

## Cabezal óptico para determinar anomalías en pared interna de tubos o ductos

Nelson Luque, M. Fernanda Ruiz Gale, Elsa Hogert  
IAMEND-ENDE-CAC-CNEA  
Bs. As. – Argentina.  
Teléfono: 011 - 67727401  
hogert@cnea.gov.ar

### Resumen

Frente a las necesidades planteadas a la División IAMEND del Departamento ENDE de la CNEA por diferentes industrias nacionales, se está desarrollando un equipo que permita detectar in-situ diversas discontinuidades y anomalías en las paredes internas de tubos de aleaciones estructurales y diámetro mayor a 100 mm. Este equipo constará de un cabezal robótico, provisto de diferentes emisores y detectores ópticos y electromagnéticos, que recorrerá interna y longitudinalmente los tubos a evaluar. En este trabajo se presentará el cabezal óptico diseñado para este fin y los resultados preliminares obtenidos.

La técnica óptica utilizada es triangulación activa con luz estructurada. Esta consiste en la proyección de un patrón de luz con una geometría dada cuya imagen es adquirida por medio de una cámara digitalizadora. En este cabezal se emplea como proyector de luz un sistema compuesto por un diodo láser y un elemento óptico difractivo (DOE). Del conjunto diodo-DOE emerge un cono de luz coherente que al interceptar la pared interna de un tubo proyecta un aro de luz de bordes bien definidos. Una cámara CCD captura la imagen del aro luminoso y la almacena en una PC. Mediante un programa en el entorno Matlab, desarrollado por el Laboratorio de Óptica y Láser, se filtran y analizan las imágenes registradas para posteriormente reconstruir la estructura de la superficie interna del ducto. De la información relevada se puede determinar ovalidad, fisuras, corrosión, etc.

### 1. 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 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, 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, ni 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.

Para comenzar, se ha realizado un estudio exhaustivo de diferentes métodos ópticos que se emplean en la evaluación superficial de un determinado componente. 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. Objetivos

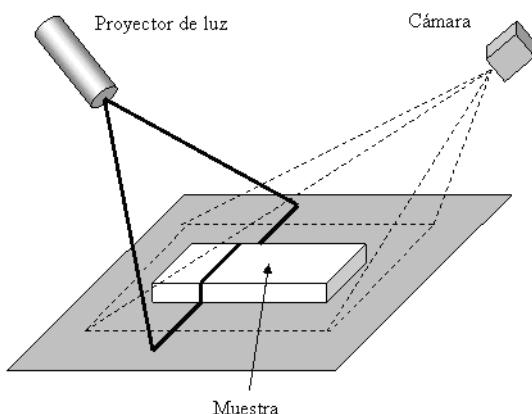
Diseñar un cabezal óptico que permita:

- Medir diámetros internos.
- Establecer y medir deformaciones, como la ovalidad de tubos.
- Identificar objetos extraños y defectos.
- Interpretar diversas discontinuidades y anomalías de las paredes internas en tubos de aleaciones estructurales.

Todo esto lleva a definir la técnica experimental más adecuada y desarrollar un software para reconstruir la superficie interna de tubos mediante la adquisición de datos y filtrados computacionales.

## 3. Teoría general

### 3.1 Luz estructurada



**Figura 1. Triangulación láser.**

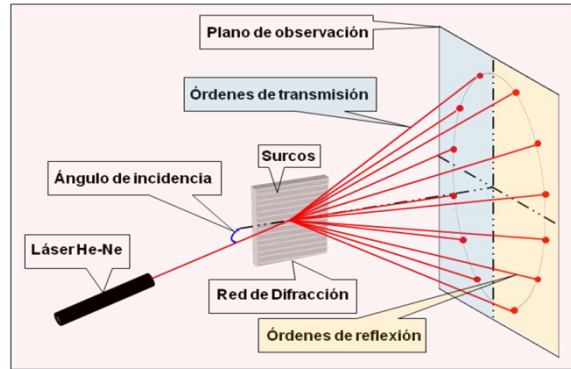
Los métodos tradicionales de luz estructurada para la determinación de formas tridimensionales, por lo general, proyectan patrones conocidos de luz modulada sobre la pieza en estudio y observan la luz reflejada.

La más sencilla de estas técnicas consiste en intersecar un plano de luz con la superficie a estudiar. Si ésta fuera plana, el resultado sería una línea recta. Si la superficie no es plana, la intersección entre ella y el plano tiene una forma más compleja, **Figura 1**. Esta imagen es registrada con una cámara digital y almacenada en una computadora.

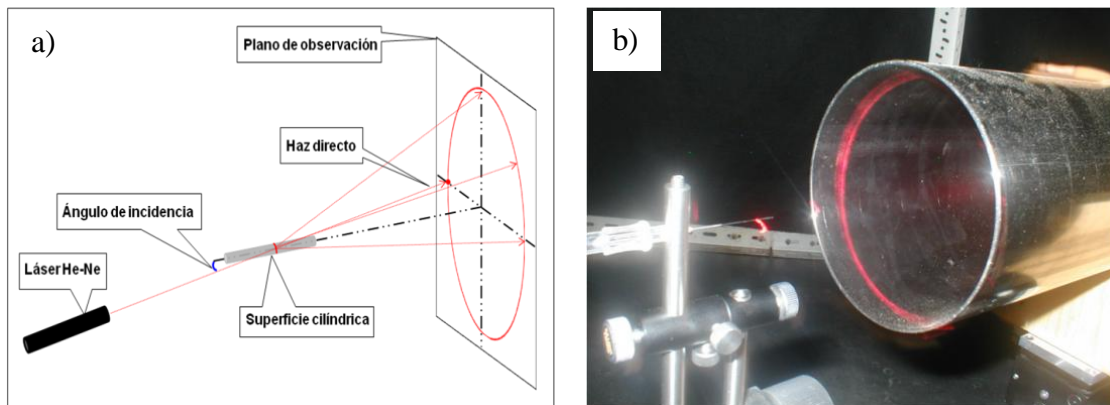
Debido a la geometría cilíndrica a evaluar, se determinó que la luz proyectada debía tener una estructura cónica, que se puede obtener por difracción o dispersión. De tal modo, con una alineación adecuada, al intersecar el interior del tubo con el cono luminoso, se proyecta en la pared interna de dicho 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: Un aro de iluminación discreta (por difracción cónica) y un aro de iluminación continua (por dispersión cónica).

La **difracción cónica** ocurre cuando un haz 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, **ver Figura 2.**



**Figura 2. Difracción cónica.**



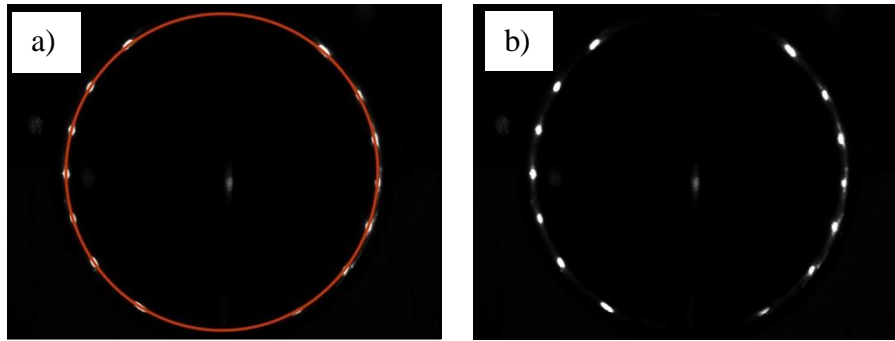
**Figura 3. Dispersión cónica.**

Cuando un frente de ondas plano incide sobre una superficie cilíndrica (una aguja), la luz se dispersa formando un cono, **Figura 3.** Este fenómeno se conoce como **dispersión cónica**. Con la alineación adecuada entre el haz láser, la aguja y el tubo se logra proyectar una anillo luminoso sobre la pared interior del caño. La cámara digital también debe estar alineada de manera tal que la imagen digital registrada de la proyección para un tubo sin fallas ni deformaciones sea una circunferencia perfecta.

## 4. Resultados obtenidos

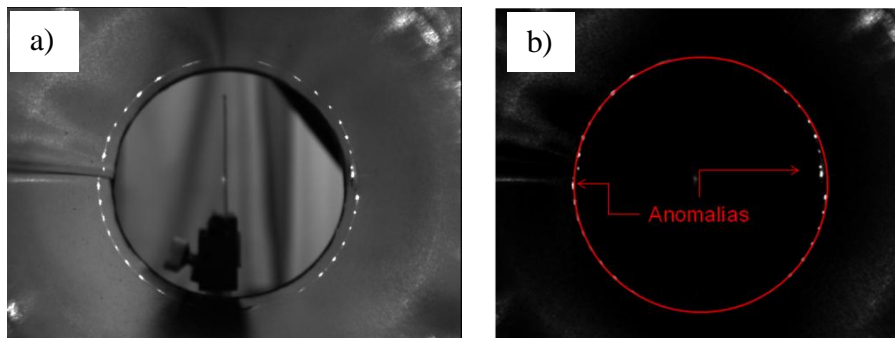
### 4.1 Medición con luz estructurada

Se analizaron cualitativamente un tubo sin defecto y otros con diferentes defectos. 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, **Figura 4a**, y luego se ajustaron los puntos luminosos con una curva circular, **Figura 4b.**



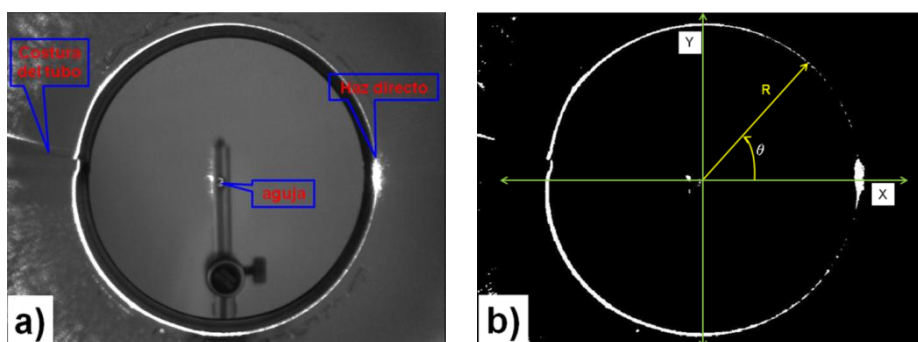
**Figura 4. Filtrado de imágenes.**

Obtenida la circunferencia de referencia, se procedió a estudiar tubos con defectos, proyectando el patrón de luz sobre sus paredes internas, **Figura5a**. Luego se realizó el filtrado de la imagen capturada y se superpuso la circunferencia patrón, **Figura5b**. Se puede observar en las figuras cómo son detectadas las anomalías en donde los puntos luminosos se apartan del aro de referencia.



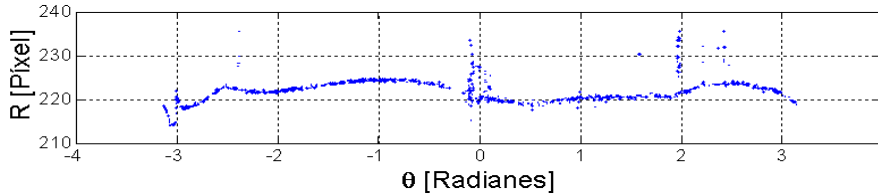
**Figura 5. Tubo con defectos.**

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. Luego, se comprueba que este tipo de iluminación sólo es aceptable para estudiar defectos geométricos, como la ovalidad. Un anillo luminoso continuo, permite detectar otros tipos de defectos además de la ovalidad. Por ello se optó por el patrón luminoso obtenido mediante la dispersión de luz por una aguja.



**Figura 6. Filtrado de una foto tomada a un tubo con defectos.**

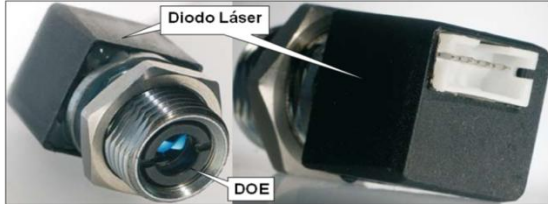
Se iluminó un tubo defectuoso con un anillo continuo dado por la dispersión cónica, **Figura 6a**. La **Figura 6b** muestra la imagen filtrada del interior del tubo donde se indica el cambio a coordenadas polares. Al graficar el radio medio del anillo luminoso en función del ángulo ( $-\pi < \theta < \pi$ ), puede detectarse rápidamente cualquier defecto que provoque una variación apreciable del radio del tubo, ver **Figura 7**.



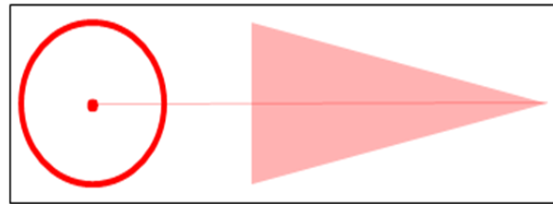
**Figura 7. Radio medio del anillo en función del ángulo.**

Por ejemplo, se observa para ángulos cercanos a  $-3\pi$  una variación del radio medio coincidente con la costura en la pared del tubo (Figura). 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 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. A continuación se presenta el nuevo dispositivo experimental, el software desarrollado y los resultados.

#### 4.2 Luz Estructurada Cónica

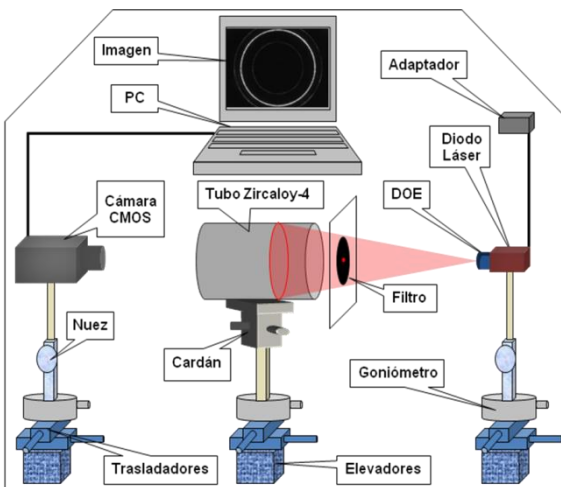


**Figura 8. Diodo Láser-DOE.**



**Figura 9. Patrón circular de luz.**

Los **DOE** (Diffractive Optical Elements) son dispositivos que modulan un haz de luz y permiten codificar o decodificar, formar imágenes o desviar dicho haz de luz en formas que hayan sido diseñadas. 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. Se adquirió un conjunto conformado por un diodo láser y un DOE de las siguientes características: Diodo láser (635nm-6mW) modelo Cameo de Global Laser Tech, unido a un DOE. Este módulo compacto (**Figura 8**) permite regular el foco a la distancia requerida, y



**Figura 10. Sistema de Alineación.**

proyectar un haz de luz estructurada con geometría cónica (**Figura 9**).

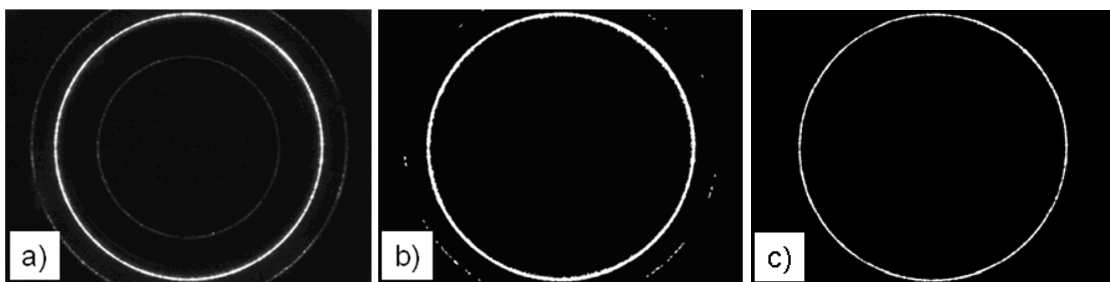
Se presenta el nuevo dispositivo óptico montado para analizar la pared interna de tubos de Zircaloy-4 (**Figura 10**). El conjunto diodo láser-DOE, proyecta sobre la pared interna de dicho tubo (diámetro aproximado de 110 mm) un anillo de luz coherente. Un filtro espacial elimina el haz directamente transmitido y la luz espuria proveniente del conjunto diodo-DOE. Una cámara digital 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.

### 4.3 Adquisición y Procesamiento de Imágenes

Para el procesamiento y análisis de imágenes se desarrolló un software en el entorno MATLAB. 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  $\theta$ , y detecta y caracteriza defectos superficiales internos del tubo. La **Figura 11a** 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 11b**).

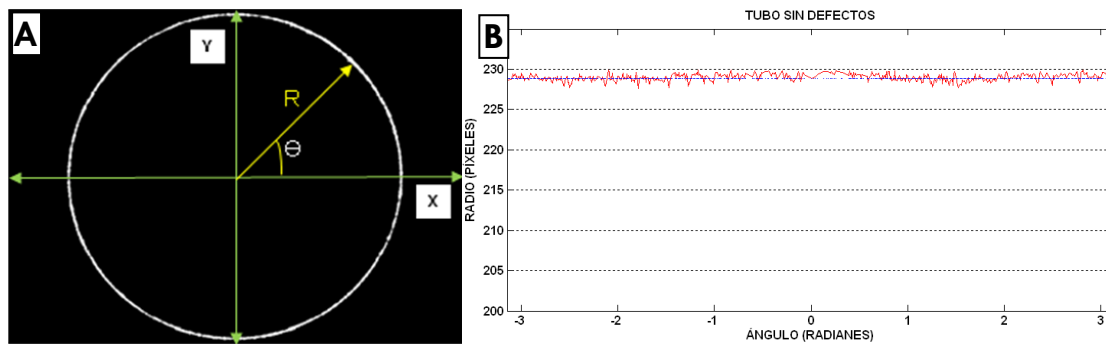
2. Eliminación del ruido en la imagen: Mediante la función “bwareaopen” se eliminan los puntos aislados distantes de la circunferencia. Para ello, se define  $C$  como la mínima cantidad de píxeles vecinos conectados entre sí para que una indicación no sea considerada una señal espuria. Todo grupo luminoso 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 11c**.



**Figura 11. Procesado de imágenes.**

3. 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  $\theta$  ( $-\pi < \theta < \pi$ ) píxel a píxel (**Figura 12**).

4. Determinación del radio medio en función del ángulo: Se determina el radio medio  $\langle R \rangle$  para cada valor de  $\theta$ , y se lo grafica en función de  $\theta$ . La **Figura 12B** muestra el gráfico de  $R$  vs  $\theta$ , en color rojo; la línea azul representa la circunferencia patrón en coordenadas polares.

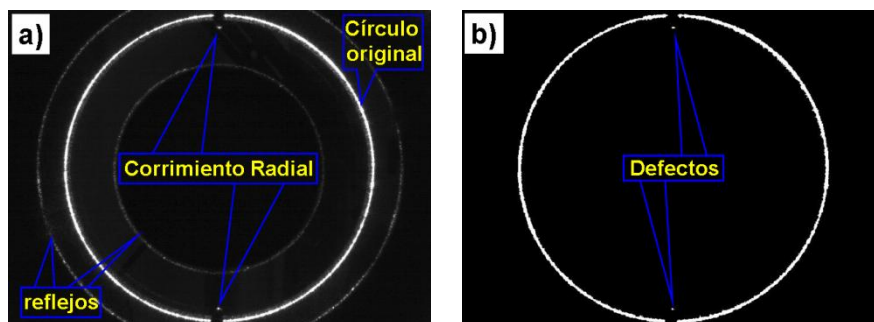


**Figura 12. Cambio a coordenadas polares.**

#### 4.4 Calibración

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. La presencia de protuberancias provoca un corrimiento localizado de la mancha luminosa en la dirección radial (**Figura 13**).

Se usaron 6 modelos de cilindros con distinto diámetro que llamaremos calibres, los cuales tenían 1; 1,5; 2; 2,5; 3,5; y 5 mm de diámetro. En la primera experiencia, para la toma de imágenes con la cámara CMOS, se utilizaron los tres últimos calibres. En el segundo caso, en la cual se dispuso de la cámara CCD para la adquisición de imágenes, se usaron los 6 tipos de calibre. Estos calibres se colocaron en forma aleatoria de a dos y de a uno, por cada foto capturada. 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.



**Figura 13. Corrimiento radial.**

#### 4.5 Mediciones y Resultados

En este párrafo se compara la variación local del radio del anillo luminoso, medida en píxel, con la correspondiente variación local del radio del tubo, medido en mm, en todas las imágenes capturadas. 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. 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 del anillo luminoso en la discontinuidad.
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.

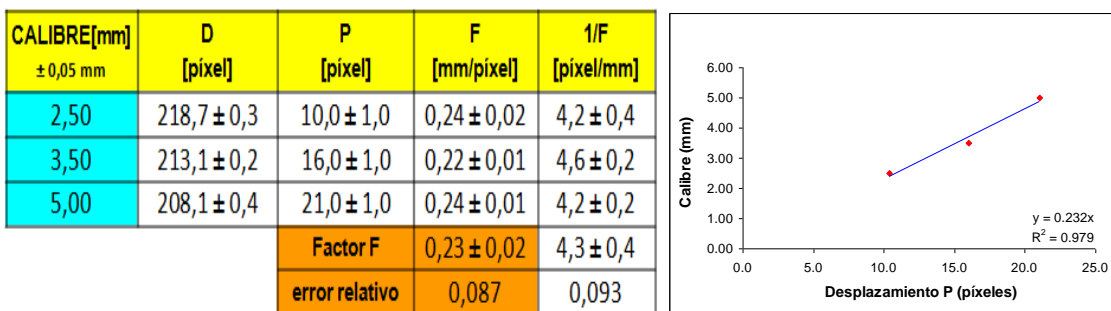
$$P = \langle R \rangle - D$$

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

#### 4.6 Imágenes con CMOS

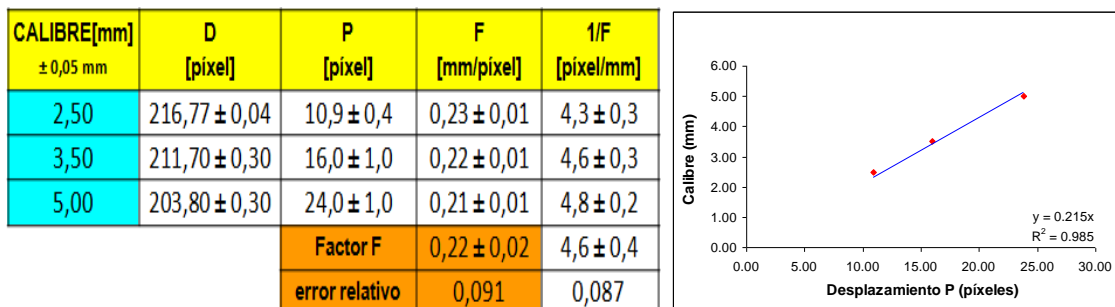
Se analizó el comportamiento de esta cámara digital para dos aperturas diferentes de diafragma. Con esta cámara solamente se pudieron detectar los tres calibres de mayor diámetro.

Caso 1. 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.  $\langle R \rangle = (229,1 \pm 0,4)$  píxel.



**Figura 14. Resultados obtenidos a mayor apertura de diafragma.**

Caso 2. Imágenes con menor apertura de diafragma, y por ende un anillo de luz de menor espesor de línea posible y menor intensidad.  $\langle R \rangle = (227,6 \pm 0,4)$  píxel.



**Figura 15. Resultados obtenidos a menor apertura de diafragma.**

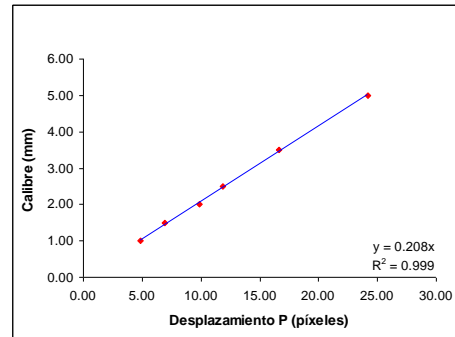
Aunque con solo 3 valores de calibres no se puede realizar una estadística confiable para la recta de calibración, al comparar los resultados obtenidos en estos dos casos, se puede inferir *que al optimizar el sistema de iluminación, logrando un anillo no saturado en intensidad y de menor espesor, se logra una mejora en el valor del coeficiente de correlación lineal obtenido.* Además, los errores relativos de F son levemente diferentes entre sí.

#### 4.7 Imágenes con CCD

Con la CCD fue posible detectar los seis calibres. Primeramente se analizaron 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.

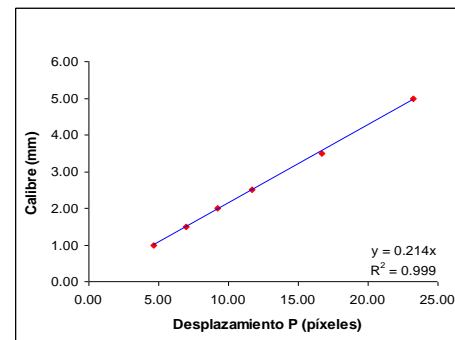
CALIBRE[mm] $\pm 0,05$	D [píxel]	P [píxel]	F [mm/píxel]	1/F [píxel/mm]
1,00	223,70 $\pm$ 0,10	4,90 $\pm$ 0,10	0,200 $\pm$ 0,020	4,9 $\pm$ 0,4
1,50	221,68 $\pm$ 0,01	6,95 $\pm$ 0,03	0,220 $\pm$ 0,010	4,6 $\pm$ 0,2
2,00	218,80 $\pm$ 0,10	9,90 $\pm$ 0,10	0,200 $\pm$ 0,010	4,9 $\pm$ 0,2
2,50	216,79 $\pm$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



**Figura 16. Resultados para 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.

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



**Figura 17. Resultados para calibres ubicados en la misma posición angular.**

Se observa que existe una relación lineal entre el diámetro del calibre y el parámetro P. Además, de los valores de F obtenidos en ambos, no se detectan diferencias significativas. Los errores relativos son iguales para estos dos casos, pero significativamente menores a los determinados para la cámara CMOS. Empleando la cámara CCD se define el factor de escala F constante, independiente de la posición de las anomalías e igual a:  $F = (0,21 \pm 0,01)$  mm/píxel.

## 5. Conclusiones

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. 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.

## Referencias

1. “Research into the engineering application of reverse engineering technology”. Yu Zhang. J. of Material Processing Tech.(2003).
2. “Using the Diffractive Optics for 3D Inspection of Nuclear Reactor Fuel Assembly Grid Spacers”. L.V. Finogenov, Yu.A. Lemeshko, P.S. Zav’ya. MEASUREMENT SCIENCE REVIEW, Volume 8, Section 3, No. 3, 2008 71.
3. J.L. Doyle et al.; Informe Técnico, Quest Integrated Inc., USA. (1991)
4. G.N. Jarvis, E.O. Corriblum, M.G. Grabish, D.L. Mader, J.C. Kuurstra and S.C. McNabb. “In-Situ optical profilometry of Candu Fuel Channels” Report Candu Owner Groupe. Canada.
5. Richard D. Roberts. “Applications of laser profilometry for tube inspection” 6<sup>a</sup> EPRI Balnace of Plant Heat Exchanger NDE Symposium. Scottsdale, Arizona, (2000).
6. Informe técnico Código SUCAN 1/95, Departamento Química de Reactores, R. Bordoni, M. Villegas, A.M. Olmedo, M. Miyagusuku, 1995.