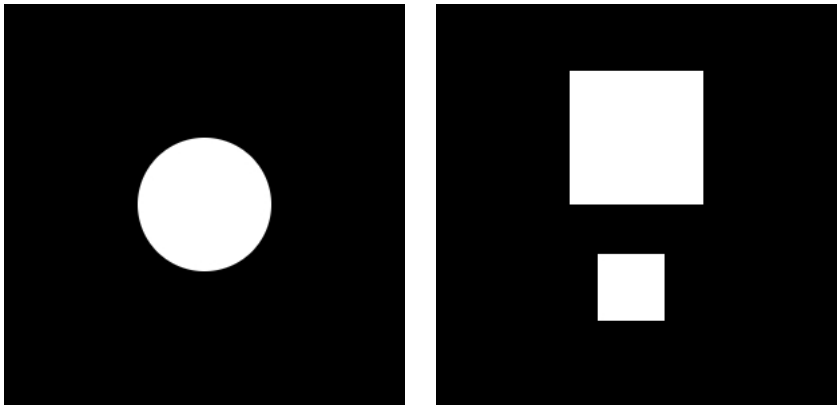
1. Iteración $k = 0$. Se calcula el valor medio de los píxeles de la imagen y se obtiene el umbral $T(k) = m$. Este valor forma dos grupos de píxeles, en uno de ellos se encuentran los píxeles cuya intensidad es menor y en el segundo la que es mayor.

2. Iteración $k = 1$. Para cada uno de los grupos obtenidos se determina un valor medio de la intensidad de los píxeles obteniendo m_1 y m_2. Se encuentra ahora el valor $T(k) = \frac{(m_1+m_2)}{2}$

3. Este nuevo valor de umbral determina la existencia de dos nuevos grupos como en el paso anterior por lo que el umbral final estará dado por $|T(k+1) - T(k)| \geq \epsilon$

Conteo de objetos en la imagen binaria

Para contar el número de objetos que se encuentran en la imagen se utilizó un método iterativo. En este método primero se asigna una etiqueta a cada píxel de valor máximo (recordando que se trabaja con una imagen binaria) para lo cual en este trabajo se utilizó un arreglo.



a) b)

Figura 3.14: a) Imagen de un círculo con radio de 50 píxeles; b) Imagen de dos cuadrados, uno con lado igual a 100 píxeles y el otro de 50 píxeles

El siguiente paso es recorrer la imagen de la esquina superior izquierda a la esquina inferior derecha. Cuando se este pasando por un píxel distinto de cero, el algotimo revisa todos los píxeles conectados y asigna al píxel actual el valor mínimo de las etiquetas vecinas. Posteriormente se hace un recorrido en el sentido contrario, es decir de la esquina inferior derecha a

la esquina superior izquierda haciendo el mismo cambio de etiqueta por el mínimo valor de etiqueta de los píxeles vecinos.

Este proceso continua hasta que el algoritmo no detecte cambio de valor en las etiquetas. Posteriormente se lleva a cabo el conteo de las diferentes etiquetas que quedaron. Por medio de este proceso es posible cuantificar el número de objetos, además se puede tomar cada conjunto de etiquetas y contar el área en píxeles que ocupan dentro de la imagen. Las Figuras en 3.14 fueron sometidas a este algoritmo.

La Figura 3.14a) es una círculo cuyo valor de radio es 50 píxeles con un área aproximada de 7854 píxeles. Al introducirse a la función de conteo los resultados son: 1 objeto de área 7999 píxeles. La Figura 3.14b) son dos cuadrados cuya longitud de cada lado es de 100 píxeles y 50 píxeles con un área de 10000 y 2500 píxeles respectivamente. Al introducirse a la función de conteo los resultados son: 2 objeto de áreas 9999 píxeles y 2500 píxeles.

Capítulo 4

Diseño del sistema de prueba

4.1 Requerimientos

Se requiere un sistema que pueda llevar a cabo la medición del número de Rasguño/Hoyo bajo el estándar MIL-0-13830A hasta un valor de 60-40. Este instrumento debe tener la capacidad de analizar superficies ópticas, en este caso lentes, desde un tamaño de 5 cm de diámetro hasta superficies de 20 cm de diámetro.El método de medición estará basado en el análisis de imágenes digitales de la superficie a ser analizada. Estas imágenes serán procesadas digitalmente para obtener la información de las imperfecciones.

Condiciones Ambientales.
El sistema debe estar aislado de luz espuria, así mismo debe ser insensible a vibraciones mecánicas que pudieran afectar la adquisición de la imagen. El instrumento completo trabajará a temperatura ambiente ($20 - 24\,^{\circ}\mathrm{C}$).

Características físicas.
El tamaño total del sistema no debe ocupar un espacio mayor a 0.5 m x 0.5 m x 0.5 m sin contar el necesario por la computadora que realice el procesamiento.

Tiempo de medición.
El tiempo total utilizado en llevar a cabo la inspección debe tomar en cuenta la velocidad de procesamiento de la imagen. Se desea que el proceso completo no requiera demasiado tiempo pueda mejorar, por ello se espera que el análisis de las superficies de mayor tamaño (20cm de diámetro) no dure más de 1 hr.

Además se condiciona el trabajo al uso de la cámara digital Nikon D80 cuyas especificaciones se muestran en el Apéndice C.

4.2 Especificaciones del sistema de prueba

4.2.1 Radiación óptica utilizada

Se utilizaron dos lámparas de luz fluorescentes de 15 watts de luz fría.

4.2.2 Dimensiones de las imperfecciones detectables

En los patrones de rasguño y hoyo utilizados se pudieron obtener imágenes de los rasguños equivalentes a $.01\mu m^2$.

4.2.3 Tipo de prueba

La prueba realizada será de reflexión, es decir, se analizará la luz reflejada de la fuente luminosa en la superficie del objeto con imperfecciones.

4.2.4 Velocidad de la medición

El tiempo en que se lleva a cabo la medición en este caso es aproximadamente de 1.5 hr. y toma en cuenta, la colocación del componente a medir, la toma de la fotografía y el procesamiento de la imagen en la computadora. Lo que retrasa la medición es el acomodo de el elemento óptico a inspeccionar debido a que no se cuenta aun con un soporte apropiado.

4.2.5 Entorno

Se utilizó el cajón de prueba mencionado en el punto 3.1 y que se muestra en la Figura 4.1.

El rango de temperaturas así como el valor de humedad dentro de los que puede ser utilizado este método depende principalmente de las propiedades de la cámara fotográfica, siendo en este caso una temperatura de entre $(-5/+40\,^{\circ}\mathrm{C})$ y un valor de humedad inferior a 85% (sin condensación).

4.2.6 Características ópticas

Se utilizará el objetivo AF-S DX Zoom-Nikkor IF ED 18-135 mm f/3.5-5.6G de la cámara CCD para enfocar la imagen.·Este objetivo tiene las siguientes características:

- Distancia focal: 18 – 135 mm
- Posiciones del zoom: 18, 24, 35, 50, 70, 105, 135

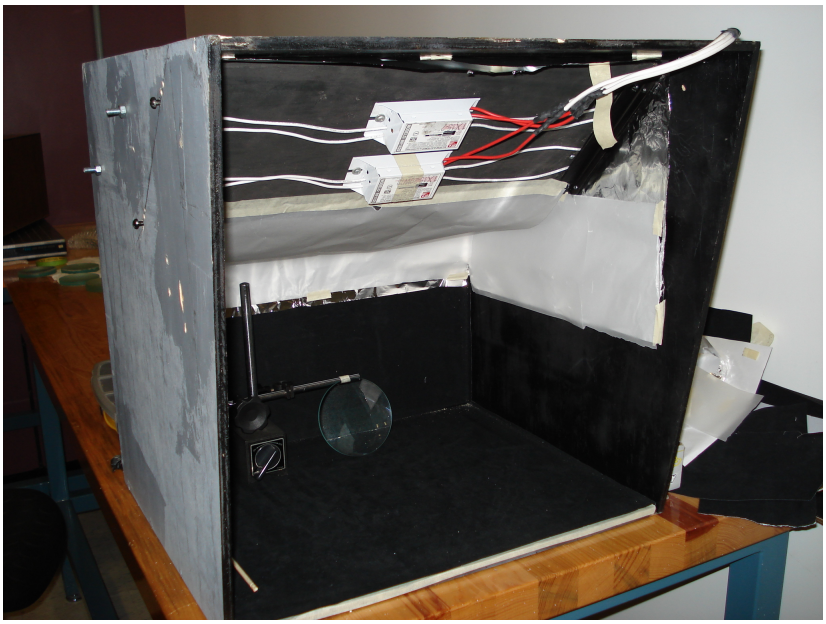


Figura 4.1: Cajón

- Distancia mínima de enfoque:0.45 m en todas las posiciones de zoom
- Abertura:Diafragma de siete hojas con abertura automática

4.2.7 Dispositivo de detección

El sensor utilizado para la detección de la señal luminosa será una cámara CCD de 10.2 píxeles efectivos. En este caso se utilizó una cámara digital réflex NIKON D80 con un CCD de 23,6 * 15,8 mm; total de píxeles: 10,75 millones.
Se pueden obtener tamaños de la imagen (en píxeles) de 3.872 x 2.592 (Grande), 2.896 x 1.944 (Mediano) y 1.936 x 1.296 (Pequeño).

4.2.8 Comunicación

La comunicación de la cámara digital con la computadora para el traslado de la información a una computadora se hará utilizando la interfaz externa USB 2.0 de alta velocidad.

4.2.9 Procesamiento de la imagen

Para el procesamiento de la imagen se eligió C++ debido a que permite mayor flexibilidad en el manejo de imágenes grandes. El código en C++ que se utilizó para el procesamiento se muestra en el Apéndice A.

Las características de la computadora en la que se realizaron las mediciones fueron las siguientes:

Sistema operativo Ubuntu, versión 8.04 (hardy) Núcleo Linux 2.6.24-23 1002 MB en memoria RAM Un procesador Intel Centrino de doble núcleo (T5600) a 1.83 GHz

4.3 Implementación del sistema

Se colocó la cámara oscura en una habitación (la Torre de Óptica en el IA-UNAM) y un tripié con la cámara frente a ella como se muestra en la Figura 4.2. Las fotografías fueron tomadas con la iluminación apagada y solamente las iluminación frontal difusa dentro de la caja estaba presente.

Para cada toma fotográfica la prueba se desarrolló de la siguiente manera:

1. Se acomodó el elemento óptico a ser inspeccionado. También se posicionó el tripié con la cámara.

2. Se encendieron las luces de la cámara y se apagó la iluminación de la torre de óptica.

3. Fueron hechos los ajustes de enfoque, apertura y velocidad de la cámara con el fin de enfocar los detalles de la superficie.

4. La toma de las fotografías fue manual utilizando el disparador automático de 10 s una vez ajustados los parámetros de la cámara.

5. Varias imágenes se capturaron y alamacenaron en la memoria de la cámara fotográfica.

6. Las imágenes se descargaron en la computadora y se analizaron.

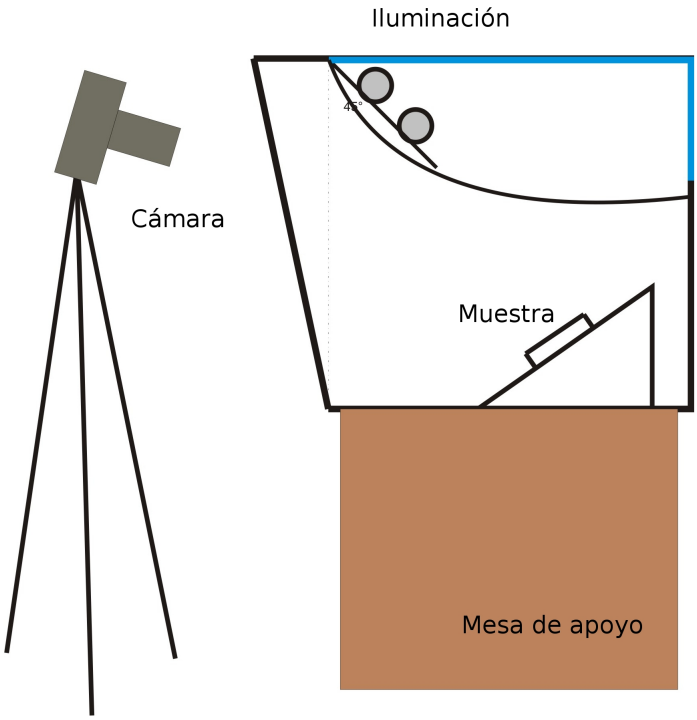


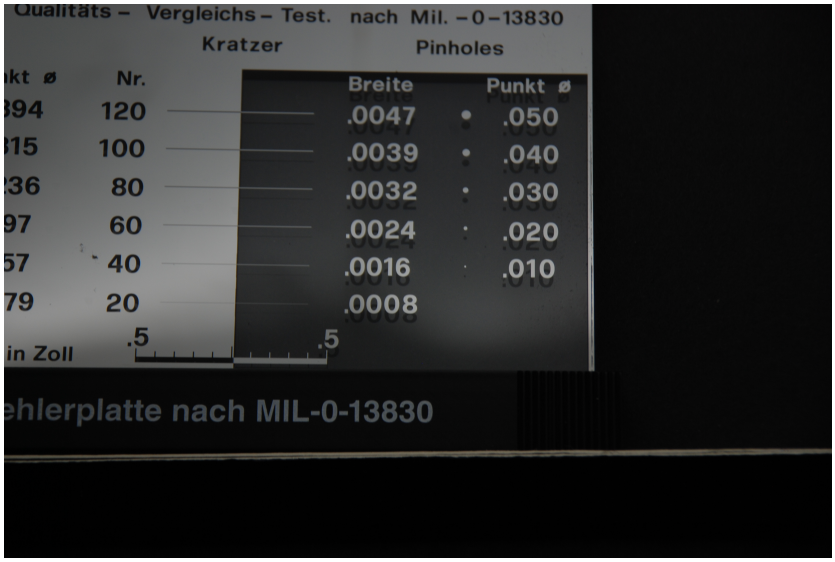
Figura 4.2: Sistema de prueba

Capítulo 5

Resultados

5.1 Imágenes obtenidas

A continuación se muestran las fotografías que fueron tomadas para la prueba del método. Se tiene la fotografía de la norma MIL-0-13830 con el fin de saber si es posible detectar los rasguños y agujeros marcados en ella. Se muestran también fotografías de dos lentes.

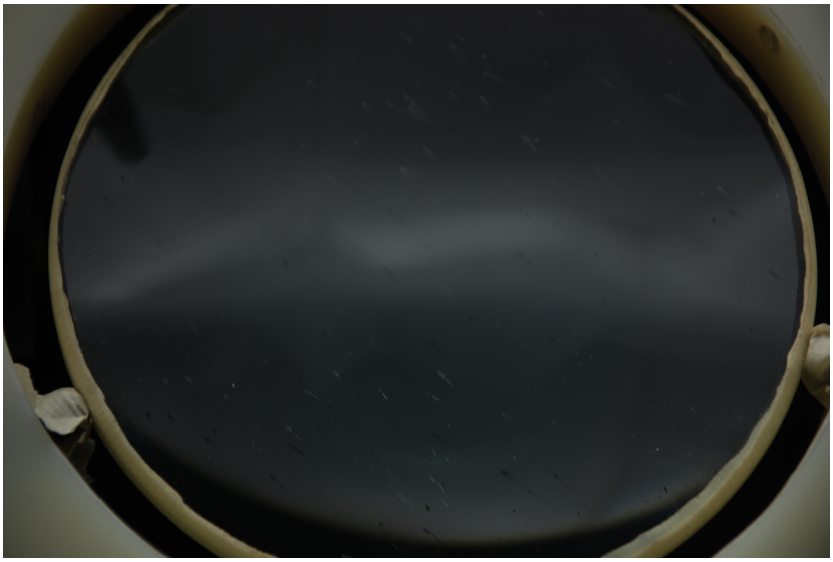


1/6 s a f/5.6; f=135.00 mm; ISO 100; $s_o \approx 32$ cm.

Figura 5.1: Patrón de referencia para la norma MIL-0-13830

En la Figura 5.1 se muestra el patrón de referencia para la norma MIL-

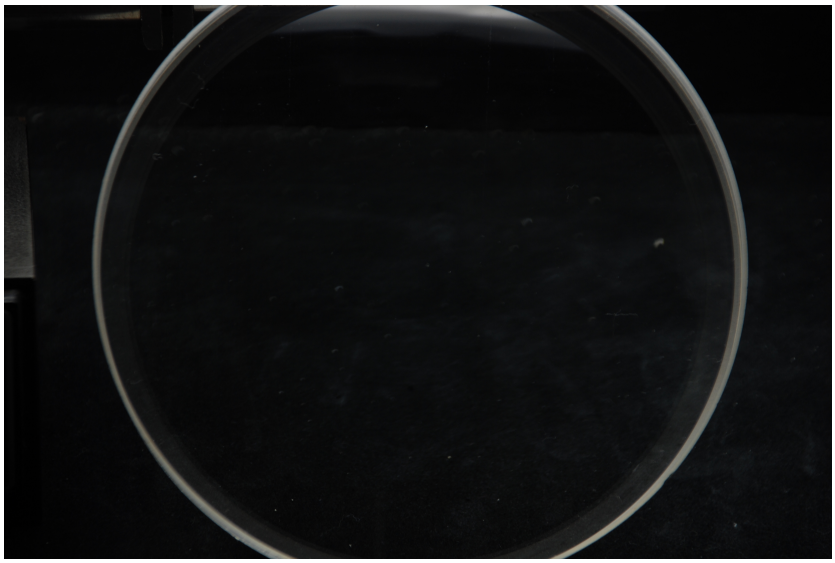
0-13830 donde se observan las líneas patrón para los rasguños con valores de 120 a 20. Para el caso de agujeros se tiene valores de comparación de 120 a 40.



1/4 s a f/5.6; f=135.00 mm; ISO 100; $s_o \approx 29$ cm

Figura 5.2: Lente de lupa

En la Figura 5.2 se muestra una lente de lupa de 10 cm de diámetro. Este elemento fue utilizado para hacer pruebas de superficies curvas con un manejo rápido ya que no necesitaba demasiadas precauciones.



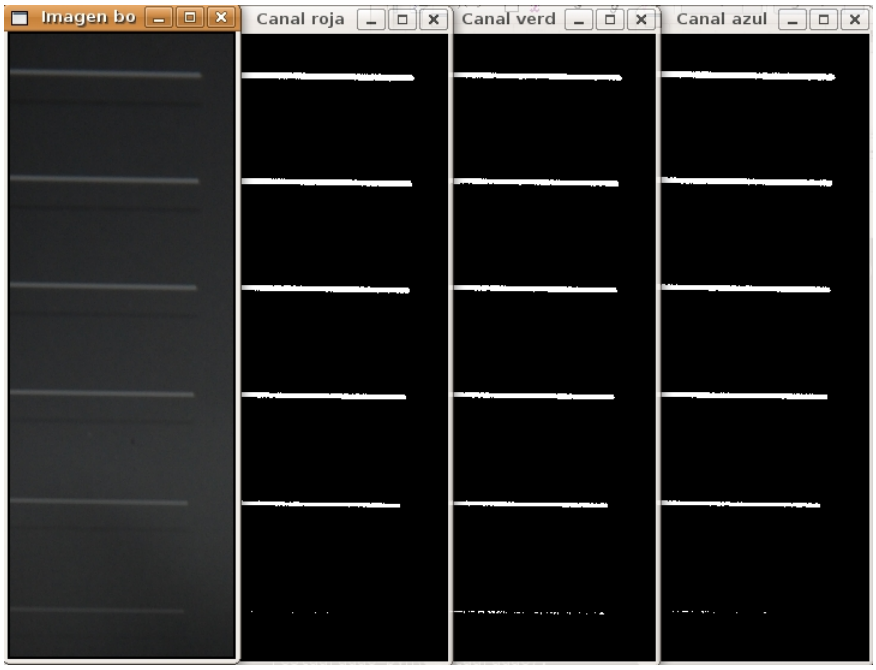
1 s a f/5.6; f=135.00 mm; ISO 100; $s_o \approx 40$ cm

Figura 5.3: Lente 1 (BTL1) del triplete azul de ESOPO

En la Figura 5.3 se muestra una lente de ESOPO con diámetro de 12 cm y radios de curvatura R1= 3,526.0 y R2= 343.9 para cada una de sus dos superficies.

5.2 Análisis con C++

A continuación se muestran las secciones de las imágenes que fueron analizadas con este código junto con los resultados obtenidos. Todos los análisis fueron hechos utilizando un elemento estructural cuadrado.

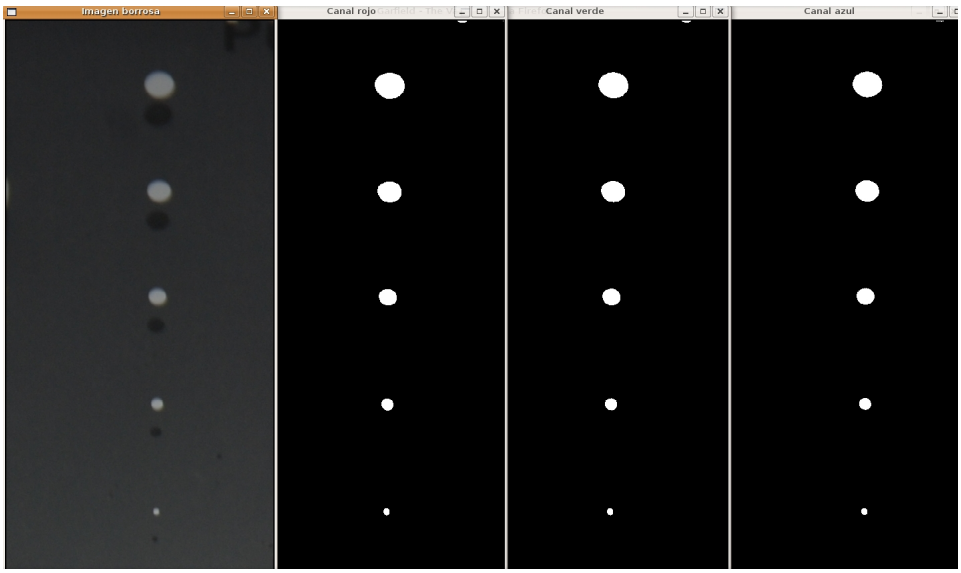


Número de objetos	26
Área de los objetos	3161, 2888, 2686, 2457, 1813, 4, 2, 5, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 6, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 2, 3, 1
Tamaño del elemento estructurador	27(R), 16(G), 20(B).
Tamaño de la imagen	400 x 1000 píxeles
Tiempo de procesamiento real	0m10.377s

Tabla 5.1: Resultados de la Figura 5.1

La imagen mostrada en la Tabla 5.1 es tomada de la Figura 5.1. El primer recuadro muestra la imagen que se analizó, los siguientes recuadros muestran el estado final de la imagen procesada para los canales rojo, verde y azul. En este caso no se puede hacer una comparación directa de áreas debido a que el programa no puede detectar el largo del rasguño. Sin embargo se logra observar que el método alcanza a detectar claramente los rasguños con valor de 40, no siendo ya claro para el valor de 20. Los resultados obtenidos en este caso correspondenden al canal verde debido al que el tamaño del elemento estructurador de 16 ofreció mejores resultados. Se esperaba encontrar 6 objetos, sin embargo la última línea no fue

resaltada lo suficiente encontrandose segmentada. Estos segmentos de línea contribuyeron con otros objetos de menor tamaño.

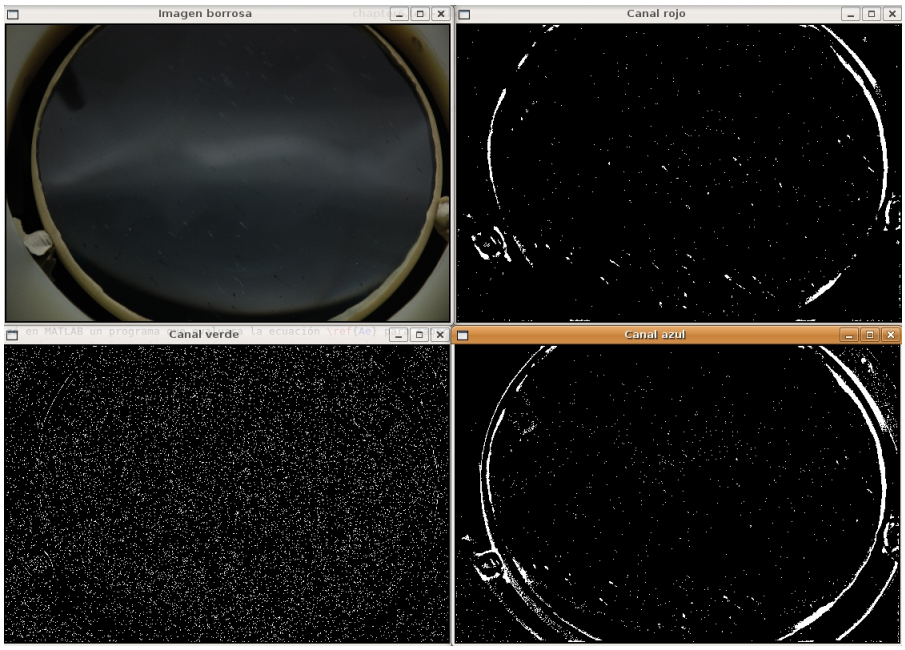


Número de objetos	8
Área de los objetos	35, 1, 1516, 80, 1001, 590, 290, 88
Tamaño del elemento estructurador	50(R), 60(G), 45(B).
Tamaño de la imagen	400 x 1000 píxeles
Tiempo de procesamiento real	0m54.574s

Tabla 5.2: Resultados de la Figura 5.1

La imagen mostrada en la Tabla 5.2 es tomada de la Figura 5.1. Igualmente se tiene para el primer recuadro la imagen que se analizó, los siguientes recuadros muestran el estado final de la imagen procesada para los canales rojo, verde y azul. Dado que el programa no permite todavía la ubicación de los elementos, hasta el momento solo puede suponer que las áreas mayores corresponden a los agujeros presentes como referencia. En ese caso el programa daría un valor de 1516 píxeles a un área de 1.131 mm^2, 1001 píxeles a un área de 0.7854 mm^2, 590 píxeles a un área de 0.5027 mm^2, 290 píxeles a un área de 0.2827 mm^2 y 88 píxeles a un área de 0.1257 mm^2. Los resultados obtenidos en este caso correspondenden al canal rojo a pesar de que el tamaño de los elementos estrucurantes no provocó cambios apreciables en la

imagen obtenida. Se esperaba encontrar en este caso 5 objetos, uno de los ocho objetos que se encontraron se aprecia en la parte superior de la imagen y corresponde al parecer a otra parte del patrón de referencia. Los otros dos objetos no se ubican.



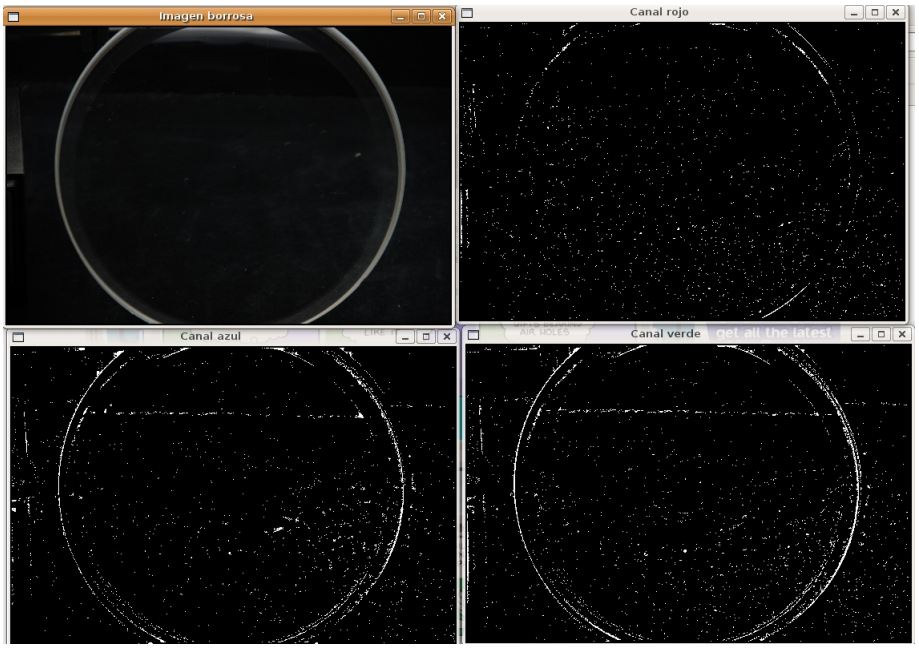
Número de objetos	561
Área de los objetos	1, 1, 1... 1, 2, 1, 1
Tamaño del elemento estructurador	40(R), 5(G), 35(B).
Tamaño de la imagen	3872 x 2592 píxeles
Tiempo de procesamiento real	7m26.715s

Tabla 5.3: Resultados de la Figura 5.2

El resultado mostrado en la Tabla 5.3 es el de la lente de lupa de la Figura 5.2. Se logra observar que para superficies curvas la iluminación, aunque resalta detalles, no logra ser homogénea. En este caso la imagen que es analizada corresponde al recuadro superior izquierdo, el canal rojo tras el procesamiento se encuentra a su derecha. El canal verde se encuentra en la esquina inferior izquierda y el azul en la esquina inferior derecha.

En este caso el diámetro de 9.9 cm de la lente corresponde a 3540 píxeles

en la imagen por lo que un píxel correspondería a un objeto de 0.03 mm en la imagen. Los resultados obtenidos en este caso correspondenden al canal rojo con el tamaño del elemento estructurador de 40. Esta lente de lupa se encontraba muy dañada, con imperfecciones de tamaño no comparable ya con las normas. Se encontraron 561 objetos donde varios de ellos corresponden a la orilla de la lente y el soporte. En este procesamiento se logró eliminar el brillo en la parte central ya que no se muestra en los resultados como un objeto.



Número de objetos	1559
Área de los objetos	1, 1, 3... 2, 7, 1, 1
Tamaño del elemento estructurador	40(R), 20(G), 30(B).
Tamaño de la imagen	3872 x 2592 píxeles
Tiempo de procesamiento real	8m13.129s

Tabla 5.4: Resultados de la Figura 5.3

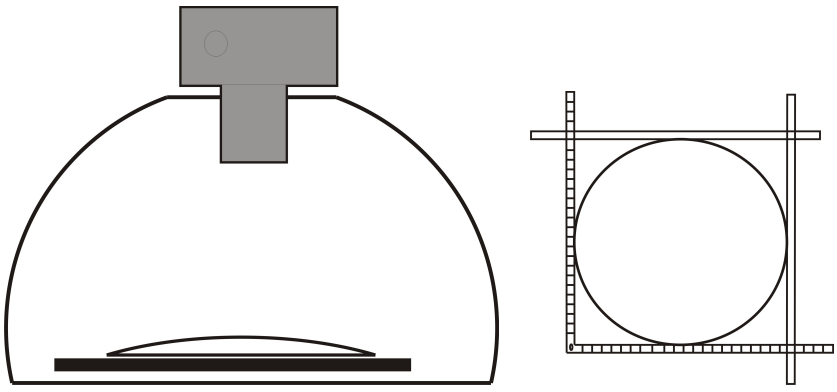
El resultado mostrado en la Tabla 5.4 es el de la lente de ESOPO de la Figura 5.3, al igual que en el caso anterior la iluminación es heterogénea (se puede observar un reflejo en la parte superior). Se resaltan los defectos del

fondo debido al mal posicionamiento de la lente con respecto a la luz. No se pudo hacer más en este aspecto ya que no podía ser recargada en alguna superficie que la inclinara por tratarse de un objeto delicado. En este caso la imagen que es analizada corresponde al recuadro superior izquierdo, el canal rojo tras el procesamiento se encuentra a su derecha . El canal azul se encuentra en la esquina inferior izquierda y el verde en la esquina inferior derecha.

En este caso el diámetro de 12 cm de la lente corresponde a 3016 píxeles en la imagen por lo que un píxel correspondería a un objeto de 0.04 mm en la imagen. Los resultados obtenidos en este caso correspondenden al canal verde con el tamaño del elemento estructurador de 20. Se esperaba encontrar solo los objetos correspondientes a la orilla de la lente así como del elemento que ayuda a soportar la lente ya que bajo inspección visual no se encontraron rasguños o agujeros. Sin embargo se muestran demasiados objetos y puntos en la imagen que señalan la necesidad de tener un soporte para la lente con un fondo completamente mate y homogeneo. Además no se alcanza a eliminar el brillo en la parte superior de la lente ocasionado por un mal acomodo de la misma respecto a la iluminación.

5.3 Sistema propuesto

Mi propuesta de sistema final se muestra en la Figura 5.4a)



a) b)

Figura 5.4: Sistema propuesto a) Domo de luz difusa iluminando la lente b) Soporte con regleteas graduadas

En este sistema se tiene un domo de iluminación difusa. La iluminación

difusa utilizando un domo es también muy utilizada pues elimina sombras y brillos. Esta iluminación brinda uniformidad en el reflejo y puede ser utilizada para la iluminación homogénea en superficies curvas por lo que también resulta de gran utilidad en este caso, la Figura 5.5 muestra la configuración y funcionamiento del domo.

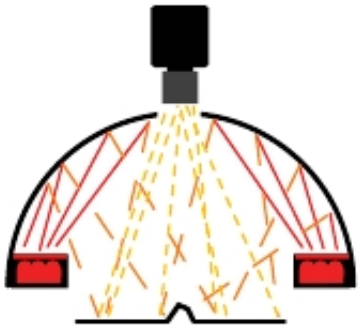


Figura 5.5: Iluminación difusa con domo

Como puede verse, el domo cubre la superficie bajo inspección dejando una abertura en la cima para poder colocar la cámara.

El sistema propuesto cuenta con un soporte con un marco móvil de aproximadamente 25 cm (ya que debe sujetar lentes de hasta 20 cm) que se trató de ilustrar en 5.4b). Este marco sirve para inmovilizar la lente y obtener un sistema de referencia ya que es un marco graduado. Todo esto formaría un sistema fijo en el cual se tienen menos errores debido al movimiento del elemento óptico o de la cámara. A partir de ello se puede tener un sistema con el cual calibrar adecuadamente la equivalencia en área real de los píxeles que se obtengan.

Como trabajo de procesamiento a futuro se tiene el ajuste de las áreas en función de la curvatura de las lentes para lo cual se necesitan fotografías con sistema de referencia. Este sistema se puede obtener con la propuesta anteriormente descrita. En cuanto a la discriminación de pelusas y manchas podría resultar útil un tratamiento con redes neuronales ya que es utilizada para la detección de patrones.

Por último, teniendo un sistema de referencia adecuado es posible obtener un mapa de las imperfecciones en la lente. Con ello es posible utilizar la norma MIL-0-13830A (o la ISO 10110-7 según se esté usando) para la clasificación de acuerdo a tamaños y cantidad de imperfecciones en diferentes zonas.

Conclusiones y Trabajo a futuro

5.4 Conclusiones

En esta sección se dan los resultados obtenidos.

Paras las fotografías tomadas del patrón de Rasguño/Hoyo de la norma MIL-0-13830A, se lograron observar los valores más pequeños correspondientes a 40 de rasguño y 40 de hoyo. El tamaño de agujero más pequeño, de $0.4mm$ de diámetro, en la mayor resolución de la cámara (10 megapíxeles) equivalió a 88 píxeles después de procesado. El área del rasguño más pequeño es de 1813 píxeles después de procesado. Sin embargo no puede hacerse una equivalencia directa de número de rasguño bajo esta norma hasta el momento ya que el código no evalúa el largo ni ancho del rasguño.De estos resultados se concluye que la mediciónń para este tamaño de imperfecciones es posible utilizando este método.

De la imagen de la lente de lupa se logró eliminar un poco el brillo que se presentó debido a su curvatura sin embargo hace notar la necesidad de un iluminación más homogénea. En esta imagen como en la siguiente de la lente de ESOPO se ve la necesidad urgente de contar con un soporte adecuado que permita el control del objeto con el fin de garantizar su seguridad y poder tener un sistema de referencia adecuado.

Para la fotografía de la Figura 5.3 en la que se toma una lente de ESOPO debido a que no se tiene un soporte adecuado para la lente, se puede observar el fondo de la caja interfiriendo, ya que incluso se distingue la línea horizontal que corresponde a la orilla del fondo de la caja. La caja está recubierta de terciopelo negro por lo que resulta muy fácil que atrape pelusas. Esto se observa en la imagen original y es destacado en el procesamiento.

Así mismo la lente tenía algunas pelusas en su superficie por lo que una mejora del programa debe contener la discriminación de estos elementos.

Se proponen mejoras del sistema físico así como funciones a anexar en el código para que el método pueda ser empleado. Parte de estas mejoras al código se exponen en la siguiente sección.

5.5 Trabajo a Futuro

De acuerdo a la Figura 5.6, se puede obtener la relación que guardan las imágenes por medio de las siguientes ecuaciones en las que A_p es el área proyectada por un segmento de esfera, A_e el área de dicho segmento, L_p la longitud de un segmento de la proyección con dirección al centro de la circunferencia proyectada y L_e la longitud de dicho segmento sobre la esfera.

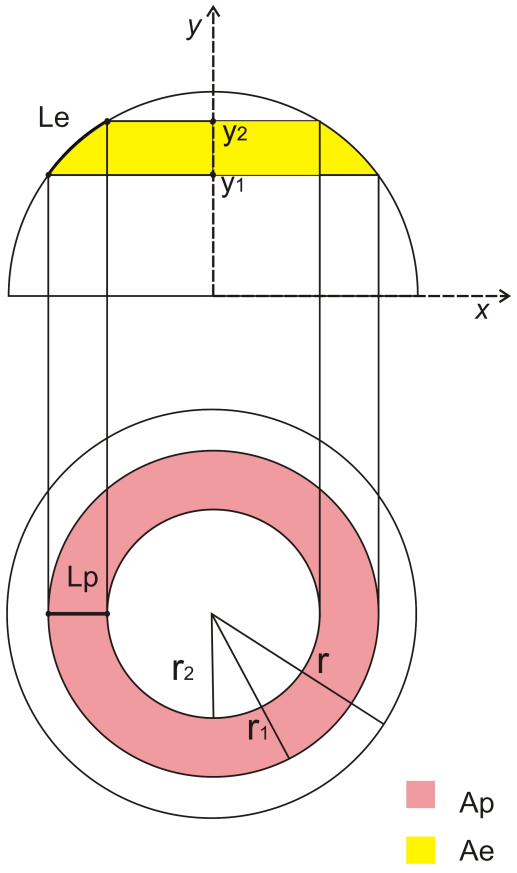


Figura 5.6: Proyección de una porción esférica

Analizando geométricamente la imagen de la Figura 5.6 se obtiene la

siguiente deducción.

El área de la sección de círculo proyectada es:

$$A_p = \pi(r_1^2 - r_2^2) \tag{5.1}$$

Mientras que el área de la sección esférica se obtiene de:

$$\int_{y_1}^{y_2} = 2\pi r \quad dy \quad = \quad 2\pi r(y_2 - y_1) \tag{5.2}$$

donde

$$y_2 = \sqrt{r^2 - r_2^2} \tag{5.3}$$

$$y_1 = \sqrt{r^2 - r_1^2} \tag{5.4}$$

Que dan como resultado la ecuación con la que se puede obtener el área de la sección esférica.

$$A_e = 2\pi r \left(\sqrt{r^2 - r_2^2} - \sqrt{r^2 - r_1^2} \right) \tag{5.5}$$

Por otra parte esta área depende también de la longitud de arco que abarca dentro de la esfera L_e:

$$L_e = \frac{\pi}{180^\circ} r\alpha \tag{5.6}$$

donde

$$\alpha = 2sen^{-1} \left[\frac{\sqrt{(r_1 - r_2)^2 + \left(\sqrt{r^2 - r_2^2} - \sqrt{r^2 - r_1^2} \right)^2}}{2r} \right] \tag{5.7}$$

Dando como resultado:

$$L_e = 2rsen^{-1} \left[\frac{\sqrt{(r_1 - r_2)^2 + \left(\sqrt{r^2 - r_2^2} - \sqrt{r^2 - r_1^2} \right)^2}}{2r} \right] \tag{5.8}$$

Mientras que en la proyección se tiene:

$$L_p = r_1 - r_2 \tag{5.9}$$

Estas ecuaciones nos ayudan a analizar el efecto de la curvatura en la inspección de las lentes.

Se realizó en MATLAB un programa que evaluara la Ecuación 5.5 para saber si el efecto de la curvatura de la lente era considerable. Este programa se encuentra en el anexo B. Se gráfica el radio de curvatura contra la relación que guarda el área de la imagen de la lente con respecto al área en la superficie esférica. La gráfica de la Figura 5.7 muestra varias curvas correspondientes a distintos valores del ancho de la superficie entre dos radios dado en centímetros. Esta sección transversal es mayor para las curvas internas y menor para aquellas que se aproximan a una constante. En la Figura 5.7 se tiene la primer curva para un valor de L_p con valor de 0.1 cm. hasta 0.9 cm en pasos de 0.1 cm para cada curva.

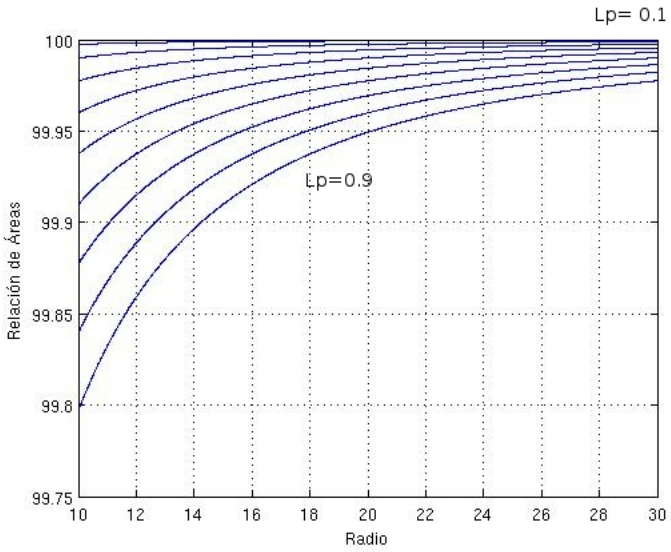


Figura 5.7: Gráfica radio-relación de áreas

Se puede ver que conforme el radio es mayor, esta relación puede ser despreciable. Dependiendo del cliente podría evaluarse si es necesario un procesamiento extra que evaluara el tamaño aproximado del rasguño con base a la curvatura de la lente utilizada.

Para ello se debe contar con una imagen calibrada, es decir que ubiquemos con certeza su posición en un eje coordenado. A partir de ahí se podrían cambiar las coordenadas a un sistema polar para localizar los radios máximo y mínimo de cada objeto 5.8. Con ello se tendría un valor de n que puede ser utilizado junto con la curvatura de la lente en la Ecuación 5.5.

Esto nos daría como resultado una constante de ajuste del valor dado debido a la curvatura.

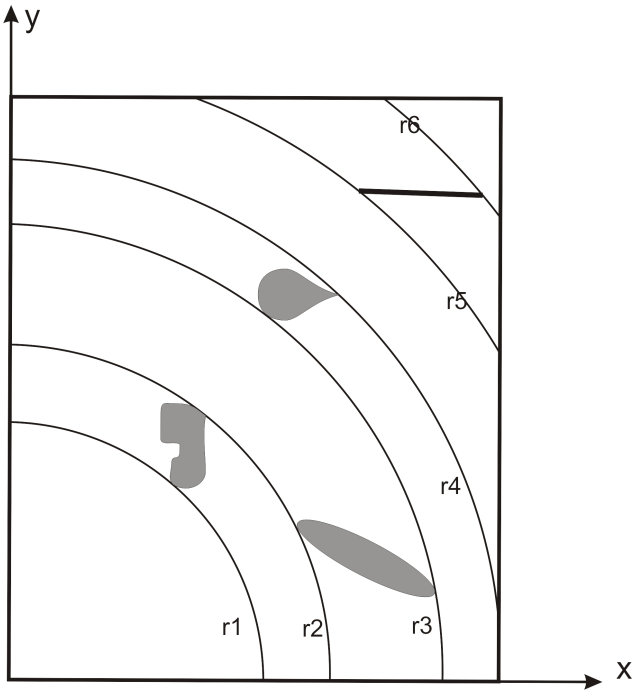


Figura 5.8: Posición de los rasguños

Debe señalarse que se necesita tener una imagen en la que se tenga completo conocimiento de la ubicación del centro de la lente para la referencia de los ejes. Además de que se analizaría para cada cuadrante mediante translaciones de ejes.

Apéndice A

Códigos

A.1 Códigos en MATLAB

A.1.1 Conteo de objetos

```
clear
close all
clc

Original = imread('porver2.jpg');% leer imagen original
CapaRojaO=Original(:,:,1);% utilizo solo la capa roja de la imagen RGB
ImContrastada=imadjust(CapaRojaO); %ajusto contraste de la imagen

se = strel('disk',4);%crea un elemento en forma de disco de radio 4
BG= imopen(ImContrastada,se);%remueve los objetos pequeños de de ImContrastada
ImLimpia= imsubtract(ImContrastada,BG);%subsrtae los elementos de BG a ImContrastada
I=imadjust(ImLimpia); %ajusta contraste de la imagen obtenida
bw = im2bw(I,.2);%convierte la imagen I a formato binario

figure(1)
subplot(2,1,1), imshow(ImContrastada)
subplot(2,1,2), imshow(bw)

%imwrite (bw, 'recor2.png');
%U=imread('gcortada.jpg');
U=bw;
figure(2)
imshow(U)
figure(3)
imshow(BG)
%%%
```

```
ji=U(:,:,1);
[labeled,numObjetos] = bwlabel(ji,8);
%%%
%[labeled,numObjects] = bwlabel(U(:,:,1),8);

% Obtención de objetos
numObjetos
k=numObjetos;
graindata = regionprops(labeled,'basic');

% área de los objetos
for f=1:1:k
    area(:,f)= graindata(f).Area;
end
area

C=zeros(3,1);

for j=1:1:k
    h=area(:,j);
    if h<=5;
        C(1)=C(1)+1;
    end
    if h>5 && h<=10;
        C(2)=C(2)+1;
    end
    if h>10 && h<=20;
        C(3)=C(3)+1;
    end
end

C
TamIm=numel(ji)
```

A.1.2 Efecto de la superficie curva

```
clear
close all
clc
for r=10:0.01:30; %asignación de diferentes radios de curvatura
for n=0.1:0.1:0.9; % asignación de diferentes longitudes de Lp
r2=0;
r1=r2+n;
h=(sqrt(r^2-r2^2)-sqrt(r^2-r1^2));
Ap=pi*(r1^2-r2^2); % obtención del área proyectada
```

```
Ae=2*pi*r*h;% obtención del área sobre la esfera
Lp=r1-r2;
t=sqrt(((r1-r2)^2+h^2))/(2*r);
th=asin(t);
Le=2*r*th;
Cp=(Ap/Ae)*100; % comparación entre el área proyectada y el área sobre la esfera
p=(r1^2-r2^2)/(2*r*(h))*100;
plot(r,Cp,'-')

hold on
end
end
xlabel('Radio');
ylabel('Relación de Áreas')
```

A.2 Código en C++

```
#include <iostream>
#include <fstream>
#include "CImg.h"
#include <math.h>

using namespace std;
using namespace cimg_library;


int etiqueta_actual=0;
//
//Asignación de etiquetas
//
int newetiqueta()
{ return etiqueta_actual ++;
}

//
// Valor mínimo
//
int min(int a, int b)
{
if((a == 0 || a > b) && b > 0)
   return b;
else
   return a;
}
```

```
//
//función de cambio a blanco y negro
//
CImg<float> byn(CImg<float> img)
{
CImg<float> BW(img.dimx(), img.dimy(), 1, 1);
double t, m1,m2;
t=img.mean();
int i;//buscando umbral
int c1,c2,k1,k2;
for(i=0; i<100; i++)
{
c1=c2=k1=k2=0;
cimg_forXY(img, x, y)
{
         if (img(x,y) <= t)
          {k1=k1+img(x,y);c1=c1++;}
           else
            {k2=k2+img(x,y);c2=c2++;}
}
m1=k1/c1;
m2=k2/c2;
t=(m1+m2)/2;
}

cimg_forXY(img, x, y)
{
          if (img(x,y) <= t)//cambiar por ponderación
            BW(x,y) = 0;
          else
            BW(x,y) = 255;
        }

return BW ;
}

////////////////////////////////////////////////// Función principal

int main(int argc,char **argv)
{ // Leer parametros
const char *name_i  = cimg_option("--imagen-entrada","punto.jpg","Imagen de entrada"),
*name_o  = cimg_option("--imagen-salida","","Nombre del archivo de salida");
// Inicializar imagen
cout << " - Carga la imagen " << name_i << "...\n";
```

```
CImg<unsigned char> original("punto.jpg"),res,restaurada0,restaurada1,restaurada2,
ch0(original.dimx(), original.dimy(), 1, 1), ch1(original.dimx(), original.dimy(), 1, 1),
ch2(original.dimx(), original.dimy(), 1, 1),oro;

cimg_forXY(original, x, y)
{ch0(x, y) =  original(x, y, 0);ch1(x, y) =  original(x, y, 1);ch2(x, y) =  original(x, y, 2);}
//descomposición de los canales


//// suavizado morfológico

float c0=ch0.min();
restaurada0=ch0-ch0.get_erode(6).get_dilate(6).get_dilate(6).get_erode(6)+c0;

float c1=ch1.min();
restaurada1=ch1-ch1.get_erode(5).get_dilate(5).get_dilate(5).get_erode(5)+c1;

float c2=ch2.min();
restaurada2=ch2-ch2.get_erode(7).get_dilate(7).get_dilate(7).get_erode(7)+c2;

///// expansión del histograma de la imagen entre los valores 0 y 255

restaurada0=ch0.normalize(0,255);
restaurada1=ch1.normalize(0,255);
restaurada2=ch2.normalize(0,255);

///// binarización de la imagen

restaurada0=byn(restaurada0);
restaurada1=byn(restaurada1);
restaurada2=byn(restaurada2);

///// despliegue de la imagen

CImgDisplay disp(original,"Imagen borrosa",0);
CImgDisplay disp2(restaurada0,"Canal rojo",0);
CImgDisplay disp3(restaurada1,"Canal verde",0);
CImgDisplay disp4(restaurada2,"Canal azul",0);

while ( !disp.is_closed  && disp.key!=cimg::keyQ  && disp.key!=cimg::keyESC)
{
CImgDisplay::wait(disp);
}

////////////////////////////
```

```
////////////////////////////// Etiquetado de componentes conexas
int m;
int etiqueta[restaurada0.dimx()][restaurada0.dimy()];
cimg_forXY(restaurada0,x,y)
{ if (restaurada0(x,y)>0)
  etiqueta[x][y]=newetiqueta();
else etiqueta[x][y]=0;
}
int cambio;
do
{
cambio = 0;
cimg_forXY(restaurada0, x, y)
   { if(etiqueta[x][y] !=0)
   { m=etiqueta[x][y];
if (x>0)
  { m=min(m,etiqueta[x-1][y]);
    if (y>0)
        { m=min(m,etiqueta[x-1][y-1]);
        if (y < restaurada0.dimy()-1)
            m=min(m,etiqueta[x-1][y+1]);
}
}
if (y>0)
{ m=min(m,etiqueta[x][y-1]);
          if (y < restaurada0.dimy()-1)
     m=min(m,etiqueta[x][y+1]);
}
if(m != etiqueta[x][y])
{
cambio = 1;
etiqueta[x][y] = m;
}
      }
  }

for (int y=restaurada0.dimy()-1; y>=0; y--)
{ for (int x=restaurada0.dimx()-1; x>=0; x--)
{ if(etiqueta[x][y] !=0)
         { m=etiqueta[x][y];
              if (x < restaurada0.dimx()-1)
{ m=min(m,etiqueta[x+1][y]);
if (y < restaurada0.dimy()-1)
     m=min(m,etiqueta[x+1][y+1]);
      if (y>0)
```

```
          m=min(m,etiqueta[x+1][y-1]);
            }
           if (y>0)
{ m=min(m,etiqueta[x][y-1]);
              if (y < restaurada0.dimy()-1)
     m=min(m,etiqueta[x][y+1]);
}
    if(m != etiqueta[x][y])
{ cambio = 1;
etiqueta[x][y] = m;
}
      }
}
}
}while(cambio != 0);

//////////////////////////////
/////////////////////////// Obtención de número de objetos y área de cada uno
int i,j,k;
int mayor = -1;
for(j=0;j<restaurada0.dimy();j++)
{ for(i=0;i<restaurada0.dimx();i++)
{ if(mayor < etiqueta[i][j])
mayor = etiqueta[i][j];
}
}

int objeto[mayor];
for (k=0; k<mayor;k++)
{   objeto[k]=0;
}


for(i=0;i<restaurada0.dimx();i++)
{ for(j=0;j<restaurada0.dimy();j++)
{ if (etiqueta[i][j] > 0){
   objeto[etiqueta[i][j]-1]++;
}
}
}
int num_obj = 0;
for (k=0; k<mayor;k++)
{ if(objeto[k] > 0)
{ num_obj++;
cout << " Area " << objeto[k] << "\n";
```

```
}
}
cout << " Número de objetos " << num_obj << "\n";

return 0;
}
```

Apéndice B

Especificaciones técnicas de la Cámara

B.1 Especificaciones de la Cámara NIKON D80 [15]

Tipo . Cámara digital réflex de objetivo único con objetivos intercambiables.

Píxeles efectivos. 10.2 millones.

CCD. 23.6×15.8 mm; total de píxeles: 10.75 millones.

Montura del objetivo. Montura Nikon F (con acoplamiento AF y contactos AF).

Ángulo de imagen. El equivalente en 35 mm (135) es, aproximadamente, 1,5 veces la distancia focal del objetivo.

Visor. Pentaprisma óptico fijo a nivel de ojo.

Pantalla de enfoque . Pantalla transparente mate BriteView Mark II tipo B con marcas de enfoque y líneas de cuadrícula bajo petición superpuestas.

Abertura del objetivo. Retorno instantáneo con previsualización de la profundidad de campo.

*Disparador automático.*Temporizador controlado electrónicamente de 2, 5, 10 o 20 seg. de duración.

Compresión

- NEF (RAW): 12 bits comprimido.
- JPEG: conforme con línea de base JPEG.

Sensibilidad ISO (Índice de exposición recomendado) 100–1600 con ajustes adicionales de hasta 1 EV sobre 1600 en pasos de $\frac{1}{3}$EV.

Obturador. Obturador de plano focal de desplazamiento vertical, controlado electrónicamente.

Velocidad. 30–$\frac{1}{4000}$ seg. en pasos de $\frac{1}{3}$ o $\frac{1}{2}$ EV, “bulb”.

Balance de blancos. Automático (balance de blancos TTL con sensor RGB de 420 segmentos); seis modos manuales con ajuste fino; ajuste de temperatura de color; preajuste de balance de blancos.

Dimensiones ($an \times pr \times al$) Aproximadamente $132 \times 103 \times 77$mm.

Peso aproximado. 585 g sin batería, tarjeta de memoria, tapa del cuerpo y tapa de la pantalla.

Entorno operativo - Temperatura.0– + 40°C. - Humedad.Inferior a 85% (sin condensación).

Objetivo 18-135mm f/3.5-5.6 ED-IF AF-S DX Zoom-Nikkor Cuenta con óptica zoom 7.5x compacta y ligera tiene una distancia focal de 18-135 mm. El cristal ED (Extra baja Dispersión) y dos elementos de lentes asféricas hibridas aseguran una funcionalidad óptica extraordinaria e imágenes de alto contraste y alta resolución. - Óptica zoom muy potente: 7.5x zoom, rango focal de 8mm a 135mm (equivalente 35mm: 27-202.5mm). - Cristal ED y dos elementos de lentes asféricas hibridas minimizan la aberración cromática, el astigmatismo y otras formas de distorsión, mientras asegura una alta definición y contraste.

B.2 Especificaciones de la Cámara Canon EOS REBEL XTi [16]

Tipo .Cámara digital réflex monocular.

CMOS. 22.2×14.8 mm; total de píxeles: 10.75 millones.

Píxeles efectivos. 10.10 megapíxeles.

Número total de píxeles. 10.50 megapíxeles.

Montura del objetivo. Montura Canon EF.

Objetivos compatibles Objetivos Canon EF (incluidos los objetivos EF-S).

Ángulo de imagen. El equivalente en 35 mm (135) es, aproximadamente, 1,5 veces la distancia focal del objetivo.

Visor. Pentaespejo nivel de ojo.

Pantalla de enfoque . Fija y mate de precisión.

Aumento. Aproximadamente 0,8 x (objetivo de 50 mm enfocado al infinito; $-1.0m^{-1}$.

Obturador. Obturador de plano focal controlado electrónicamente.

Velocidad. 30–$\frac{1}{4000}$ seg. en pasos de $\frac{1}{3}$ o $\frac{1}{2}$.

Balance de blancos. Automático , luz de día, sombra, nublado, tungsteno,luz fluorescente blanca, flash, personalizado.

Dimensiones ($an \times al \times p$) Aproximadamente $126.5 \times 94.2 \times 765$mm.

Peso aproximado. 510 g (solo el cuerpo).

Entorno operativo - Temperatura.0–40°C. - Humedad.Inferior a 85% (sin condensación).

Bibliografía

[1] COSTERO, R ; ECHEVARRIA, J. Objetivos Científicos del Espectrógrafo óptico de mediana y baja dispersión para el Ossevatorio de san Pedro Mártir. 2005

[2] BAKER, Lionel. *Surface imperfections: specimen measurement by microscope and digital camera*. Optical Engineering. Vol 40, No.10, 2001.

[3] SÁNCHEZ Brea, et al. *Optical technique for the automatic detection and measurement of surface defects on thin metallic wires*. Applied Optics, Vol. 39, No.4, 2000.

[4] KRANENBERG; JUNGLING. *Subsurface damage identification in optically transparent materials using a nondestructive method*. Applied Optics, Vol. 33, No.19, 1994.

[5] BAKER, Lionel. *Metrics for high-quality specular surfaces* LinkBellingham, Washington : SPIE, c2004

[6] MIL-O-13830A. *Military specification . Optical Copmponents For Fire Control Instruments; General Specification Governing The Manufacture, Asembly, And Inspection Of*. 11 sep 1963.

[7] ISO 10110 . *Optics and Optical Instruments- Preparation of drawings for optical elements and systems : A User's Guide*. Second Edition. OSA, 1995

[8] GONZÁLEZ; WOODS;EDDINS. *Digital Image Processing Using Matlab*. Prentice HAll, 2007.

[9] CASTLEMAN Kenneth R. *Digital image processing* Englewood Cliffs, New Jersey : Prentice Hall, 1995

[10] HAUßECKER, Horst. *Computer Vision and Applications*. Academic Press, 2000.

[11] PAJAREZ y de la CRUZ. *Visión por Computador, Imágenes digitales y aplicaciones* Alfaomega, México, 2008

[12] HECHT, Eugene. *Óptica* Perason, España, 2000.

[13] MALACARA, Daniel; THOMPSON, Brian. *Handbook of Optical Engineering.* Marcel Dekker USA, 2001.

[14] POZO, Salvador. *Curso de C++*. Septiembre de 2003

[15] Guía Nikon de fotografía digital para la D80 Cámara Digital

[16] Manual de la cámara EOS DIGITAL REBEL XTi/EOS 400D DIGITAL