



**INSTITUTO DE
TECNOLOGIA**

PROF. JORGE A. SABATO

**UNIVERSIDAD NACIONAL
DE GENERAL SAN MARTIN**

**COMISION NACIONAL
DE ENERGIA ATOMICA**

**MAESTRIA EN
CIENCIA Y
TECNOLOGIA
DE MATERIALES**

ANÁLISIS DE VIDA DE TUBERÍAS O DUCTOS

Nelson R. Luque P.

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE GENERAL SAN MARTIN
COMISIÓN NACIONAL DE ENERGÍA ATÓMICA
INSTITUTO DE TECNOLOGÍA
“Prof. Jorge A. Sábato”**

Análisis de vida de tuberías o ductos^(*)

por Ing. Nelson R. Luque P.

Director

**Dra. Elsa N. Hogert
Dra. Marta C. Ruch**

^(*) Tesis para optar el título de *Magíster en Ciencia y Tecnología de Materiales*

República de Argentina

2011

COMISION NACIONAL DE ENERGIA ATOMICA
CENTRO DE INFORMACION C.A.C.

La División de Investigación Aplicada (IAMEND) del Departamento de Ensayos No Destructivos y Estructurales (ENDE) de la Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA) ha sido consultada, en forma creciente, por diferentes industrias nacionales para detectar y analizar defectos en paredes internas de tubos. Frente a las necesidades planteadas se presenta el desarrollo de un cabezal óptico que permite detectar in-situ diversas discontinuidades y anomalías en las paredes internas de tubos de aleaciones estructurales y diámetro mayor a 100 mm. La técnica óptica utilizada es triangulación activa con luz estructurada. Esta consiste en la proyección, sobre una superficie tridimensional, de un patrón de luz determinado. Una cámara digital captura la imagen final y la almacena en una PC. Mediante un software apropiado se procesan las señales obtenidas y se reconstruye en tres dimensiones el perfil de la superficie iluminada. En este trabajo el patrón de luz empleado es un cono de luz coherente, que al interceptar la pared interna de un cilindro patrón, proyecta un aro de luz de bordes bien definidos. Si el tubo está ovalado o presenta diversos defectos, la imagen capturada se aparta del círculo ideal. Se desarrolló un software en el entorno Matlab para reconstruir la estructura de la superficie interna de tubos, y detectar fisuras, corrosión, ovalidad, etc. Se presentan los resultados obtenidos, y se discute la sensibilidad y alcance del sistema.

Abstract

After receiving many inquiries concerning the detection and analysis of defects in the inner walls of tubes and pipes, the equipment described in this report was developed by the Applied Research Group (IAMEND) of the Nondestructive and Structural Testing Department (ENDE) of the National Atomic Energy Commission (CNEA). It is an optical inspection head, which allows for the in-situ detection of various discontinuities, imperfections and anomalies in the inner wall of tubes made of structural alloys and with a diameter of more than 100 mm. The selected optical technique is "structured light active triangulation". It consists in projecting a particular light pattern on a 3-D surface. The resulting image, captured by a digital camera, is stored in a PC. With a special software, the stored signals are processed and the 3D profile of the illuminated curved surface is reconstructed. In the present work, the light pattern used is a coherent light cone which, when intersecting the inner surface of a standard cylinder, projects on it a light ring with well-defined boundaries. If the tube is oval or has any defects, the captured image will no longer be an ideal circle. Special software, written in Matlab, was prepared and used for the reconstruction of the inner surface of the tubes and the detection of cracks, corrosion, ovality, etc. Results are presented, and the sensitivity and scope of the system are discussed.

Tabla de Contenido

RESUMEN	2
ABSTRACT.....	3
INTRODUCCIÓN.....	6
I	8
MÉTODOS ÓPTICOS APLICADOS AL ANÁLISIS DE SUPERFICIES.....	8
II	10
TRIANGULACIÓN LÁSER	10
1. PRINCIPIO DEL MÉTODO	10
2. DISTINTOS DISEÑOS DE PERFILÓMETROS POR TRIANGULACIÓN LÁSER	12
3. TRIANGULACIÓN LÁSER APLICADA A LA CARACTERIZACIÓN DEL INTERIOR DE TUBOS.....	14
3.1. Clark y Doyle.....	15
3.2. El sistema Lotis 400-N	16
3.3. Láser Techniques Co.	17
3.4. López et al	18
3.5. Jarvis et al.....	21
3.6. R. Henry et al y Zhang y Zhuang	23
3.7. CUES Corporate;	26
3.8. Laboratorio de Óptica y Láser (LOL) –IAMEND-ENDE-CNEA:.....	27
4. CONCLUSIONES.....	28
III	29
TRIANGULACIÓN ACTIVA CON LUZ ESTRUCTURADA.....	29
1. TEORÍA GENERAL DE LA LUZ ESTRUCTURADA	30
1.1. El Sistema posicionador.	31
1.2. El Sistema de Visión Automática.	31
1.2.1. El subsistema de iluminación.....	32
Elementos ópticos difractivos.....	32

1.2.2. El subsistema de adquisición.	33
Cámara:.....	34
El sensor de imagen:.....	34
1.2.3. Subsistema de procesamiento de la imagen.....	38
1.2.4. Subsistema de almacenamiento.	38
IV	39
CARACTERIZACIÓN DE DEFECTOS EN PAREDES INTERNAS DE TUBOS	39
1. DETERMINACIÓN DEL TIPO DE LUZ ESTRUCTURADA.....	40
1.1. Difracción Cónica.....	41
1.1.1. Dispositivo experimental.....	41
1.1.2. Medición.	42
1.1.3. Conclusión:.....	44
1.2. Dispersión Cónica.	45
1.2.1. Dispositivo experimental.....	45
1.2.2. Medición.	47
1.2.3. Conclusión.....	50
2. LUZ ESTRUCTURADA CÓNICA.....	51
3. COMPONENTES ÓPTICOS SELECCIONADOS	52
4. ALINEACIÓN	53
5. ADQUISICIÓN Y PROCESAMIENTO DE IMÁGENES	54
5.1. MATLAB.	54
5.2. Procesado Computacional.....	55
6. CALIBRACIÓN	63
7. MEDICIONES Y RESULTADOS.....	65
7.1. Imágenes con CCD.	66
7.2. Imágenes con CMOS.	69
V.....	72
CONCLUSIONES GENERALES.....	72
BIBLIOGRAFÍA	75

Introducción

Corre el tiempo y el mundo cambia. Todo tiende a ser más dinámico, funcional, económico y práctico. En cuanto a la Industria se refiere, es muy importante contar con nuevas y más precisas técnicas de control industrial no destructivas ni invasivas, que permitan la evaluación parcial o completamente automática del objeto a inspeccionar. Se requiere además, que estos métodos posean una alta sensibilidad y precisión, y que sean capaces de hacer un análisis bajo condiciones industriales y en tiempo real. Es así que en los últimos años se han reportado en la literatura una gran variedad de métodos ópticos que cumplen con estos requisitos y resultan de gran utilidad en la inspección topográfica de superficies. La triangulación óptica se destaca como una de estas técnicas, principalmente en las áreas de detección y exploración.

En diversas industrias es fundamental la inspección de la superficie interna de tubos, ya sea en el proceso de fabricación, para tener un conocimiento preciso de su acabado, o durante su uso, para efectuar un diagnóstico de su estado general y asesorar sobre su vida útil. En EE.UU., por ejemplo, daños en paredes internas de ductos, no detectados, estudiados y corregidos a tiempo, han sido la causa del 40% de las fallas graves en usinas térmicas y calderas. O sea, es primordial poder detectar y cuantificar precozmente cualquier tipo de discontinuidades o anomalías en tuberías. Para ello, es muy importante comprender de manera adecuada la problemática de la topografía de las superficies cilíndricas: sus características y métodos para analizarla.

La División de Investigación Aplicada en Métodos de Ensayos No Destructivos (IAMEND) del Departamento de Ensayos no Destructivos y Estructurales (ENDE) de la Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA) ha sido consultada en forma creciente por diferentes industrias nacionales para detectar y caracterizar defectos en paredes internas de tubos. Frente a estas necesidades se está

desarrollando un cabezal controlado por PC que recorrerá interna y longitudinalmente los tubos a evaluar. Este dispositivo estará provisto de diferentes emisores y detectores ópticos y electromagnéticos. En este contexto, el presente trabajo de Tesis es una de las varias etapas para la puesta en marcha del dispositivo de ensayo no destructivo. Tiene como objetivo el análisis, diseño y montaje de los emisores y detectores ópticos empleados en el cabezal antes mencionado.

Para comenzar, se ha realizado un estudio exhaustivo de diferentes métodos ópticos que se emplean en la evaluación superficial de un determinado componente^{[1]-[51]}, tal como se muestra en el Capítulo I. Teniendo en cuenta que este cabezal deberá operar in-situ, generalmente en ambientes agresivos y que el tiempo requerido para la inspección debe ser el menor posible, se ha determinado que el método de Triangulación Láser es el más apto para este tipo de evaluaciones^{[2]-[21]},^{[44]-[46]},^[52],^[53]. En el Capítulo II se presenta el método de triangulación láser y su aplicación como perfilómetro óptico. Se analizaron diferentes dispositivos experimentales tanto para evaluar superficies planas como cilíndricas. Se estudian los diferentes emisores y detectores de luz coherente utilizados, como así también las diferentes geometrías empleadas. Se concluye que en este dispositivo se empleará el método de Triangulación activa con Luz Estructurada (pag.29). Este método se basa en la proyección, sobre una superficie tridimensional, de un patrón de luz coherente determinado, una cámara digital captura la imagen final y la almacena en una PC. Mediante un software apropiado se procesan las señales obtenidas y se reconstruye en tres dimensiones el perfil de la superficie iluminada. En el Capítulo III se describe este método, y se analiza los emisores y detectores de luz empleados. El Capítulo IV está dedicado a una parte importante del trabajo de Tesis: Estudio de defectos en paredes internas de tubos. En la primera parte de este capítulo se analiza diferentes proyectores de luz, de forma tal de obtener un cono (discreto o continuo) de luz coherente, que al interceptar la pared interna de un cilindro patrón, proyecte un aro de luz de bordes bien definidos. De los resultados obtenidos se concluye que el emisor de luz del cabezal debe tener un elemento óptico difractivo (DOE) y un diodo láser que proyecte un aro continuo de luz coherente.

Métodos ópticos aplicados al análisis de superficies

Las técnicas ópticas^[1] existentes en la literatura para analizar el estado de una superficie pueden clasificarse, según el método utilizado en:

- Interferometría^{[33]-[42]}
- Proyección de Franjas^{[42],[43]}
- Reflectometría^{[23]-[32],[48]-[51]}
- Triangulación Láser^{[2]-[22],[44],[45]}

Las técnicas interferométricas^{[33]-[42]} para determinar el perfil de una superficie son las que poseen mayor resolución (del orden de 0,1nm), pero requieren una muy alta estabilidad mecánica, por ello, son equipos esencialmente de laboratorio. Uno de los problemas que presentan es la necesidad de hacer hipótesis sobre el tipo de distribución de alturas de la muestra, para poder decodificar el diagrama de intensidad de las franjas en curvas de nivel de la superficie. Por ello son usadas principalmente para inspeccionar muestras sobre una base estadística conocida.

Las técnicas de proyección de franjas^{[42],[43]}, sobre el objeto a analizar, son los que poseen peor resolución (superiores a los 10 μm). Las franjas proyectadas deben inter-compararse con un sistema de franjas patrones.

En Reflectometría, los instrumentos ópticos que emplean luz difundida son bastante sensibles, pueden ser operados a relativa gran distancia del objeto a testear y en general no se ven afectados por vibraciones ambientales. Por ello, son potencialmente compatibles con aplicaciones industriales de monitoreo de micro rugosidades.

La triangulación láser consiste en proyectar sobre una pieza, bajo un ángulo conocido, un patrón de luz modulado. La luz reflejada, que también está modulada, es portadora de información de la estructura superficial del objeto. Mediante un software adecuado, se procesan las señales obtenidas y se reconstruye en tres dimensiones el perfil de la superficie iluminada.

A nuestro criterio, ni los perfilómetros interferométricos, ni los de proyección de franjas parecen ser adaptables para el estudio de paredes internas de tubos; siendo los dos últimos métodos los más aplicables a esta problemática. Dado que, en general, el tiempo requerido para la inspección debe ser el menor posible, como veremos más adelante, el método de Triangulación Láser activa con Luz estructurada es el más apto para este tipo de evaluaciones.

Triangulación Láser

1. Principio del Método

En los últimos años se han publicado numerosos trabajos sobre la determinación del perfil de una muestra por triangulación láser^{[2]-[22],[44],[45]}. También se han construido dispositivos comerciales basados en este principio, que funcionan como perfilómetros ópticos^{[42]-[45]}.

Este método, que es una asociación de la triangulación óptica y el láser, permite medir distancias muy pequeñas con precisión submicrónica. Básicamente consta de un emisor de luz láser y dos sistemas ópticos. El primero proyecta sobre la muestra y desde una dirección conocida, un haz de luz coherente; el segundo proyecta sobre un detector sensible a movimientos espaciales la imagen de la mancha luminosa sobre la muestra. Un procesador de imágenes analiza el desplazamiento del haz de luz al variar la altura del espécimen.


$$y' = M \frac{y \operatorname{sen}(\eta + \theta)}{\cos \eta + \left(\frac{y}{f}\right) \cot(\eta + \theta)} \quad (11.1)$$

Página | 11

Usualmente, el ángulo de triangulación ($\eta + \theta$) no es muy pequeño ($> 5^\circ$), y f es mayor que y , entonces la ecuación (II.1) resulta:

$$\text{Para incidencia normal } (\eta = 0) \quad y' = My \operatorname{sen} \theta \quad (\text{II.2})$$

$$\text{Para observación normal } (\theta = 0) \quad y' = My \operatorname{tg} \eta \quad (\text{II.3})$$

2. Distintos diseños de perfilómetros por triangulación láser

Se han construido distintos tipos de perfilómetros, ya sea de uso comercial^[42] o prototipo de laboratorio^{[44],[45]}, variando la geometría del sistema óptico de detección y de enfoque. Según la bibliografía consultada, estos instrumentos pueden relevar el perfil de una superficie con una precisión comprendida entre $200 \mu\text{m}$ y $0,1 \mu\text{m}$, dependiendo de la geometría y los sensores utilizados. Si además se realiza una determinación subpíxel^{[17]-[19]}, se puede llegar a una precisión de $0,05 \mu\text{m}$.

Según las necesidades de sensibilidad y rapidez del dispositivo, se puede optar por una de estas dos geometrías (ver Figura II.2):

- Incidencia normal y observación bajo un ángulo θ (menor sensibilidad).
- Observación normal e incidencia bajo dos ángulos η y $-\eta$ (doble barrido, menor rapidez de medida).

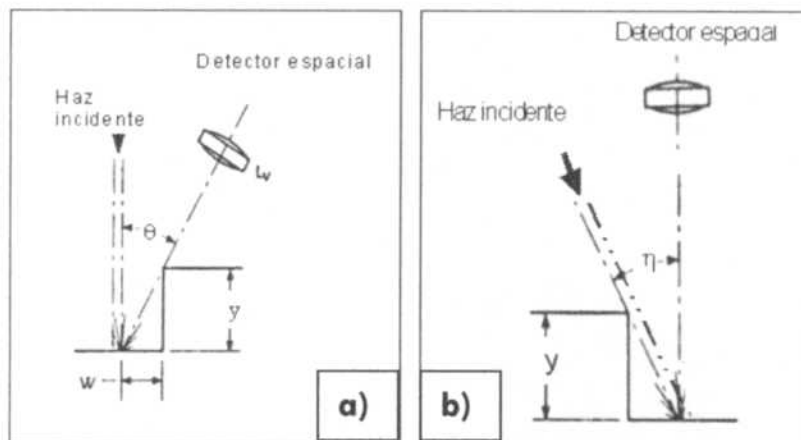


Figura II.2: Esquema de un dispositivo de triangulación:
a) Incidencia normal. b) incidencia oblicua.

En general estos equipos utilizan:

- Como fuente de luz: láseres de He-Ne o diodos láser.
- Como sistema de enfoque: un conjunto de lentes que enfoca el haz sobre la zona a evaluar.
- Como detector espacial: cámaras CCD (charge coupled device) o detectores sensibles a la posición del haz de luz (PSD). Dependiendo del tipo de superficie a evaluar o defecto a medir, es más conveniente el uso de un PSD o de una CCD.
- Software de procesamiento de imágenes y relevamiento del perfil de la superficie y/o detección de fisuras.

Entre los prototipos de laboratorio que se están desarrollando o ya han sido desarrollados, se pueden mencionar: El perfilómetro óptico de Arecchi et al.^[2]; el equipo de J.L. Doyle.^{[4],[14]}; la punta sensora de W.G.Clark et al.^[7]; el Microtopógrafo Láser de Costa et al.^{[6],[8]}; y el perfilómetro del laboratorio de Óptica y Láser (LOL)-ENDE-CNEA.^{[16],[49]}

Para dar un ejemplo, los perfilómetros desarrollados por Doyle y Clark iluminan con un diodo láser en forma normal (Figura 11.2a) y detectan con un sensor PSD. En cambio los sistemas desarrollados por Costa o por (LOL), detectan con una CCD en forma normal, e iluminan con un láser de He-Ne.

Entre los equipos comerciales para detectar defectos o relevar el perfil de una superficie por triangulación láser se pueden señalar:

- Lotis de Quest Integrated Inc.^[54]
- Laser MicroMap™ system de Laser Techniques Co.^[55]
- 3 D Surveyor® systems de Laser Design Inc.^[56]

Estos tres fabricantes iluminan con un diodo láser en la dirección normal; los dos primeros utilizan un sensor PSD, mientras que 3 D Surveyor® está provisto de una cámara CCD.

3. Triangulación Láser aplicada a la caracterización del interior de tubos

Los trabajos de Clark^[7], Doyle^{[4],[14]} y Jarvis^[21] fueron los primeros en mostrar perfilómetros ópticos basados en triangulación láser para caracterizar paredes internas de tubos. Estos autores demostraron que este dispositivo puede determinar, por ejemplo, el estado de corrosión de las paredes interiores de tubos. Además informaron que si el diámetro del haz láser es del orden de los 40 μm , el rango de resolución del sistema es del orden de las décimas de micrones.

Como primera etapa de este trabajo se realizó una exhaustiva búsqueda bibliográfica sobre los distintos prototipos basados en triangulación láser. Se presenta a continuación un resumen de los mismos:

3.1. Clark y Doyle^{[4],[7],[14]}; sus publicaciones hacen referencia al primer prototipo para inspección de tubos desarrollado en 1987 por Quest Integrated Inc. En la actualidad, esta empresa ha desarrollado una variedad de puntas láser, diseñadas para operar en tubos de diámetros comprendidos entre 12 mm y 153 mm aproximadamente y 4 m de longitud.

Estas puntas láser constan de 3 módulos unidos por medio de un conjunto de soportes flexibles (Figura II.3 y II.4). La fuente láser, la óptica y el sensor PSD están ubicados en la cabeza óptica del sensor que puede girar a 1800 rpm (Figura II.5). También han desarrollado cabezales láser no-rotantes conformados por 12 sistemas láser-detector en un único cabezal compacto de diámetro menor a 6 mm.

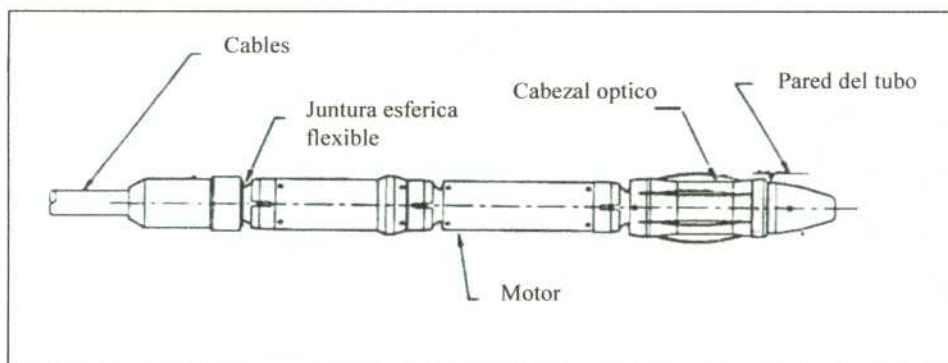


Figura II.3: Sensor óptico desarrollado por Clark y Doyle.^{[4],[7],[14]}

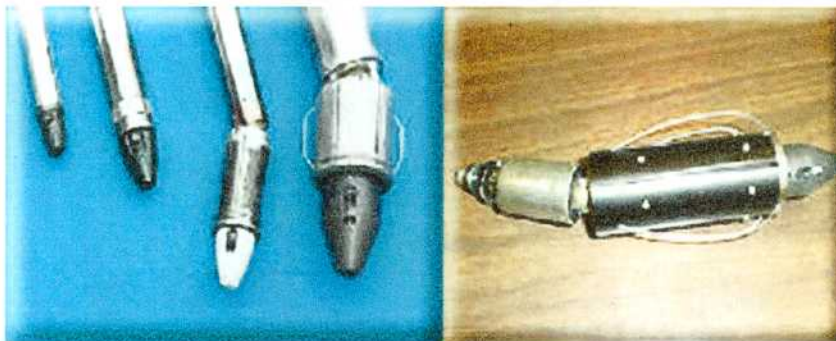


Figura II.4: Diferentes sensores de la empresa Quest Integrated Inc.^{[4],[7],[14]}

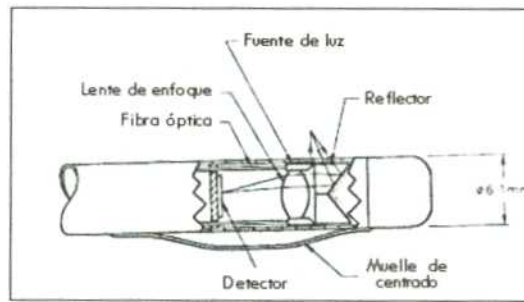


Figura II.5: Diagrama esquemático del cabezal Óptico del LOTIS.^[54]

3.2. El sistema Lotis 400-N^[54] para inspección de tubos, consta de: una punta sensora rotante, un sistema de adquisición de datos y un software desarrollado por esa firma (Figura II.6).



Figura II.6: Sistema de inspección de tubos LOTIS 400 N.^[54]

Este equipo permite obtener un mapeado computacional de las paredes internas de tubos cuyos diámetros están comprendidos entre 76 mm y 134 mm. R.D. Roberts ha realizado varios informes técnicos^{[44],[45]} de los trabajos realizados en refinerías y empresas petroquímicas con el Lotis 400 N. En estos informes se detalla que la punta sensora tarda aproximadamente 3 minutos en recorrer 15 m de tubos; posteriormente se analizan los datos obtenidos con el software provisto por el fabricante. De esta manera se ha podido detectar pequeños agujeros, en las paredes internas de caños, de 0,25 mm de diámetro y 0,5 mm de profundidad (Figura II.7).



Figura II.7: Vista tridimensional de las paredes internas de un tubo. Se observa un agujero de aproximadamente 1,5 mm de profundidad.^[54]

El sistema de detección **Lotis 400N**, demora 5 a 6 minutos en realizar la inspección. El costo del cabezal óptico, que es un prototipo desarrollado para cada aplicación, es de aproximadamente US\$ 40.000. El costo del resto del sistema es de US\$ 250.000 aproximadamente.

3.3. Láser Techniques Co. ha desarrollado el equipo **Láser MicroMap™ Tube Inspection System**^[55]. Este sistema utiliza la geometría descrita en la Figura II.2a, y el diseño de su punta sensora es muy parecido al de la marca **Lotis**, o sea, posee sensores rotantes en 360° que permiten medir interiores de tubos de diámetros mayores a 7mm (Figura II.8).



Figura II.8: Sistema de inspección de tubos Láser MicroMap™ Tube.^[55]

A través del software **LaserViewer™ software** este instrumento genera un mapa de la superficie evaluada (Figura II.9). La resolución del mismo es del orden de los 25 μm tanto espacialmente como en profundidad.

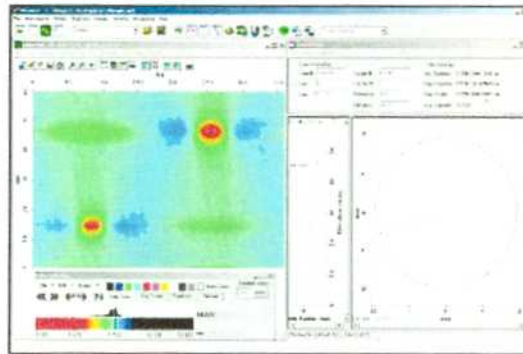


Figura II.9: Mapa de alta resolución de las paredes internas de un tubo.^[56]

Según sus fabricantes, este equipo puede utilizarse para la detección de agujeros, fisuras, corrosión tipo picado (pitting) y mediciones de ovalidad en tubos.

Para asesorarse sobre este equipo se contactó con el Dr. J. Doyle, presidente de Láser Techniques Company, quien informó que para obtener una alta velocidad de escaneo de los tubos (menos de 1 minuto), la cabeza rotante sensora debería estar conformado por 3 sensores orientados a 120°.

3.4. López et al^{[29],[30]}; estudiaron la posibilidad de determinar fisuras de 10-200 μm de ancho, en el interior de tubos de pequeño diámetro (menores de 20 mm). Ellos decidieron construir una punta sensora conformada por una matriz de pequeñas fibras ópticas reflectométricas (endoscopio), dispuestas en una sección circular (Figura II.10) con el fin de obtener una imagen de las paredes internas del tubo, o sea una correspondencia uno a uno entre los píxel de la imagen y una grilla bidimensional de puntos Q. Luego, el brillo promedio asignado a la salida de cada fibra óptica es proporcional al valor promedio de la irradiancia a la entrada de cada una de ellas. Para obtener una imagen bidimensional de las paredes internas de un tubo se desplaza axialmente la punta sensora, y las fisuras deberán aparecer como zonas oscuras.

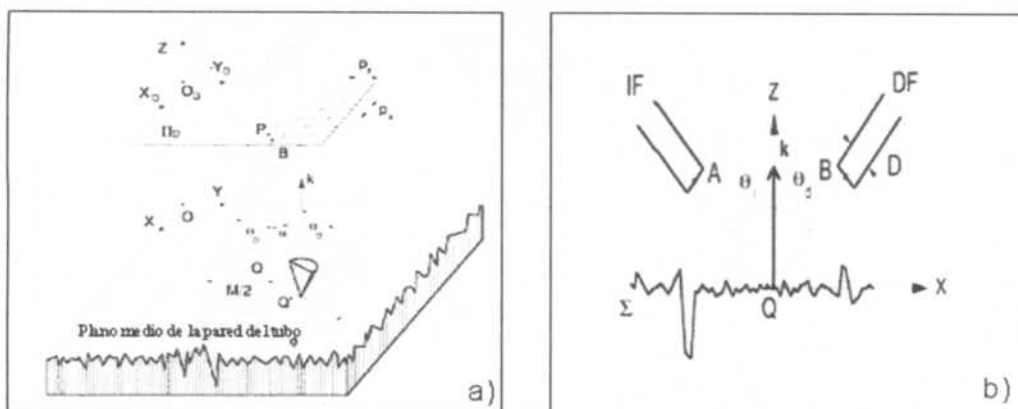


Figura 11.10: a) Diagrama esquemático de la geometría de detección, donde (x, y) son las coordenadas de la pared del tubo; (x_D, y_D) son las coordenadas del detector; Q y Q' son dos puntos que reflejan la luz incidente según la ley cosenoidal Lambertiana con una apertura θ_D ; p coordenada s de un sensor del array de detección. b) Diagrama de la configuración reflectométrica. IF fibra de detección; DF fibra de iluminación; Σ superficie; θ_i ángulo medio de iluminación; θ_d ángulo medio de detección, k normal de la superficie media; QB distancia de detección; D diámetro pupila de entrada.^{[29],[30]}

El modelo desarrollado por estos autores toma como hipótesis que la intensidad reflejada por una superficie sigue la ley cosenoidal Lambertiana. Demuestran que a una distancia **QB** de la superficie, la intensidad reflejada se extiende una distancia **M** igual a^{[29],[30]}:

$$M = 2.QB.\tan\theta_d \quad (11.4)$$

El proceso de medición en este dispositivo está compuesto por tres sistemas lineales en cascada:

1. S₁: relaciona el comportamiento dispersor de la superficie con una respuesta impulsiva **h_d** caracterizada por **M**.
2. S₂: relaciona la integración de la fibra de detección con una respuesta impulsiva **h_f** caracterizada por la pupila de entrada **D**.
3. S₃: relaciona el proceso de muestreo con una respuesta impulsiva invariante a la traslación **h_s** caracterizada por los pasos de muestreo **p_c** y **p_a**.

López et al, demostraron que cuando p_c y $p_a \ll M$, el ancho de una fisura δ está relacionado con el ancho δ_f de la imagen por:

$$\delta_f = \delta + M + D \quad (II.5)$$

La Figura II.11 muestra este prototipo.

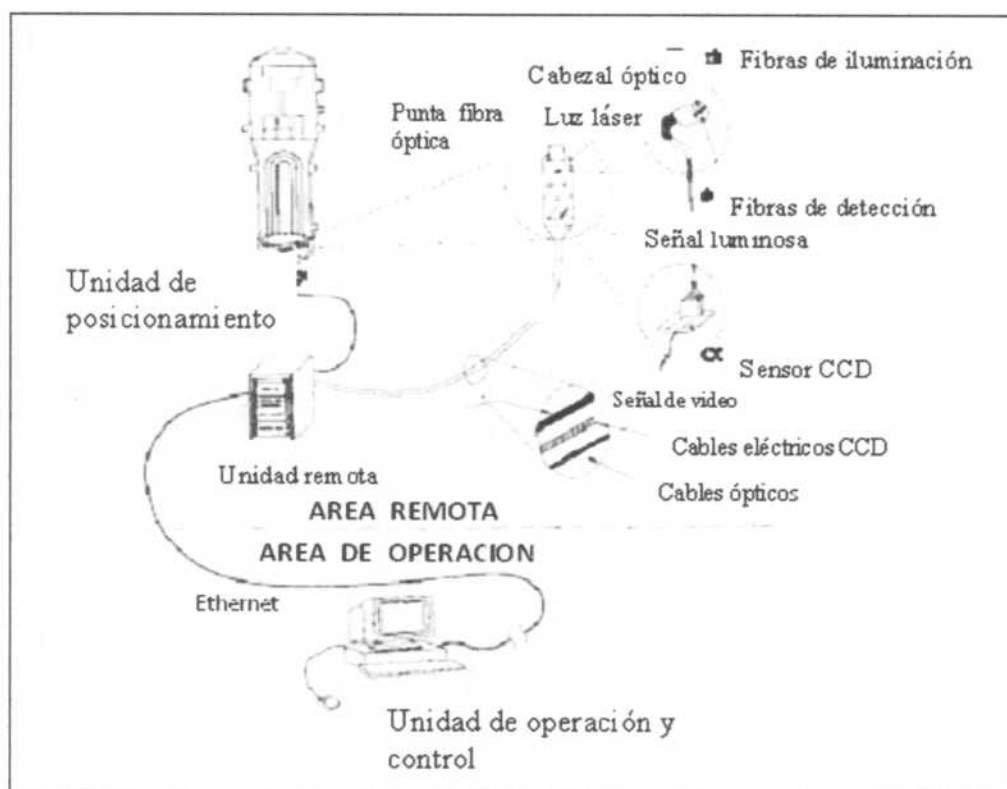


Figura II.11: Diseño del prototipo desarrollado por López et al.^{[29],[30]}

La cabeza sensora posee 4 cabezales ópticos dispuestos en el mismo plano en forma radial y ortogonal (Figura II.12). Cada cabezal posee 150 reflectómetros. Un sensor CCD detecta la intensidad a la salida de las fibras, con una velocidad por cuadro de 25 Hz, lo cual limita la velocidad axial de inspección a 0,75 mm/s, que se traduce en $p_x = 30 \mu\text{m}$. Una unidad remota controla a la punta sensora y al sistema de adquisición de imágenes; y a su vez dicha unidad está gobernada por una PC, que además realiza el análisis de los datos obtenidos.

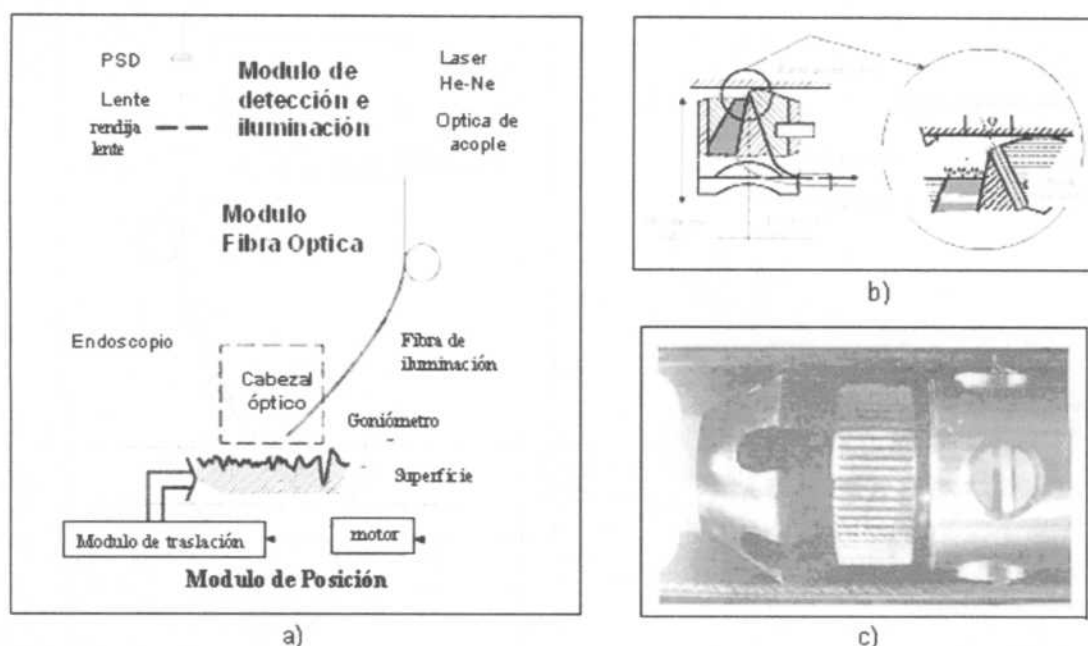


Figura 11.12: a) Prototipo desarrollado por López et al, ubicado dentro de un tubo de 16,8 mm de diámetro interno. b) Diagrama del cabezal óptico. c) Imagen del sensor óptico. Puede observarse 3 de los cabezales.^{[29],[30]}

En los trabajos publicados, los autores afirman que han podido determinar y medir fisuras de ancho mayor a 50 μm .

3.5. Jarvis et al^[21]; construyeron un equipo para inspeccionar los canales de combustibles de un reactor tipo Candú. En este dispositivo se utilizó un haz de luz divergente y astigmático (proyector de luz esfero cilíndrico), con uno de sus focos sobre el objeto a inspeccionar y el otro sobre el detector con un ángulo de incidencia $\eta = 22,5^\circ$ (Figura 11.13). La posición del detector forma un ángulo de 45° con la normal al plano de referencia.

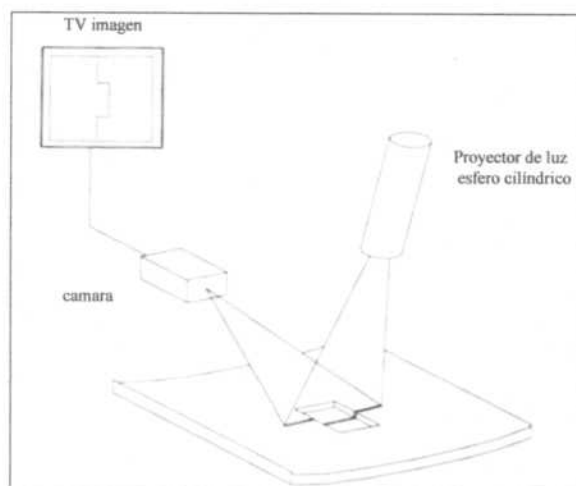


Figura II.13: Proyector de luz esfero cilíndrico.

Dada la alta radiación existente, utilizaron como proyector de luz esfero cilíndrico una lámpara cuarzo-halógena de 20 W, y una lente plana convexa. Se obtuvo así, un haz de 10 mm de longitud y $50\text{-}60\text{ }\mu\text{m}$ de ancho. Como detector se utilizó un Vidicom con un conjunto de lentes de aumento. Los autores informan mediciones de fisuras en la pared interna de estos tubos, cuyas profundidades varían entre los $50\text{-}230\text{ }\mu\text{m}$. En las Figura II.14 y II.15 se muestra el sensor y el cabezal esfero cilíndrico diseñado para este reactor.

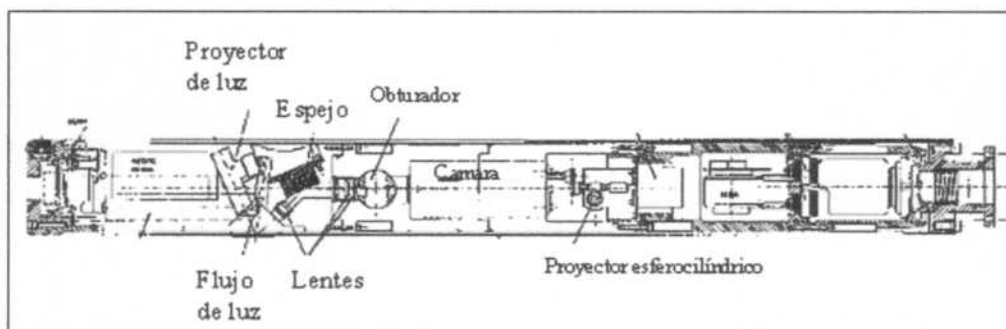


Figura II.14: Sensor diseñado por Jarvis.^[21]

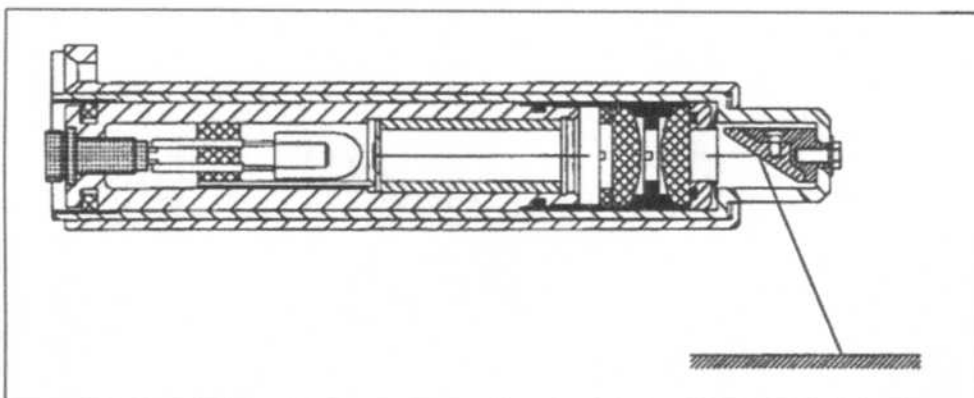


Figura II.15: Cabezal óptico esfero cilíndrico de Jarvis.^[21]

3.6. R. Henry et al y Zhang y Zhuang^{[32],[33]}; Otros prototipos muy interesantes fueron los desarrollados independientemente por estos autores. En ambos equipos se proyecta sobre las paredes internas de un tubo y perpendicular a su eje, un anillo de luz. Éste delinea la pared interna del cilindro, y permite determinar su forma y tamaño. Una cámara CCD captura esta imagen. Basándose en la teoría de la reflexión y dispersión de la luz, estos investigadores determinaron el tamaño y el perfil, como así también defectos en las paredes internas de objetos con simetría circular.

La Figura II.16 muestra el prototipo diseñado por R. Henry et al^[32], quien utilizó un cabezal luminoso que emite un haz de luz con una distribución de intensidad aproximadamente gaussiana. Una CCD recoge la imagen del anillo proyectado. Mediante un proceso de segmentación de imágenes, se determina las coordenadas de los puntos brillosos que conforman el anillo, calculando su radio y centro. Utilizando técnicas subpixel se determinó el radio interno de caños, con diámetros comprendidos entre 100 y 250 mm con un error del 0,2%.

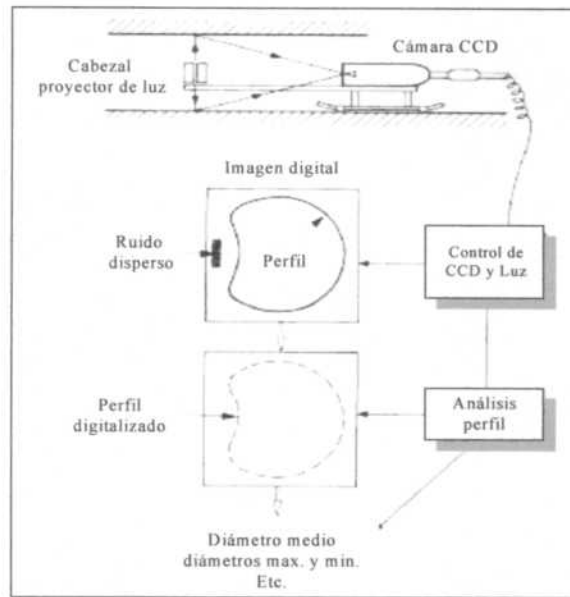


Figura II.16: Esquema del prototipo diseñado por R. Henry et al.^[32]

La Figura II.17 muestra el principio de funcionamiento del prototipo diseñado por Zhang y Zhuang^[33]. Un diodo láser (1 en la Figura II.17) emite un haz que al atravesar el generador del anillo óptico (2) es proyectado en un aro sobre las paredes internas del tubo a estudiar. En cada punto **M** de la pared del tubo incide un haz láser formando un ángulo con la normal local igual a $(\pi/2 + \alpha)$ {ángulo de abertura del generador de luz}. La luz reflejada y dispersada por la pared es enfocada por la lente (4) de distancia focal f en la CCD (5). El punto **N** representa la imagen del punto **M** en la cámara.

Zhang y Zhuang demostraron que la relación entre el radio r de la imagen del anillo y el valor del radio interno del tubo desde el centro del sensor R es igual a:

$$r = \frac{f R}{m - R / \tan \alpha} \quad (II.6)$$

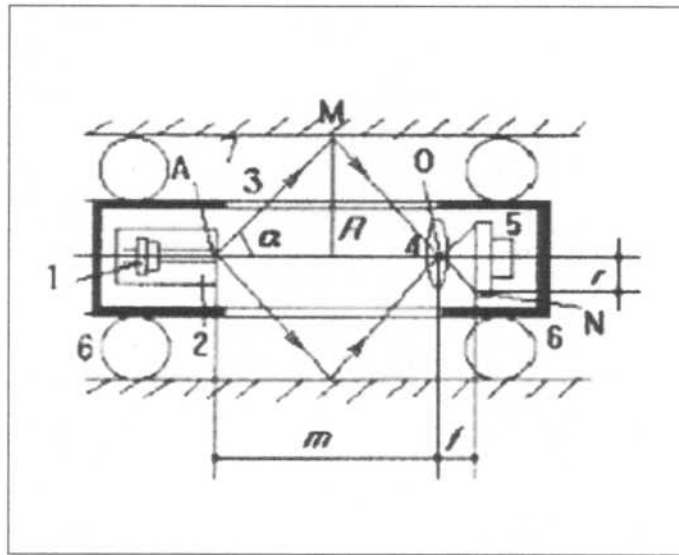


Figura II.17: Dispositivo desarrollado por Zhang y Zhuang.^[33]

Para analizar toda una sección del tubo, el sensor está montado sobre un carro (6), que le permite desplazarse longitudinalmente. Como las características del anillo óptico proyectado son invariantes, una variación del diámetro medio interno del tubo produce una variación de la imagen del anillo óptico en la CCD.

La Figura II.18 muestra una imagen del anillo proyectado sobre las paredes internas de un tubo.

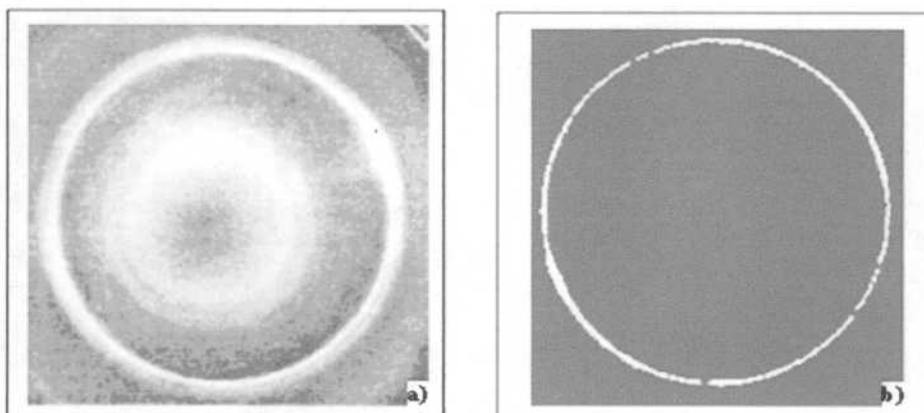


Figura II.18: a) imagen del anillo óptico sobre las paredes internas de un tubo. b) imagen filtrada del mismo anillo.^[33]

Una vez adquirida la imagen con una cámara CCD, se realizan distintos filtrados computacionales y técnicas subpixel para detectar la imagen del borde del anillo (Figura II.18b) y poder caracterizar la distribución de intensidad en direcciones diametrales.

Con la geometría antes descrita, los autores han inspeccionado tubos cuyos diámetros internos estaban comprendidos entre 70 – 160 mm con un error de aproximadamente 0,1 mm. Utilizando teoría de wavelet, han analizado la textura de sus paredes internas. Han podido detectar errores de forma, como así también fisuras o defectos esporádicos de 100 μm de espesor.

3.7. CUES Corporate; (www.cuesinc.com). Esta empresa ha desarrollado el producto **CUES Láser Profile** (Figura II.19), cuyo principio de funcionamiento es muy parecido al de la punta sensora desarrollada por R. Henry et al y Zhang y Zhuang. Según catálogo, este equipo posee una exactitud de 1mm en la medición del diámetro de tubo, deformaciones, incrustaciones, fisuras, erosión, agujeros, etc.

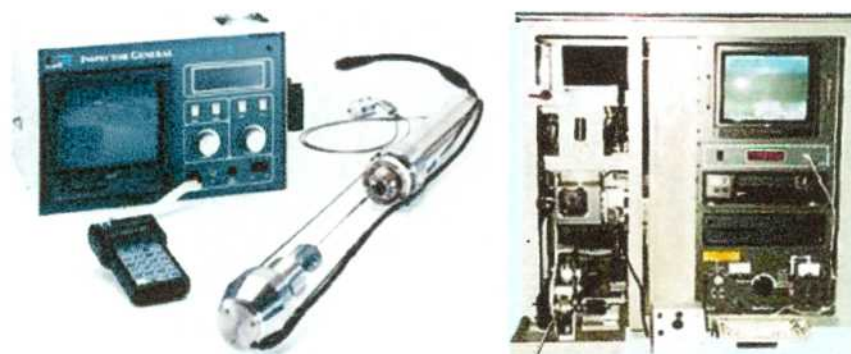


Figura II.19: Equipo portable para analizar interiores de tubos marca Cues Laser Profile.

Para tuberías de longitudes superiores a los 250 mm y hasta 6000 mm, se monta el sistema sobre un transportador (Figura II.20).

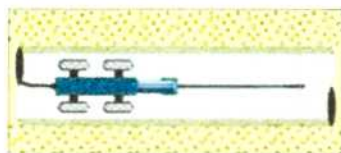


Figura II.20: Diagrama esquemático del Cues Laser profile.

Se contactó al Sr. Bennett, quien por su parte informó que el Laser Profile puede inspeccionar tubos de diámetros comprendidos entre 150 mm y 1500 mm. Para diámetros menores de 450 mm, solamente se necesita un simple proyector láser no pulsado. Este sistema tarda aproximadamente 1 minuto en inspeccionar 1 metro de tubo con pequeño diámetro. El costo en EE.UU., incluyendo el software, es de aproximadamente u\$s 30.000.

3.8. Laboratorio de Óptica y Láser (LOL) –IAMEND-ENDE-CNEA: Se montaron diferentes dispositivos ópticos con el fin de realizar una inspección visual de tubos utilizando una cámara CCD^{[16],[49]} y variando la fuente de iluminación. Los autores pudieron comprobar que:

- Si se utiliza como fuente de iluminación una fuente de luz blanca difusa, las reflexiones múltiples que se producen en las paredes internas perjudican notablemente las imágenes obtenidas con la CCD, no pudiéndose detectar defecto alguno.

- Si se ilumina con luz blanca una pequeña área de la pared interna y se emplea un sistema óptico de enfoque de 10x para la cámara CCD, se puede localizar fisuras y medir el ancho y la profundidad de las mismas. Pero el relevamiento de toda la pared interna de un tubo requeriría más tiempo que el que tarda un operador en una inspección visual a ojo desnudo.

- Si se ilumina la pared interna del tubo con una onda coherente esfero cilíndrica proyectando un anillo de luz coherente de pequeño espesor, como los diseñados por R. Henry et al y Zhang y Zhuang, es posible detectar diversas anomalías. El tiempo de inspección requerido es levemente superior al de inspección visual, pero la determinación de defectos es mucho más exacta.

4. Conclusiones

En este capítulo se presentó una revisión de trabajos publicados por distintos autores sobre sistemas de inspección con métodos ópticos. Ahora bien, teniendo en cuenta que el cabezal óptico que se desea diseñar debe operar in-situ, generalmente en ambientes agresivos, y con los menores tiempos de inspección posible, se concluye que, para los fines de este dispositivo, se empleará el método de Triangulación activa con Luz Estructurada, aunque implique mayor complejidad computacional. Dicho método será desarrollado extensamente en el capítulo siguiente.

Triangulación activa con luz estructurada

Los métodos de luz estructurada utilizan como fuente de iluminación un proyector que genera un haz con una geometría adecuada a fin de facilitar la extracción de la profundidad de la escena de análisis. Una de estas técnicas consiste en la proyección de una línea sencilla de luz sobre la escena y la imagen bidimensional es adquirida por medio de una cámara digitalizadora que se encuentra a un ángulo de observación adecuado. La información de profundidad se adquiere del desplazamiento relativo de los diferentes puntos de la línea de luz. Una particularidad del método de línea sencilla es la necesidad de procesar múltiples imágenes para reconstruir la escena completa. La totalidad de la escena puede cubrirse ya sea moviendo la fuente de luz o bien, dejando el sistema de iluminación fijo y trasladando la escena. Una variación de este método de luz estructurada consiste en la proyección de múltiples líneas sobre la escena con una regularidad o un patrón definido. Para ello se usa una rejilla de difracción, diseñada para tal fin. La técnica de múltiples líneas tiene la ventaja obvia de requerir, en principio, una sola imagen para lograr la reconstrucción de la escena completa. Esta ventaja, en términos computacionales, representa una simplificación en el manejo de los “buffers” o memoria RAM. Sin embargo, la complejidad de los algoritmos de reconstrucción aumenta considerablemente, pues es necesario resolver ciertas dificultades inherentes al método, entre las cuales se destaca la posible confusión entre las diferentes líneas. El principio de extracción de profundidad mediante el desplazamiento relativo de puntos de luz conduce al diseño de algoritmos demasiado complejos para poder aspirar a su implantación en tiempo real.

1. Teoría general del método a aplicar

La luz estructurada consiste en proyectar, bajo un ángulo conocido, un patrón de luz modulado (plano, red, o forma más compleja) sobre una pieza. La luz reflejada, que también está modulada, es portadora de información de la estructura superficial del objeto. Mediante un software adecuado, basado en el método de triangulación se procesan las señales obtenidas y se reconstruye en tres dimensiones el perfil de la superficie iluminada.

En general, las fuentes de luz empleadas son láseres o diodos láser adosados a un proyector de luz; de esta manera emerge del conjunto una luz estructurada y coherente. El patrón de luz más utilizado en bancos de coordenadas es un plano de luz que se proyecta sobre la superficie del objeto. En la intersección del plano luminoso con el objeto puede observarse una línea brillante de luz discontinua. Las distorsiones observadas en dicha línea respecto de una línea patrón pueden traducirse en variaciones de altura (Figura III. 1). Una vista completa de la superficie 3D se construye en forma secuencial, sección por sección, al mover el objeto transversalmente respecto del plano de luz proyectado.

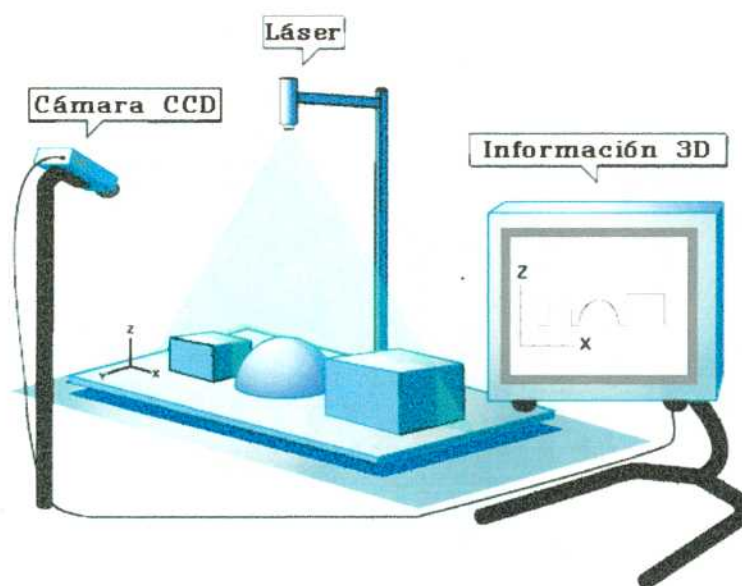


Figura III. 1: Información Dimensional.

Estos perfilómetros ópticos tridimensionales se componen de las siguientes partes:

- Un sistema de posicionamiento, que sitúa la superficie del objeto a evaluar ante el captador de imagen.
- El sistema de visión automática conformado por:
 - Subsistema de iluminación, que provee la luz estructurada: Esta luz estructurada puede generarse de varias formas, por ejemplo con luz láser y Elementos Ópticos Difractivos.
 - Subsistema de adquisición, encargado de la recolección de la imagen.
 - Subsistema de procesamiento, encargado de analizar los datos visuales proporcionados por el subsistema de adquisición
 - Subsistema de almacenamiento, para almacenar los datos inferidos o adquiridos.
- Un sistema de separación, para la clasificación de piezas inspeccionadas de acuerdo con el procesamiento.

1.1. El Sistema posicionador. Incluye tanto el sistema de alimentación como el carro lineal. Cabe mencionar que un buen posicionamiento del objeto podría facilitar la tarea de los algoritmos de reconocimiento. Para el caso de inspección continua, desplaza la muestra para obtener diferentes zonas de muestreo. El tiempo requerido entre desplazamientos depende de la velocidad del sistema de adquisición de imágenes.

1.2. El Sistema de Visión Automática. Es la parte fundamental del sistema de reconstrucción automática y es el encargado de la adquisición y procesamiento de la imagen, así como de la presentación al usuario, es decir, la interfaz del usuario.

1.2.1. El subsistema de iluminación. La iluminación de la escena juega un papel crucial en el desarrollo de un sistema de reconocimiento visual automático, puesto que puede determinar el éxito o fracaso de una aplicación de este tipo.

Elementos ópticos difractivos. Los DOE (Diffractive Optical Elements) son dispositivos que modulan un haz de luz y permiten codificar (o decodificar), formar imágenes o desviar un haz de luz en las formas que hayan sido diseñados (Figura III. 2); utilizan las propiedades de la difracción, lo que les permite controlar la distribución de la luz de diferentes formas, que sería difícil o imposible conseguir usando elementos ópticos clásicos basados en la refracción y la reflexión. Pueden modular la luz por medio de un relieve en su superficie o por cambios espaciales en el índice de refracción. Estos elementos de relieve pueden trabajar por transmisión o por reflexión. Para elementos de transmisión la absorción del sustrato sobre el cual están hechos debe ser muy débil. Los elementos difractivos suelen tener menor peso y volumen que sus equivalentes clásicos como prismas, lentes, espejos, etc. Actualmente existe una enorme tendencia a miniaturizar los componentes de instrumentos, con el fin de reducir significativamente su peso, tamaño y costo. Esta tendencia se ha hecho presente en óptica, principalmente en campos como micro-óptica, óptica integrada y sistemas mecánicos opto electrónicos. En cada una de estas áreas, la óptica difractiva juega un rol muy importante. Con los avances en la micro fabricación, los DOE pueden construirse muy compactos, ligeros y baratos, lo cual es ideal para la miniaturización e integración en sistemas ópticos convencionales.

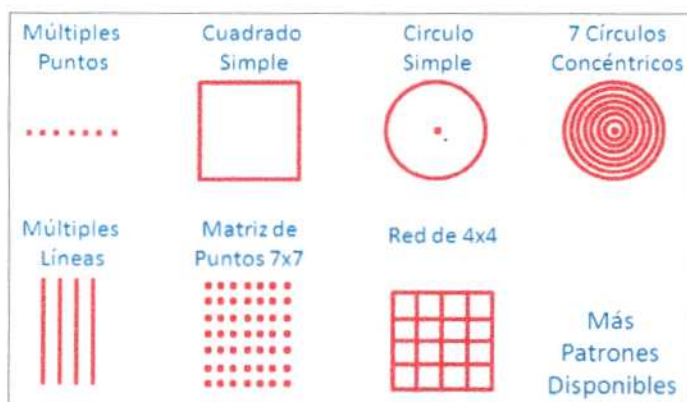


Figura III. 2: Patrones de luz.

La óptica difractiva ha demostrado que es tecnológicamente útil para una gran variedad de aplicaciones, entre las cuales se incluyen: i) las telecomunicaciones donde se puede modular un haz de luz y acoplarlo a una fibra óptica, o también se pueden usar para separar longitudes de onda en multiplexado; ii) pantallas donde pueden usarse para construir patrones de luz deseados, tales como: hologramas, y almacenamiento de información; iii) sistemas ópticos para corregir aberraciones cromáticas, etc.

Por otro lado, a partir de la década de los 60's y con la ayuda de los avances en la computación digital, surgió una nueva alternativa para generar elementos difractivos, la cual se conoce como holografía digital. Su característica principal radica en que el proceso de grabación del holograma es ejecutado sintéticamente con la ayuda de una computadora digital. El paso de reconstrucción permanece igual al de la holografía óptica tradicional. Debido a la naturaleza de la técnica, el procedimiento comienza definiendo un objeto determinado (imagen reconstruida) y mediante un proceso de difracción inversa se calcula la amplitud compleja que se graba posteriormente en forma codificada en el holograma.

El método de fabricación de los elementos difractivos se resume en los siguientes pasos:

- a) Cálculo de la función de transmisión de fase del holograma en una computadora.
- b) Fabricación de la máscara de amplitud binaria en una impresora de alta resolución.
- c) Conversión de la información de amplitud a fase mediante un proceso litográfico usando un material fotopolímero que cura con radiación ultravioleta.

1.2.2. El subsistema de adquisición. La adquisición correcta de la imagen es fundamental para el éxito o fracaso del procesamiento, ya que una imagen con buenas propiedades de iluminación, puede llegar a hacer viable o inviable un proyecto de automatización de una inspección. El subsistema de adquisición es una cámara digital compuesta por un sensor de imagen y una óptica

de enfoque. Según el tipo de sensor utilizado a veces es necesario una placa digitalizadora, o conversor analógico-digital, encargada de transformar la señal de vídeo, cualquiera que sea el formato utilizado, en una señal digital capaz de ser capturada y procesada por una computadora.

➤ **Cámara:** Es el dispositivo encargado de transformar las señales luminosas captadas en señales analógicas o digitales capaces de ser transmitidas por un cable coaxial. Se divide en dos partes claramente diferenciadas que son: el sensor, que es el responsable de capturar las propiedades del objeto en forma de señales luminosas y transformarlas en señales electrónicas, y la óptica que se encarga de formar una imagen de la escena sobre dicho sensor. Existen en el mercado una gran variedad de cámaras digitales, por lo tanto es importante saber elegir la adecuada.

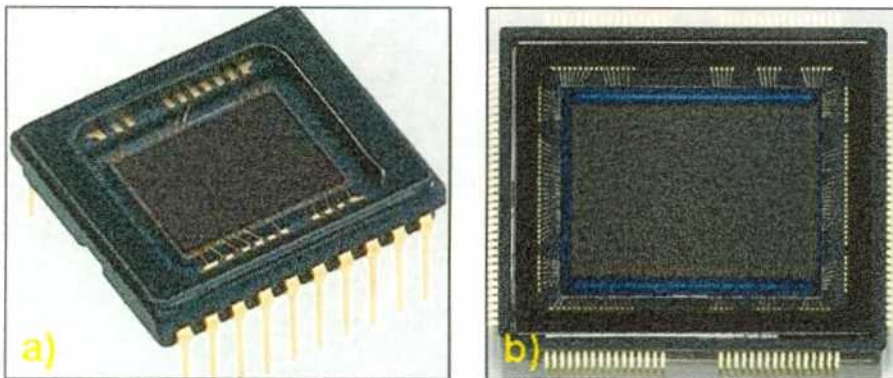


Figura III. 3: a) Sensor CCD. b) Sensor CMOS.^[57]

➤ **El sensor de imagen:** Los sensores son dispositivos electrónicos fotosensibles, y cumplen las mismas funciones que la película fotográfica. Están compuestos por millones de pequeños semiconductores de silicio. Poseen una estructura de células sensibles a la luz en forma de mosaico, cada una de esas células es lo que se denomina **píxel**. Cada píxel es una estructura detectora capaz de almacenar fotones en forma de carga eléctrica. Por tanto, un sensor es un elemento que permite evaluar de forma cuantitativa la luz que ha incidido sobre cada uno de sus píxeles, generando una tensión eléctrica proporcional a la cantidad de fotones almacenados.

Los sensores más comunes que utilizan las cámaras digitales son los **CCD** (Charge Coupled Device) y **CMOS** (Complementary Metal Oxide Semiconductor). Ambos están fabricados con materiales Semiconductores de Metal-Óxido (MOS) y estructurados en forma de matriz. Acumulan una carga eléctrica en cada celda de la matriz en forma proporcional a la intensidad de la luz que incide sobre cada píxel. No obstante existen diferencias notables entre ambas tecnologías:

En un **sensor CCD** o Dispositivo de Cargas Acopladas (Figura III. 4) expuesto a la luz durante un tiempo denominado tiempo de integración, los fotones generan carga eléctrica que es almacenada en cada píxel. Luego, dicha carga es transferida en forma ordenada a una etapa de salida. En esta etapa un amplificador se encarga de convertir la carga que posee cada píxel en una tensión eléctrica, generando a la salida una señal analógica. El segundo componente electrónico en importancia es el conversor Analógico/Digital que traduce la señal analógica en digital. Este código digital es enviado a la computadora bien por el puerto serie, puerto paralelo o por una tarjeta de adquisición. Una vez allí la imagen está lista para ser procesada, visualizada, etc.

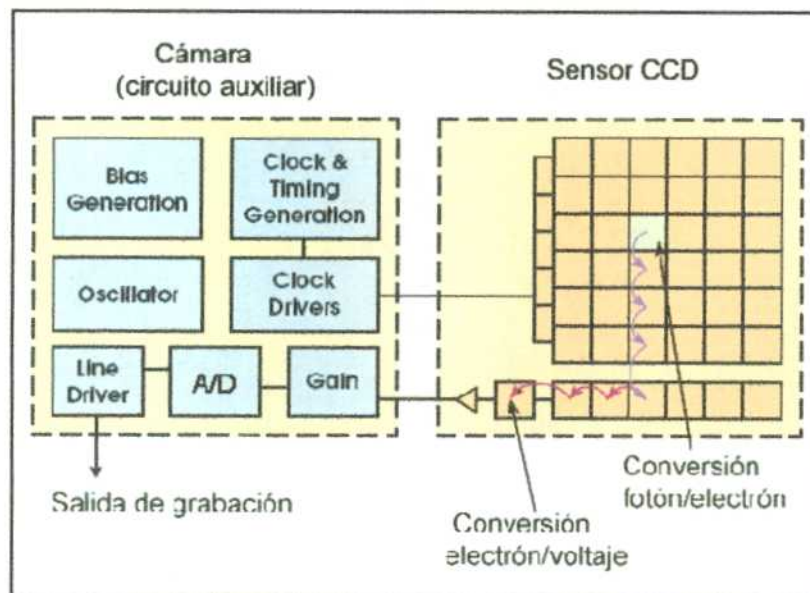


Figura III. 4: Esquema de un sensor CCD.

En un **sensor CMOS**, los fotones que recibe cada celda son convertidos en carga eléctrica y en tensión [V] en la misma celda receptor, realizando la digitalización píxel a píxel (Figura III. 5). De esta manera, al contrario que en los CCD, las celdas son totalmente independientes de sus vecinas. Opuestamente al CCD, a la salida del sensor CMOS se obtiene una señal digital, sin emplear un convertidor analógico digital.

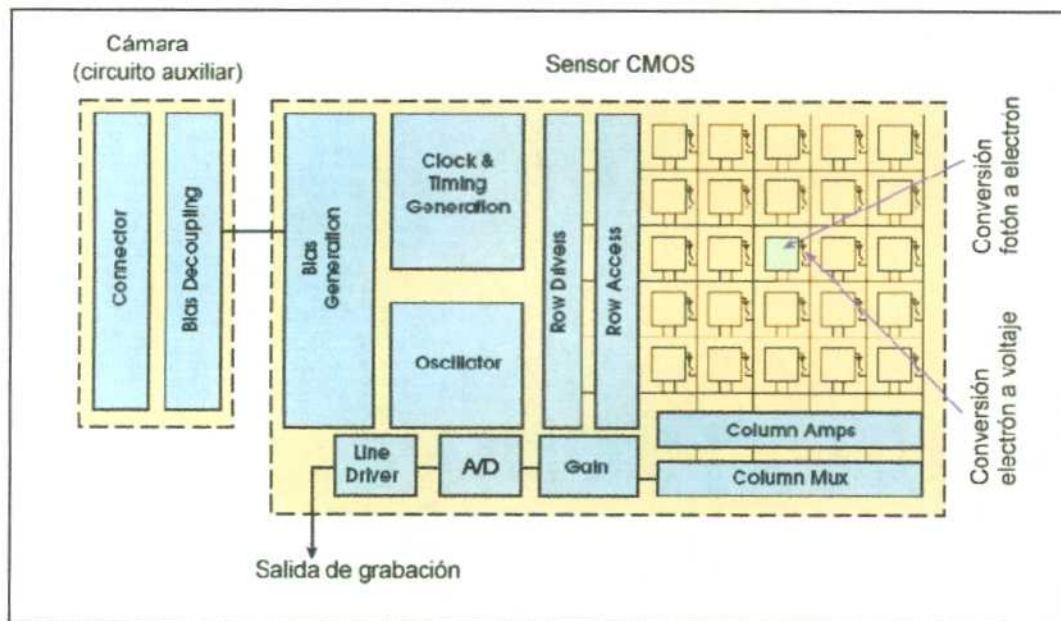


Figura III. 5: Esquema de un sensor CMOS.

A continuación se muestran algunas virtudes y defectos de cada uno de estos sensores^{[52],[53]}:

Responsividad (capacidad de respuesta): Se define con este término al nivel de señal eléctrica (medida en ampere) que es capaz de brindar el sensor por cada unidad de energía óptica incidente (medida en watts). Se suele expresar en A/W y es función de la longitud de onda incidente. Lógicamente interesa que el sensor tenga una responsividad elevada, o sea, que con baja intensidad luminosa se obtenga una señal de salida aceptable. En este tema, los sensores CMOS son superiores a los de tecnología CCD, debido a que integran elementos amplificadores en cada celda.

Rango Dinámico: (RD) Es la razón entre el nivel de energía de saturación de los píxeles y el umbral por debajo del cual no captan señal. En este aspecto los sensores CCD superan a los CMOS, típicamente el RD de un sensor CCD es aproximadamente el doble del de un CMOS.

Ruido: Por ruido se entiende a cualquier perturbación que interfiere con la señal eléctrica de interés. Existen numerosas fuentes y tipos de ruidos, pero aquellos que más afectan a la estructuras CCD o CMOS son: ruidos externos a los sensores (usualmente conocidos como interferencias), ruido de corriente continua (dc-noise), ruido térmico, ruido shot el ruido de cuantificación. Los sensores CCD aventajan a los de tecnología CMOS en este apartado, ya que debido a su construcción todo el procesamiento de señal se da fuera del CCD. Los convertidores A/D podrán ser elegidos de forma tal de ir aumentando la relación señal-ruido. Por su parte, los CMOS al realizar la gran mayoría de las funciones dentro del sensor destinan menos espacio para los fotodiodos encargados de recoger la luz, por lo que se produce más ruido en la lectura.

Respuesta Uniforme: Se espera que un píxel con el mismo nivel de excitación de luz que sus vecinos no presente cambios apreciables respecto de ellos. En este aspecto la individualidad de cada píxel de un sensor CMOS los hace más sensibles a no cumplir con esta característica. No obstante, mediante circuitos con realimentación se puede lograr una linealidad en su respuesta. Pero todavía los sensores CCD presentan una ligera ventaja frente a los CMOS.

Velocidad: La velocidad de captura de imágenes en los CMOS es bastante superior a la de los CCD, debido a que muchas funciones, como la propia conversión analógico-digital es realizada en el propio sensor.

Enventanado: Es sabido que los CCD funcionan a su máxima resolución en la gran mayoría de dispositivos, en cambio los CMOS, dado su carácter de píxeles independientes, permiten seleccionar más fácilmente porciones de la imagen, esto permite más refresco en modos de video o bien tomar imágenes a menor resolución sin interpolación.

Blooming: Es el conocido fenómeno por el cual un píxel que ha alcanzado la saturación empieza a 'contagiar' a sus vecinos, creando efectos indeseados. El fenómeno de Blooming se observa en los CCD. En cambio por su construcción los CMOS no sufren este defecto.

En resumen CCD brinda más calidad de imagen a costa de un tamaño mayor y consumo más elevado. Por su lado CMOS es superior en integración y bajo consumo a costa de perder calidad de imagen en situaciones de poca luz. No hay nada superior de por sí, sino situaciones en las que cada tecnología es más adecuada.

1.2.3. Subsistema de procesamiento de la imagen. El sistema encargado de realizar el procesamiento de la imagen varía ampliamente, desde procesadores muy especializados, pequeñas computadoras de propósito general, hasta procesadores vectoriales de gran versatilidad. El tipo de arquitectura a emplear varía mucho y depende de diversos parámetros, como el uso de uno o varios procesadores y el uso de sistemas específicos o de propósito general, y por supuesto del costo. Dependiendo de la elección de los parámetros anteriores, el procesamiento de la imagen será más rápido o no. Para requerimientos en tiempo real, se debe estudiar la implantación del sistema más barato con las mejores prestaciones.

1.2.4. Subsistema de almacenamiento. Los requerimientos de almacenamiento de datos y velocidad de acceso son vitales en los sistemas de visión, siendo muy usual tener grandes volúmenes de datos para almacenar. Existen muchos tipos de almacenamiento (magnético, óptico, extraíble), como el disco duro, discos compactos, memoria USB, etc. Cada uno de ellos tiene sus ventajas e inconvenientes y es necesario fijarse en dos parámetros fundamentales para su elección, que son velocidad de acceso a los datos y costo.

Caracterización de defectos en paredes internas de tubos

En el Laboratorio de Óptica y Láser se querían evaluar tubos de Zircaloy-4, similares a los que se usan en los canales de combustible de Atucha I. En vista de las técnicas mencionadas y analizadas anteriormente, se decidió aplicar el método de Triangulación Activa con luz Estructurada. A tal efecto, primero se probaron distintos sistemas de alineación, para poder elegir luego los instrumentos idóneos que permitieran una correcta calibración y adquisición de datos respectivos.

Aún más importante es saber elegir el DOE (Elemento Óptico Difractivo) adecuado, que permita delinear un aro de luz en el interior de los tubos, que a su vez será necesario para realizar el ensayo. En IV.1 se presentan dos tipos de luz estructurada, con su respectivo dispositivo experimental y los resultados obtenidos, para luego poder hacer una comparación que permita elegir el proyector de luz más adecuado.

Fue necesario también el desarrollo de un software en el entorno del programa MATLAB, para procesar las imágenes almacenadas, y extraer de ellas la información deseada. En el punto 5 del presente capítulo se analizará las distintas sentencias que conforman dicho software.

1. Determinación del tipo de Luz Estructurada

Debido a la geometría cilíndrica a evaluar, se determinó que la luz proyectada debía tener una estructura cónica, que se puede obtener por difracción o dispersión. De tal modo, con una alineación adecuada, al intersecar el interior del tubo con el cono luminoso, se proyecta en la pared interna de dicho tubo, una intensidad luminosa con simetría circular.

Seguidamente, se estudiaron, en el laboratorio y con las herramientas disponibles, las formas de obtener dicho cono de luz. Así se obtuvieron dos tipos de aros luminosos:

- Aro de iluminación discreta (por difracción cónica).
- Aro de iluminación continua (por dispersión cónica).

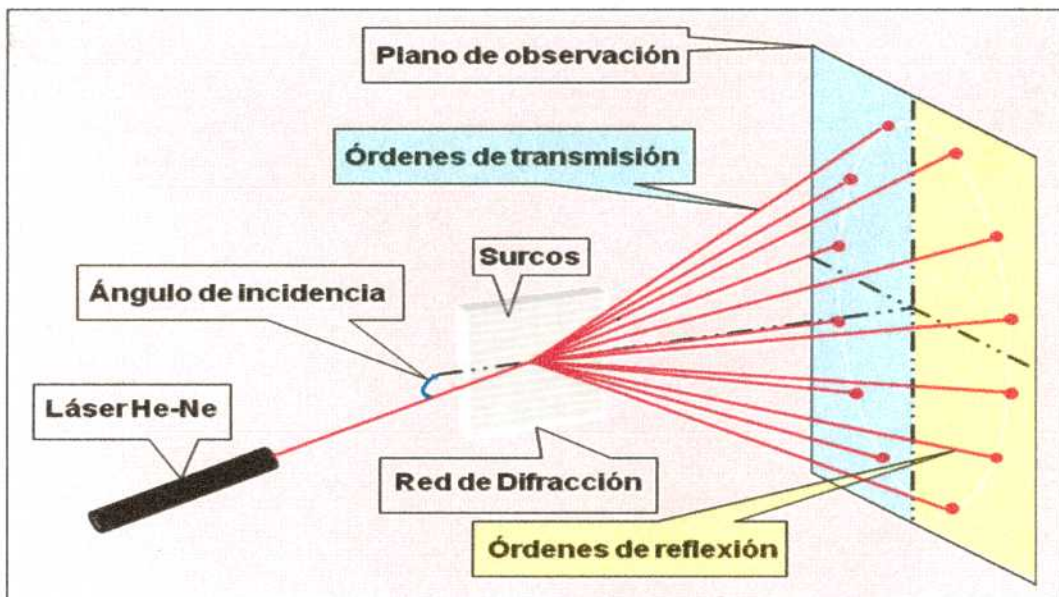


Figura IV. 1: Órdenes de Difracción.

1.1. Difracción Cónica.

Cuando un haz de luz coherente incide sobre una red de difracción, bajo un ángulo de incidencia oblicuo (montaje no paraxial) los órdenes de difracción (por reflexión y transmisión) yacen sobre un cono, cuyo eje es paralelo a los surcos de la red y su ángulo medio es el ángulo formado entre el haz incidente y la dirección de los surcos. Al intersecar este cono difractivo con un plano perpendicular a los surcos se obtiene un conjunto de puntos luminosos dispuestos sobre un anillo^{[58][59]} (Figura IV. 1).

1.1.1. Dispositivo experimental.

Una parte importante de este capítulo fue el diseño, montaje y alineación de un dispositivo que permita iluminar internamente un tubo patrón con un aro luminoso discreto. La Figura IV. 2 muestra esquemáticamente este dispositivo con la respectiva distribución de los equipos para una correcta alineación.

Un sistema compuesto por un objetivo de microscopio, asociado con un filtro espacial (pinhole), un diafragma y una lente; ensancha, limpia y enfoca un haz láser de He-Ne ($\lambda = 0,6328 \mu\text{m}$) sobre una red de difracción (78 líneas/mm) en un montaje no paraxial. El cono de luz difractivo así obtenido incide sobre las paredes internas de una superficie cilíndrica. De esta manera se observa, sobre el tubo patrón, un conjunto de máximos de intensidad distribuidos sobre una circunferencia. Una cámara CCD (CV- M50), captura dicha imagen, almacenándola en una PC.

La alineación de todo el sistema es quizá una de las etapas más arduas y tediosas, ya que hay que alcanzar gran adiestramiento en el armado y manejo de los equipos de laboratorio. Para poder realizar una correcta alineación, cada uno de los componentes está montado sobre platinas de traslación y movimientos cardánicos, que permiten moverlo en tres ejes perpendiculares, y rotarlos.

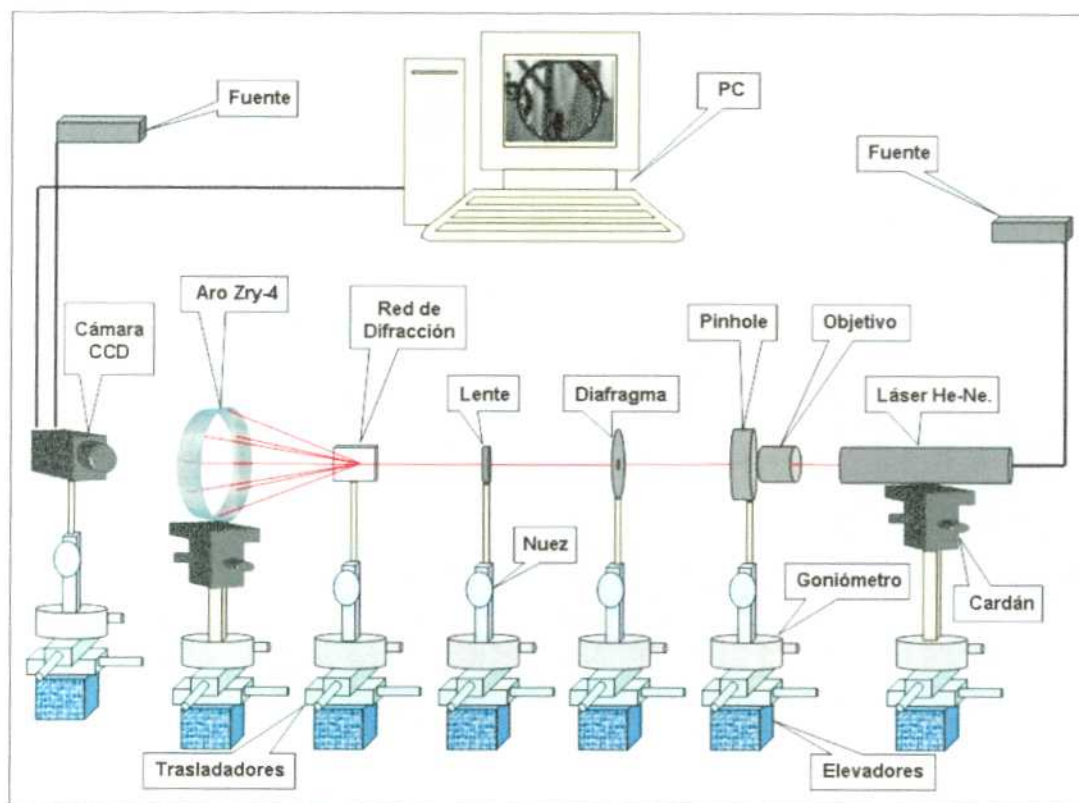


Figura IV. 2: Sistema de alineación para Difracción Cónica: Láser He-Ne Uniphase (modelo 1135P 20mW); Cámara CCD (CV-M5); Posicionadores (goniómetro, trasladadores, cardán, nuez); Aberturas (diafragma, pinhole); Lentes; Red de Difracción; Aro de Zircaloy y tubos de latón; Computadora personal (software Matlab).

1.1.2. Medición.

Se analizaron cualitativamente un tubo sin defectos y otros que presentaban diferentes anomalías. El tubo sin defectos se utilizó para obtener la parametrización de la circunferencia patrón.

Para ello, primero se realizó un filtrado de la imagen registrada y almacenada en la PC (Figura IV. 3a), luego se determinó la posición de los puntos luminosos; y posteriormente se ajustó y parametrizó una circunferencia patrón que los contiene, (Figura IV. 3b).

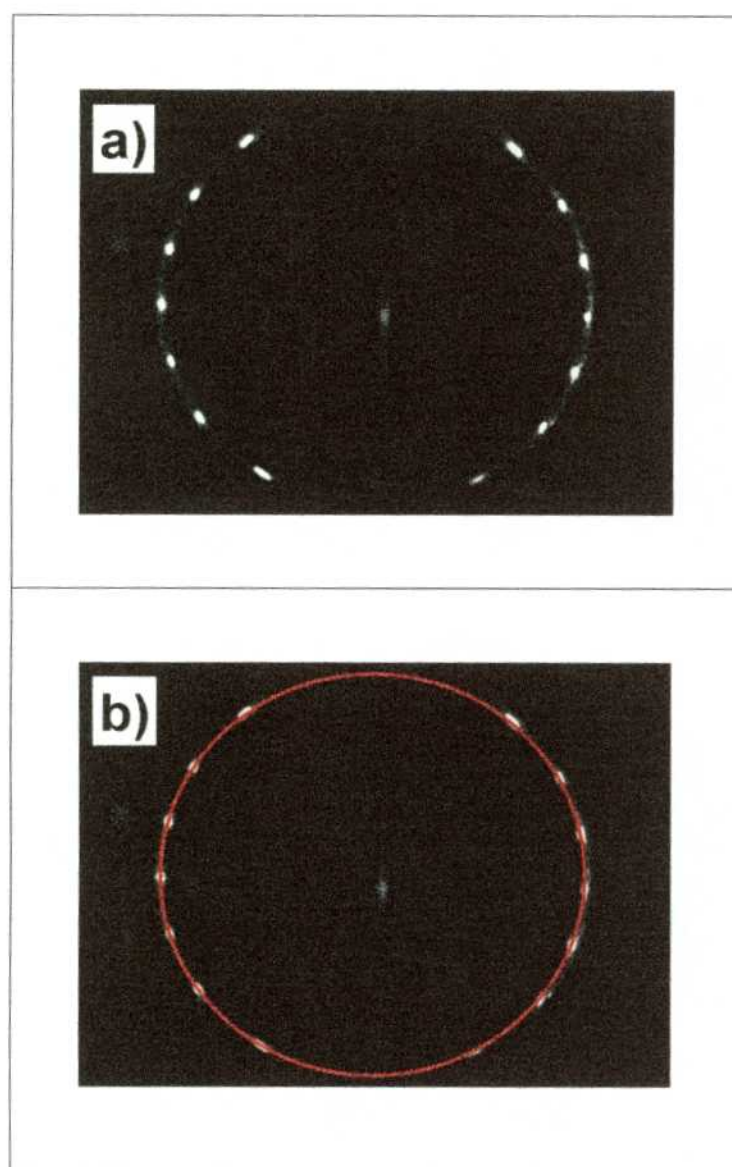


Figura IV. 3: Filtrado de Imágenes.

Obtenida la circunferencia de referencia, se procedió a estudiar tubos con defectos (Figura IV. 4a). Nuevamente se realizó el filtrado de la imagen capturada y se le superpuso la circunferencia patrón, (Figura IV. 4b). Se puede observar en las figuras cómo son detectadas las anomalías en donde los puntos luminosos se apartan del aro de referencia.

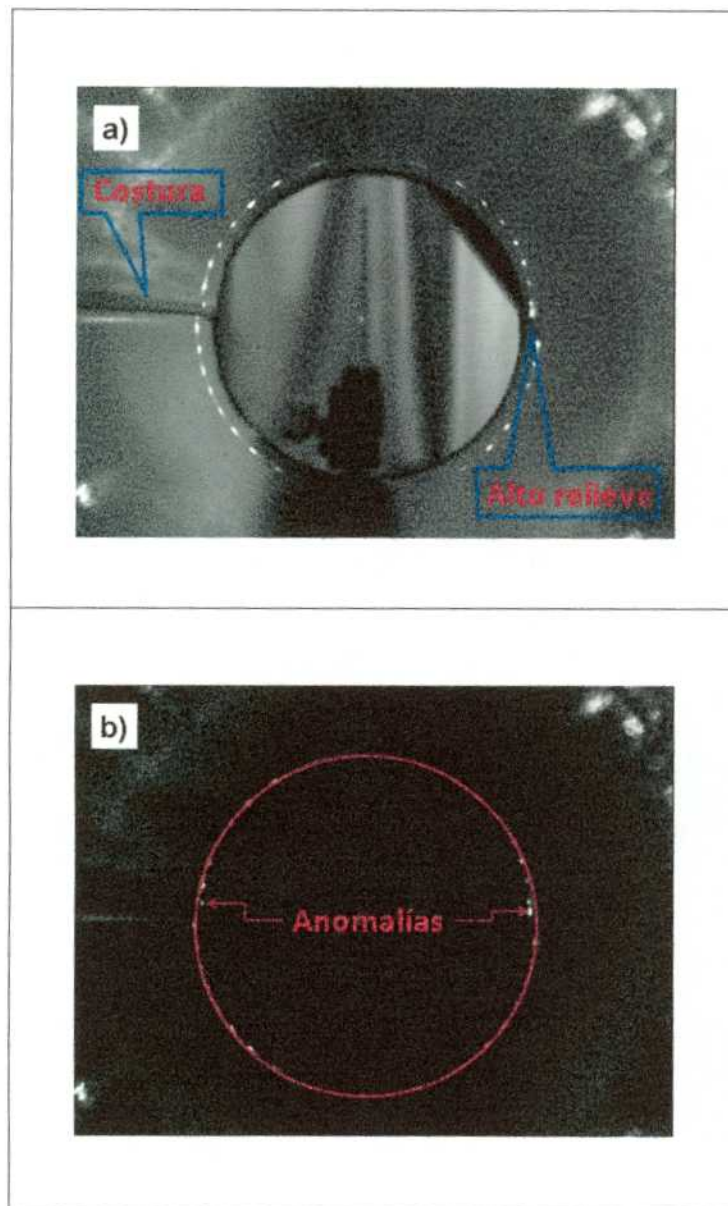


Figura IV. 4: Tubo con defectos.

1.1.3. Conclusión:

La proyección de luz producida por la difracción cónica solamente puede detectar deformaciones o defectos de tamaño del orden de la separación entre puntos luminosos. Se puede concluir que este tipo de iluminación discreta sólo es aceptable para estudiar defectos geométricos, como la ovalidad.

1.2. *Dispersión Cónica.*

Cuando un frente de ondas plano incide sobre una superficie cilíndrica (por ejemplo una aguja) la luz se dispersa formando un cono, (Figura IV. 5). Este fenómeno se conoce como dispersión cónica. Con la alineación adecuada entre el haz láser, la aguja y el tubo se logra proyectar un anillo luminoso sobre la pared interior del tubo. La cámara digital también debe estar alineada de manera tal que la imagen digital registrada de la proyección sobre un tubo sin fallas ni deformaciones sea una circunferencia perfecta.

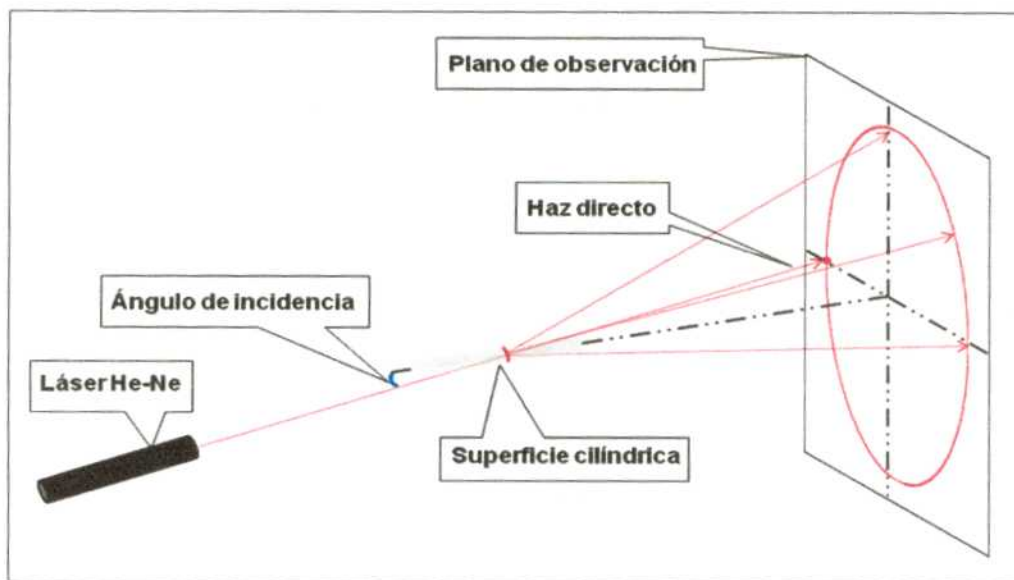


Figura IV. 5: Dispersión en un cilindro.

1.2.1. *Dispositivo experimental.*

Se realizaron diversas pruebas de alineación para elegir los componentes ópticos que se emplearían en el montaje de este nuevo sistema. Uno de los principales objetivos era tratar de usar la menor cantidad de elementos de laboratorio, para que resultara más práctico y versátil, pero que a su vez permitieran obtener un haz incidente limpio. Puesto que se utilizó una aguja como superficie cilíndrica, esta tenía que cumplir ciertos requisitos de manufactura:

- La rugosidad superficial debe ser menor que la longitud de onda de la luz incidente, para disminuir el ruido de speckle y obtener un aro de luz de bordes bien definidos.
- El diámetro debe ser tan pequeño como sea posible, para que el aro luminoso así obtenido sea muy delgado.

Todas las características mencionadas se determinaron experimentalmente.

Considerando todo lo anterior, y siguiendo una metodología similar a la técnica de difracción cónica, se montó el dispositivo experimental esquematizado en la Figura IV. 6. Un sistema formado por un láser de He-Ne, lentes y diafragmas iluminan un elemento cilíndrico (aguja) de 0,3mm de diámetro. El cono de luz dispersado interseca la pared interna de un tubo, proyectando un aro luminoso. Una cámara digital captura la imagen del aro luminoso y la almacena en una PC.

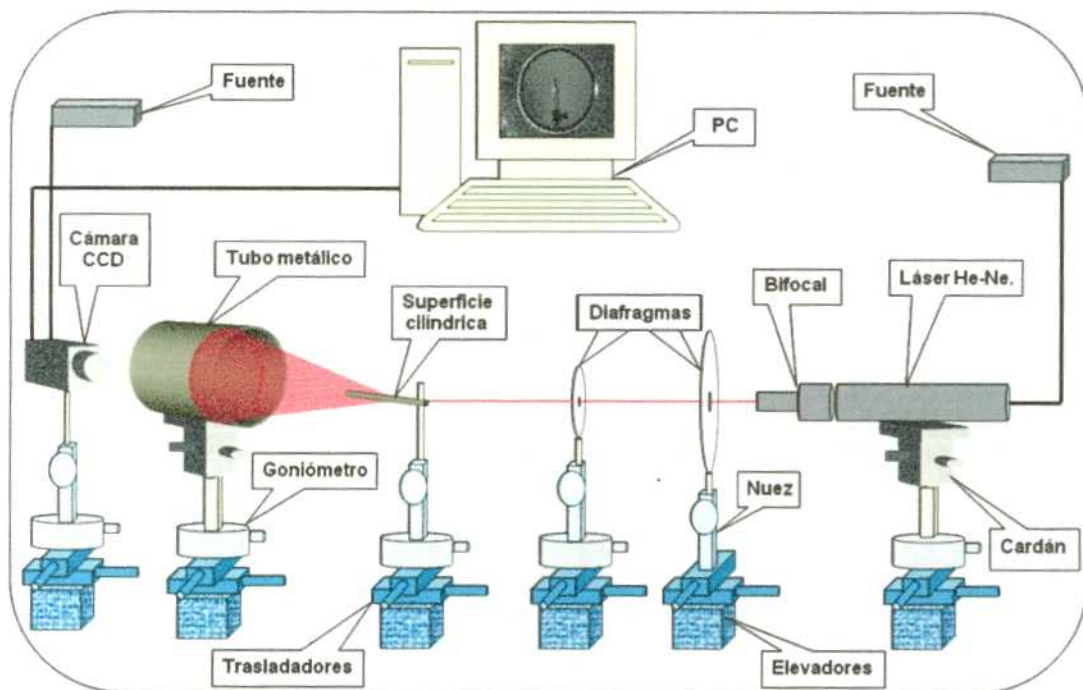


Figura IV. 6: Sistema de Alineación para una Dispersión Cónica.

Todos los elementos utilizados están montados sobre platinas de translación, cardánicas y/o goniométricas para lograr una perfecta alineación. En particular, debió alinearse el sistema de proyección para lograr un aro luminoso del diámetro del tubo. Como se muestra en la Figura IV. 7, el diámetro de la circunferencia luminosa depende del ángulo de incidencia θ del haz láser y de la distancia x entre la aguja y la zona de observación. Por ello, primero se alineó la aguja paralela al haz incidente; segundo, se hizo coincidir el eje de giro del goniómetro solidario a la aguja con el punto de incidencia del haz, y tercero se rotó dicha aguja un ángulo θ hasta obtener la circunferencia luminosa de radio óptimo.

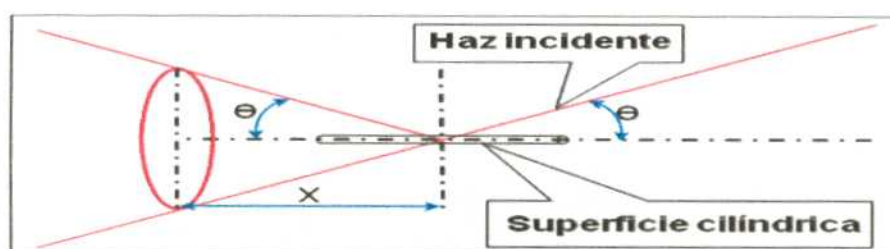


Figura IV. 7: Ángulo de incidencia.

1.2.2. Medición.

Se iluminó un tubo defectuoso con un anillo continuo dado por la dispersión cónica (Figura IV. 8a). En ésta se puede apreciar significativamente la distorsión del aro de luz en la zona de costura del tubo y algunas discontinuidades a lo largo de la circunferencia. La Figura IV. 8b muestra la imagen filtrada del interior del tubo donde se indica el cambio a coordenadas polares. Al graficar el radio medio del anillo luminoso en función del ángulo ($-\pi < \theta < \pi$), puede detectarse rápidamente cualquier defecto que provoque una variación apreciable del radio del tubo (ver Figura IV. 9). Por ejemplo, se observa para ángulos cercanos a $-\pi$ una variación del radio medio coincidente con la costura en la pared del tubo (Figura IV. 8a).

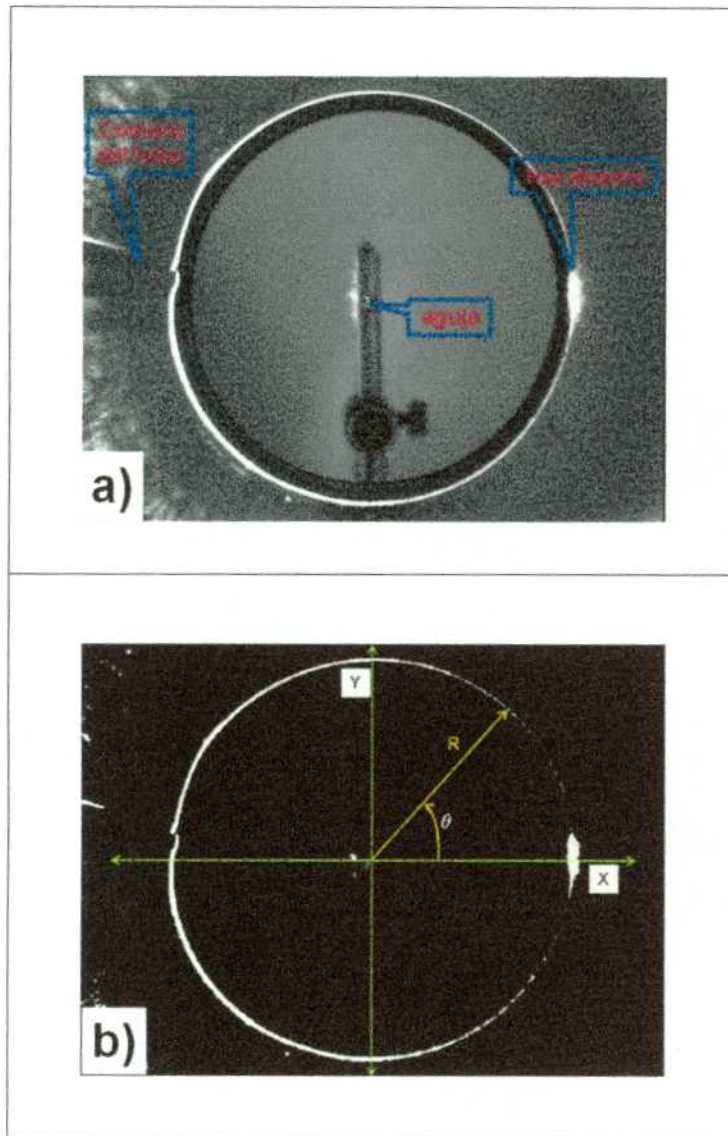


Figura IV. 8: Filtrado de una foto tomada a un tubo con defectos.

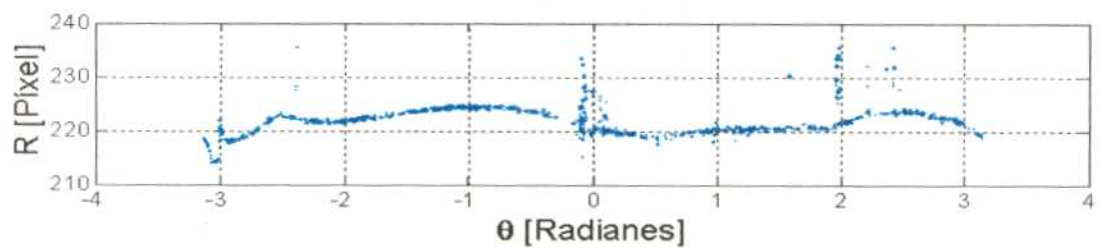


Figura IV. 9: Radio medio del anillo en función del ángulo, donde en $\theta=0$ se observa el haz directamente transmitido y en $\theta=-3$ rad, un defecto.

Para poder determinar el tamaño del defecto detectado se debe calibrar el sistema en su conjunto. Para ello se hicieron los primeros intentos de calibración colocando en la pared interna de un tubo objetos de diferentes tamaños conocidos y en distintas posiciones angulares. La presencia de relieves provoca un corrimiento en dirección radial medido en píxeles, (ver Figura IV. 10a). Como el tamaño del relieve es conocido, se determina el factor de escala del sistema. En esta figura se han adosado relieves de 2,5 mm de espesor que son claramente percibidos en la imagen, dentro de un tubo de diámetro mayor a 100 mm.

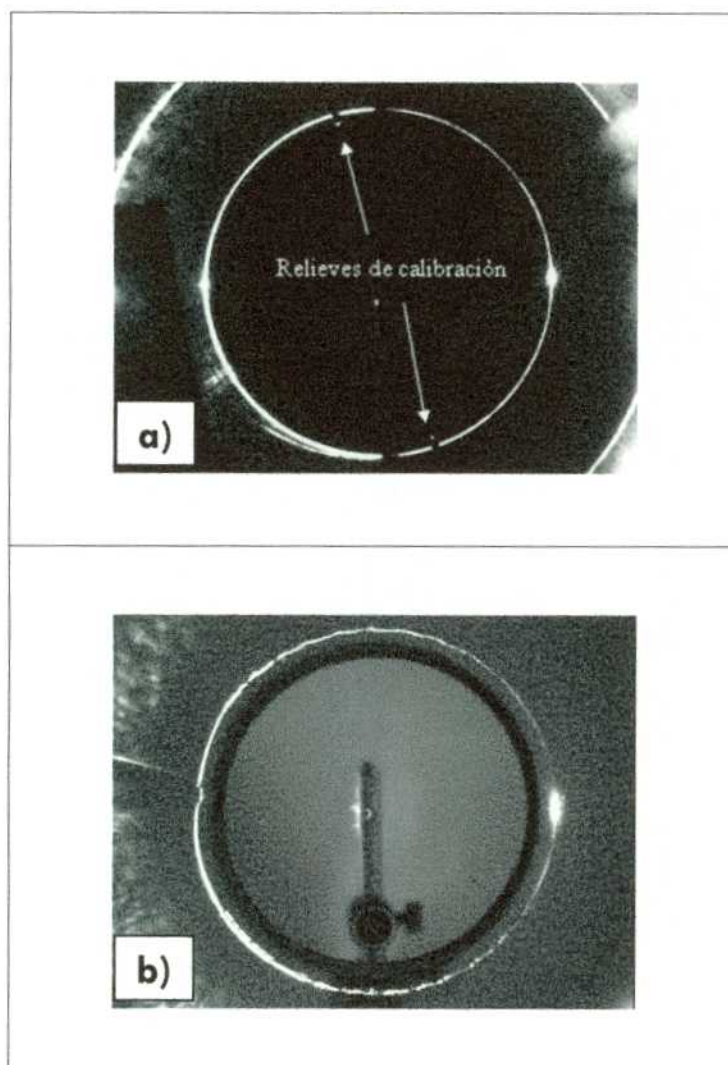


Figura IV. 10: Corrimientos radiales en presencia de defectos.

A esta altura del trabajo se estuvo desarrollando conjuntamente el software de adquisición de imágenes y filtrados computacionales, para poder correlacionar los pixeles con unidades métricas, es por eso que hasta ahora se muestran solo resultados cualitativos, pero más adelante se presentará la respectiva calibración para poder cuantificar los defectos. Es importante aclarar que el método también permite determinar sobre y bajo relieves, como se muestra en la Figura IV. 10b.

1.2.3. Conclusión.

A pesar de que la difracción de luz por una red tiene la propiedad de difractar sus órdenes sobre un cono, el patrón de luz proyectado resulta ineficiente frente a un aro de luz continuo. Es por ello que se optó por la dispersión de luz de una superficie reflectora cilíndrica pequeña, es decir, una aguja. Para mejorar el sistema de iluminación, en adelante, se tendría que utilizar como proyector de luz un DOE.

Por consiguiente, comparando los dos sistemas de iluminación, difracción y dispersión cónica, se concluyó que la proyección de un anillo continuo sobre la pared interna del tubo es más eficiente para la detección de defectos, ya que permite detectar de otros tipos, además de la ovalidad. En vista de estos resultados, se decidió adquirir un DOE que proyecte un aro de luz continuo en el interior del tubo. En el capítulo siguiente se presenta el nuevo dispositivo experimental, el software desarrollado y los resultados.

2. Luz Estructurada Cónica

Con todo lo experimentado anteriormente y habiéndose analizado con detenimiento los diferentes tipos de proyectores de luz estructurada, se procedió a buscar en el mercado un Elemento Óptico Difractivo (DOE) que se ajuste a las necesidades del equipo. Éste debe proyectar un haz de luz estructurada con geometría cónica, tal que, previa alineación, al ser intersecado por la pared interna del tubo produzca sobre ella un aro de luz con bordes bien definidos y lo más delgado posible. La Figura IV. 11 muestra el patrón de luz buscado.

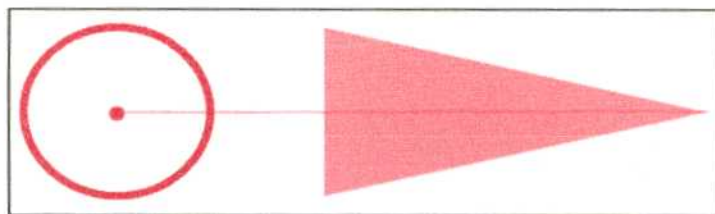


Figura IV. 11: Patrón circular de luz.

Finalmente se adquirió un conjunto conformado por un diodo láser y un DOE de las siguientes características: Un Diodo láser (635nm-6mW) modelo Cameo de Global Laser Tech, unido a un DOE mediante una rosca. Además, este módulo compacto permite regular el foco a la distancia requerida, (Figura IV. 12).

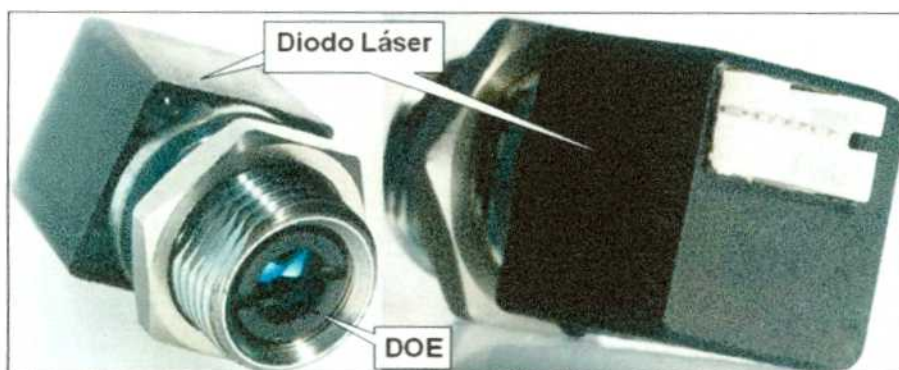


Figura IV. 12: Diodo Láser-DOE.

3. Componentes Ópticos Seleccionados

La adquisición de un proyector de luz compacto facilitó y simplificó algunas etapas del mecanismo de alineación. Por ello, se suprimieron y reemplazaron algunos componentes ópticos del dispositivo montado en el apartado anterior (Figura IV. 2). También se tuvo a consideración utilizar con igual sistema óptico, tanto la cámara digital CCD antes empleada, como una cámara CMOS adquirida recientemente en el laboratorio, (Figura IV. 13). Luego se compararán los resultados obtenidos con las distintas técnicas.

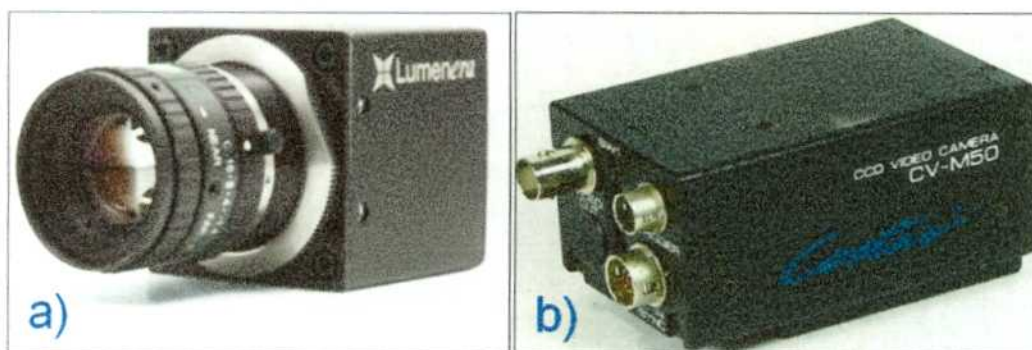


Figura IV. 13: a) Cámara CMOS, conexión a puerto USB. b) Cámara CCD.

A continuación se presenta el dispositivo óptico montado para la proyección del aro de luz en la pared interna de un tubo de Zircaloy-4 (Figura IV. 14). Un diodo láser (635nm-6mW) unido mediante una rosca montable a un DOE, proyecta sobre la pared interna de dicho tubo (diámetro aproximado de 110 mm) un anillo de luz coherente. Un círculo negro elimina el haz directamente transmitido y la luz espuria proveniente del conjunto diodo-DOE. Una cámara CCD (CV-M50) o CMOS (Lm085M) captura la imagen del anillo luminoso y la almacena en una PC. Mediante el software desarrollado en el presente trabajo se analizan las imágenes almacenadas. Tanto el conjunto diodo-DOE como el tubo y la cámara se montaron sobre platinas de traslación, goniómetro y movimientos cardánicos para lograr una buena alineación.

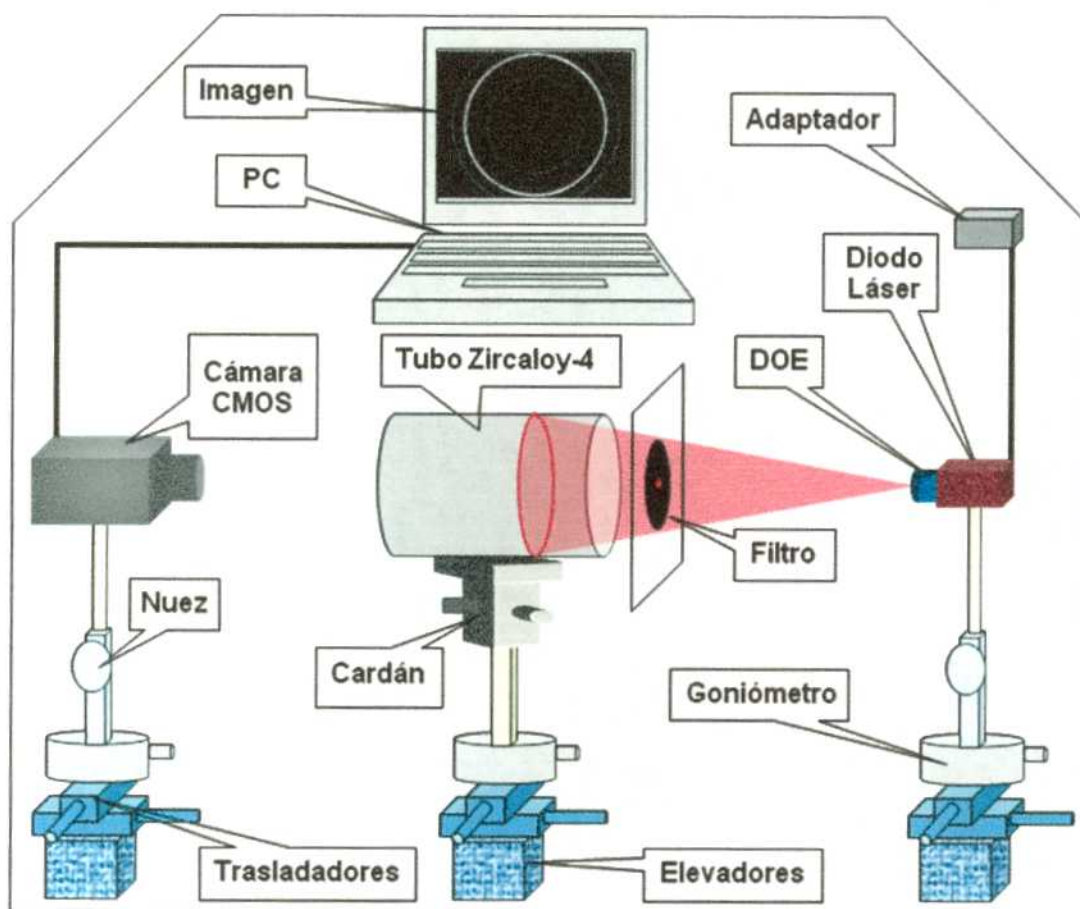


Figura IV. 14: Sistema de Alineación del DOE.

4. Alineación

En los prototipos presentados en el capítulo anterior se utilizaron distintas técnicas experimentales para poder lograr una correcta alineación. Este mismo procedimiento se realizó en el dispositivo diseñado y montado en este parágrafo. Se elaboró así un procedimiento de alineación con el fin de proyectar en la pared interna del tubo un anillo luminoso circular cuyo eje coincida con el eje del tubo. Dicho protocolo consta de los siguientes pasos:

1. Diodo Láser - Cámara Digital: Se alinean el diodo y la cámara (CMOS o CCD) de forma tal que el haz láser incida perpendicular a la superficie del sensor.

2. Tubo - Diodo Láser: Se alinea el tubo respecto del haz incidente de forma tal que la dirección del haz defina una generatriz del tubo.
3. Se enfoca el diodo láser sobre el plano imagen de la cámara digital.
4. Se acopla al diodo láser el DOE y se realiza un leve ajuste de alineación para obtener una corona luminosa de bordes bien definidos sobre la pared interna del tubo.
5. Se interpone un filtro entre el diodo y el tubo (Figura IV. 14) con la finalidad de suprimir el haz directo (Figura IV. 11) y la luz espuria que proyecta el DOE en la zona central del anillo, dejando pasar solo el anillo que se necesita. Tanto el haz directo como la luz espuria distorsionan la imagen capturada por la cámara.

5. Adquisición y Procesamiento de Imágenes

Para el procesamiento y análisis de imágenes se desarrolló un software en el entorno MATLAB^[60]. Para cada imagen capturada por la cámara digital y almacenada en la PC, el software realiza un filtrado computacional, grafica en coordenadas polares el radio en función del ángulo θ , y detecta y caracteriza defectos superficiales internos del tubo.

Cabe señalar que aún falta perfeccionar dicho programa, y es sin duda una herramienta fundamental para la caracterización de anomalías por triangulación activa. Un software comercial para este tipo de aplicaciones puede llegar a tener costos exorbitantes en el mercado.

5.1. MATLAB.

Abreviatura de MATrix LABoratory, "laboratorio de matrices"; es un programa matemático que ofrece un entorno de desarrollo integrado (IDE)^[61] con un lenguaje de programación propio (lenguaje M). Se encuentra disponible para las plataformas Unix, Windows y Apple Mac OS X. Entre sus prestaciones básicas se hallan: la manipulación de matrices, la representación de datos y funciones, la

implementación de algoritmos, la creación de interfaces de usuario (GUI)^[62] y la comunicación con programas en otros lenguajes y con otros dispositivos hardware.

El paquete MATLAB dispone de dos herramientas adicionales que expanden sus prestaciones, a saber, Simulink (plataforma de simulación multidominio) y GUIDE (editor de interfaces de usuario - GUI). Además, se pueden ampliar las capacidades de MATLAB con las cajas de herramientas (toolboxes); y las de Simulink con los paquetes de bloques (blocksets). Es un software muy usado en universidades y centros de investigación y desarrollo. En los últimos años ha aumentado el número de prestaciones, como la de programar directamente procesadores digitales de señal o crear código VHDL^[63].

5.2. Procesado Computacional.

La Figura IV. 15a muestra una imagen del anillo de luz Láser en el interior de un tubo sin defectos. Haciendo uso de distintas funciones en el entorno MATLAB se desarrolló el software para procesar las imágenes almacenadas que consta de los siguientes pasos:

1. Binarización de la imagen: Se utiliza la función "threshold" para calcular un valor de umbral H . A los píxeles con intensidad mayor que H se le asigna 1 (luz) y aquellos cuya intensidad es menor que H se le asigna un 0 (oscuridad); (Figura IV. 15b).

2. Eliminación del ruido en la imagen: Mediante la función "bwareaopen" se eliminan los puntos aislados distantes de la circunferencia. Para ello, se define C como la mínima cantidad de píxeles vecinos conectados entre sí para que una indicación no sea considerada una señal espuria. Todo grupo luminoso que contenga menos de C píxeles será eliminado, o sea se le asignará el valor 0. Se obtiene así una circunferencia uniforme, representada en la Figura IV. 15c.

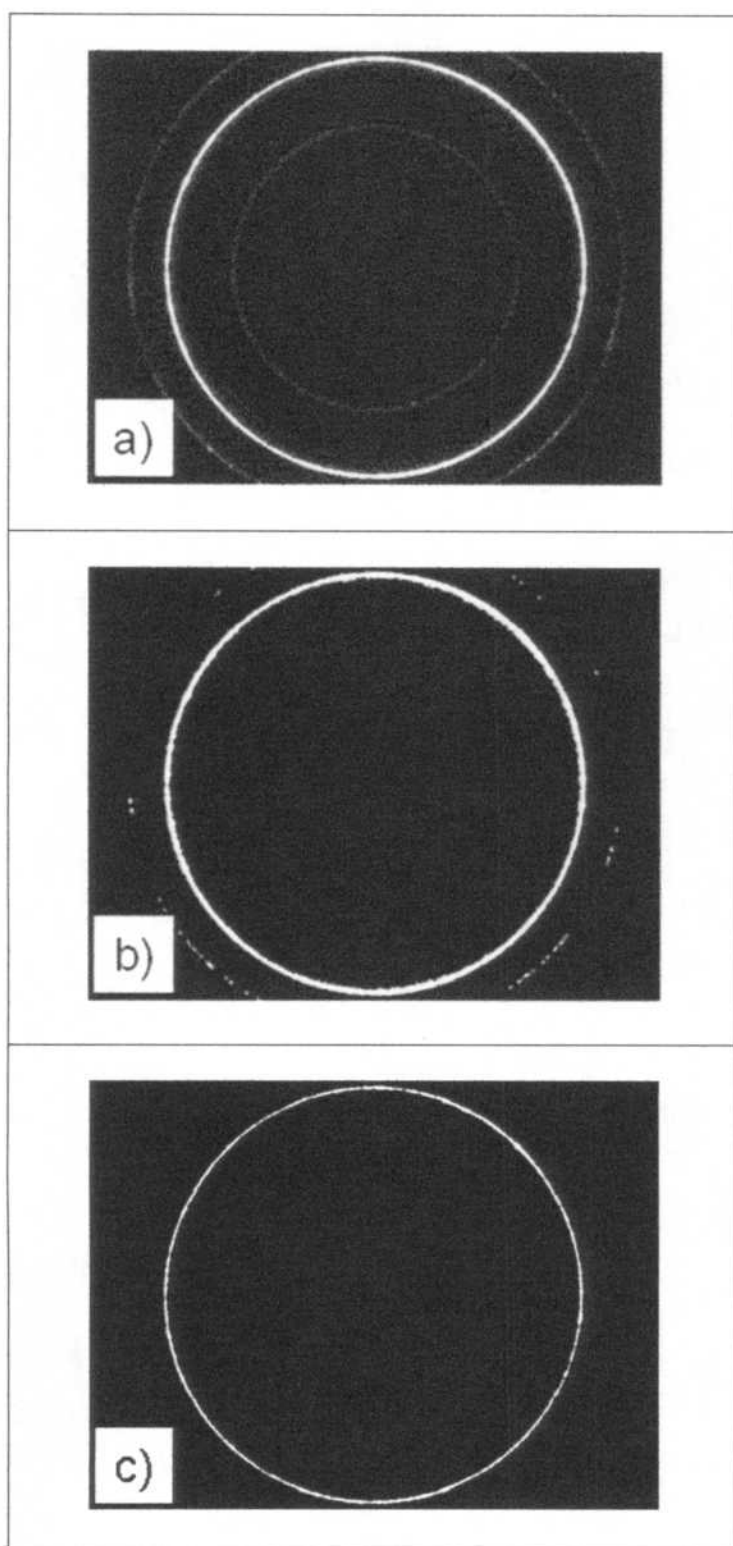


Figura IV. 15: a) imagen original. b) primer filtrado. c) segundo filtrado.

Para entender mejor los puntos 1, 2; se presenta a continuación la Figura IV. 16.

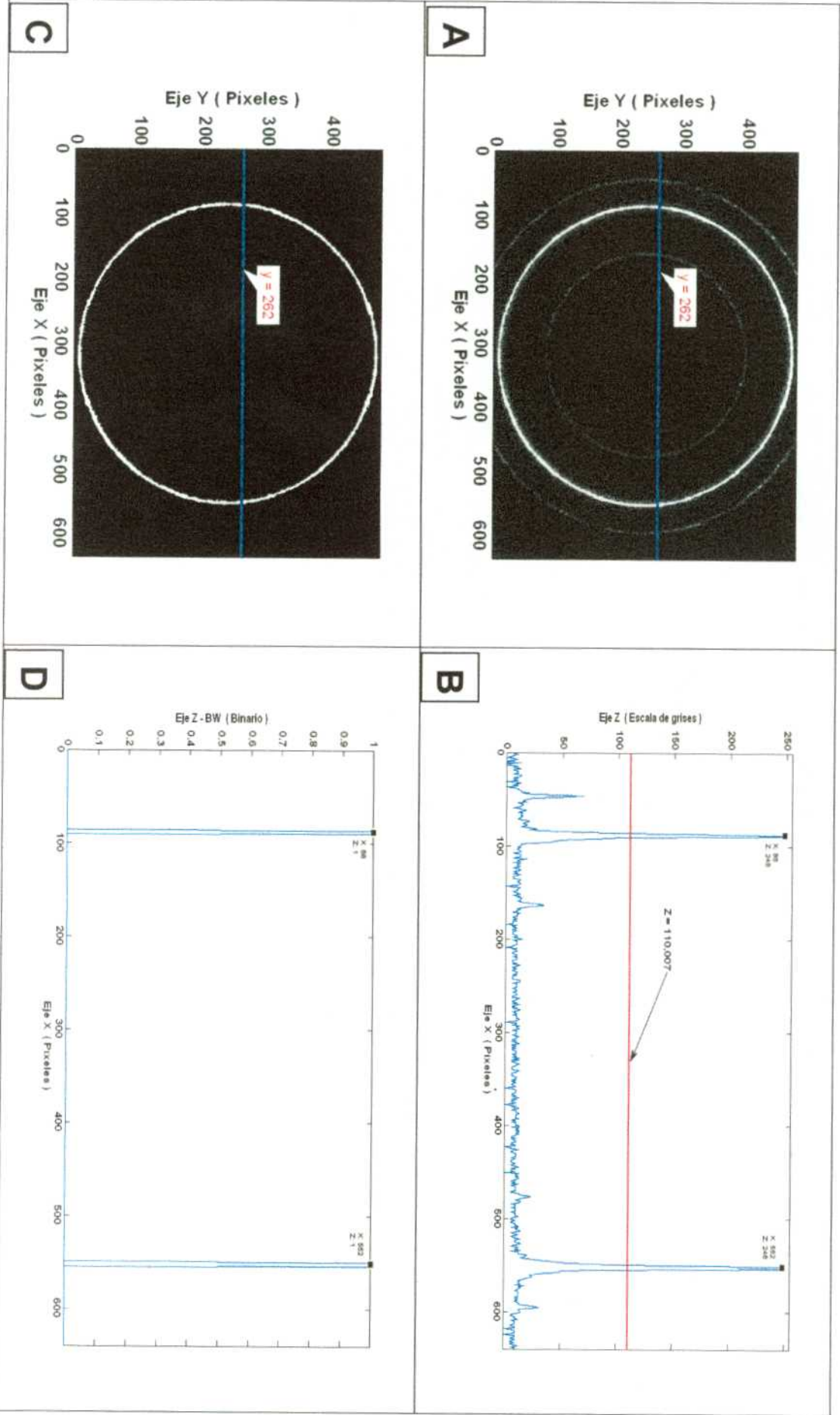


Figura IV. 16: Binarización y filtrado.

La Figura IV. 16A muestra la imagen registrada del tubo iluminado, donde se han marcado los ejes x y y en píxeles, correspondientes a filas y columnas de la matriz imagen. Para un valor fijo de píxeles en uno de los dos ejes, por ejemplo $y = 262$, se grafica la intensidad en escala de grises (eje z) en función de la posición (píxeles) en la dirección x (Figura IV. 16B) y se determina el nivel de gris medio H en una escala de 0 a 256. En este gráfico se observan dos picos de máxima intensidad ($z = 248$) de dos o tres píxeles de ancho medio, cuyos puntos medios se encuentran en las coordenadas $x_1=88$ píxel, y $x_2=552$ píxel respectivamente. Estos picos corresponden a la intersección de la coordenada $y=262$ con el aro luminoso. Todos los pares de valores (x,y) que corresponden a un máximo en la coordenada z (nivel de gris) delinean el aro de luz final.

Una vez calculado el valor de umbral H se binariza la imagen, obteniéndose un aro filtrado (Figura IV. 16C). La Figura IV. 16D muestra, para $y = 262$, el gráfico de intensidad vs x de la imagen binaria, donde se observa que las coordenadas correspondientes a las dos intersecciones del barrido con los puntos de mayor intensidad son $x_1=88$ píxel, y $x_2=552$, coincidentes con los valores hallados en la Figura IV. 16B. Por lo tanto al binarizar la imagen no se han producido variaciones del radio del anillo luminoso.

3. Parametrización de la Circunferencia Patrón: Del análisis de la imagen obtenida de un tubo sin defectos, el programa determina el radio medio y el centro de la circunferencia patrón. En la Figura IV. 17, se muestra dicha circunferencia en color negro y en amarillo el aro luminoso.

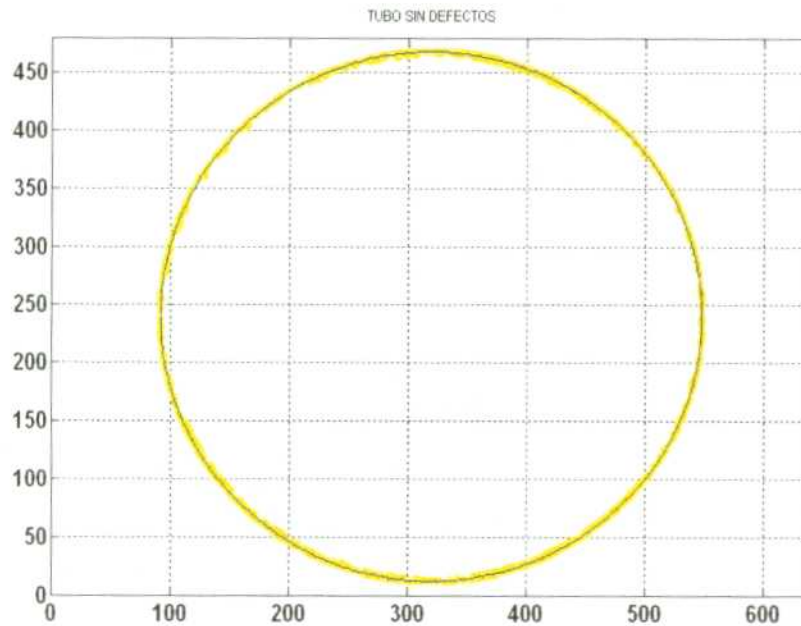


Figura IV. 17: Circunferencia patrón (color oscuro) y aro filtrado (color amarillo).

4. Parametrización del aro imagen en coordenadas polares: Se determina la posición de los píxeles de máxima intensidad (valor 1) en la imagen binaria, y se grafica el radio en función del ángulo θ ($-\pi < \theta < \pi$) píxel a píxel (Figura IV. 18).

5. Determinación del radio medio en función del ángulo: Se determina el radio medio $\langle R \rangle$ para cada valor de θ , y se lo grafica en función de θ . La Figura IV. 18B muestra el gráfico de R vs θ , en color rojo; la línea azul representa la circunferencia patrón en coordenadas polares.

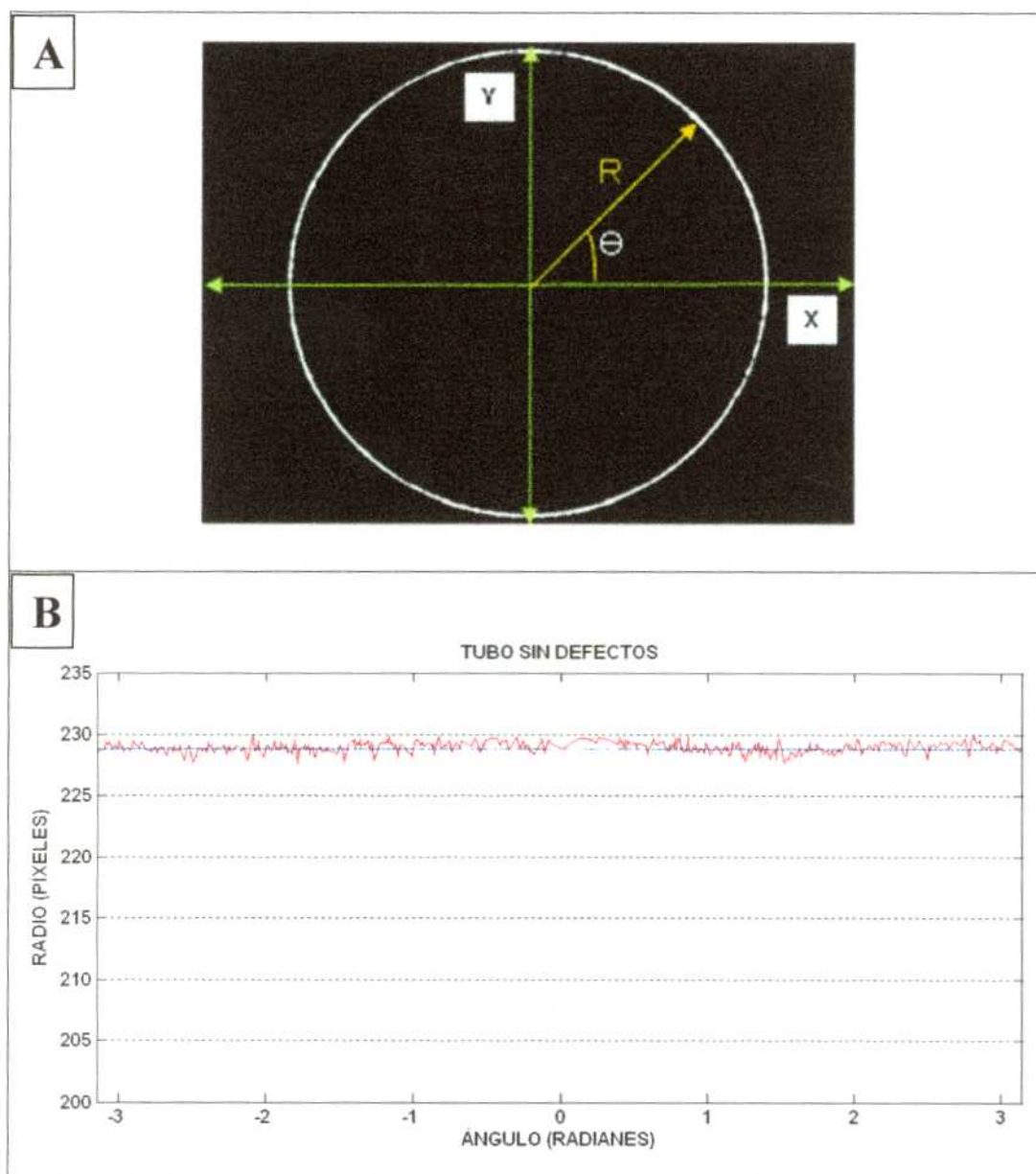


Figura IV. 18: Cambio a coordenadas polares.

Posteriormente se trabajó con imágenes de tubos con defectos, la Figura IV. 19 muestra la distorsión del aro de luz en presencia de un defecto.

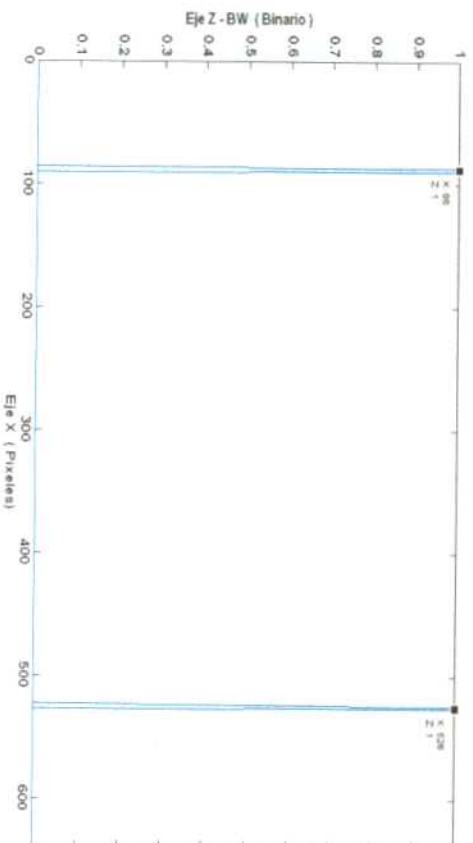
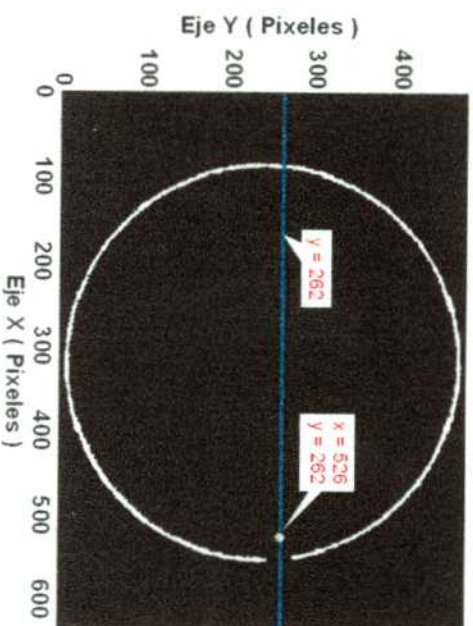
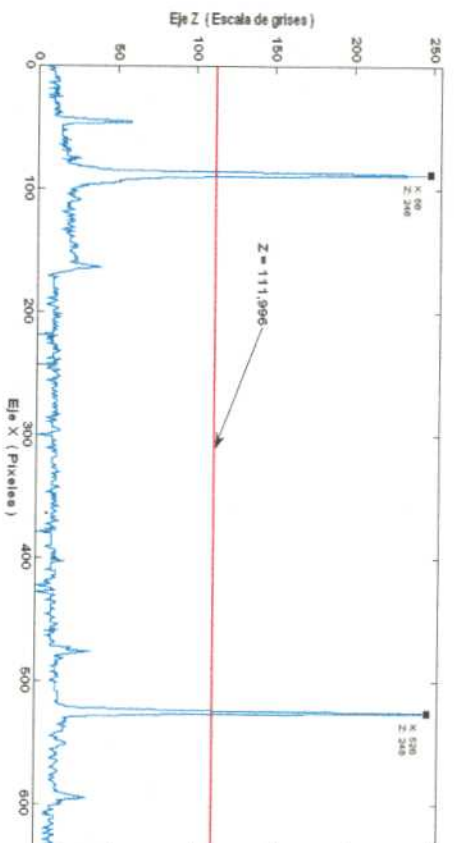
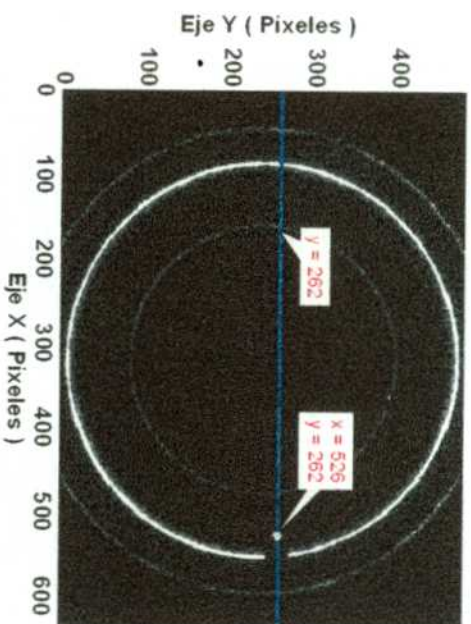


Figura IV. 19: Binarización y filtrado para un arco con defecto.

Siguiendo el mismo criterio que en la Figura IV. 16, aquí se presenta la imagen de un aro con un defecto presente en el mismo eje que el anterior. Los máximos de intensidad corresponden para las coordenadas $x_1=88$ y $x_2=526$. Al comparar la posición de estos máximos con los de la Figura IV. 16, se determina un corrimiento de 26 píxeles en la posición del máximo de la derecha, que indica la presencia de un defecto.

De igual forma, al proceder según los pasos 4 y 5 se puede observar cómo la presencia de defectos produce variaciones en la posición radial del punto luminoso (Figura IV. 20).

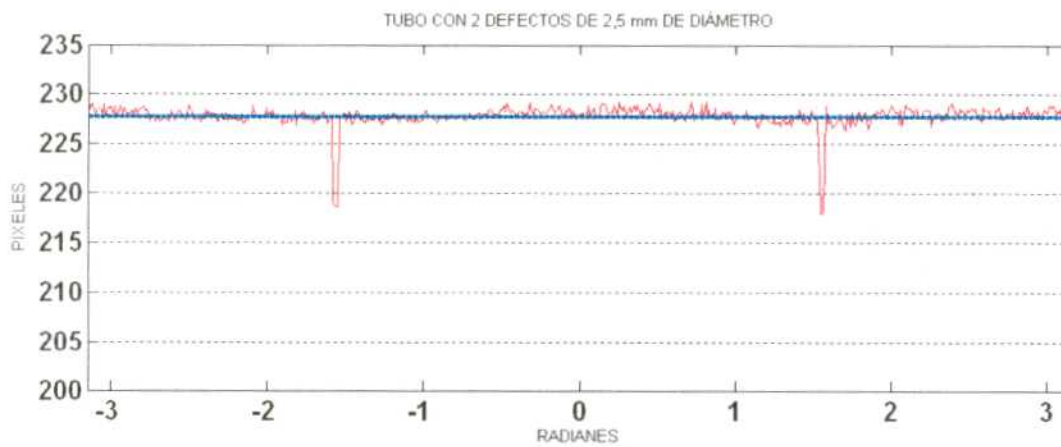


Figura IV. 20: Corrimiento radial en presencia de defectos.

Con el software elaborado se obtienen los datos numéricos necesarios para cuantificar los corrimientos respecto de la circunferencia patrón. Se puede calcular las coordenadas del punto central de la circunferencia, la medida del radio de la misma, la intensidad de los picos más altos y su ubicación, etc.

6. Calibración

Una vez que el sistema estuvo correctamente alineado y haciendo uso del software descrito anteriormente, se procedió a la calibración del equipo. Todo aquello que pueda analizarse de los datos obtenidos, constituirá los resultados finales del presente trabajo, y a su vez el primer paso para el desarrollo del dispositivo final.

Para realizar la calibración, primero se analizó un tubo de Zircaloy-4 sin ningún tipo de defectos ni deformaciones. Luego, y para simular defectos, sobre la pared interna de este tubo se adosaron objetos cilíndricos de hierro de diferentes diámetros conocidos y en distintas posiciones angulares. Se los sostenía con imanes colocados sobre la pared externa, en una disposición que permitía desplazar y/o cambiar fácilmente los “defectos” entre los diversos experimentos a realizar. Como ya se discutió, la presencia de protuberancias provoca un corrimiento localizado de la mancha luminosa en la dirección radial (Figura IV. 21).

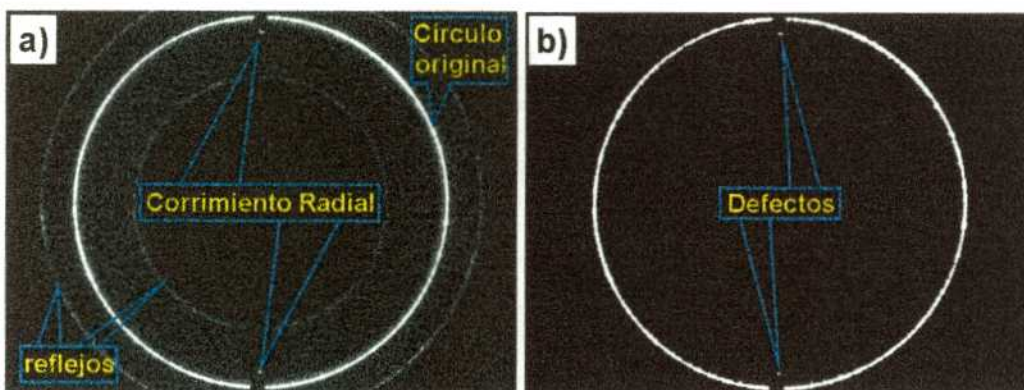


Figura IV. 21: a) Imagen original. b) Imagen filtrada.

Se usaron 6 modelos de cilindros con distinto diámetro, como se muestra a continuación:

- 1) Calibre # 1: 1 mm de diámetro.
- 2) Calibre # 2: 1,5 mm de diámetro.
- 3) Calibre # 3: 2 mm de diámetro.
- 4) Calibre # 4: 2,5 mm de diámetro.
- 5) Calibre # 5: 3,5 mm de diámetro.
- 6) Calibre # 6: 5 mm de diámetro.

En la primera experiencia, en la cual se dispuso de la cámara CCD para la adquisición de imágenes, se usaron los 6 tipos de calibre.

En el segundo caso, para la toma de imágenes con la cámara CMOS, se utilizaron los calibres números 4,5,6.

Estos calibres se colocaron en forma aleatoria de a dos y de a uno, por cada foto capturada, (más adelante se muestran las fotos correspondientes). Luego se estudian los datos que proporciona el programa Matlab, es decir la posición de los picos en píxeles de un determinado calibre, para promediarlos, y posteriormente correlacionarlo con la posición radial medida en milímetros.

7. Mediciones y Resultados

En este párrafo se compara variaciones locales del radio del anillo luminoso, medidas en píxel, con las correspondientes variaciones locales del radio del tubo, medidas en mm. De este análisis se obtiene un único factor de escala **F** que incluye el factor de aumento del sistema óptico, los ángulos de observación y detección y el tamaño de píxel en mm. Es decir, todos aquellos factores que intervienen en la triangulación, y que dependen del sistema de iluminación y de detección, como así también del software utilizado.

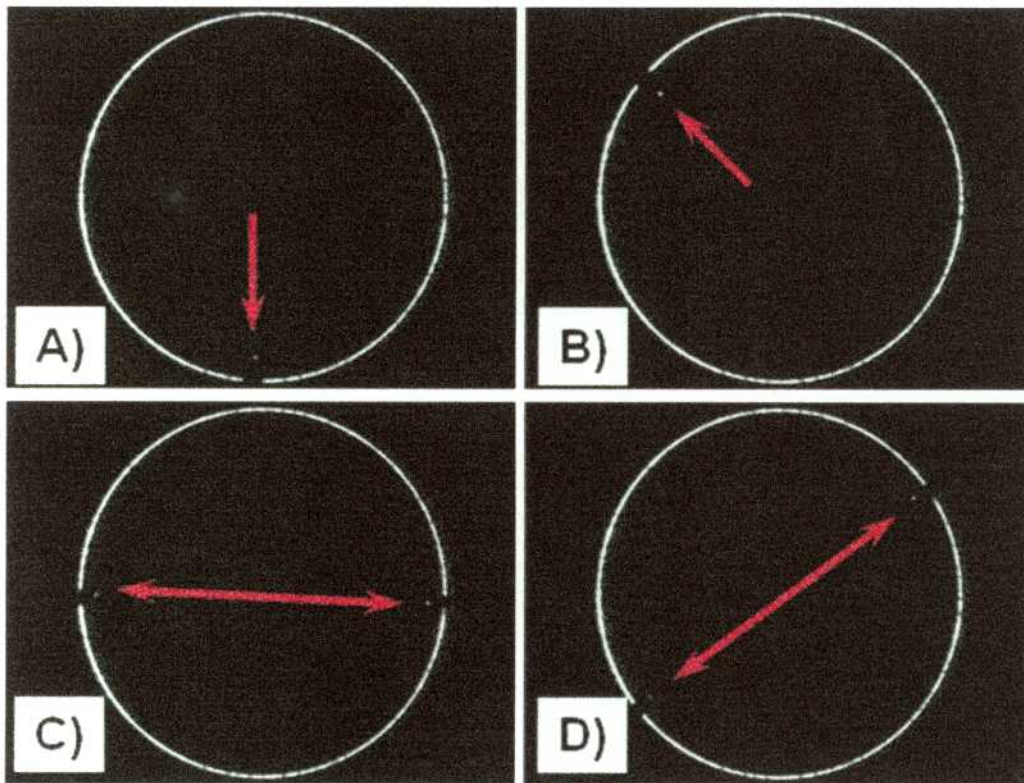


Figura IV. 22: Algunas posiciones angulares.

Para determinar **F**, como se indicó en el apartado anterior, se adosan a la pared interna del tubo diferentes calibres en distintas posiciones angulares. Al iluminar la zona donde se adosó un calibre, aparece una discontinuidad en el aro

luminoso (ver Figura IV. 22), o sea, se produce un corrimiento en píxeles de la posición del máximo local de intensidad luminosa (Figura IV. 19 y 20), que se traduce en una variación local del valor del radio. Luego, por cada calibre ubicado en diferentes posiciones angulares, se registraron y almacenaron varias imágenes (Figura IV. 22A y B). Además, para verificar la linealidad de dicho factor, simultáneamente se adosaron dos o más calibres de igual diámetro en distintas disposiciones angulares (Figura IV. 22C y D) y se guardaron las imágenes así obtenidas. Posteriormente se procesó cada fotografía digital y se determinó el valor en píxeles de los siguientes parámetros:

1. **Radio medio $\langle R \rangle$:** Es el valor del radio promedio del círculo de la imagen capturada para un tubo patrón sin defectos.
2. **Radio R_d :** Valor del radio en la discontinuidad del anillo luminoso.
3. **Desplazamiento radial medio D :** Para un dado calibre, es el valor promedio de R_d de todas las imágenes tomadas.
4. **P :** Es la magnitud de los desplazamientos radiales respecto de la circunferencia patrón.

$$P = \langle R \rangle - D$$

Se determinó el factor de escala F para las imágenes registradas, tanto con la cámara CCD como con la cámara CMOS, luego se compararán analíticamente los resultados obtenidos.

7.1. Imágenes con CCD.

Primeramente se analizó las imágenes de un tubo patrón y se determinó el valor de $\langle R \rangle = (228,63 \pm 0.02)$ píxel.

Caso 1. Se procesaron las imágenes almacenadas para cada medida de calibre. Cada imagen tenía uno o dos calibres iguales, adosados en distintas posiciones angulares y en forma aleatoria. La Tabla IV. 1 muestra los resultados obtenidos para cada uno de los 6 calibres utilizados.

CALIBRE[mm] ± 0,05 mm	D [píxel]	P [píxel]	F [mm/píxel]	1/F [píxel/mm]
1,00	223,70 ± 0,10	4,90 ± 0,10	0,200 ± 0,020	4,9 ± 0,4
1,50	221,68 ± 0,01	6,95 ± 0,03	0,220 ± 0,010	4,6 ± 0,2
2,00	218,80 ± 0,10	9,90 ± 0,10	0,200 ± 0,010	4,9 ± 0,2
2,50	216,79 ± 0,04	11,80 ± 0,10	0,210 ± 0,010	4,7 ± 0,1
3,50	212,00 ± 0,02	16,63 ± 0,04	0,211 ± 0,004	4,8 ± 0,1
5,00	204,50 ± 0,10	24,20 ± 0,10	0,207 ± 0,003	4,8 ± 0,1
Factor F			0,210 ± 0,010	4,8 ± 0,2
error relativo			0,048	0,042

Tabla IV. 1: Resultados para calibres ubicados en forma aleatoria.

En la Figura IV. 23 se grafica el diámetro del calibre versus el desplazamiento en píxeles P obtenido. Se puede observar una relación lineal entre ambos parámetros con un coeficiente de correlación igual a 0,999. De la pendiente de la recta obtenida por cuadrados mínimos se obtiene el valor de $F = (0.21 \pm 0.01)$ mm.

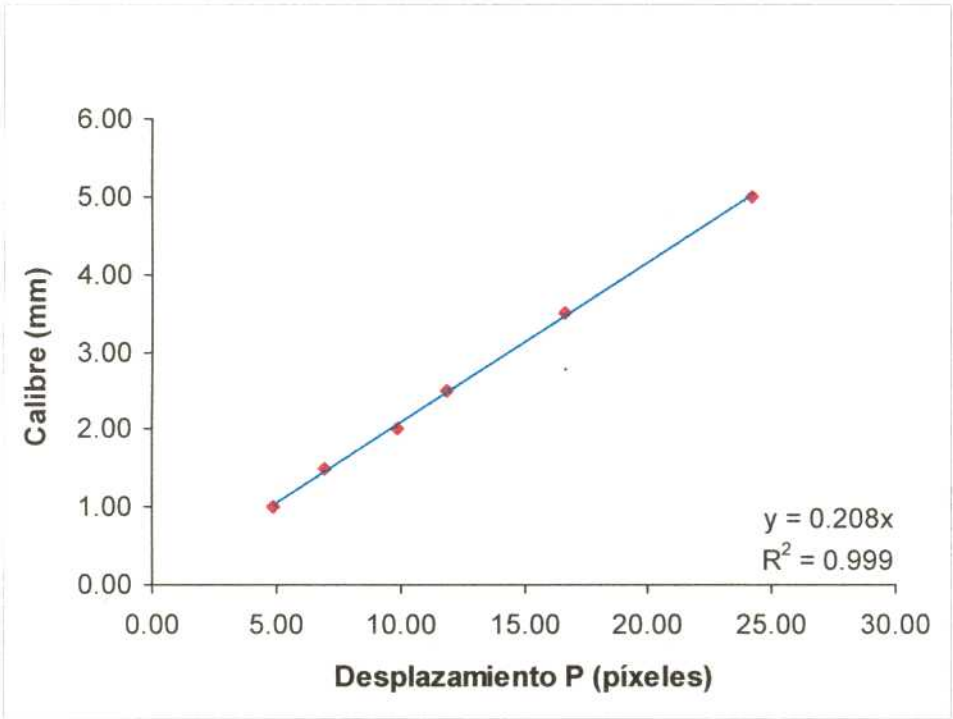


Figura IV. 23: Relación lineal en calibres ubicados en forma aleatoria.

Caso 2. Para corroborar los resultados anteriores se procesaron imágenes con los mismos calibres, pero esta vez adosados en una misma posición angular. Así se muestran los valores en la Tabla IV. 2.

CALIBRE[mm] ± 0,05 mm	D [píxel]	P [píxel]	F [mm/píxel]	1/F [píxel/mm]
1,00	223,95 ± 0,02	4,68 ± 0,04	0,210 ± 0,010	4,7 ± 0,3
1,50	221,68 ± 0,01	6,95 ± 0,03	0,220 ± 0,010	4,6 ± 0,2
2,00	219,40 ± 0,10	9,20 ± 0,10	0,220 ± 0,010	4,6 ± 0,2
2,50	216,91 ± 0,04	11,70 ± 0,10	0,210 ± 0,010	4,7 ± 0,1
3,50	211,97 ± 0,04	16,70 ± 0,10	0,210 ± 0,004	4,8 ± 0,1
5,00	205,41 ± 0,04	23,20 ± 0,10	0,215 ± 0,003	4,6 ± 0,1
Factor F			0,210 ± 0,010	4,7 ± 0,2
error relativo			0,048	0,043

Tabla IV. 2: Resultados para calibres ubicados en la misma posición angular.

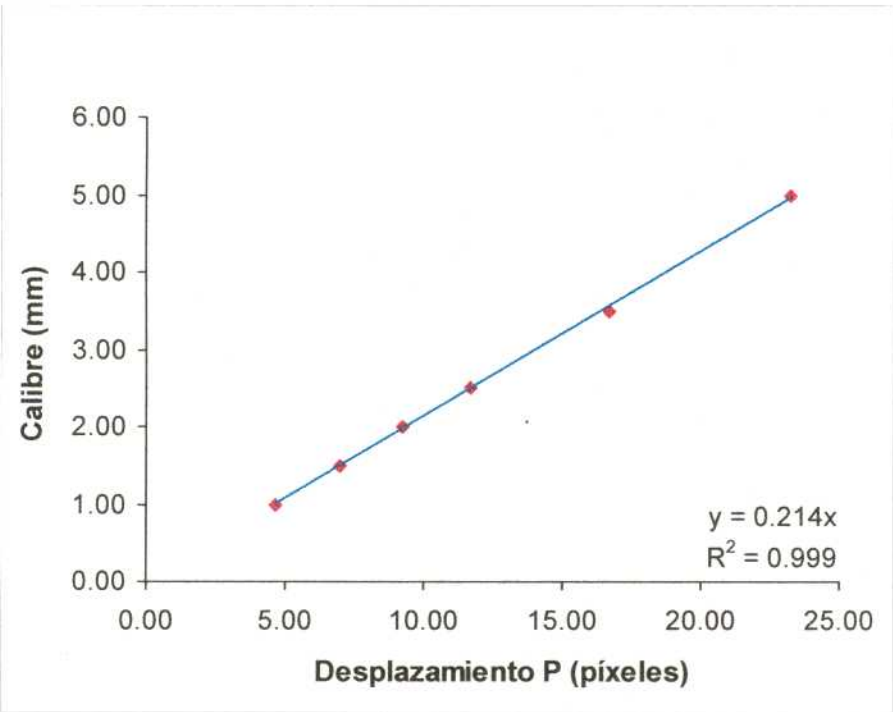


Figura IV. 24: Relación lineal para calibres ubicados en la misma posición angular.

De los valores de F obtenidos en ambos casos no se observan diferencias significativas. La Figura IV. 24 muestra nuevamente que existe una relación lineal entre el diámetro del calibre y el parámetro P . Así, empleando la cámara CCD antes descrita y para la geometría utilizada (Figura IV. 14) se define el factor de escala F constante, independiente de la posición de las anomalías e igual a:

$$F = (0.21 \pm 0.01) \text{ mm}$$

7.2. Imágenes con CMOS.

De las primeras mediciones realizadas, se evaluó que la sensibilidad de la Cámara CCD es mayor que la sensibilidad de la Cámara CMOS. Por ello, al utilizar esta última solamente se pudieron detectar los calibres 4, 5 y 6. Además, se analizó la resolución de este tipo de cámara digital para dos aperturas de diafragma diferentes.

Caso 1. Se procesaron imágenes con mayor apertura de diafragma, de tal forma de obtener un anillo de luz más intenso, o sea con niveles de grises cercanos a la saturación. Así entonces la Tabla IV. 3 muestra los resultados obtenidos con los calibres 4, 5 y 6, a partir de un $\langle R \rangle = (229,1 \pm 0,4)$ píxel.

CALIBRE[mm] ± 0,05 mm	D [píxel]	P [píxel]	F [mm/píxel]	1/F [píxel/mm]
2,50	218,7 ± 0,3	10,0 ± 1,0	0,24 ± 0,02	4,2 ± 0,4
3,50	213,1 ± 0,2	16,0 ± 1,0	0,22 ± 0,01	4,6 ± 0,2
5,00	208,1 ± 0,4	21,0 ± 1,0	0,24 ± 0,01	4,2 ± 0,2
Factor F			0,23 ± 0,02	4,3 ± 0,4
error relativo			0,087	0,093

Tabla IV. 3: Resultados obtenidos a mayor apertura de diafragma.

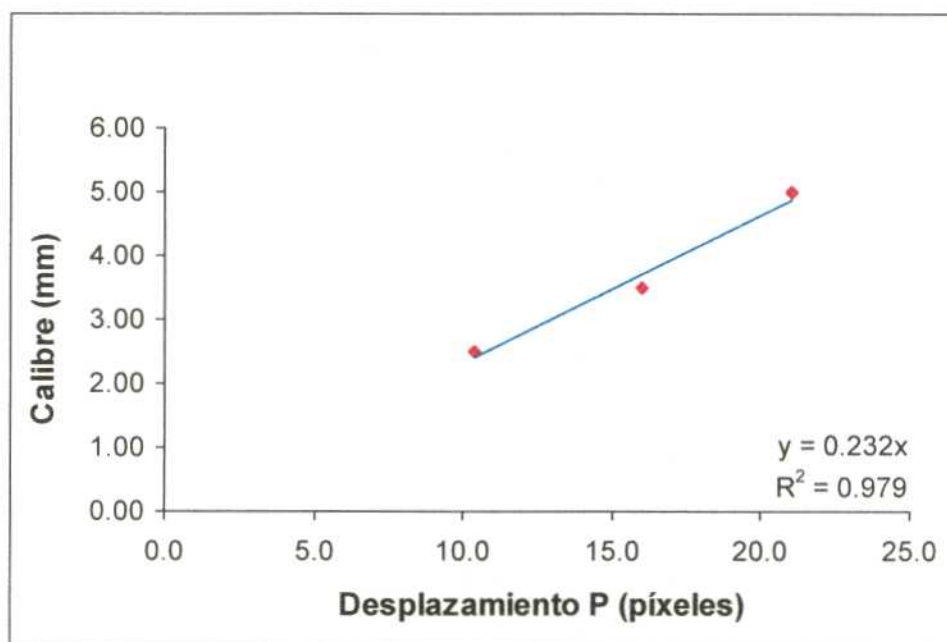


Figura IV. 25: Relación lineal a mayor apertura de diafragma.

Aunque con solo 3 valores de calibres, no se puede realizar una estadística confiable para definir una recta de calibración (Figura IV. 25), se puede observar un bajo coeficiente de correlación lineal. La Tabla IV. 3 muestra que el error relativo de **F** es mayor que 8% y superior al error relativo encontrado para el caso de una cámara CCD (5%).

Caso 2. Se presenta el procesamiento de imágenes adquiridas con menor apertura de diafragma, y por ende un anillo de luz de menor espesor de línea posible y de menor intensidad que el anterior. Lo propio se muestra en la Tabla IV. 4, siendo $\langle R \rangle = (227,6 \pm 0,4)$ píxel.

CALIBRE[mm] ± 0,05 mm	D [píxel]	P [píxel]	F [mm/píxel]	1/F [píxel/mm]
2,50	216,77 ± 0,04	10,9 ± 0,4	0,23 ± 0,01	4,3 ± 0,3
3,50	211,70 ± 0,30	16,0 ± 1,0	0,22 ± 0,01	4,6 ± 0,3
5,00	203,80 ± 0,30	24,0 ± 1,0	0,21 ± 0,01	4,8 ± 0,2
Factor F			0,22 ± 0,02	4,6 ± 0,4
error relativo			0,091	0,087

Tabla IV. 4: Resultados obtenidos a menor apertura de diafragma.

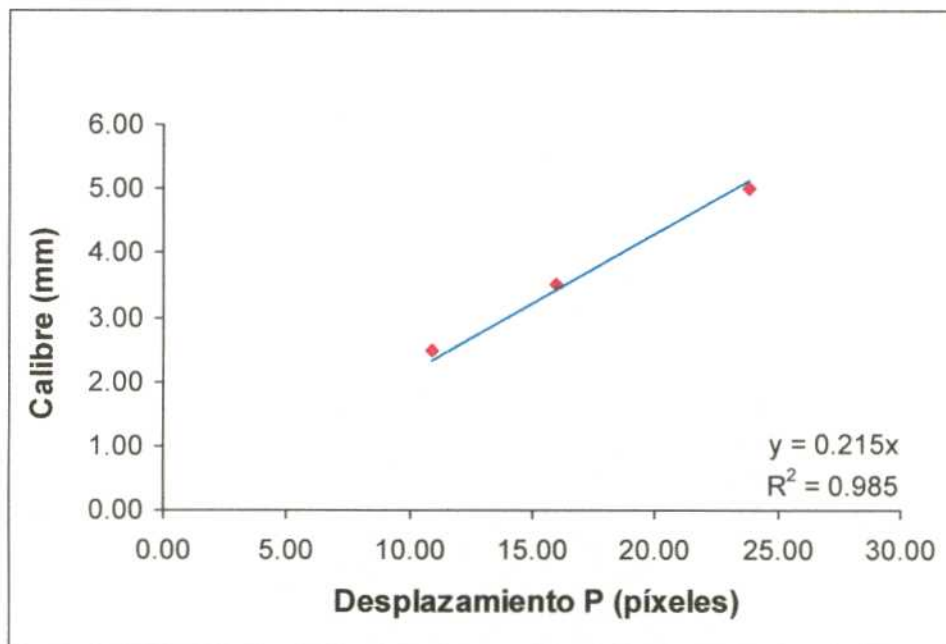


Figura IV. 26: Relación lineal a menor apertura de diafragma.

Nuevamente, aunque no se puede realizar una estadística confiable para la recta de calibración, al comparar los resultados obtenidos en estos dos últimos casos (Figura IV. 25 y Figura IV. 26), se puede inferir que al optimizar el sistema de iluminación, logrando un anillo no saturado en intensidad y de menor espesor, mejora notablemente el valor del coeficiente de correlación lineal obtenido. Además, al confrontar los datos de las Tabla IV. 3 y Tabla IV. 4 no se observan diferencias significativas de los valores de F hallados. Para el caso 2, el error relativo de F es igual a 9,1 %, levemente superior al error relativo para el caso 1, pero significativamente mayor al determinado para la cámara CCD (5%).

Conclusiones Generales

Para determinar el tipo de técnica óptica, y así poder caracterizar el interior de tubos, se analizaron las siguientes opciones: Triangulación Láser, Reflectometría, Interferometría y Proyección de Franjas. Seguidamente se hizo una revisión de trabajos publicados por distintos autores sobre sistemas de inspección con métodos ópticos, donde se tuvo en cuenta que el cabezal óptico a diseñar debe operar in-situ, generalmente en ambientes agresivos, y con los menores tiempos de inspección posible. Aunque estas técnicas ópticas implican mayor complejidad computacional, se verificó y se concluyó que, para los fines de este dispositivo, se empleará el método de Triangulación activa con Luz Estructurada, dado que es una buena herramienta en cuanto a su practicidad y funcionalidad.

Para llevar a cabo el desarrollo del método propuesto, se estudió cual debería ser el patron de luz adecuado para hacer este tipo de análisis. Dada la geometría cilíndrica a evaluar se determinó que la luz proyectada debía tener una estructura cónica, que al intersecar el interior del tubo, proyectase una intensidad luminosa con simetría circular. Para obtener un cono de luz se trabajó con dos sistemas de iluminación diferentes: uno de ellos proyecta un aro de iluminación discreta (por difracción cónica), y otro proyecta un aro de iluminación continua (por dispersión cónica). Comparando los dos sistemas de iluminación se pudo llegar a la siguiente conclusión:

La proyección de luz producida por difracción cónica solamente puede detectar deformaciones o defectos del orden de la separación entre puntos luminosos. Por ello, esta geometría sólo es aceptable para estudiar

defectos geométricos, como la ovalidad. Este patrón de luz entonces resulta ineficiente para la detección de irregularidades, frente a un aro de luz continuo que permite detectar otros tipos de anomalías. Es por tal razón que se optó inicialmente por el patrón de luz obtenido mediante la dispersión de luz de una superficie reflectora cilíndrica pequeña. Teniendo definido esto, y para mejorar el sistema de iluminación, finalmente se decidió utilizar como proyector de luz un DOE (Elemento Óptico Difractivo) que brinda una luz estructurada con geometría cónica. Previa alineación, al intersecar este cono de luz con la pared interna del tubo se observa un aro luminoso con bordes bien definidos y del menor espesor de línea posible.

Es necesario recurrir a un software para la adquisición y procesamiento computacional. Para los fines del presente trabajo se optó por desarrollar un programa en el entorno MATLAB, que procesa las imágenes almacenadas con una resolución de 640 x 480 píxeles, y extrae de ellas la información deseada. En cuanto a la adquisición de imágenes, a la hora de alinear y poner a punto el equipo, debe lograrse que el centro del aro de luz coincida con el centro del área sensible del detector.

De acuerdo con lo visto en el punto 5.2. del capítulo IV, sobre el procesamiento computacional, es muy importante que el programa admita variar los parámetros umbral **H** y píxeles vecinos **C** según el tipo de imagen inicial que se obtenga. Modificar el valor **H** por debajo del nivel gris medio de la imagen y designar una cantidad mínima de píxeles vecinos **C** permite, por ejemplo, hacer comparaciones entre fotos procesadas y tener certeza en la identificación de defectos.

Del análisis de todas las imágenes tomadas con la cámara CCD y la cámara CMOS, con un mismo sistema de lentes se pudo llegar a la conclusión que, para esta configuración, la cámara CCD es la más adecuada para análisis de defectos más pequeños. Esto es debido a que la CCD utilizada tiene un área sensible (6,45x4,84mm) mayor que la CMOS (4,5x2,9mm) y tamaño de píxel similar al de la CMOS (8µm y 6µm respectivamente). Todo esto sumado a las comparaciones generales, citadas en el apartado 1.2.2.2. del capítulo III, explican por qué la cámara CMOS solo puede detectar defectos del orden de los 2 mm, mientras que la cámara CCD puede detectar defectos del orden de 1 mm.

El rango de la magnitud de desplazamiento P , detectado por el software, también depende de cuán definido esté el aro de luz y de su espesor de línea. Si al binarizar la imagen el aro de luz resulta discontinuo, aumenta el error en la medición de la posición de los máximos de intensidad. Si el espesor de línea es muy grueso podría enmascarar un corrimiento radial pequeño. Con el programa desarrollado no se puede detectar defectos en una escala menor a la del grosor de línea. Queda pendiente mejorar el programa desarrollado para detectar defectos del orden del micrón.

Los resultados de la caracterización de defectos también va a depender del tipo o forma de calibración que se lleve a cabo para tal caso. Entonces se puede decir que para cada medición y caracterización de defectos, se tiene que realizar la calibración correspondiente.

De los resultados de la correlación de píxeles con milímetros se puede apreciar el grado de confiabilidad, ya que los valores obtenidos no presentan un error de medición significativo (5%). Para disminuir este error debería medirse los diámetros de los calibres con mayor precisión.

Por lo tanto, de todo lo analizado y sabiendo que todavía se pueden optimizar algunos aspectos, se concluye que la técnica de triangulación activa con luz estructurada será el método que se aplicará en el desarrollo del cabezal óptico para determinar anomalías en la pared interna de tubos o ductos.

De ahora en adelante se trabajará en el desarrollo del cabezal, que contendrá el dispositivo de triangulación láser. Se deberá adaptar todos los mecanismos utilizados en el laboratorio para poder hacer mediciones conforme a lo planteado en el presente trabajo de tesis. También se tiene que optimizar el programa de adquisición y procesamiento computacional, tanto para mejorar su practicidad en cuanto al uso, como para la evaluación de defectos del orden del micrón.

Bibliografía

- [1]. P. Cielo. "Optical techniques for industrial inspection". Academic Press, INC. (1988). F.T. Arecchi, D.Bertani and Ciliberto. "A fast Versatile Optical Profilometer". Op.Comm. 31, 3, (1979).
- [2]. J F.T. Arecchi, D.Bertani and Ciliberto. "A fast Versatile Optical Profilometer". Op.Comm. 31, 3, (1979).
- [3]. A. Jalkio, J.E.Bolkom, S.K. Case. "High resolution triangulation based range sensing form metrology". SPIE 814 (1987).
- [4]. J.L. Doyle et al.; Informe Técnico 1991, Quest Integrated Inc., USA.
- [5]. Costa, M.F., "System of Optical Non Contact Microtopography", Appl. Opt., 32, 4860-4863 (1993).
- [6]. Costa, M.F., Almeida, J., "Application of optical triangulation of microtopographic inspection of rough surfaces", ISLOE 93 Proceedings (1993).
- [7]. W.G.Clark et al., Mat. Eval. Sep. (1993). 997.
- [8]. Costa, M.F., Almeida, J., "An Optical sensor for microtopographic inspection of rough surfaces", Proc. Int. Conf. on Optics'92: From Galileo to Optoelectronics, 663-668 (1992), World Scientific.
- [9]. K Stanley; "Nondestructive Testing Handbook" Section 3, American Society for Nondestructive Testing, New York, 1995.
- [10]. R. W. McCullough, P.D. Bondurant and J.L. Doyle. "Laser-Optical Triangulation Systems Provide New Capabilities for Remote Inspection of Interior Surfaces". Mat. Eval. Dic.1995.