



CENTRO DE INVESTIGACIONES
EN ÓPTICA, A.C.

**Medición remota de alta resolución en tiempo real y por medios
ópticos de diámetros externos en flechas manufacturadas.**



Para la obtención del grado de:
MAESTRO EN OPTOMECATRÓNICA

Asesor: Dr. Manuel Humberto De la Torre Ibarra

Estudiante: Ing. Julio Cesar Pachuca Saucedo

Enero de 2015
León, Guanajuato, México

AGRADECIMIENTOS

Todos los días nos pasan cosas buenas o malas, las personas nos hacen favores, nos hacen felices y siempre es bueno agradecer por los buenos sentimientos y por las buenas acciones de otros hacia nosotros o hacia los que amamos.

A mi señor por concederme serenidad para aceptar las cosas que no puedo cambiar, valor para cambiar las cosas que puedo modificar y sabiduría para conocer la diferencia. Y sobre todo por mostrarme que la vida es sagrada y que se debe disfrutar día a día.

A mi esposa Karina por siempre apoyarme en mis planes y sueños. Por estar a mi lado en aquellos momentos difíciles en los que mi paciencia, mi fe y mis deseos se volvieron frustración, dándome siempre su aliento para seguir esforzándome y luchando por la superación.

A mis padres Marcela y Raymundo por inculcarme ese sentimiento de superación, humildad, amistad y sobre todo por traerme a la vida, cuidarme, apoyarme y mostrarme su amor en todo momento sin importar los sacrificios y humillaciones que hayan obtenido en su camino. A mis hermanos Laura, Raymundo y Salvador por demostrarme su amor incondicionalmente, por permitirme ser parte de sus vidas y apoyarme a pesar de todo.

A mi asesor el Dr. Manuel por no olvidar el valor más importante considerado por mí, que es la humildad, por siempre mantener los pies sobre la tierra y no olvidar quien fue y de donde viene, a pesar de su gran trayectoria. Por su apoyo incondicional, asesorías, compartir sus experiencias en todo momento y sobre todo por su amistad.

A mis compañeros por demostrarme su amistad y por ser parte de esta etapa de mi vida.

A CONACYT por brindarme el apoyo económico y la oportunidad para dar un paso hacia un mayor conocimiento.

Al área de metrología dimensional, de manufactura e ingeniería del Centro de Investigaciones en Óptica por brindarme su apoyo y ayuda en el proceso de desarrollo de este trabajo de tesis.

RESUMEN

El área de inspección de calidad dentro de las empresas manufactureras es la sección donde se aplican todos los mecanismos, acciones y herramientas para detectar posibles fallas en el producto final fabricado, teniendo como base la normalización de las actividades de esta área (norma internacional ISO), las especificaciones del cliente y las tolerancias marcadas por la sección de ingeniería del producto.

En específico el área de inspección dimensional recolecta y analiza grandes cantidades de datos empleando comúnmente instrumentos de medición mecánicos. Estos datos son afectados por condiciones ambientales, de desgaste en el instrumento de medición y en gran medida por el factor humano.

Debido a estas condiciones y a los requerimientos estrictos tanto de las normas como del cliente, varias empresas han optado por el empleo de sistemas automatizados de medición por contacto, pero debido al costo que implica su adquisición y a que a veces modifican la forma del objeto a medir, es necesario desarrollar sistemas autónomos remotos (de no contacto) y de bajo costo.

Acorde a lo anterior, el objetivo principal de éste trabajo de tesis es el desarrollo de un método de medición dimensional óptico en tiempo real de bajo costo con una resolución de micrómetros, empleando la difracción y la proyección de sombra para la identificación de los bordes rectos de una muestra de varios centímetros de grosor.

Este sistema por ser remoto y automatizado, implica que las mediciones obtenidas no son afectadas por errores ocasionados debido al factor humano, el desgaste del mecanismo de medición y por ende la deformación de la muestra al llevar a cabo la medición. A su vez por emplear unos cuantos elementos ópticos, un software de desarrollo propio y un par de cámaras CCD de bajo costo, podrá ser adquirido e implementado para mejorar los procesos de control de calidad en los que interactúa directamente el factor humano.

En este trabajo de tesis se empleará como dimensión de estudio el diámetro de un cilindro metálico templado y rectificado de acero que está restringido por una tolerancia de unos cuantos micrómetros, tomando como parámetro de control la temperatura a la que se lleva a cabo la medición.

Pero ya que el sistema de medición remota emplea la identificación de bordes rectos del objeto a medir, este sistema podrá ser empleado para medir diámetros, espesores de láminas, ancho, largo y alto de una pieza, dimensión de orificios rectos y cuadrados, tanto en proceso como fuera del proceso de producción; por lo cual su campo de aplicación no estará limitado solamente a la medición de diámetros.

ÍNDICE

ÍNDICE	I
1. INTRODUCCIÓN	1
2. CONCEPTOS BÁSICOS.....	3
2.1 REFLEXIÓN Y REFRACCIÓN.....	4
2.2 ABERRACIÓN CROMÁTICA Y ESFÉRICA.....	5
2.3 DIFRACCIÓN.....	7
2.3.1 DIFRACCIÓN DE FRESNEL EN UNA ABERTURA CUADRADA.....	11
2.3.2 DIFRACCIÓN DE FRESNEL EN BORDES RECTOS.....	14
2.4 PROCESAMIENTO DIGITAL DE SEÑALES	15
2.4.1 ANÁLISIS FRECUENCIAL DE SEÑALES.....	17
2.5 FORMACIÓN DE IMÁGENES EN SENSORES CCD.....	20
2.5.1 CAPTURA DE IMÁGENES.....	21
2.5.2 CAPTURA DE VALORES DE INTENSIDAD EMPLEANDO SENSORES CCD	21
3. METROLOGÍA	23
3.1 METROLOGÍA DIMENSIONAL.....	25
3.2 ERRORES EN LA MEDICIÓN	27
3.3 INSPECCIÓN DIMENSIONAL A TRAVES DE MÉTODOS MECÁNICOS O DE CONTACTO	29
3.3.1 MÉTODOS MECÁNICOS DE MEDICIÓN.....	30
3.3.2 RESOLUCIÓN DE LOS MÉTODOS MECÁNICOS	36
3.4 INSPECCIÓN DIMENSIONAL A TRAVES DE MÉTODOS DE NO CONTACTO.....	36
3.4.1 MÉTODO ÓPTICO EMPLEANDO LUZ BLANCA.....	37
3.4.2 MÉTODO ÓPTICO EMPLEANDO LUZ LÁSER	43
3.4.3 RESOLUCIÓN DE LOS MÉTODOS DE NO CONTACTO	46
4. DESARROLLO EXPERIMENTAL Y RESULTADOS.....	47
4.1 ARREGLO DE LUZ LASER (DIFRACTION TRACKING).....	47

4.1.1	POR REFLEXIÓN.....	47
4.1.2	POR TRANSMISIÓN.....	49
4.1.3	ARREGLO DE LUZ LÁSER DIFRACCIÓN-REFLEXIÓN MODIFICADO	50
4.2	ARREGLO DE LUZ BLANCA (SHADOWING CASTING).....	53
4.3	DESARROLLO DE SISTEMA DE CAPTURA EN TIEMPO REAL	58
4.4	ADQUISICIÓN DE IMÁGENES Y DETECCIÓN DE BORDES	63
4.4.1	DETECCIÓN DE BORDE POR DIFRACCIÓN.....	66
4.4.2	DETECCIÓN DE BORDE POR PROYECCIÓN DE SOMBRA.....	70
4.5	RESULTADOS FINALES.....	74
4.5.1	ESTUDIO POR CAMBIO DE TEMPERATURA.....	75
4.5.2	ESTUDIO COMPARATIVO DE MÉTODOS ÓPTICOS	97
4.5.3	ESTUDIO COMPARATIVO DE MÉTODOS ÓPTICOS CONTRA MECÁNICOS	99
4.6	RESOLUCIÓN DE LA MEDICIÓN EN SISTEMAS ÓPTICOS REMOTOS.....	101
5.	DISCUSIONES Y CONCLUSIONES.....	103
5.1	TRABAJO A FUTURO	104
6.	REFERENCIAS.....	105
APENDICE A.	MAQUINADO DE LAS PIEZAS PATRÓN.....	108
APENDICE B.	GRÁFICAS DE REPETIBILIDAD Y CAJA.....	111
APENDICE C.	CARTA DE ENLACE CON LA INDUSTRIA	122

1. INTRODUCCIÓN

Con el objetivo de disminuir el tiempo de fabricación e incrementar el volumen y calidad del producto recientemente la industria manufacturera ha empleado como elemento esencial la implementación de sistemas automatizados aplicados en áreas productivas, de inspección y liberación logrando así la disminución de los rechazos (pérdidas).

En específico el área de inspección de calidad en varias industrias, ha sido el cuello de botella en el sistema productivo, ya que es la etapa que tiene como responsabilidad la liberación del producto terminado. Con frecuencia, la implementación de sistemas automatizados se vuelve una actividad primordial para el cumplimiento de las especificaciones del producto y a su vez del plan de producción.

En la actualidad, centros de metrología tales como CENAM y el laboratorio de metrología dimensional ubicado en el CIO emplean sistemas automatizados como lo son las Maquinas de Medición por Coordenadas (CMM por sus siglas en inglés) [1][2], las cuales a través de la interacción o contacto de un palpador y el objeto de estudio llevan a cabo la medición.

Debido a que el contacto de la herramienta de medición y el objeto puede generar una deformación de cualquiera de los elementos, provocando un error dimensional; la incorporación de los sistemas de no contacto o remotos se vuelven las herramientas del futuro en la metrología dimensional [3].

Dentro de estas técnicas o sistemas de metrología dimensional remotos se encuentran:

1. Comparadores ópticos [4].
2. Sistemas de visión por computadora [5].
3. Micrómetros láser [4].
4. Dispositivos de identificación del patrón de difracción (luz láser) y proyección de sombra (luz blanca) [6][7].

Estas últimas técnicas son la base de este trabajo de tesis, el cual tiene como objetivo el desarrollo de un sistema remoto en tiempo real de bajo costo para la medición de diámetros de cilindros de acero con resolución de unos cuantos micrómetros. Empleando, la propagación tanto del haz de luz láser como de luz blanca sobre un cilindro metálico, se forma el patrón de difracción o la sombra del

objeto respectivamente. Posterior a esto, se magnifica la imagen generada por cada borde de la muestra, se captura a través de dos cámaras CCD de bajo costo y por medio de un software de desarrollo propio (procesamiento digital de imágenes) se localiza la posición de los bordes; y por ende, la distancia entre ellos, dando como resultado el diámetro de la muestra. Adicionalmente, estos sistemas tienen como propósito generar una herramienta de inspección dimensional de bajo costo empleando un número limitado de elementos ópticos y dos cámaras.

Para probar el sistema remoto de medición se utilizará una muestra de diez cilindros metálicos templados y rectificadas de acero, que están manufacturados con variaciones entre ellos de unos cuantos micrómetros.

El desarrollo de la tesis está estructurado de la siguiente manera, en el capítulo 2 se presentan los conceptos básicos de óptica utilizados en el desarrollo de los sistemas ópticos de medición, en conjunto con la teoría de adquisición y procesamiento digital de señales. Respectivamente, en el capítulo 3 se describen los conceptos básicos de la metrología y la clasificación de los métodos de medición dimensional, posteriormente la descripción de los instrumentos de medición mecánicos empleados comúnmente en la industria y adicionalmente un estudio del estado del arte de los métodos de no contacto, identificación de difracción y proyección de sombra, que han sido desarrollados hasta la actualidad.

Finalmente en el capítulo 4 se explica en forma detallada el procedimiento experimental para la adquisición de la señal de entrada, en conjunto con el algoritmo empleado para procesar la señal. En el capítulo 5 se discuten los resultados obtenidos empleando la metodología descrita en el capítulo anterior y por ende el trabajo a futuro que se desprende de la investigación y estudio de los sistemas ópticos de identificación de difracción y proyección de sombra.

2. CONCEPTOS BÁSICOS

El estudio de la luz está fundamentado por tres ramas principales: la óptica geométrica, óptica física y la mecánica cuántica.

Las cuales se diferencian entre sí por la forma de analizar la luz. En el caso de la óptica geométrica el análisis se lleva a cabo por medio del trazado de rayos, a su vez la óptica física emplea la naturaleza de ondas electromagnéticas continuas para caracterizar la luz y finalmente la mecánica cuántica cuantifica la luz a través de partículas llamadas fotones.

Debido a la controversia en la naturaleza de la luz, uno de los principios básicos de la mecánica cuántica es que tanto la luz como las partículas materiales muestran una propiedad similar de onda-partícula, tal como Erwin C.Schrödinger (1887-1961), afirmó [8]:

“No se debe desechar ninguno de los conceptos (partículas y ondas) sino ambos deben amalgamarse. El aspecto que sobresalga no dependerá del objeto físico sino del dispositivo experimental usado para examinarlo”.

Bajo el concepto de que la luz es una onda electromagnética irradiada a través del espacio en todas direcciones y que se caracteriza por sus propiedades como amplitud y longitud de onda, a continuación se muestra una distribución del espectro electromagnético (ver *Figura 2.1*), clasificado en estos rangos, basado en la forma de su generación y detección, el cual va desde los rayos gamma hasta la radiofrecuencia.

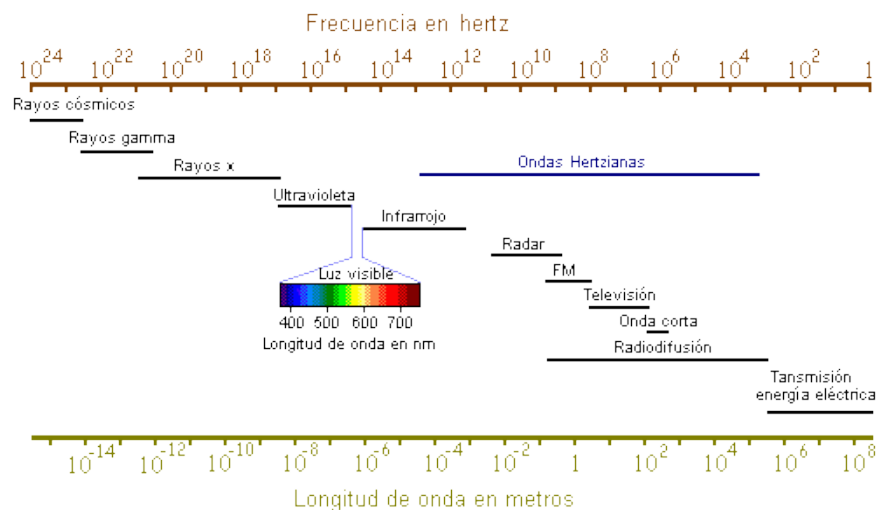


Figura 2.1 Distribución del espectro electromagnético en donde se detalla el rango de visión humana, siendo el ojo humano el detector, el cual tiene más sensibilidad en cierta región del visible (por lo general entre la luz verde y la amarilla a una longitud de onda de 550nm).

Considerando que la luz en el espectro visible es el intervalo de interés, se aprecia que ocupa un rango muy reducido en la distribución del espectro electromagnético (400nm a 700nm).

La luz como se comentó es irradiada de una fuente y esta se propaga tanto en un medio como en el vacío a una velocidad constante, pero debido a que el medio de propagación tiene una densidad diferente la velocidad y la trayectoria de la luz es afectada. Estos cambios muestran algunas características de la luz como son: refracción y reflexión.

2.1 REFLEXIÓN Y REFRACCIÓN

El esparcimiento o dispersión es la interacción de la luz con partículas más pequeñas que una longitud de onda [8] contenidas en un líquido, sólido o gas, la intensidad de la luz esparcida depende de la densidad y homogeneidad del medio (en un medio denso y homogéneo, muy poca luz es esparcida). Un medio que no esparce luz a simple vista es transparente.

Cuando la luz se propaga a través del aire suele llegar a superficies y en ese punto la luz puede ser reflejada (esparcimiento hacia atrás) o refractada (esparcimiento hacia adelante). Empleando el argumento de que la luz puede ser analizada como un rayo y considerando una superficie especular (ópticamente lisa) la reflexión es el cambio de dirección, en el mismo medio, que experimenta un rayo luminoso al incidir sobre dicha superficie. El ángulo de incidencia es siempre igual al ángulo de reflexión, como se observa en la *Figura 2.2*.

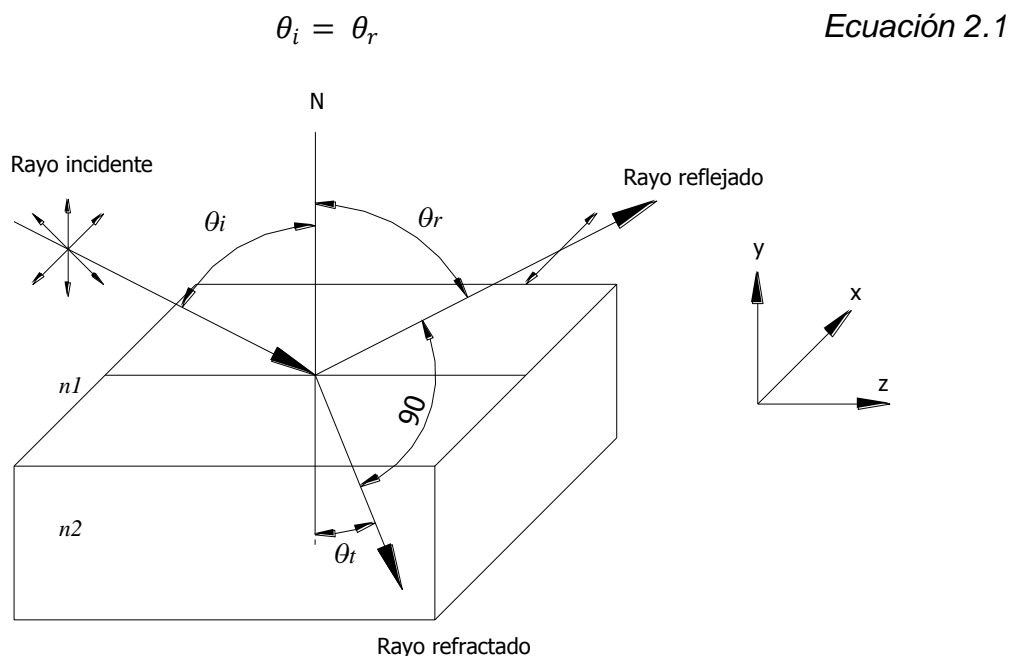


Figura 2.2 Interfaz de un rayo incidente en un medio.

Debido al esparcimiento se genera un cambio de la velocidad de la luz con respecto a su normal, esto es debido al índice de refracción del medio el cual es determinado a través de la *Ecuación 2.2*.

$$n = \frac{c}{v} \quad \text{Ecuación 2.2}$$

donde:

n : Índice de refracción del medio.

c : Velocidad de la luz en el vacío (3×10^8 m/s).

v : Velocidad de la luz en el medio.

La ley de refracción (ley de Snell) relaciona los índices de refracción de los medios que forma la interface con los ángulos de incidencia y transmisión tal y como se muestra en la *Figura 2.2* y se describe en la *Ecuación 2.3*.

$$n_1 \text{sen } \theta_i = n_2 \text{sen } \theta_t \quad \text{Ecuación 2.3}$$

donde:

n_1 : Índice de refracción del medio en el cual incide la luz.

n_2 : Índice de refracción del medio en el cual es reflejada la luz.

θ_i : Angulo al cual incide la luz en el medio.

θ_t : Angulo al cual se transmite la luz en el medio.

2.2 ABERRACIÓN CROMÁTICA Y ESFÉRICA

Los sistemas ópticos son el conjunto de elementos como: lentes, diafragmas, espejos, prismas, fibras ópticas, etc. En específico, las lentes son elementos transparentes (vidrio, plástico, etc.), que presentan al menos una de sus superficies curvas, las cuales en la mayoría de los casos se emplean como elementos formadores de imagen y se clasifican en convergentes y divergentes. Si la lente hace que los rayos refractados converjan, la lente es convergente, si hacen que diverjan, la lente es divergente [9] (ver *Figura 2.3*).

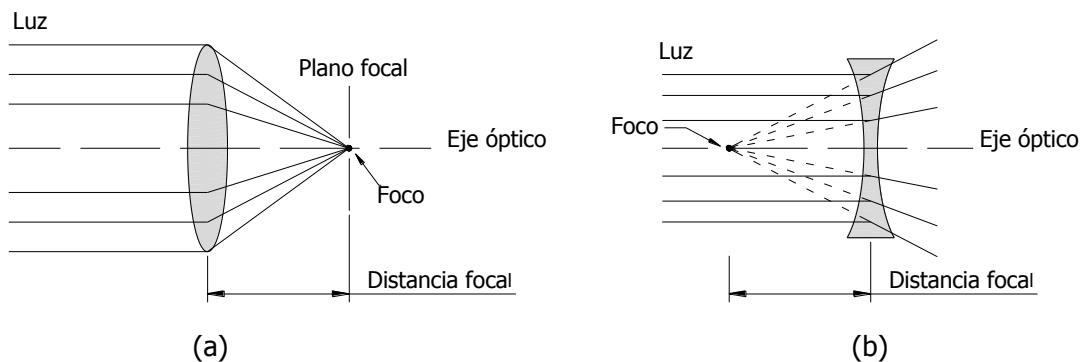


Figura 2.3 Tipos de lentes, sus focos y distancias focales; (a) Lente convergente, (b) Lente divergente

Al propagarse la luz a través de estos elementos, su trayectoria y su intensidad es afectada dando como resultado que la imagen proporcionada por la lente no sea equivalente a la imagen construida teóricamente. A estas diferencias se les denomina aberraciones.

Las aberraciones a su vez se clasifican en cromáticas y monocromáticas (esféricas, de coma, astigmatismo, distorsión y curvatura de campo). Pero debido a la relevancia e interés en específico de las aberraciones cromáticas y esféricas solo se tratarán estas a detalle. Las cromáticas son el resultado de la variación del índice de refracción con respecto a la longitud de onda de la luz. En la *Figura 2.4* se muestran algunos ejemplos de aberraciones y sus efectos.

Una de las aberraciones monocromáticas es la generada por una mayor refracción de los rayos periféricos con respecto a los rayos paraxiales que inciden sobre una lente convergente dando como resultado una distancia de foco menor a la distancia del foco principal. Al generarse este efecto las imágenes formadas son percibidas con bordes difusos, como se muestra en la *Figura 2.5*, este tipo de aberración es llamada esférica, la cual es la más importante de las aberraciones monocromáticas.

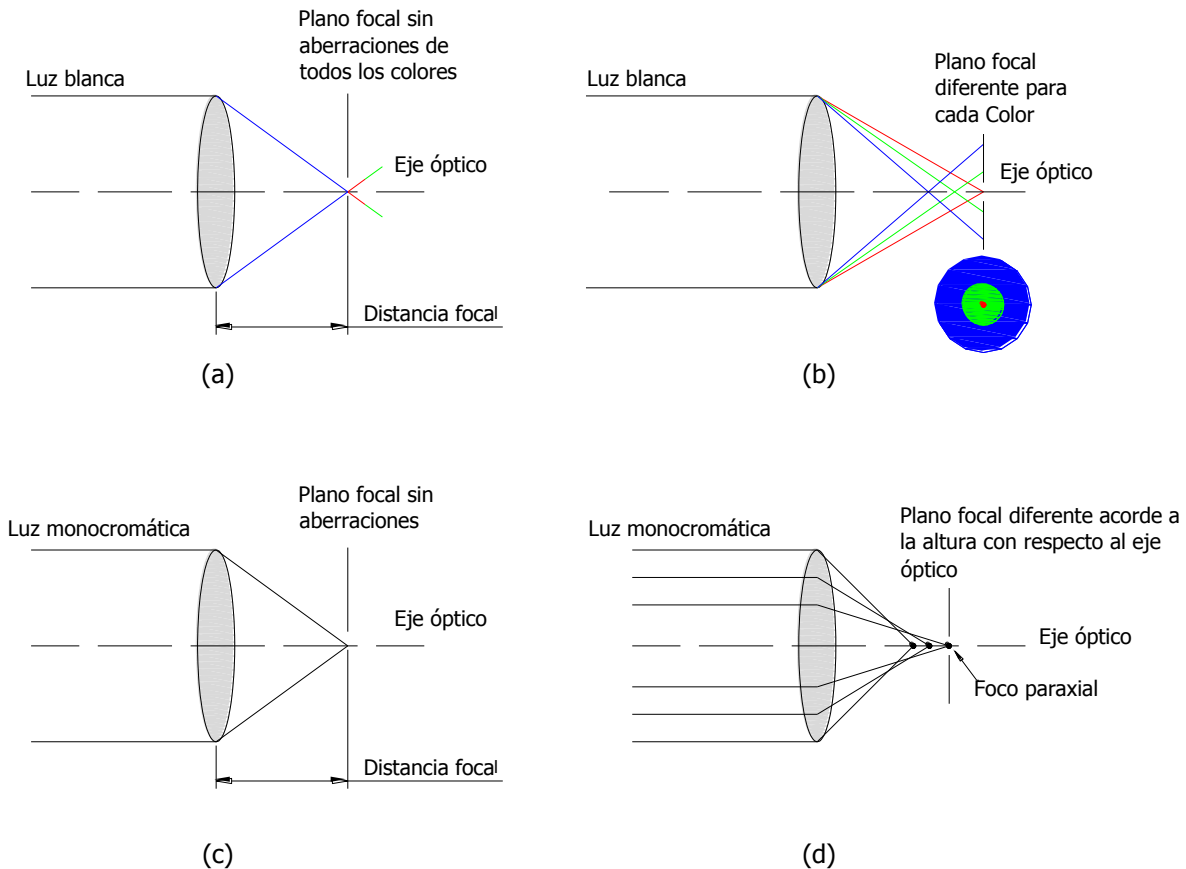


Figura 2.4 Algunos tipos de aberraciones de las lentes; (a) Trayectoria ideal del haz de luz blanca, (b) Aberración cromática, (c) Trayectoria ideal de haz monocromático, (d) Aberración esférica (monocromática).



Figura 2.5 Imagen de una letra “E” que contiene aberración esférica.

Estas aberraciones son eliminadas comúnmente mediante aberturas o diafragmas, ya que estos controlan la cantidad de luz (eliminación de rayos periféricos) entrantes al sistema óptico logrando el control de la calidad en la imagen.

2.3 DIFRACCIÓN

El término difracción es una desviación de los rayos de luz de un camino rectilíneo que no puede ser interpretado como una reflexión o refracción [10]. Esta desviación es causada comúnmente por un obstáculo.

Al proyectar una fuente de luz puntual y pseudo-monocromática entre un objeto opaco y una pantalla podemos observar la formación de una sombra de la misma forma que el objeto, a simple vista la sombra aparenta ser bien definida (*Figura 2.6a*) pero al realizar una inspección cercana se puede observar que se genera un patrón de franjas en el borde de la sombra (ver *Figura 2.6b*).

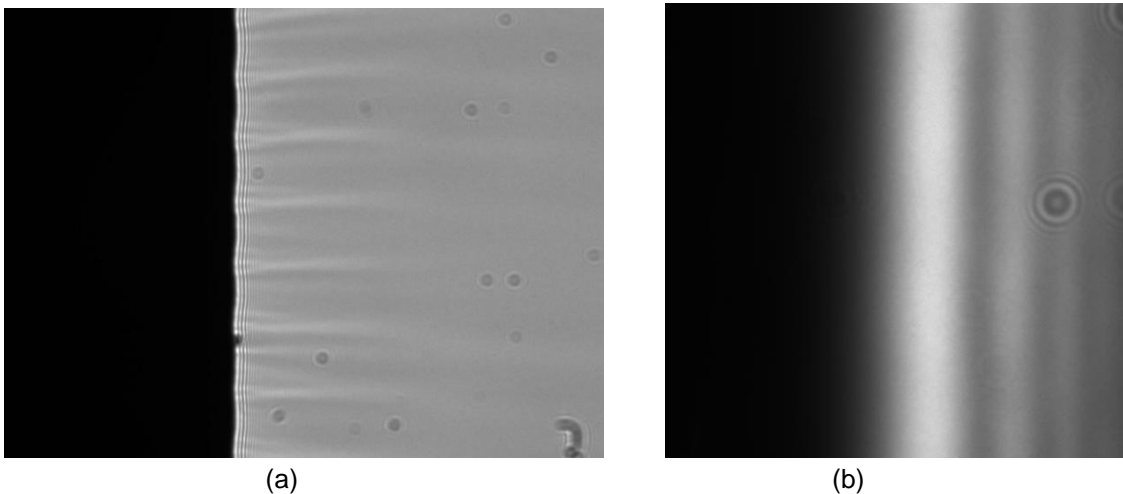


Figura 2.6 Difracción generada al proyectar luz blanca sobre el borde de un cilindro metálico; (a) Sombra del borde magnificado con objetivo de microscopio 4X, (b) Vista magnificada con objetivo de microscopio 10X.

El fenómeno de difracción se establece matemáticamente empleando como base el principio de Huygens-Fresnel, el cual se muestra geoméricamente en la *Figura 2.7* para el caso de coordenadas rectangulares [10].

La *Figura 2.7* muestra una abertura de difracción, situada en el plano (ξ, η) , iluminada en una dirección positiva z , además de un plano de referencia (x, y) donde se formara el patrón de difracción.

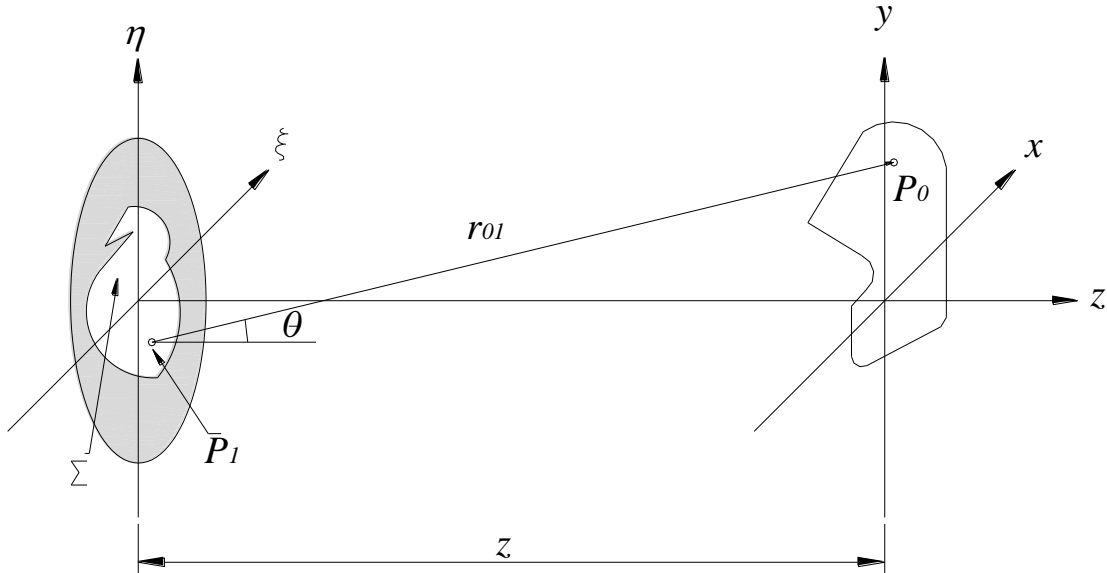


Figura 2.7 Geometría de difracción.

Acorde a la *Figura 2.7* el principio de Huygens-Fresnel puede ser expresado según la *Ecuación 2.4* como:

$$U(P_0) = \frac{1}{i\lambda} \iint_{\Sigma} U(P_1) \frac{e^{ikr_{01}}}{r_{01}} \cos\theta d\xi d\eta \quad \text{Ecuación 2.4}$$

Donde:

λ : Longitud de onda del haz de luz.

k : Numero de onda.

r_{01} : Vector de posición P_1 - P_0 .

θ : Angulo entre el vector normal del plano ξ - η y el vector de posición r_{01} .

$U(P_1)$: Amplitud del frente de onda que ilumina la abertura.

$U(P_0)$: Perturbación resultante de la luz en el plano x - y debida a la abertura ubicada en el plano ξ - η (superposición de frentes de onda).

Tomando en cuenta de la figura *Figura 2.7*, que el $\cos\theta$ está definido por la *Ecuación 2.5*:

$$\cos\theta = \frac{z}{r_{01}} \quad \text{Ecuación 2.5}$$

Y calculando el campo de onda a través del plano (x, y) , que es paralelo al plano (ξ, η) y está ubicado a una distancia normal z con respecto a este, se puede reescribir el principio de Huygens-Fresnel de la siguiente manera, (Ecuación 2.6).

$$U(x, y) = \frac{z}{i\lambda} \iint_{\Sigma} U(\xi, \eta) \frac{e^{ikr_{01}}}{r_{01}^2} d\xi d\eta \quad \text{Ecuación 2.6}$$

En donde que la distancia r_{01} está dada por:

$$r_{01} = \sqrt{z^2 + (x - \xi)^2 + (y - \eta)^2} \quad \text{Ecuación 2.7}$$

donde:

z : Distancia normal entre el plano ξ - η y x - y .

$U(\xi, \eta)$: Amplitud del frente de onda que ilumina la abertura.

$U(x, y)$: Perturbación resultante de la luz en el plano x - y debida a la abertura ubicada en el plano ξ - η (superposición de frentes de onda).

x, y : Coordenadas rectangulares del punto P_0 con respecto al plano (x, y) .

z : Coordenadas rectangulares del punto P_0 con respecto al plano (ξ, η, z) .

ξ, η : Coordenada rectangulares del punto P_1 con respecto al plano (ξ, η) .

Al mismo tiempo la difracción esta distinguida por 2 casos generales denominados difracción de Fresnel y difracción de Fraunhofer. La Difracción de Fresnel o difracción de campo cercano es un patrón de difracción de una onda electromagnética obtenida muy cerca del objeto causante de la difracción, donde los frentes de onda propagados son "no planos". En el aspecto matemático la aproximación de Fresnel es una expansión binomial de la Ecuación 2.7, mostrada en la Ecuación 2.8.

$$r_{01} \approx z \left[1 + \frac{1}{2} \left(\frac{x - \xi}{z} \right)^2 + \frac{1}{2} \left(\frac{y - \eta}{z} \right)^2 \right] \quad \text{Ecuación 2.8}$$

Sustituyendo la aproximación de Fresnel en la Ecuación 2.6 se obtiene la difracción de Fresnel en forma de convolución, Ecuación 2.9.

$$U(x, y) = \frac{e^{ikz}}{i\lambda z} \iint_{-\infty}^{\infty} U(\xi, \eta) e^{i\frac{k}{2z}[(x-\xi)^2 + (y-\eta)^2]} d\xi d\eta \quad \text{Ecuación 2.9}$$

Observando que la *Ecuación 2.9* describe una convolución, esta puede ser expresada de la siguiente manera, *Ecuación 2.10* :

$$U(x, y) = \frac{e^{ikz}}{i\lambda z} \iint_{-\infty}^{\infty} U(\xi, \eta) h(x - \xi, y - \eta) d\xi d\eta \quad \text{Ecuación 2.10}$$

donde el término de convolución, $h(x, y)$, se define acorde a la *Ecuación 2.11*:

$$h(x, y) = \frac{e^{ikz}}{i\lambda z} e^{i\frac{k}{2z}(x^2 - y^2)} \quad \text{Ecuación 2.11}$$

Empleando la convolución definida por la *Ecuación 2.10* se consigue la ecuación resultante llamada Integral de difracción de Fresnel, *Ecuación 2.12*.

$$U(x, y) = \frac{e^{ikz}}{i\lambda z} e^{i\frac{k}{2z}(x^2 + y^2)} \iint_{-\infty}^{\infty} \{U(\xi, \eta) e^{i\frac{k}{2z}(\xi^2 + \eta^2)}\} e^{-i\frac{2\pi}{\lambda z}(x\xi + y\eta)} d\xi d\eta \quad \text{Ecuación 2.12}$$

donde:

$e^{i\frac{k}{2z}(\xi^2 + \eta^2)}$: *Chirp o cuadrática.*

$e^{i\frac{k}{2z}(x^2 + y^2)}$: *Factor de fase.*

Por su parte la Difracción de Fraunhofer o difracción de campo lejano es un patrón de difracción de una onda electromagnética cuya fuente (al igual que la pantalla) se encuentran infinitamente alejadas con respecto al obstáculo, por lo que sobre éste y sobre la pantalla incidirán ondas planas (ver condición en la siguiente sección). En el aspecto matemático la aproximación de Fraunhofer se muestra en la *Ecuación 2.13*.

$$z \gg \frac{k(\xi^2 + \eta^2)_{max}}{2} \quad \text{Ecuación 2.13}$$

Utilizando la integral de difracción de Fresnel *Ecuación 2.12* y sustituyendo en ella la aproximación de Fraunhofer, el término $e^{i\frac{k}{2z}(\xi^2 + \eta^2)}$ puede ser considerado unitario debido al valor de z (tiende a infinito), por lo tanto se obtiene la *Ecuación 2.14*, llamada difracción de Fraunhofer.

$$U(x, y) = \frac{e^{ikz}}{i\lambda z} e^{i\frac{k}{2z}(x^2 + y^2)} \iint_{-\infty}^{\infty} U(\xi, \eta) e^{-i\frac{2\pi}{\lambda z}(x\xi + y\eta)} d\xi d\eta \quad \text{Ecuación 2.14}$$

2.3.1 DIFRACCIÓN DE FRESNEL EN UNA ABERTURA CUADRADA

Con base en el número de Fresnel determinado por la *Ecuación 2.15*:

$$F = \frac{a^2}{L\lambda} \quad \text{Ecuación 2.15}$$

donde:

a = Tamaño de la apertura (50 mm).

L = Distancia de la apertura hasta la pantalla (272 mm).

F = Numero de Fresnel (Difracción de Fresnel cuando $F > 1$, Difracción de Fraunhofer cuando $F \ll 1$).

y aplicándolo a la condición específica de este trabajo de tesis:

$$F = \frac{(0.05)^2}{[(0.272)(460 \times 10^{-9})]} = 19980.81$$

Se observa que una de las bases de este trabajo es la difracción de Fresnel; y debido a que un obstáculo puede ser considerado como una apertura opaca semi-infinita, se analizara como primera instancia la distribución de intensidad de la difracción de Fresnel generada por una apertura cuadrada.

En base a la difracción de Fresnel en su forma de convolución (*Ecuación 2.9*), considerando:

a) Una apertura cuadrada con ancho $2w$ esquematizada en la *Figura 2.8* [10].

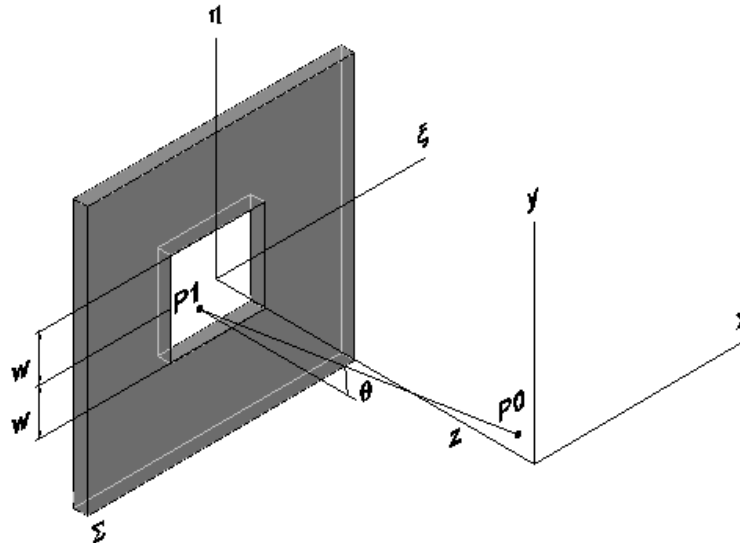


Figura 2.8 Difracción de Fresnel en una apertura cuadrada.

b) La amplitud del frente de onda que ilumina la abertura, $U(\xi, \eta)$ como una constante $U(\xi, \eta) = U_0$ debido a su distribución rectangular.

Entonces se puede demostrar que la *Ecuación 2.16* define la distribución en el plano imagen:

$$U(x, y) = \frac{U_0 e^{ikz}}{i\lambda z} \iint_{-w}^w e^{i\frac{k}{2z}[(x-\xi)^2 + (y-\eta)^2]} d\xi d\eta \quad \text{Ecuación 2.16}$$

Separando la *Ecuación 2.16* en un producto de dos integrales, se obtiene la *Ecuación 2.17*:

$$U(x, y) = \frac{U_0 e^{ikz}}{i} A(x)A(y) \quad \text{Ecuación 2.17}$$

donde:

$$A(x) = \frac{1}{i\lambda z} \int_{-w}^w e^{i\frac{k}{2z}[(\xi-x)^2]} d\xi \quad \text{Ecuación 2.18}$$

$$A(y) = \frac{1}{i\lambda z} \int_{-w}^w e^{i\frac{k}{2z}[(\eta-y)^2]} d\eta \quad \text{Ecuación 2.19}$$

Con el objetivo de reducir la *Ecuación 2.18* y *Ecuación 2.19*, se aplica el siguiente cambio de variable mostrado a continuación:

$$\alpha = \sqrt{\frac{2}{\lambda z}} (\xi - x) \quad ; \quad \beta = \sqrt{\frac{2}{\lambda z}} (\eta - y)$$

obteniendo como resultado la *Ecuación 2.20* y *Ecuación 2.21*.

$$A(x) = \frac{1}{\sqrt{2}} \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} e^{i\frac{\pi}{2}\alpha^2} d\alpha \quad \text{Ecuación 2.20}$$

$$A(y) = \frac{1}{\sqrt{2}} \int_{\beta_1}^{\beta_2} e^{i\frac{k}{2z}\beta^2} d\beta \quad \text{Ecuación 2.21}$$

Donde los limites son:

$$\alpha_1 = -\sqrt{\frac{2}{\lambda z}} (w + x) \quad ; \quad \alpha_2 = \sqrt{\frac{2}{\lambda z}} (w - x)$$

$$\beta_1 = -\sqrt{\frac{2}{\lambda z}} (w + y) \quad ; \quad \beta_2 = \sqrt{\frac{2}{\lambda z}} (w - y)$$

Con base en las integrales de Fresnel mostradas a continuación:

$$C(z) = \int_0^z \cos\left(\frac{\pi t^2}{2}\right) dt \quad ; \quad S(z) = \int_0^z \sin\left(\frac{\pi t^2}{2}\right) dt$$

y aplicando la identidad de Euler en la *Ecuación 2.20* y *Ecuación 2.21* se obtiene el primer término reducido, $A(x)$ de la *Ecuación 2.17*:

$$A(x) = \frac{1}{\sqrt{2}} \left[\int_0^{\alpha_2} e^{i\frac{\pi}{2}\alpha^2} d\alpha - \int_0^{\alpha_1} e^{i\frac{\pi}{2}\alpha^2} d\alpha \right]$$

$$A(x) = \frac{1}{\sqrt{2}} \left\{ \int_0^{\alpha_2} \left[\cos\left(\frac{\pi}{2}\alpha^2\right) + \text{sen}\left(i\frac{\pi}{2}\alpha^2\right) \right] d\alpha - \int_0^{\alpha_1} \left[\cos\left(\frac{\pi}{2}\alpha^2\right) + \text{sen}\left(i\frac{\pi}{2}\alpha^2\right) \right] d\alpha \right\}$$

$$I(x) = \frac{1}{\sqrt{2}} \{ [C(\alpha_2) - C(\alpha_1)] + i[S(\alpha_2) - S(\alpha_1)] \}$$

A continuación, por medio del mismo procedimiento se obtiene el segundo término, $A(y)$:

$$A(y) = \frac{1}{\sqrt{2}} \left[\int_0^{\beta_2} e^{i\frac{\pi}{2}\beta^2} d\beta - \int_0^{\beta_1} e^{i\frac{\pi}{2}\beta^2} d\beta \right]$$

$$I(y) = \frac{1}{\sqrt{2}} \left\{ \int_0^{\beta_2} \left[\cos\left(\frac{\pi}{2}\beta^2\right) + \text{sen}\left(i\frac{\pi}{2}\beta^2\right) \right] d\beta - \int_0^{\beta_1} \left[\cos\left(\frac{\pi}{2}\beta^2\right) + \text{sen}\left(i\frac{\pi}{2}\beta^2\right) \right] d\beta \right\}$$

$$A(y) = \frac{1}{\sqrt{2}} \{ [C(\beta_2) - C(\beta_1)] + i[S(\beta_2) - S(\beta_1)] \}$$

Con respecto a lo anterior se adiciona los términos $A(x)$ e $A(y)$ a la *Ecuación 2.17*, resultando la *Ecuación 2.22*:

$$U(x, y) = \frac{U_0 e^{ikz}}{2i} \{ [C(\alpha_2) - C(\alpha_1)] + i[S(\alpha_2) - S(\alpha_1)] \} \\ \times \{ [C(\beta_2) - C(\beta_1)] + i[S(\beta_2) - S(\beta_1)] \} \quad \text{Ecuación 2.22}$$

Finalmente calculando la intensidad del frente de onda final $I(x, y) = |U(x, y)|^2$, se obtiene la distribución de intensidad de la difracción de Fresnel [10], *Ecuación 2.23*:

$$I(x, y) = \frac{I_0}{4} \{ [C(\alpha_2) - C(\alpha_1)]^2 + [S(\alpha_2) - S(\alpha_1)]^2 \} \\ \times \{ [C(\beta_2) - C(\beta_1)]^2 + [S(\beta_2) - S(\beta_1)]^2 \} \quad \text{Ecuación 2.23}$$

Esta describe en forma matemática el fenómeno de difracción de Fresnel presentado a una distancia z con respecto a una abertura cuadrada iluminada por un haz de luz con longitud de onda λ .

2.3.2 DIFRACCIÓN DE FRESNEL EN BORDES RECTOS

Con fundamento en la deducción matemática de una abertura cuadrada, esta puede ser extrapolada a la condición de una pantalla opaca semi-infinita en términos generales a un borde de un obstáculo no transparente.

Empleando la *Ecuación 2.23*, definiendo como límites de integración $\alpha_2 = \beta_2 = \infty$; $\alpha_1 = -\infty$ y empleando la integral definida:

$$\int_0^{\infty} \text{sen}(ax^2) dx = \int_0^{\infty} \text{sen}(ax^2) dx = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\pi}{2a}} \\ I(x, y) = \frac{I_0}{2} \left\{ \left[\frac{1}{2} - C(\beta_1) \right]^2 + \left[\frac{1}{2} - S(\beta_1) \right]^2 \right\} \quad \text{Ecuación 2.24}$$

Se obtiene la *Ecuación 2.24* que define el comportamiento de la difracción de Fresnel en un borde recto [8][11], mostrada en la *Figura 2.9*, en la cual se observa que la intensidad de cada orden de difracción está en función de su ubicación con respecto al borde recto (dado por β_1).

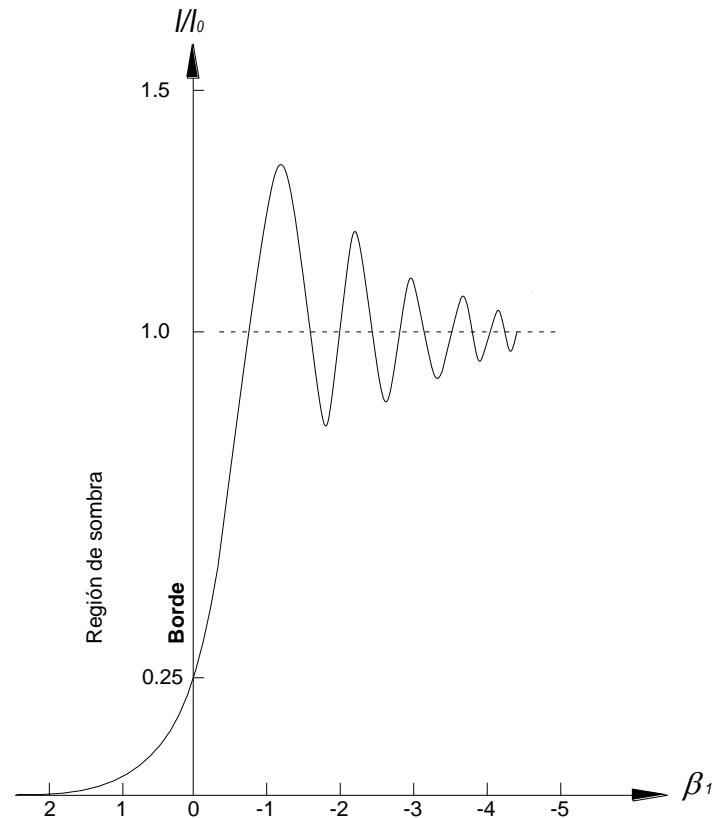


Figura 2.9 Distribución de intensidad del patrón de difracción de Fresnel en un borde recto.

Analizando el patrón de difracción en la ubicación del borde, $\beta_1=0$, y sustituyendo este valor en la *Ecuación 2.24* se determina la irradiancia [11], *Ecuación 2.25*:

$$\frac{I}{I_0} = \frac{1}{4} \quad \text{Ecuación 2.25}$$

El cual es considerado como uno de los parámetros base de este trabajo de tesis para la determinación de la ubicación del borde recto.

2.4 PROCESAMIENTO DIGITAL DE SEÑALES

Una señal en términos generales es un fenómeno que varía con respecto a una variable y que puede ser medido. La generación de las señales está asociada a sistemas estimulados o forzados. Un sistema se puede definir como un dispositivo que realiza una operación en una señal [12]. Adicionalmente los sistemas están integrados por operaciones, dentro de las cuales se encuentra el procesamiento de la señal, que puede ser llevado a cabo en forma física (hardware) o empleando software. En específico el software emplea algoritmos matemáticos para llevar a cabo el procesamiento de señales.

La gama de señales se encuentra clasificada en dos ramas, señales analógicas (señales continuas) y digitales (señales discretas), la diferencia entre una y otra se

encuentra en la relación valores- espacio, las señales analógicas se definen por cada valor espacial y toman valores en intervalos continuos. Caso contrario, las señales digitales se definen solo en ciertos valores específicos espaciales (ver *Figura 2.10*), donde "X" designa un valor espacial.

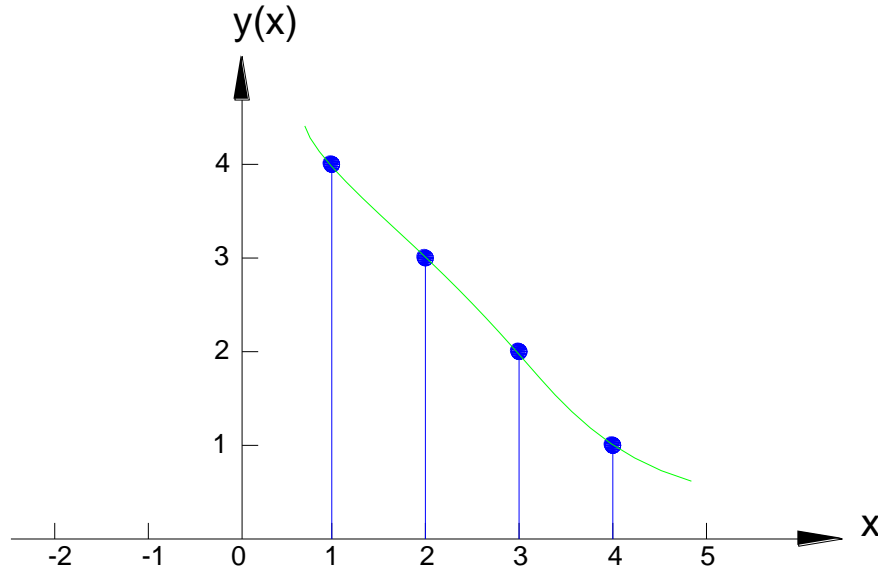


Figura 2.10 Gráfica representativa de una señal analógica (grafico en verde) y una señal digital (grafico en azul).

Las señales analógicas son las más comúnmente encontradas en la ciencia e ingeniería pero debido a los avances tecnológicos se ha enfocado el empleo de convertidores analógicos-digitales con el objetivo de emplear los procesadores para llevar a cabo el tratamiento de las señales mediante software (ver *Figura 2.11*).

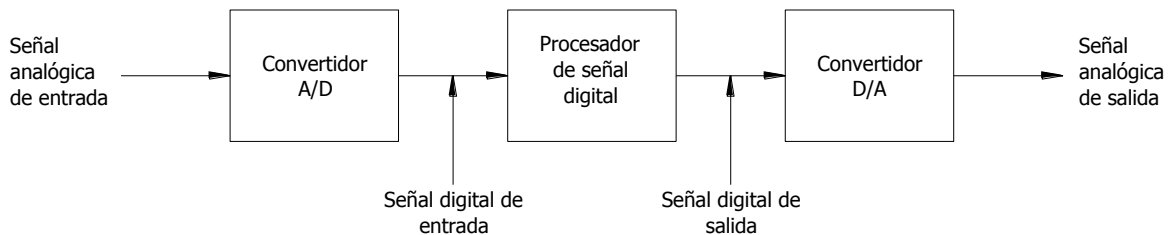


Figura 2.11 Diagrama de bloques del sistema de procesamiento digital de señales (A/D: Analógico/Digital).

Adicional a lo anterior se encuentran otras ventajas del empleo de señales digitales con respecto a las señales analógicas tales como:

- a. Los sistemas programables digitales permiten flexibilidad de cambios.
- b. La precisión y el control de los requerimientos de precisión.
- c. Almacenamiento.
- d. Procesamiento remoto.
- e. Implementación de algoritmos complejos.

La conversión Digital-Analógica observada en la *Figura 2.11* es la interconexión de puntos (muestreo) empleando un tipo de interpolación tal como cero-orden o aproximación escalera, interpolación lineal, interpolación cuadrática o de orden superior (ver *Figura 2.12*).

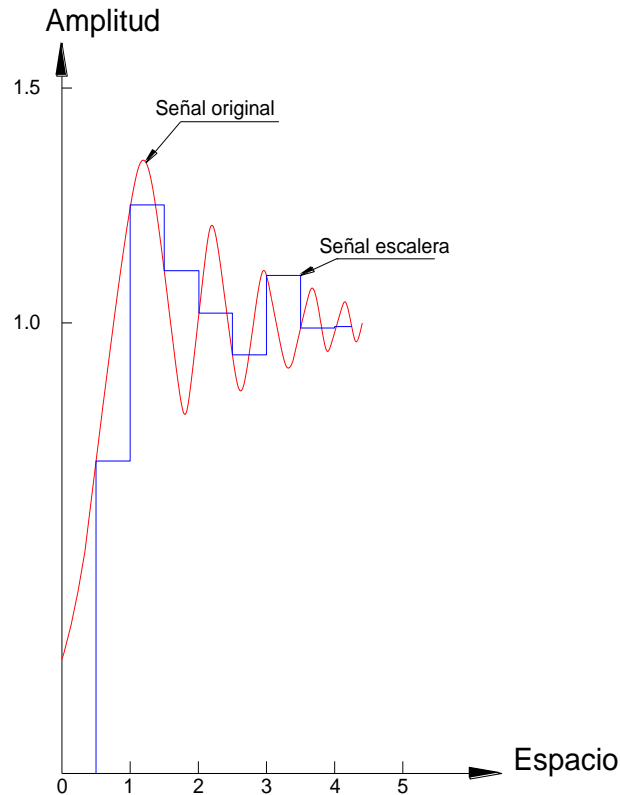


Figura 2.12 Convertidor Digital-Analógico basado en interpolación cero-orden; señal original (grafico en rojo), señal escalera (grafico en azul).

Una desventaja dentro de la etapa de conversión señal Digital-Analógica es el efecto '*aliasing*' que es la distorsión de la señal analógica al momento de reconstruirla empleando el bajo muestreo digital, ya que se torna indistinguible con respecto a la señal analógica original.

A pesar de esta desventaja el procesamiento digital de señales sigue siendo empleado tanto en el dominio del tiempo, espacio o frecuencia.

2.4.1 ANÁLISIS FRECUENCIAL DE SEÑALES

El análisis de frecuencia está conformado por tres etapas principalmente (ver *Figura 2.13*):

- Transformada de Fourier de la señal de entrada.
- Aplicación de filtro de frecuencia (Aplicación del teorema de convolución al espectro de frecuencia de entrada) para la selección de frecuencias.
- Transformada inversa de Fourier de la señal resultante del filtro, obteniendo la señal de salida.

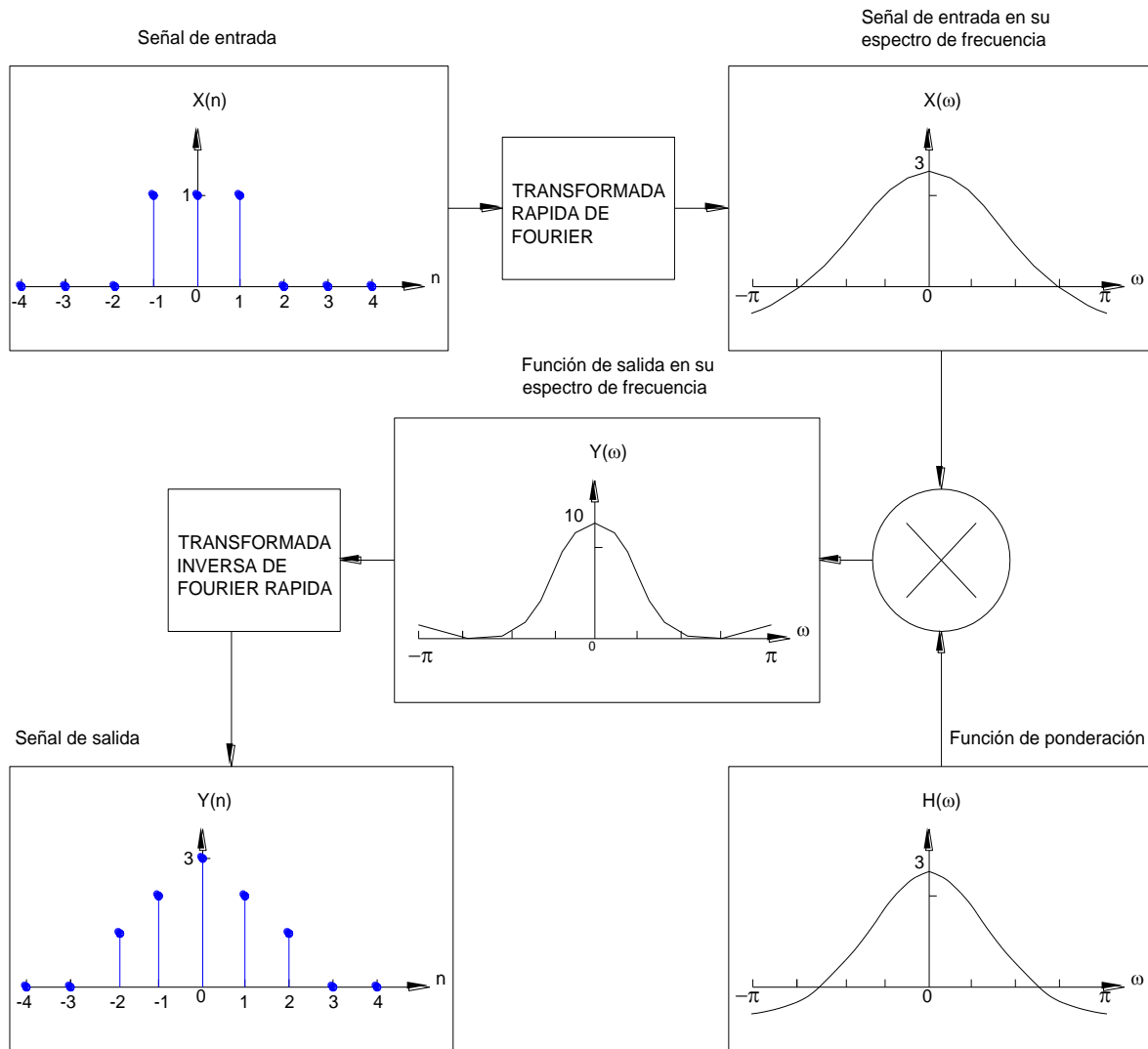


Figura 2.13 Representación gráfica del análisis frecuencial de señales.

La transformada de Fourier es una herramienta matemática empleada para representar una señal en el dominio de la frecuencia con el objetivo de analizar las señales en base a los diferentes modos de frecuencias que las integran y así eliminar o discriminar frecuencias generadas por ruidos o señales externas al fenómeno medido.

A estos elementos selectivos de frecuencia se les llama filtros los cuales modifican el espectro de frecuencia de la señal de entrada $X(\omega)$ de acuerdo a su frecuencia de respuesta $H(\omega)$ dando como resultado un espectro de salida $Y(\omega) = X(\omega)H(\omega)$, comúnmente a $H(\omega)$ es llamada función de ponderación o de formación espectral o de transferencia.

Los filtros son clasificados acorde a su dominio de frecuencia en [12]:

- Filtro pasabajas.
- Filtro pasaaltas.

- c. Filtro pasabandas.
- d. Filtro de supresión de bandas.

La magnitud ideal de respuesta que caracteriza a estos filtros se muestra en la *Figura 2.14*, estos filtros tienen una ganancia unitaria por lo cual la señal de entrada no es modificada en magnitud.

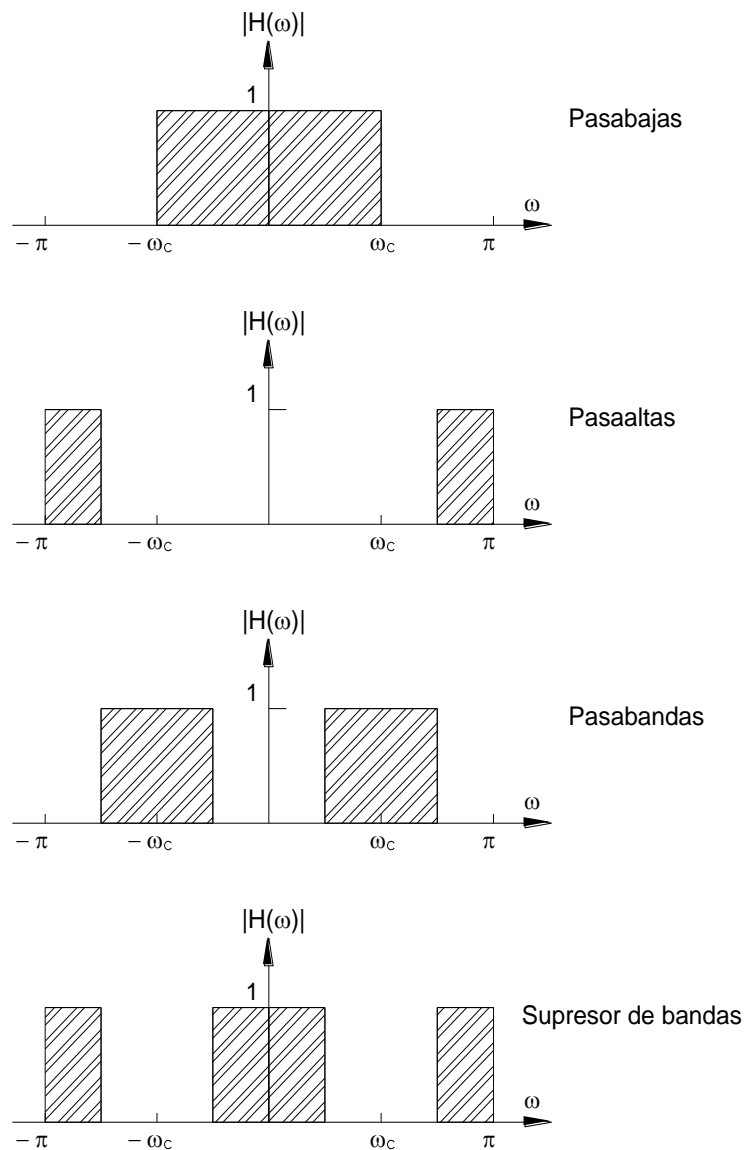


Figura 2.14 Tipos de Filtros ideales en el espectro de frecuencia.

En específico los filtros pasabajas y pasaaltas pueden tener varias formas como: ideal (lineal), Butterworth o Gaussiana ver *Figura 2.15*. Los cuales se caracterizan por su ecuación de ponderación [12][13], mostradas en la *Tabla 2.1*.

Forma del filtro	Función de ponderación	
	Filtro Pasabajas	Filtro Pasaaltas
Ideal	$H(\omega) = \begin{cases} 1 & \text{si } D(\omega) \leq D_0 \\ 0 & \text{si } D(\omega) > D_0 \end{cases}$	$H(\omega) = \begin{cases} 0 & \text{si } D(\omega) \leq D_0 \\ 1 & \text{si } D(\omega) > D_0 \end{cases}$
Butterworth	$H(\omega) = \frac{1}{1 + [D(\omega)/D_0]^{2n}}$	$H(\omega) = 1 - \left\{ \frac{1}{1 + [D(\omega)/D_0]^{2n}} \right\}$
Gaussiano	$H(\omega) = e^{-D(\omega)/2\sigma^2}$	$H(\omega) = 1 - e^{-D(\omega)/2\sigma^2}$

Tabla 2.1 Funciones ponderadas para las diferentes formas de filtros Pasabajas y Pasaaltas.

Donde:

$D(\omega)$: Distancia desde la frecuencia ω al centro del filtro.

D_0 : Frecuencia de corte del filtro.

n : Orden del filtro.

σ : Desviación estándar.

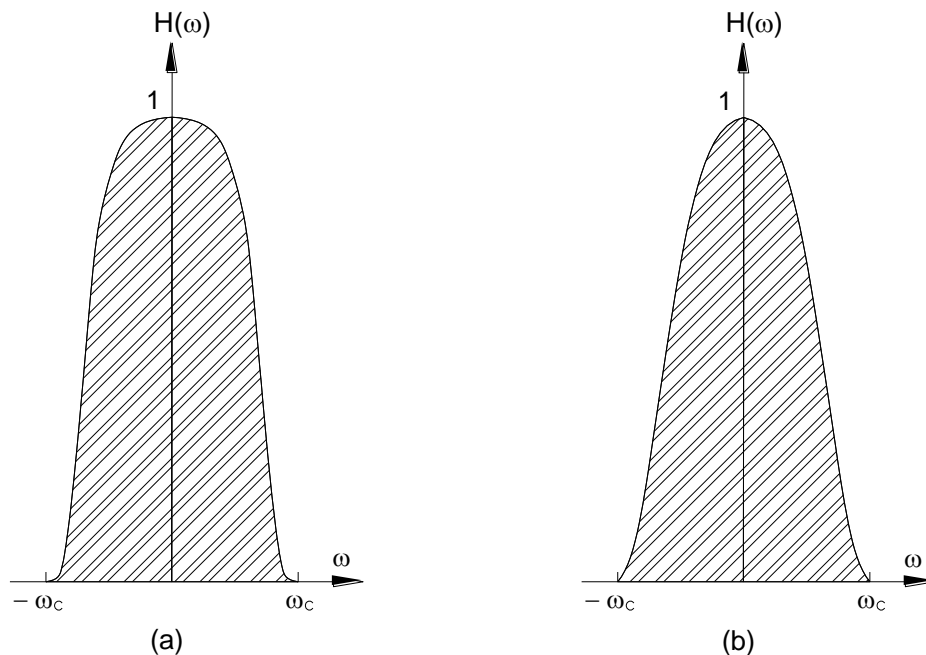


Figura 2.15 Forma de los filtros pasabajas; (a) Butterworth, (b) Gaussiano.

2.5 FORMACIÓN DE IMÁGENES EN SENSORES CCD

Como se indicó anteriormente una parte principal del procesamiento digital es el dispositivo o sensor que convierte la señal analógica a digital (A/D), en el caso específico de los sistemas de visión este dispositivo es una cámara.

2.5.1 CAPTURA DE IMÁGENES

Para llevar a cabo la adquisición de imágenes son necesarios dos elementos. Un elemento que es sensible a determinada banda del espectro electromagnético y el elemento digitalizador, el cual discretiza la señal continua en localizaciones del plano de imagen, posteriormente las cuantifica espacialmente y en amplitud obteniendo la imagen ver *Figura 2.16* [14].

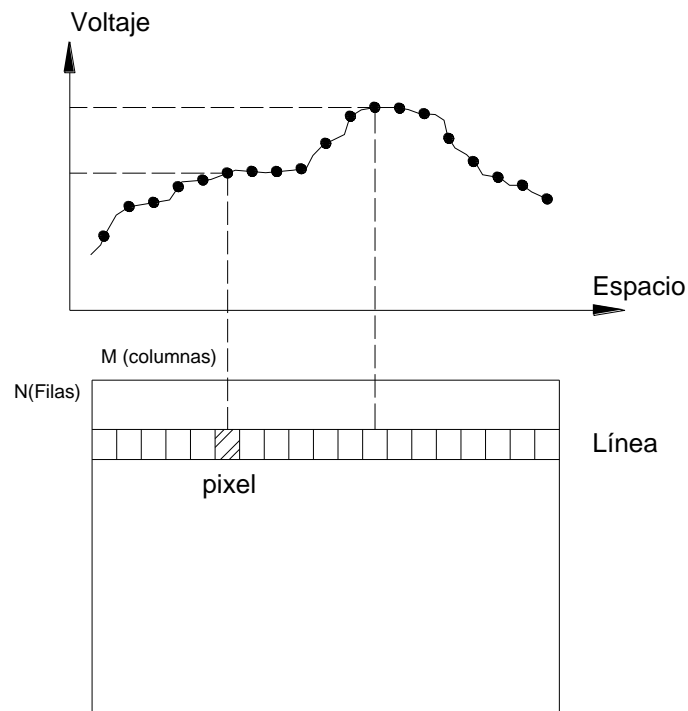


Figura 2.16 Digitalización de una imagen.

Dentro de los elementos de captura de imagen se encuentran principalmente los CCD (Dispositivo de acoplamiento de carga) y CMOS (semiconductor complementario de óxido de metal) en distintas configuraciones. Los sensores se clasifican también en dos tipos: de línea y de área. El sensor de línea está integrado de una línea con M elementos semiconductores llamados fotosites que son excitados por los fotones procedentes de la fuente, de forma que el grado de excitación es proporcional a la intensidad luminosa. Por otra parte, los sensores de área están integrados por una matriz de $M \times N$ fotosites y opera de la misma forma que el sensor de línea.

2.5.2 CAPTURA DE VALORES DE INTENSIDAD EMPLEANDO SENSORES CCD

La imagen obtenida empleando cualquier sensor CCD se presenta espacialmente en forma de matriz con una resolución de $M \times N$ píxeles (picture element) y con un

nivel de precisión de intensidad dependiente de la profundidad de bits, 8 bits (0-255 niveles de intensidad) y 16 bits (0-65535 niveles de intensidad). A su vez una imagen podrá estar integrada por varias matrices, dependiendo del tipo de imagen, escala de grises (1 matriz) o a color (RGB) integrada por 3 matrices (roja, verde y azul).

3. METROLOGÍA

La metrología es la ciencia que trata de las medidas, de los sistemas de unidades adoptados y los instrumentos usados para efectuarlas e interpretarlas [15].

La metrología está fundamentada en una normalización como parte del control, ya que es el proceso de formular y aplicar reglas para una aproximación ordenada de la medición. Empleando este criterio en la actividad industrial la normalización es un conjunto de reglas que se emplean como referencia para definir si un producto se encuentra dentro de las especificaciones, exigencias o requerimiento del producto, proceso o servicio. Las normas pueden estar clasificadas según su nivel: en internacionales, Regionales, Nacionales, Asociación y hasta llegar al último nivel que es la empresa.

Algunos ejemplos de normas se mencionan a en la *Figura 3.1* y *Tabla 3.1*:

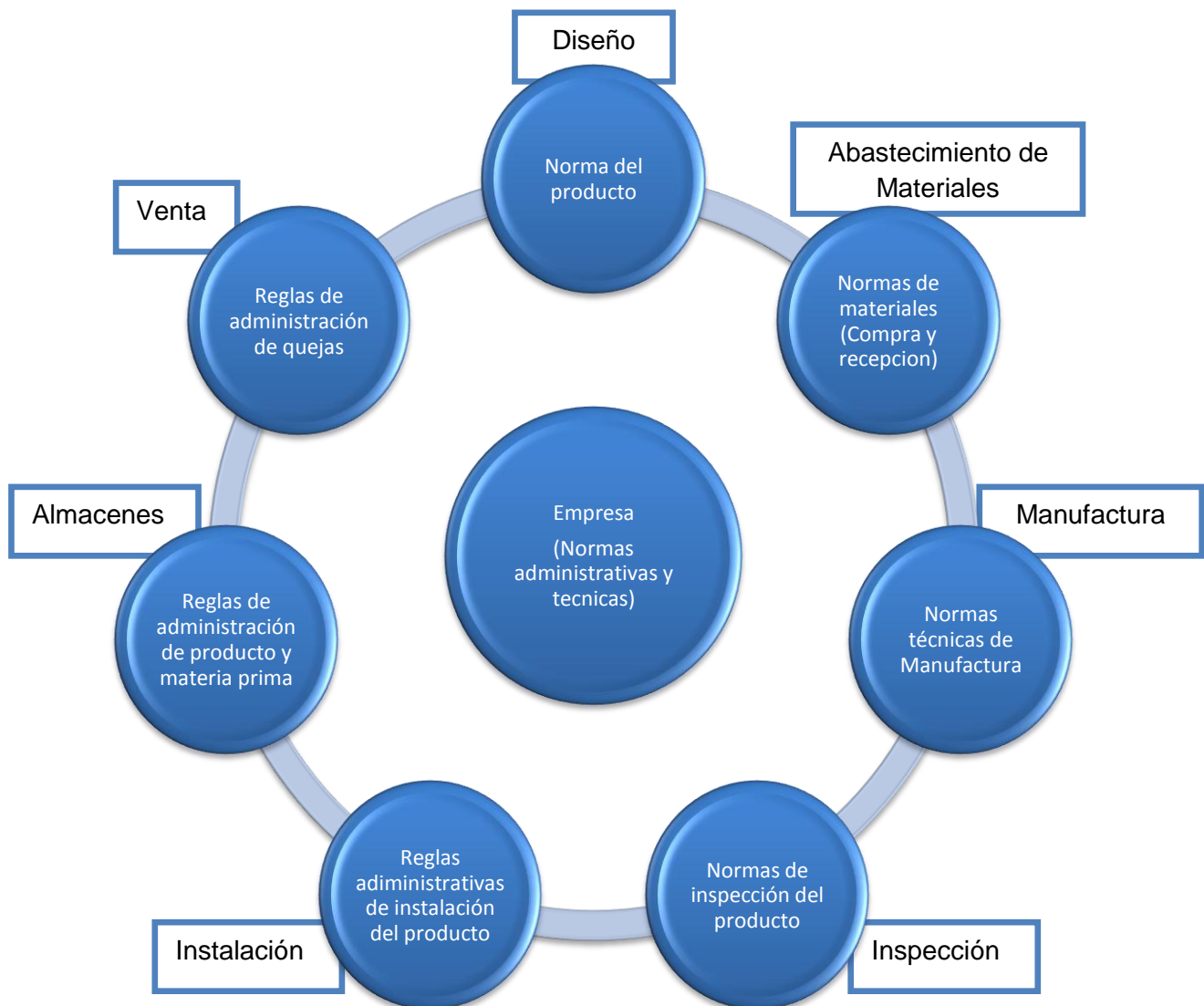


Figura 3.1 Ejemplo de normas de una empresa.

3.1 METROLOGÍA DIMENSIONAL

La metrología dimensional se encarga de estudiar las técnicas de medición que determinan correctamente las magnitudes lineales y angulares (longitudes y ángulos) [15]. La medición se clasifica en directa e indirecta, la medición directa es la que se obtiene de los aparatos de medición y la indirecta es aquella que se obtiene al comparar el valor con un patrón de referencia.

A continuación en la *Figura 3.3* se muestra la clasificación de instrumentos y aparatos de medición lineal [16]:

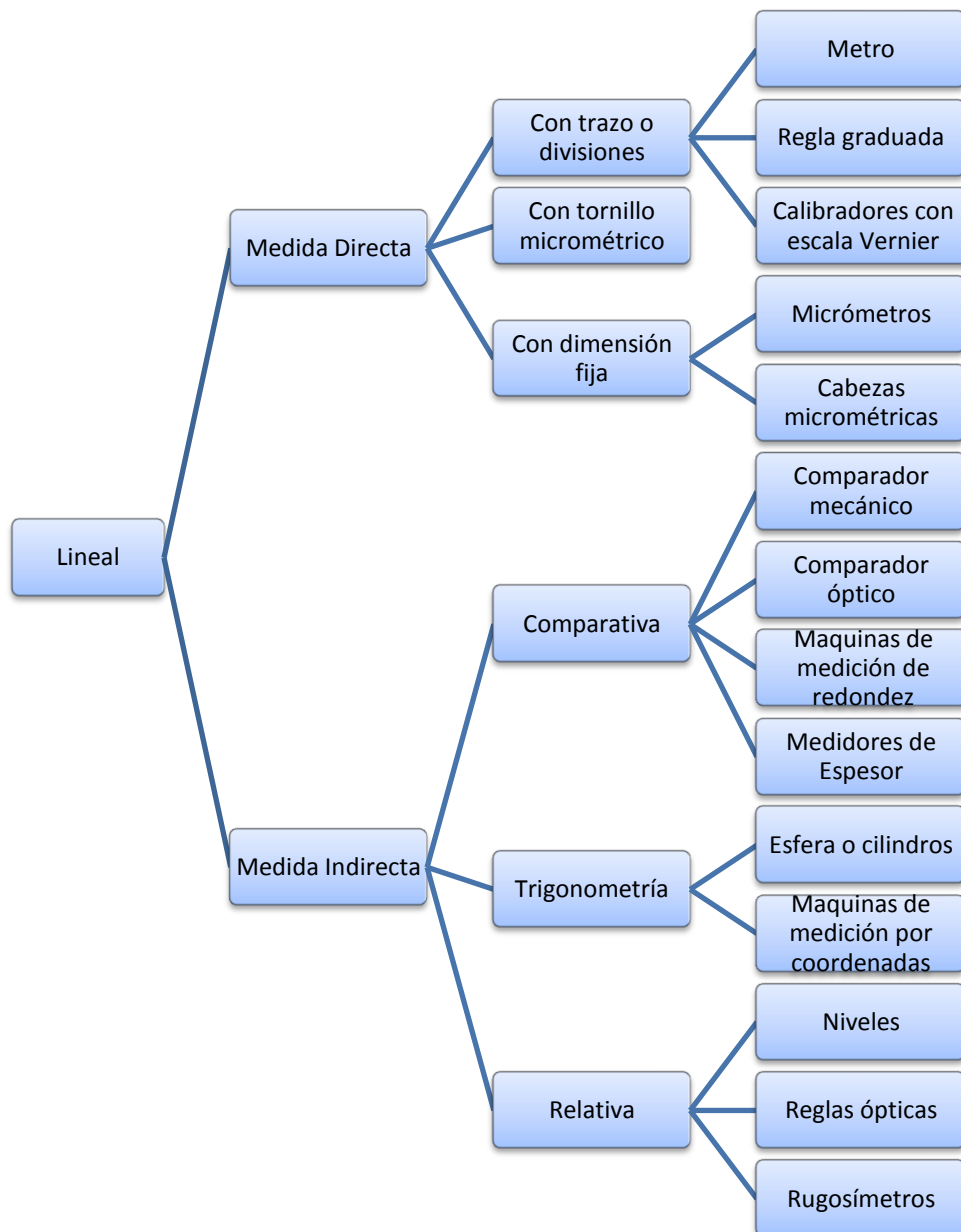


Figura 3.3 Clasificación de instrumentos y aparatos de medición en metrología dimensional lineal.

De forma similar se encuentra otra forma de clasificar la metrología dimensional en base al proceso de medición (ver *Figura 3.4*) [17]. Como referencia en este trabajo solo será considerada la inspección dimensional después del proceso.

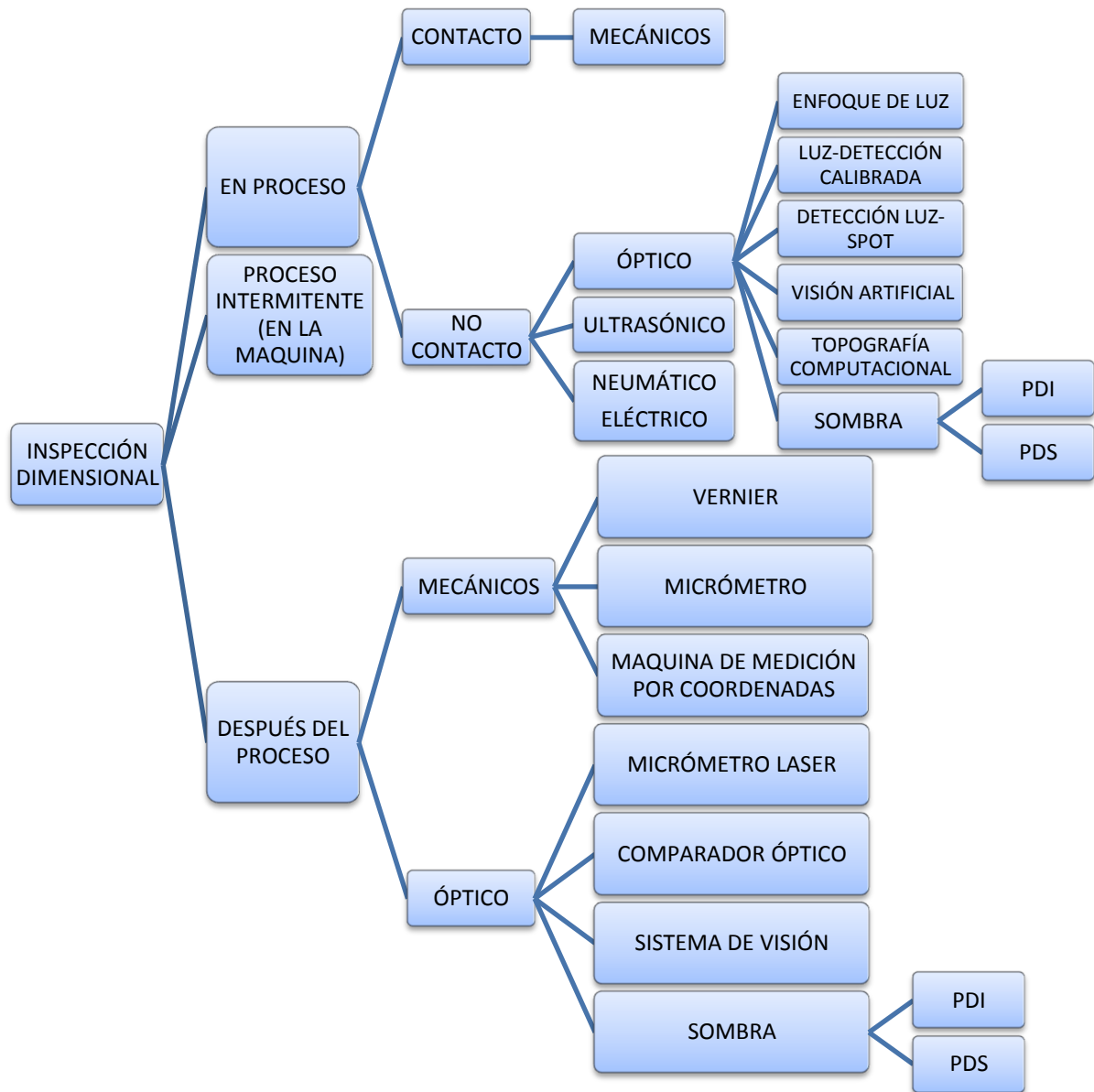


Figura 3.4 Clasificación de la metrología dimensional en base a su proceso. (PDI: Procesamiento digital de imágenes, PDS: Procesamiento digital de señales).

Como se observa en la *Figura 3.2* las dimensiones están compuestas por su valor nominal y una desviación con respecto a ella llamadas tolerancias dimensionales. Adicional a estas tolerancias en la metrología dimensional se encuentran las

tolerancias geométricas empleadas para controlar forma, orientación, localización y alabeo (ver *Tabla 3.2*) [18].

Tipo de Tolerancia	Características	Símbolos
Forma	Rectitud	—
	Planitud	
	Redondez	
	Cilindricidad	
	Perfil de una línea	
	Perfil de una superficie	
Orientación	Paralelismo	//
	Perpendicularidad	
	Angularidad	
Localización	Posición	
	Concentricidad o coaxialidad	
	Simetría	
Alabeo	Alabeo circular	
	Alabeo total	

Tabla 3.2 Símbolos de características geométricas en mediciones dimensionales.

3.2 ERRORES EN LA MEDICIÓN

Un error en metrología se puede definir como “La diferencia entre el resultado obtenido en una medición y el valor verdadero de la misma que siempre es desconocido”[19]. Los errores se clasifican en errores sistemáticos y aleatorios, el error sistemático es aquel que permanece constante en valor absoluto y signo al medir una magnitud en la misma condición, que se genera por causas controlables y con posibilidad de eliminación. Por ejemplo un aparato averiado.

Por su parte los errores aleatorios como su nombre lo indica dependen de condiciones aleatorias y no previsibles. La inclusión del error trae como consecuencia la incertidumbre que es la cuantificación de precisión, la cual se representa como: $A \pm i$ donde A representa el valor medido e i_e la incertidumbre determinada de acuerdo a la *Ecuación 3.1* [16].

$$i_e = \text{valor maximo} - \text{valor minimo} \quad \text{Ecuación 3.1}$$

Adicional a estos términos se encuentra el error absoluto, error relativo definido por la *Ecuación 3.2* y *Ecuación 3.3*.

$$\text{Error absoluto} = \text{valor leído} - \text{valor convencional verdadero} \quad \text{Ecuación 3.2}$$

$$\text{Error relativo} = \frac{\text{Error absoluto}}{\text{Valor convencional verdadero}} \quad \text{Ecuación 3.3}$$

Los errores están clasificados acorde a la causa que los genera y que se enlistan en la *Figura 3.5*:

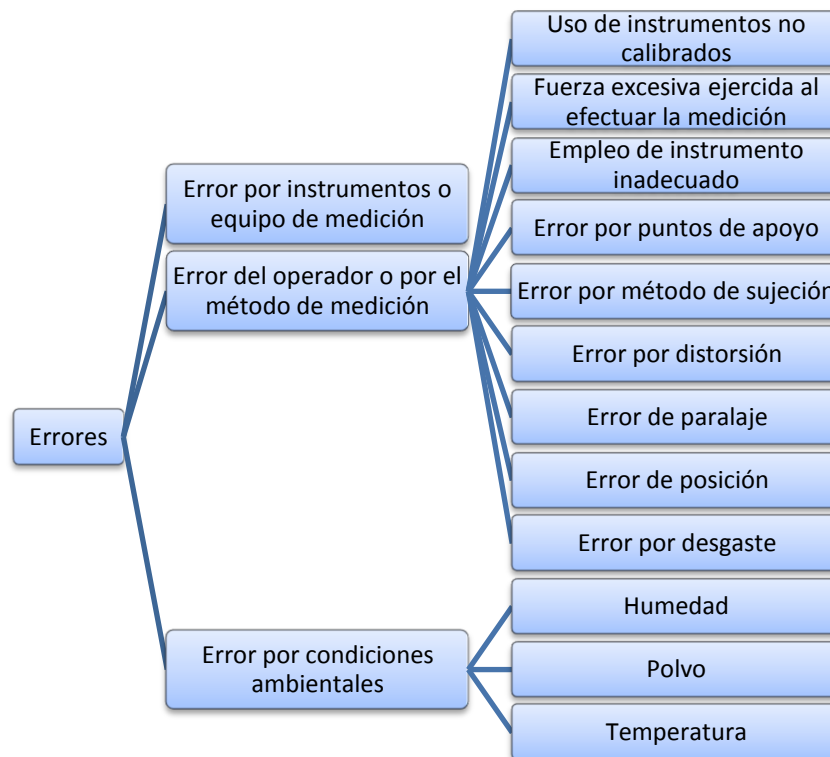


Figura 3.5 Clasificación de los errores acorde a su origen.

a) Errores por instrumentos de medición o equipo de medición

Estos errores son establecidos en normas o más comúnmente en la información técnica del fabricante y puede ser determinada mediante la calibración. Como parte de una contramedida para evitar este error es llevar a cabo un programa de calibración de instrumentos.

b) Errores del operador o por el método de medición

Dentro de las causas se encuentra la agudeza visual, el descuido, cansancio, la falta de orden en el proceso de medición y apego a la metodología.

Por su parte la selección de un instrumento de medición debe considerar una resolución idealmente de 10 a 1 con respecto a la tolerancia de la pieza de trabajo o de 5 a 1 en el peor de los casos. Cuando no se satisface la razón 10 a 1 se deberá llevar a cabo la medición en forma repetida para asegurar la confiabilidad de la medición. Adicionalmente la máxima exactitud en la medición se obtiene

- Si el eje de medición y el eje del instrumento es el mismo.
- La posición del observador al momento de la medición es perpendicular al plano de medición.

c) Error por condiciones ambientales

Para minimizar los errores debidos a la temperatura se estableció internacionalmente, desde 1932, como norma una temperatura de 20°C para efectuar las mediciones. También es buena práctica dejar que durante un tiempo se estabilice la temperatura tanto de la pieza por medir como del instrumento de medición [19].

Las variaciones por temperatura se pueden determinar a través de la *Ecuación 3.4*.

$$L = L_0 [1 + (\alpha \Delta T)] \quad \text{Ecuación 3.4}$$

Donde:

L: Longitud final.

α: Coeficiente de expansión térmica del material. [Acero al carbono; $\alpha=11.7 \cdot 10^{-6} / ^\circ\text{C}$].

L₀: Longitud original de la pieza.

ΔT: Incremento de Temperatura.

3.3 INSPECCIÓN DIMENSIONAL A TRAVES DE MÉTODOS MECÁNICOS O DE CONTACTO

Como se mostró en la *Figura 3.3* y *Figura 3.4* dentro de los métodos de inspección mecánico o de contacto empleados a nivel industrial se encuentran principalmente: el Calibrador Viernier, el micrómetro y la máquina de medición por coordenadas.

3.3.1 MÉTODOS MECÁNICOS DE MEDICIÓN

A. Calibrador Vernier

El calibrador Vernier es un instrumento empleado para medir longitudes, espesores, diámetros internos, diámetros externos y profundidades en una pieza. Se compone por una regla graduada, con una barra fija sobre la cual se desliza el cursor ver *Figura 3.6* y *Figura 3.7*.

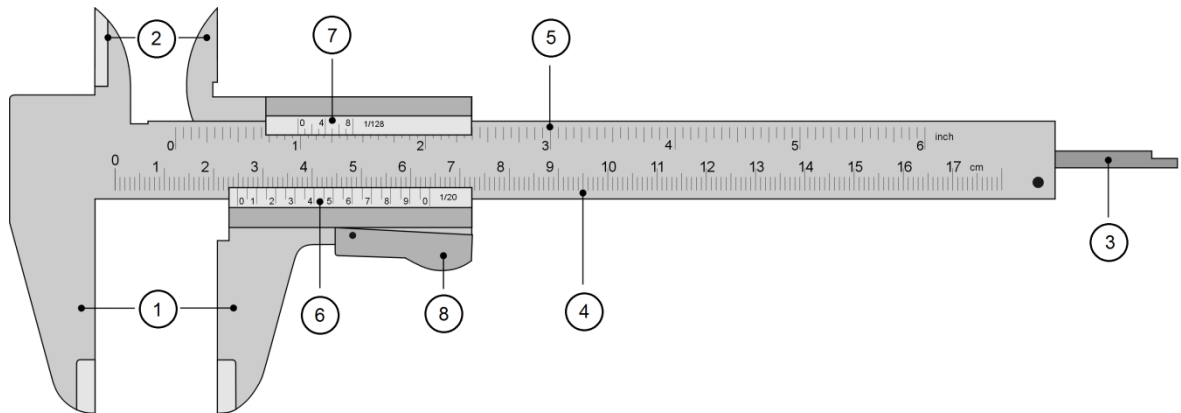


Figura 3.6 Calibrador Vernier estándar.

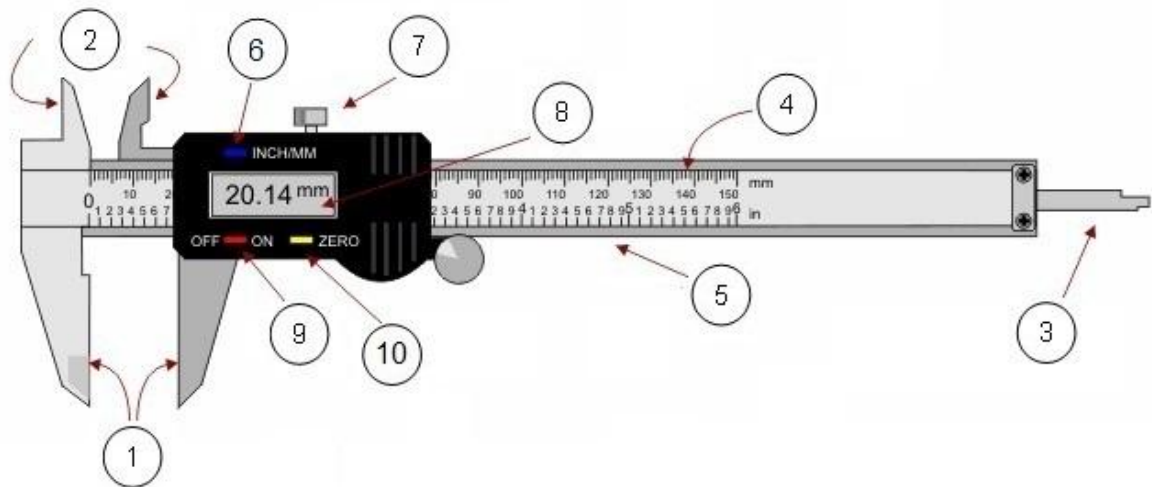


Figura 3.7 Calibrador Vernier Digital.

Partes comunes del calibrador Vernier estándar y calibrador Vernier digital [16][20]:

1. Mordazas para medición de exteriores
2. Mordazas para medición de interiores
3. Barra para medición de profundidad
4. Escala con división en centímetros y milímetros.

5. Escala con división en pulgadas y fracciones de pulgada

Partes del Calibrador Vernier estándar:

6. Nonio para la lectura de las fracciones de milímetros y fracciones de pulgada en que se divide.
7. Botón de deslizamiento y freno.

Partes del calibrador Vernier Digital:

6. Botón mm/pulgadas
7. Tornillo de fijación
8. Indicador LCD
9. Botón de encendido ON/OFF
10. Cero de configuración

B. Micrómetro

El micrómetro es un dispositivo que convierte un movimiento giratorio en un desplazamiento lineal, involucrando para esto un tornillo de alta precisión llamado husillo y un elemento graduado llamado tambor. El desplazamiento de este lo amplifica la rotación del tornillo y el diámetro del tambor. Las graduaciones alrededor de la circunferencia del tambor permiten leer variaciones hasta de micrómetros.

La conversión del movimiento giratorio a desplazamiento lineal está basada en la *Ecuación 3.5* [15]:

$$x = p\alpha / 2\pi \quad \text{Ecuación 3.5}$$

Donde:

x : Desplazamiento del husillo (mm).

p : Paso de los hilos del tornillo (mm).

α : Ángulo de giro del tornillo (radianes).

Estos instrumentos a su vez son empleados para medir profundidades, espesores y diámetros externos e internos.

Los elementos que integran a estos instrumentos son mostrados a continuación en la *Figura 3.8* y *Figura 3.9*.

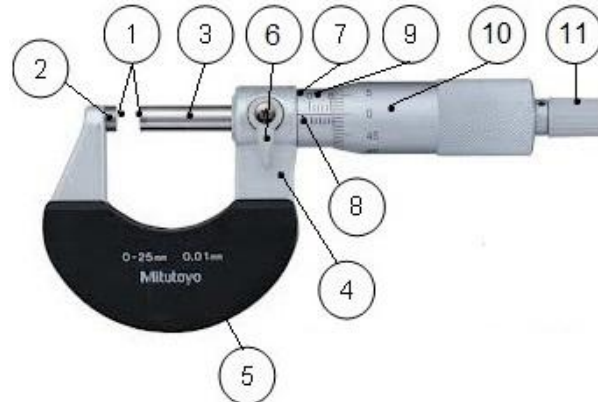


Figura 3.8 Micrómetro estándar



Figura 3.9 Micrómetro digital

Partes comunes del micrómetro estándar y micrómetro digital[16][20]:

1. Caras de medición.
2. Punto fijo.
3. Husillo de medición.
4. Marco.
5. Placas de aislamiento térmico.
6. Freno del husillo.
7. Cilindro.
8. Línea de referencia.
9. Indicación analógica
10. Tambor
11. Trinquete

Partes del micrómetro Digital:

12. Indicador LCD
13. Botón mm/pulgadas
14. Configuración de origen
15. Cero/Absoluto
16. Botón para mantener la medición.

C. Maquina de Medición por coordenadas (CMM)

Estos instrumentos de medición automáticos emplean como principio de operación el movimiento en el sistema de coordenadas XYZ o recorrido ortogonal de un palpador físico, el cual es ubicado en cada punto de interés de la pieza a medir como se ve en la *Figura 3.10*. Al ubicar los puntos en el plano de coordenadas el sistema de medición de desplazamiento (que se encuentran en cada eje) lleva a cabo la correlación de estos puntos con su punto de referencia (Cero del sistema). Debido a su principio de operación el sistema se emplea para medir, distancias, posiciones relativas, ángulos, diámetros, longitudes, espesores, formas, etc.

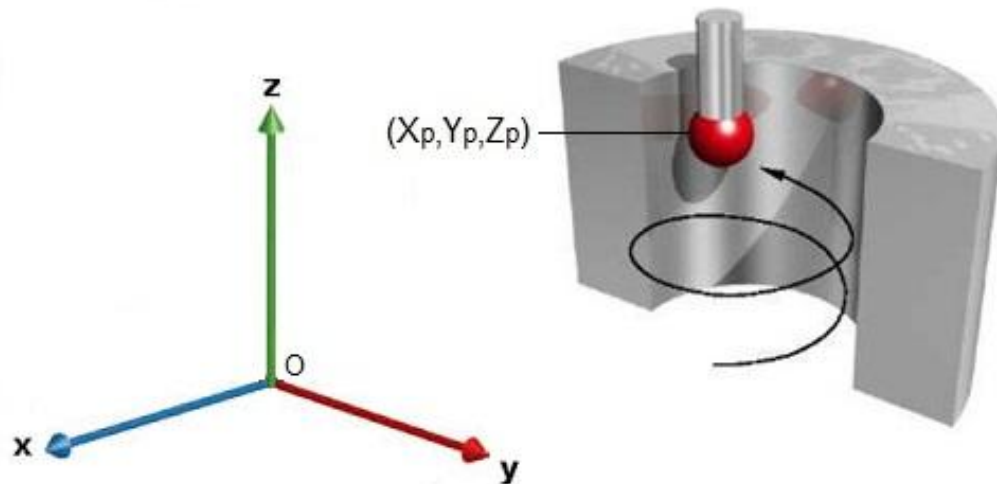


Figura 3.10 Sistema cartesiano XYZ empleado para medir el diámetro interior de una pieza cilíndrica.

Los elementos que integran en general a este instrumento son mostrados en la *Figura 3.11*.



Figura 3.11 Instrumento de medición por coordenadas (CMM por sus siglas en ingles).

1. Mecanismo de movimiento en el eje X.
2. Mecanismo de movimiento en el eje Y.
3. Mecanismo de movimiento en el eje Z.
4. Base de la máquina o mesa.
5. Palpadores (mecánicos, palpador de señal de contacto).

El instrumento CMM emplea para su automatización el sistema de control numérico (CNC por sus siglas en ingles) y en ocasiones puede ser complementado con el sistema de diseño asistido por computadora (CAD por sus siglas en ingles).

Los sistemas CMM se clasifican en tres grupos acorde a su método de operación: CMM manual, CMM controlado por motor y CMM CNC [20].

Como su nombre lo indica en el CMM manual, el operador mueve de forma manual el palpador en los ejes XYZ. En el caso del CMM controlado por motor sus mecanismo de movimiento son operados mediante un control remoto, por su parte CMM CNC emplea la programación de comandos los cuales le indican la trayectoria de operación automática empleando sistemas de retroalimentación de posición. Además de estas ventajas el sistema CMM CNC mantiene constante su aceleración y velocidad de

recorrido logrando la eliminación del error humano al momento de ubicar el palpador.

La *Figura 3.12* muestra el sistema de configuración estándar de la CMM. Los sistemas de medición de desplazamiento, incorporados en cada uno de los tres ejes, detectan la posición del palpador. Cuando una señal de interrupción, entrada de dato, es mandada por el palpador o por el interruptor, los valores del contador se envían a la unidad de procesamiento de datos, la cual ejecuta cálculos de esos valores de acuerdo con las formulas programadas [4].

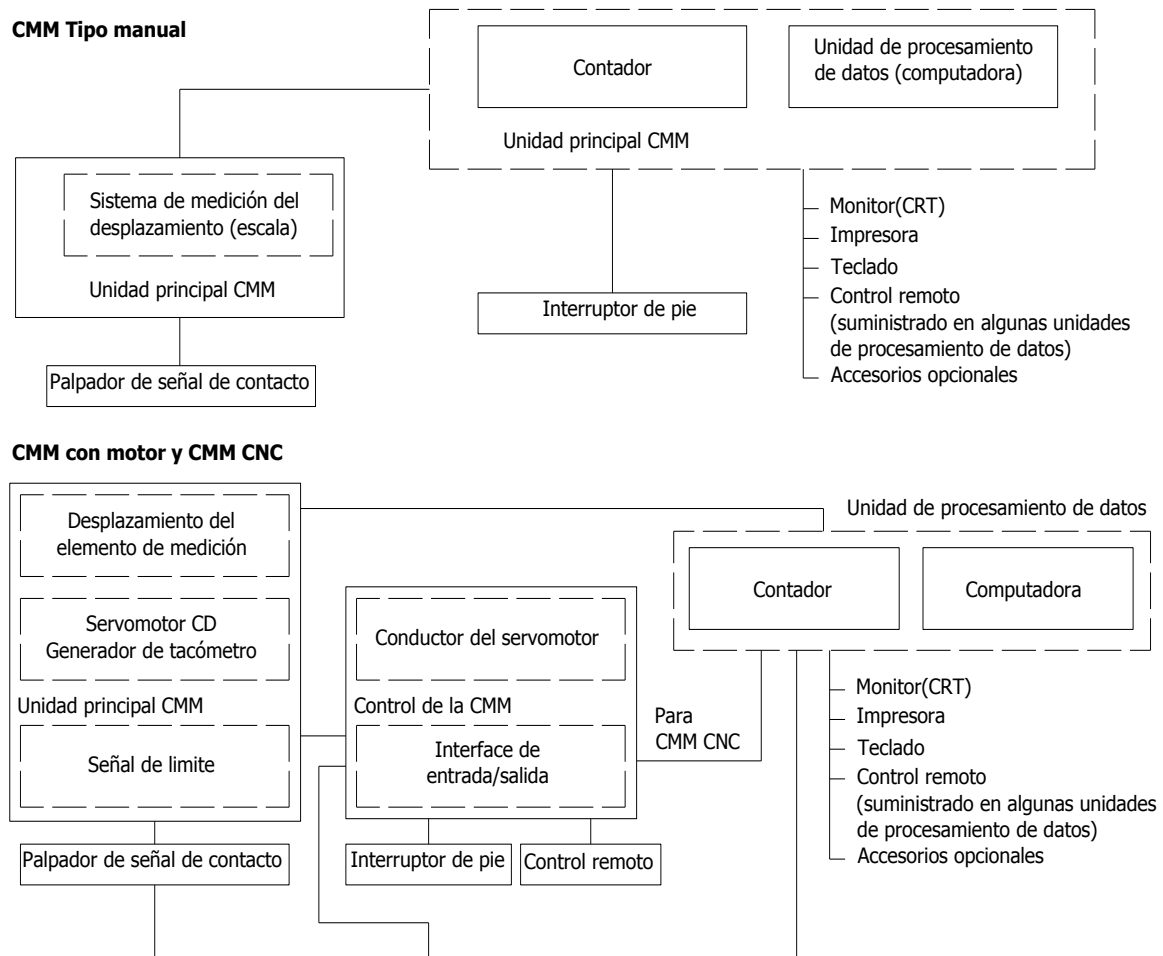


Figura 3.12 Configuración estándar del sistema CMM.

- **Ventajas con respecto a los instrumentos convencionales de medición**
 - a. La inspección dimensional no requiere expertos y experiencia para asegurar una medición
 - b. Reducción del tiempo de inspección.

- c. Efectúa mediciones complicadas de hacer con métodos convencionales tales como: contornos, mediciones dentro de orificios.
- d. Minimización de errores humanos y disminución de fatiga del operador.
- e. Eliminación de accesorios de fijación y patrones de referencia.
- f. Manejo automático de los datos.
- g. Medición automática para el caso de los CMM CNC.
- h. Aumento en la resolución de sistema de medición hasta 0.0001mm.

3.3.2 RESOLUCIÓN DE LOS MÉTODOS MECÁNICOS

La resolución es la mínima variación de la magnitud a medir que es detectable por el instrumento de medición. Acorde a las especificaciones marcadas por el fabricante de instrumentos de medición Mitutoyo y Zeiss las resoluciones de los instrumentos mecánicos se encuentran entre el rango de 0.01 a 0.0001 mm (ver *Tabla 3.3*).

Dispositivo de Medición	Intervalo de medición	Resolución
Vernier	0 a 300mm	0.01 mm
Micrómetro	25 a 50 mm	0.001 mm
Maquina de Medición de Coordenadas	400 x 500 x 400mm	0.0001 mm

Tabla 3.3 Resolución de los dispositivos de medición mecánicos.

3.4 INSPECCIÓN DIMENSIONAL A TRAVES DE MÉTODOS DE NO CONTACTO

La exigencia de los sistemas internacionales de calidad (tal como ISO) por la búsqueda de una alta precisión en los productos finales, ha conducido a la industria metalmecánica a la búsqueda de sistemas de inspección dimensional automatizados y remotos (no contacto) en el que son eliminados en su mayoría los errores debidos al operador, a la metodología empleada en la medición y al desgaste o defectos en los elementos mecánicos de los instrumentos de contacto. Este trabajo se enfocará en sistemas ópticos que emplean la sombra de los objetos (Luz Blanca) y el fenómeno de difracción (Luz Laser) remotamente para llevar a cabo la medición.

3.4.1 MÉTODO ÓPTICO EMPLEANDO LUZ BLANCA

Se han presentado diversos métodos de no contacto en las tres últimas décadas para la medición de diámetros de ejes empleando como fuente la luz blanca, en primera instancia se encuentra K. Takesa et. al [21][17] que empleó una sola cámara en 1984. Este método determina el diámetro basado en un factor de amplificación de la imagen, la distancia focal y la longitud de la imagen a la CCD obtenida por un proceso de enfoque automático. Sin embargo las distorsiones de la lente no se consideraron.

Así mismo en 1998 E. Milana et. al [6], muestra un aparato opto-electrónico de medición para checar dimensiones lineales, integrado por un arreglo de dos renglones tanto de emisores de luz como de detectores alineados entre sí, ilustrado en la *Figura 3.13*. El haz de luz emitido es dirigido hacia la pieza de trabajo, dispuesta en una posición prefijada. La pieza de trabajo intercepta parcialmente el haz de luz, en función de sus dimensiones. La porción no interceptada del haz de luz llega al arreglo de detectores y por medio de procesamiento electrónico, se calcula las dimensiones de la pieza.

Para 1999, A. Harding [22] describe una medición en línea, sin contacto de tubos laminados en caliente de tamaño de hasta 66 mm de diámetro. El sistema de medición utiliza dos cámaras lineales y dos iluminadores. Las cámaras están instaladas en las plataformas móviles para proporcionar el movimiento de 2 dimensiones alrededor del tubo. La *Figura 3.14* muestra el diagrama esquemático del sistema. A través de la lente, se forma la imagen del tubo de laminado en caliente sobre las CCD. El diámetro del tubo caliente se conoce a partir de la producción del número de píxeles y el factor de magnificación.

En 2008, Song et al. [23- [25] empleo la proyección de dos haces paralelos de luz sobre los bordes del objeto cilíndrico, generando la sombra de los bordes del objeto, las cuales son captadas por dos cámaras, respectivamente (ver *Figura 3.15*). Con la captura de la sombra, el diámetro se obtiene por medio de la suma de la distancia entre las trayectorias de la luz (D_0) y las distancias de los bordes del objeto captadas por las cámaras (D_1 , D_2). Sin embargo, debido a la calibración micrométrica necesaria en orientación de las cámaras y la distancia entre las trayectorias de la luz se vuelve un sistema sensible y complejo con un posible error inherente debido a su calibración. Como estudio relativo y alternativo al trabajo de Song en 2009 Xinwen Gao et al. [26] introdujo un sistema telecéntrico de un solo haz de luz con el objetivo de medir piezas cilíndricas de diámetro entre 5 y 10 mm empleando como fuente, la luz infrarroja y el algoritmo de filtraje Kalman para el procesamiento digital de la señal. Posteriormente en 2011, Guan Wei et. al [5] presenta la medición de diámetros de ejes empleando la visión por computadora, una fuente de luz difusa controlada por una apertura rectangular proyectada sobre el eje formando la proyección de la sombra, la cual es capturada

por una cámara que está integrada por su lente formadora de imagen y un diafragma para controlar la luz capturada (ver *Figura 3.16*). La calibración del sistema incluye términos de distorsión radial, tangencial, la distorsión de la lente y perspectiva, aumentando la precisión de medición.

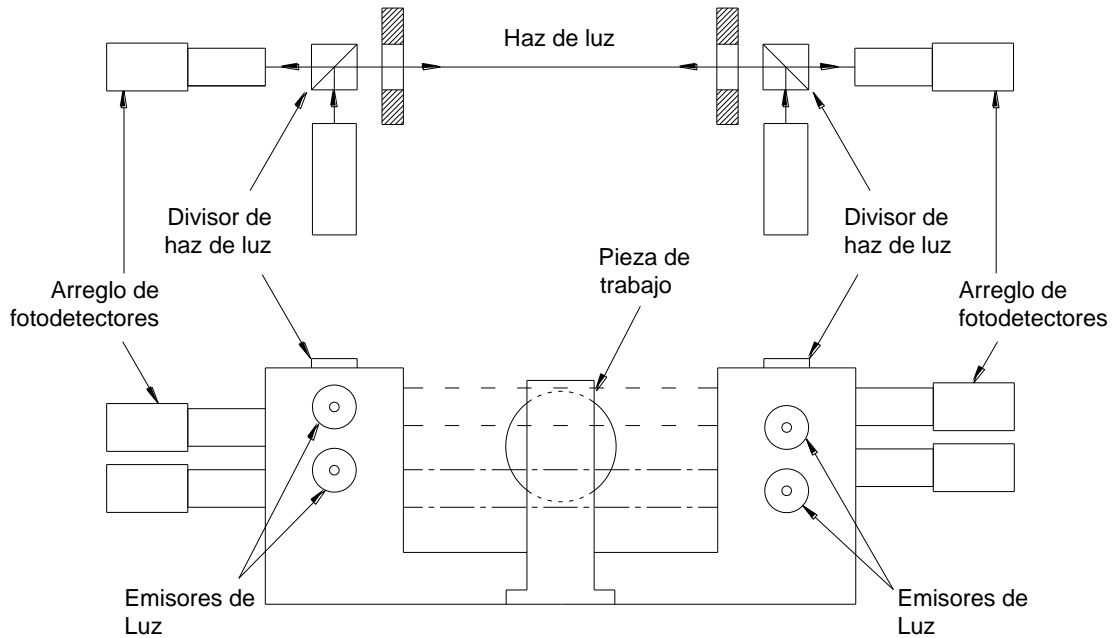


Figura 3.13 Diagrama esquemático de sistema E. Milana.

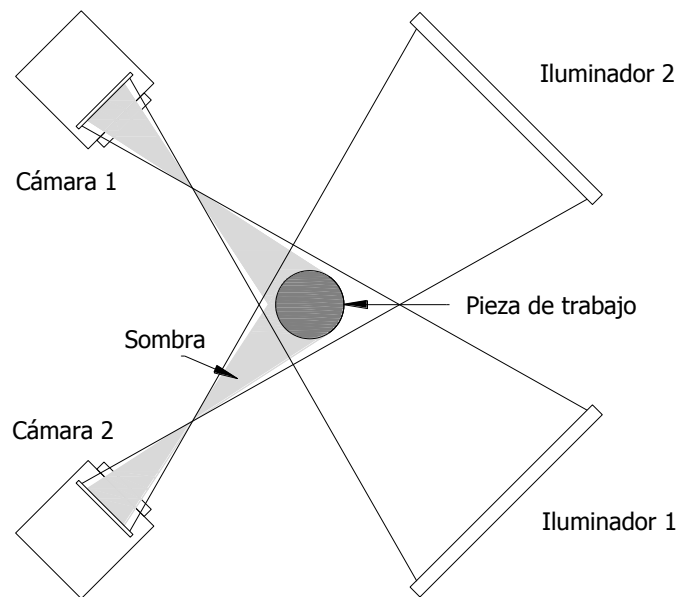


Figura 3.14 Diagrama esquemático de sistema A. Harding.

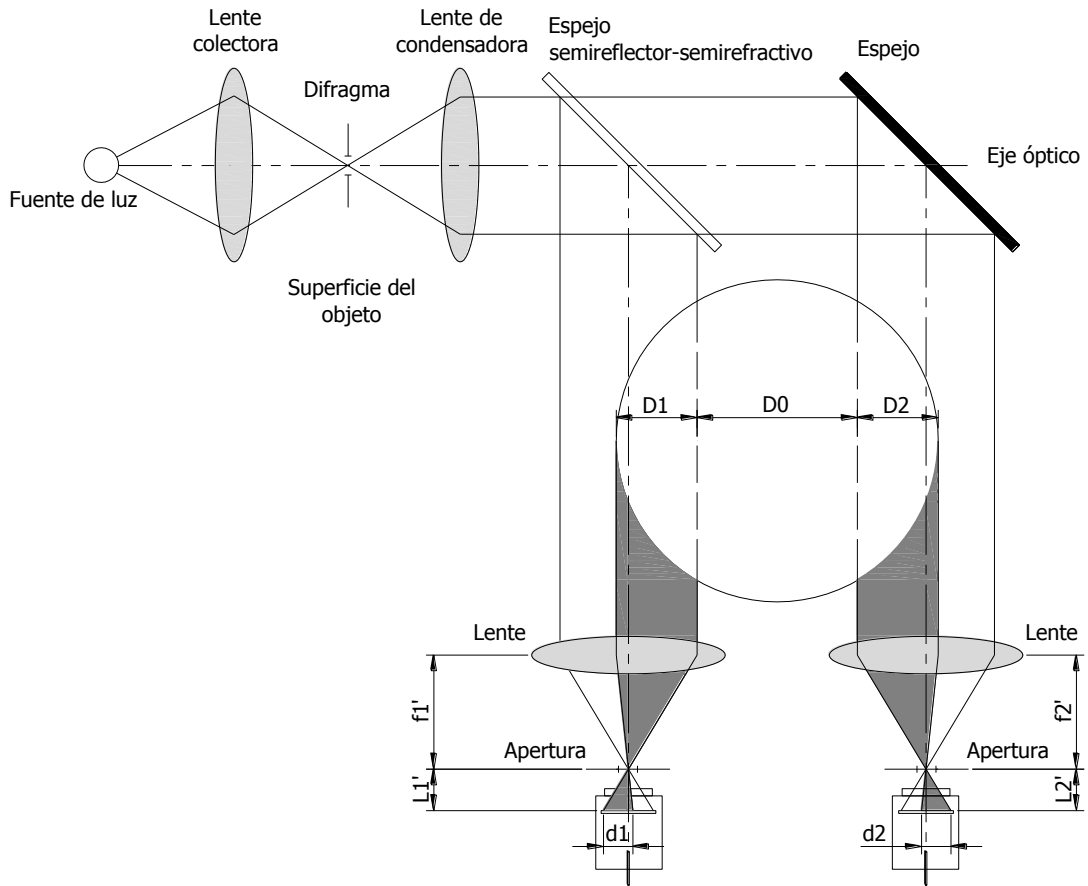


Figura 3.15 Diagrama esquemático de sistema Song et. al.

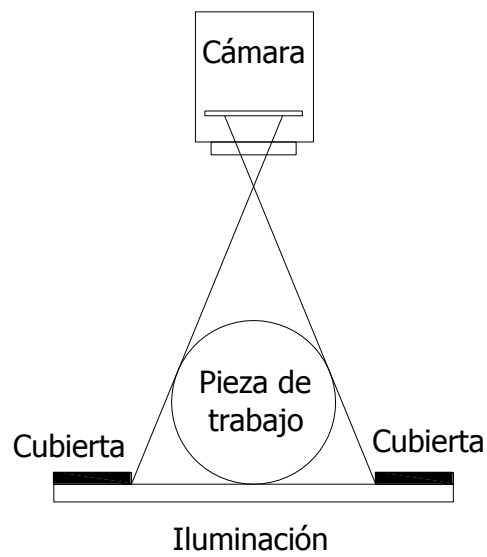


Figura 3.16 Diagrama esquemático de sistema Guan Wei et. al.

3.4.1.1 PROYECTOR DE PERFILES (PROFILE PROJECT)

Dentro de los sistemas comerciales que emplean la luz blanca como fuente de luz se encuentra el proyector de perfiles o comparador óptico. Estos dispositivos emplean la proyección de luz sobre la pieza a medir logrando la visualización de su imagen ampliada sobre una pantalla traslúcida de medición (principio de trasmisión). Así mismo estos cuentan con un sistema óptico telecéntrico presentado en la *Figura 3.17* con el objetivo de eliminar las aberraciones esféricas.

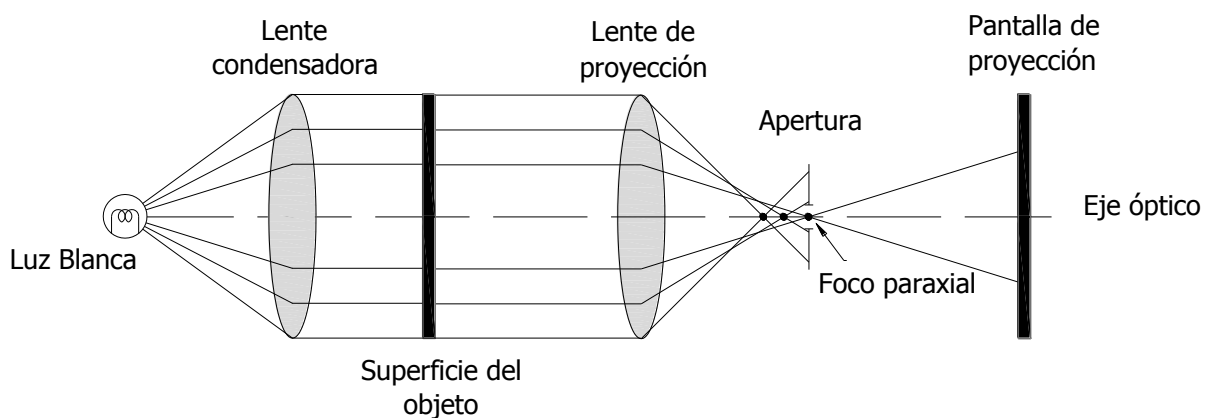


Figura 3.17 Esquema básico de un sistema óptico telecéntrico.

El sistema de iluminación como parte principal de estos dispositivos se clasifica en [4]:

- Iluminación de contorno.
Empleado para la medición del contorno amplificado de una pieza (sombra). La *Figura 3.18* muestra la trayectoria de la luz utilizada para iluminar el contorno del objeto a medir, dando como resultado visual una imagen similar a la presentada en la *Figura 3.20(a)*.
- Iluminación de superficie
Este método de iluminación es utilizado para la observación o medición de la superficie de la pieza a analizar. En la *Figura 3.19* se observa una posible configuración del sistema óptico de iluminación de superficie, el cual muestra un resultado visual semejante a la *Figura 3.20(b)*.

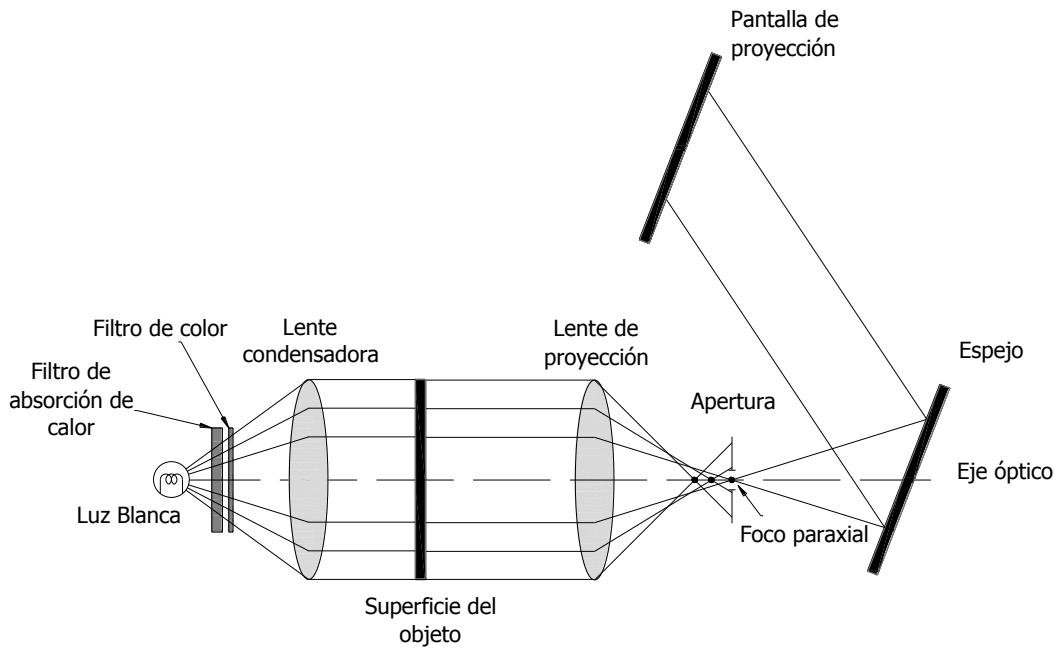


Figura 3.18 Sistema óptico de iluminador de contorno.

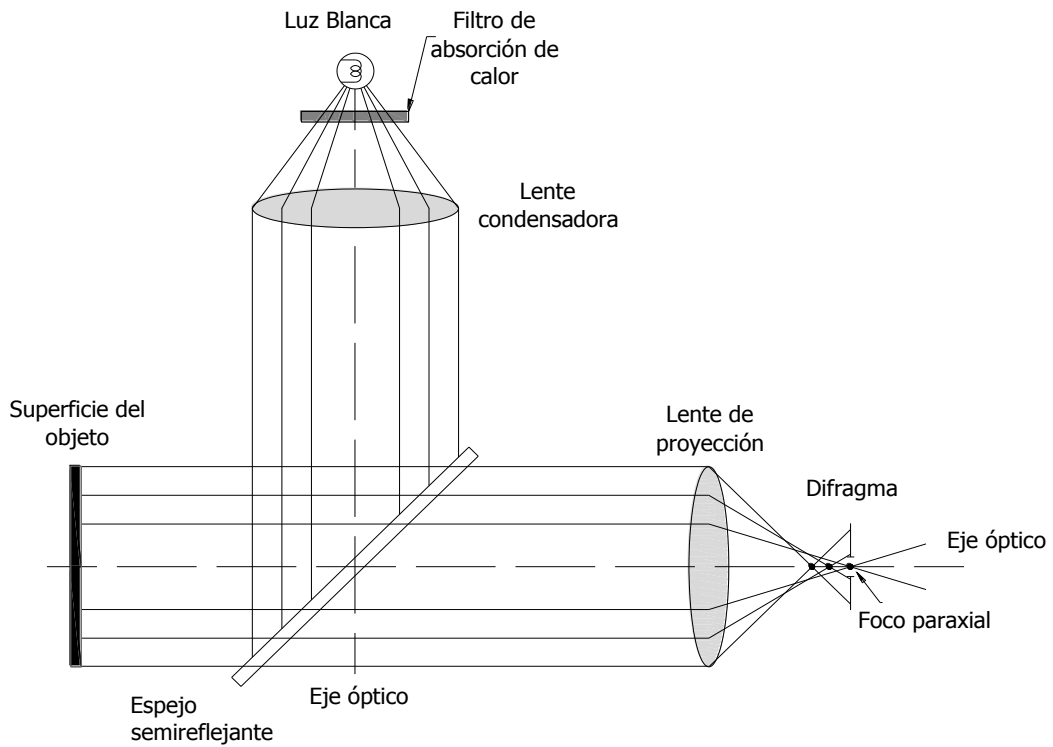


Figura 3.19 Sistema óptico de iluminador de superficie.

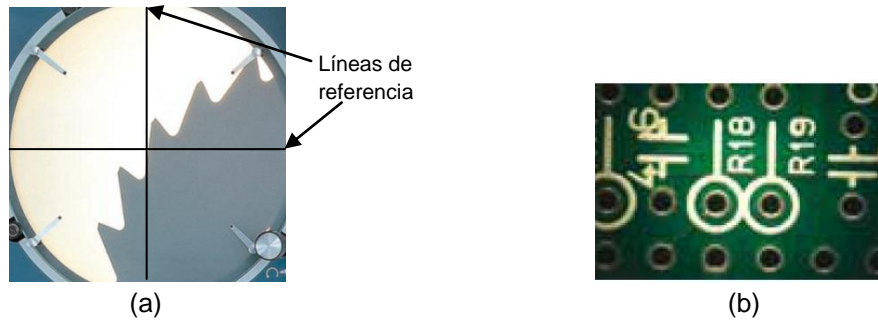


Figura 3.20 Imágenes resultantes debido a cada sistema de iluminación (a) Iluminador de contorno, (b) Iluminador de superficie.

Obtenida una imagen enfocada del objeto, la medición dimensional es llevada a cabo empleando el movimiento en XY de la platina en forma manual (base donde es colocado el objeto), alineando uno de los bordes del objeto con las líneas de referencia de la pantalla (líneas perpendiculares entre sí, indicando el cero) observadas en la *Figura 3.20(a)*. Se mueve la platina hasta que el otro borde de la pieza está alineado con las mismas línea de referencia, dando como resultado la medición del ancho de la pieza indicada en la pantalla de la cabeza micrométrica (medición lineal), en la *Figura 3.21* se muestra un sistema comercial marca Mitutoyo [27].



Figura 3.21 Proyector de perfiles Mitutoyo PH-A14.

La pantalla está integrada a su vez por una escala en grados logrando la medición de ángulos, a través del giro de esta pantalla y el empleo de los ejes de referencia. Debido a que la base de la precisión en este instrumento es la agudeza visual y cuidado del inspector para efectuar la alineación, se han desarrollado detectores

electrónicos de borde integrados a la pantalla, logrando una medición más confiable. En la actualidad la integración de un sistema de visión por computadora al proyector de perfiles ha transformado la medición semiautomática a automática logrando eliminar los errores por agudeza visual.

3.4.2 MÉTODO ÓPTICO EMPLEANDO LUZ LÁSER

Debido a los tipos de fuentes de luz, los métodos de medición de ejes se han extendido logrando la generación de sistemas que emplean luz láser. En 1989 Manfred Ring et. al [7], presenta la patente en la cual el borde de la pieza de trabajo se ilumina con un arreglo de luz láser para formar un patrón de difracción real. El patrón de difracción real se convierte en señales electrónicas por medio de un arreglo de sensores y se correlaciona con un patrón de difracción predeterminado y calculado teóricamente. En base al patrón de difracción y a la teoría de difracción de Fresnel en un borde recto se determina la ubicación de cada borde del eje y se despliega la medición del diámetro (ver *Figura 3.22*).

Posteriormente en el 2001 C. Sun et. al [28] presentó un método con láseres y cámaras, en el que un par de láseres de línea-estructurada, se sitúan en lados diferentes de la tubería, pero se encuentran en un plano común, emitiendo sobre el tubo para crear dos arcos elípticos. Dos cámaras CCD captan estos dos arcos, con lo cual el radio mayor, menor y las coordenadas espaciales en 3D de cada sección transversal elíptica se pueden calcular a través del ajuste de elipse, determinando a su vez el diámetro del tubo (ver *Figura 3.23*).

En 2002 Zhang et. al [29] introdujo un sistema láser de escaneo doble de borde para grandes diámetros con medición dinámica en línea y sistema de control o retroalimentación. Los diámetros de control dentro del alcance de medición son 1000- 2000 mm. El sistema está integrado por un sistema de doble láser escaneado de medición, un sistema de medición del desplazamiento de rejilla y los sistemas mecánicos finos. El sistema de medición consta de dos emisores láser, dos receptores láser, sistemas ópticos, sistemas electrónicos de transferencia optoelectrónica y un controlador principal. El sistema de medición del desplazamiento de rejilla se compone de dos cabezales de lectura de rejilla y un medidor de visualización de dígitos de rejilla, con el objetivo de extender el rango de medición del sistema debido a la limitación del escaneo por láser.

En este sistema los haces de dos fuentes láser son analizados por los espejos que giran a una velocidad angular ω y pasan por el sistema óptico de escaneo. Los dos haces de exploración, que son paralelas a su eje óptico, escanean por separado los dos bordes de la pieza mecanizada y entran en cada receptor optoelectrónico. A continuación se analiza la señal y calcula para determinar el diámetro de la pieza mecanizada, para citar detalles esquemáticos ver referencia.

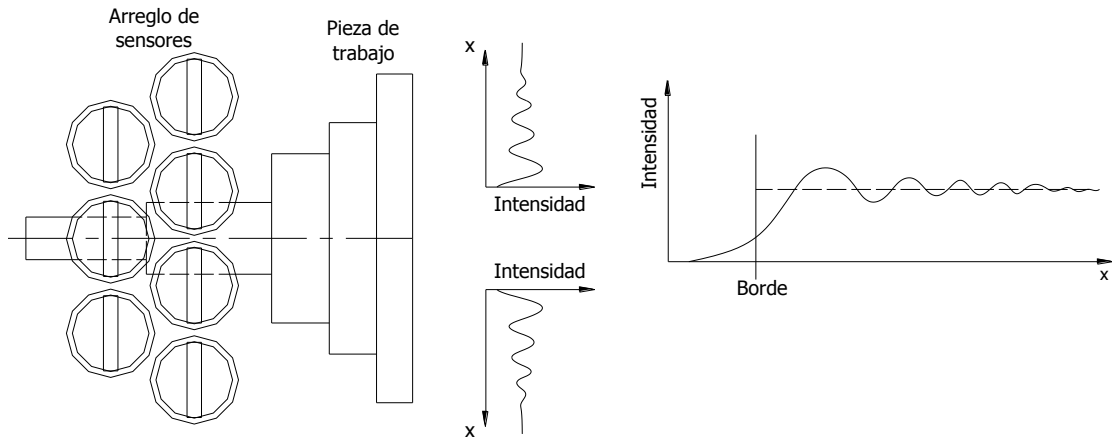


Figura 3.22 Método y aparato de medición optoelectrónica de la pieza de trabajo empleando difracción de Fresnel.

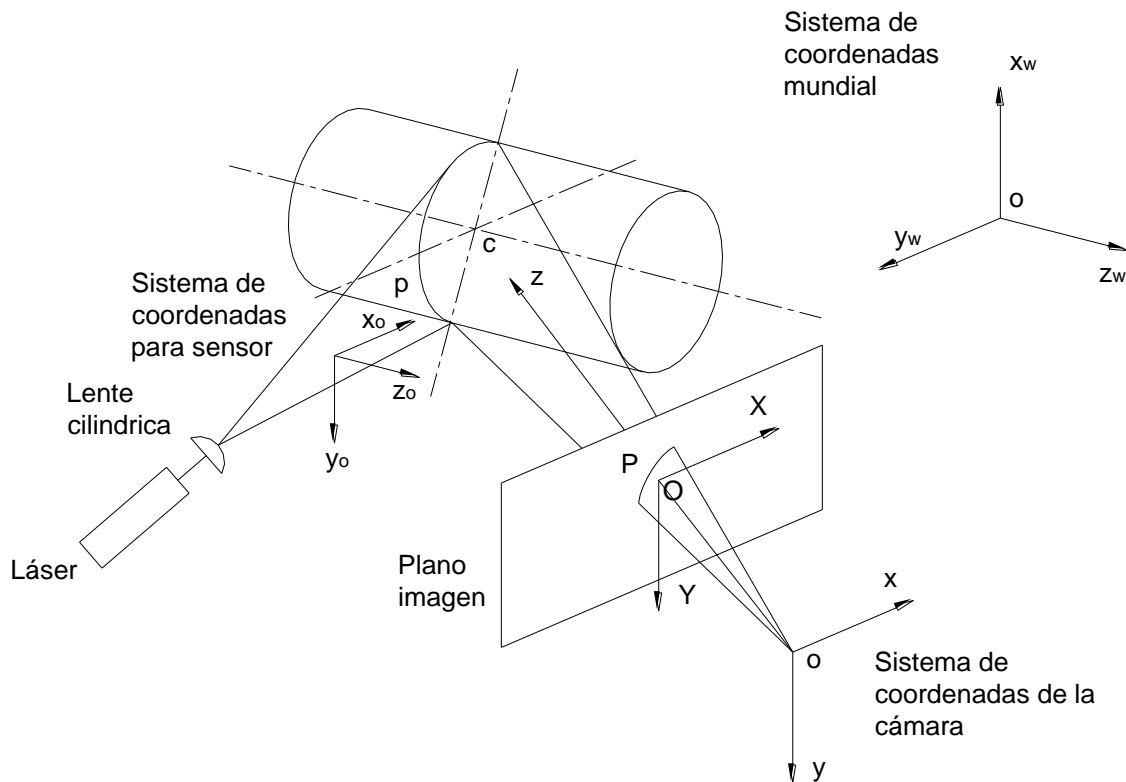


Figura 3.23 Principio de medición del centro de arco elíptico empleando un sensor visual.

Posteriormente en 2007 J. Apolinar et. al [30][31][32] presenta una técnica para medir la forma del objeto. En esta técnica, el objeto se analiza por medio de una línea de luz Láser y a partir de la exploración un conjunto de imágenes son captadas por una o dos cámara CCD (sistema monocular, binocular respectivamente). La superficie del objeto se recupera mediante el procesamiento

de estas imágenes y para determinar las dimensiones de la superficie, se aplica una red de aproximación Bezier. Esta red de aproximación se construye usando la información de las imágenes de una línea de luz proyectada sobre los objetos (cuyas dimensiones son conocidas). Los datos de imagen se extraen mediante la aplicación del método de aproximación Gaussiana. Usando la red de aproximación en esta técnica, la medición de la superficie está determinada por el procesamiento de imágenes, con lo cual se evitan los parámetros de configuración y se mejora la precisión de las técnicas de proyección de línea de luz para la detección de forma.

3.4.2.1 MICRÓMETRO LÁSER

El micrómetro láser es un sistema de no contacto que usa el método de barrido con haz láser de longitud de onda 560nm y el conteo de los pulsos de reloj cuando el haz láser no se detecta, para llevar a cabo la medición de la pieza de trabajo. Este sistema es empleado en la medición de objetos elásticos, frágiles, piezas a alta temperatura, objetos que deben estar libres de suciedad y piezas suaves que pueden sufrir algún cambio dimensional causado por la fuerza en la medición. En la *Figura 3.24* se muestra el diagrama general del micrómetro láser en el cual un haz de luz láser se refleja mediante el espejo poligonal que está girando a una velocidad ω y esta sincronizado con el pulso de reloj.

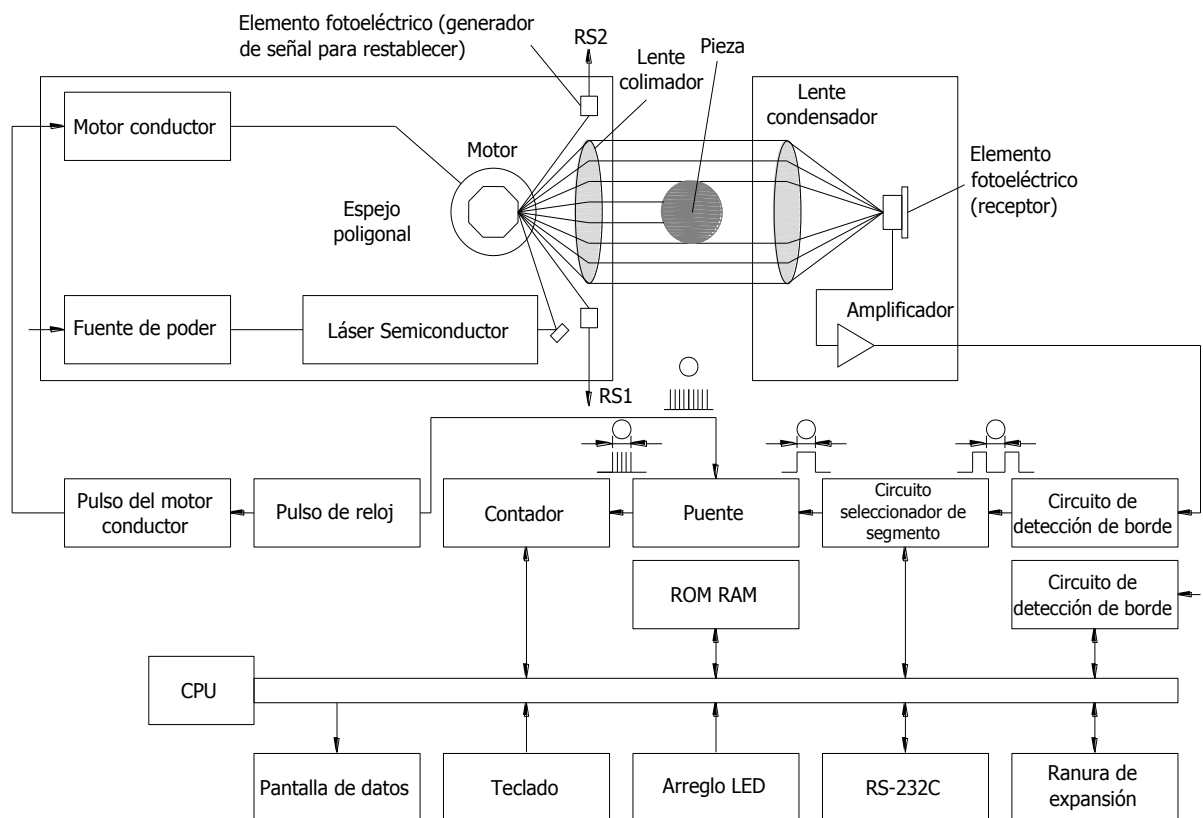


Figura 3.24 Diagrama de bloques del sistema del micrómetro láser.

El haz reflejado es colimado a través de la lente colimadora, la parte del haz que no es interceptado por la pieza, converge en el elemento fotoeléctrico convirtiendo la intensidad de luz no interceptada a voltaje y simultáneamente en un número determinado de pulsos de reloj los cuales son contabilizados, representando el diámetro de la pieza. Los datos son enviados al CPU para procesarse y determinar el diámetro [4].

Adicional a la medición de diámetros este dispositivo es empleado para medir espacio entre pernos paralelos, espesor de laminados y mediciones lineales. Pero debido al empleo de la luz láser este sistema es afectado por elementos como:

- a. Capa de aceite.
- b. Polvo.
- c. Aire perturbado, excesiva refracción de luz causada por diferencia de densidad del aire.
- d. Objetos transparentes (barra redonda de vidrio).

En la figura 3.27 se muestra un micrómetro láser comercial marca Mitutoyo con un intervalo de medición de 1mm a 60mm [27].



Figura 3.25 Micrómetro láser marca Mitutoyo LSM-506S.

3.4.3 RESOLUCIÓN DE LOS MÉTODOS DE NO CONTACTO

Acorde a las especificaciones marcadas por el fabricante de instrumentos de medición Mitutoyo las resoluciones de los instrumentos de no contacto se encuentran entre el rango de 0.003 a 0.001 mm ver *Tabla 3.4*.

Dispositivo de Medición	Intervalo	Resolución
Comparador óptico	1 a 355 mm	0.001 mm
Micrómetro láser	1 a 60 mm	0.003 mm

Tabla 3.4 Resolución de los dispositivos de medición de no contacto.

4. DESARROLLO EXPERIMENTAL Y RESULTADOS

A través de este capítulo se establecerán dos métodos ópticos de no contacto empleados para llevar a cabo la medición del diámetro de piezas cilíndricas con una resolución de unos cuantos micrómetros. Se estudian dos métodos ópticos bajo la hipótesis de que el sistema con luz laser tiene una mayor resolución que el sistema de luz blanca, pero sin conocer que tan grande es esta diferencia. En ambos casos se parte de un arreglo experimental inicial el cual va evolucionando por medio de mejoras y adecuaciones hasta llegar a los arreglos finales. A su vez se describirá la forma en que se obtienen las imágenes, su conversión a señal digital, los algoritmos de procesamiento digital de imágenes, y la obtención de los resultados de la medición del diámetro de las piezas de trabajo.

4.1 ARREGLO DE LUZ LASER (DIFRACCIÓN TRACKING)

Con el objetivo de estudiar el fenómeno de difracción generado por un obstáculo o pieza de trabajo se analizará y visualizará el cambio del patrón de difracción al momento de aumentar o disminuir el diámetro de la pieza [33]. Para la formación de la imagen del patrón de difracción se cuenta con la reflexión o transmisión de la luz, empleando una pantalla reflectiva o traslucida respectivamente, por lo cual se evaluarán las dos opciones y se seleccionará la adecuada.

4.1.1 POR REFLEXIÓN

En la *Figura 4.1* se muestra el sistema óptico utilizado para la generación del patrón de difracción, empleando como pieza de análisis una llave allen con una sección hexagonal, teniendo como dimensión entre caras 0.8mm y entre vértices 1mm. Dimensiones medidas a través de un calibrador Vernier marca MITUTOYO con resolución de 0.01mm.

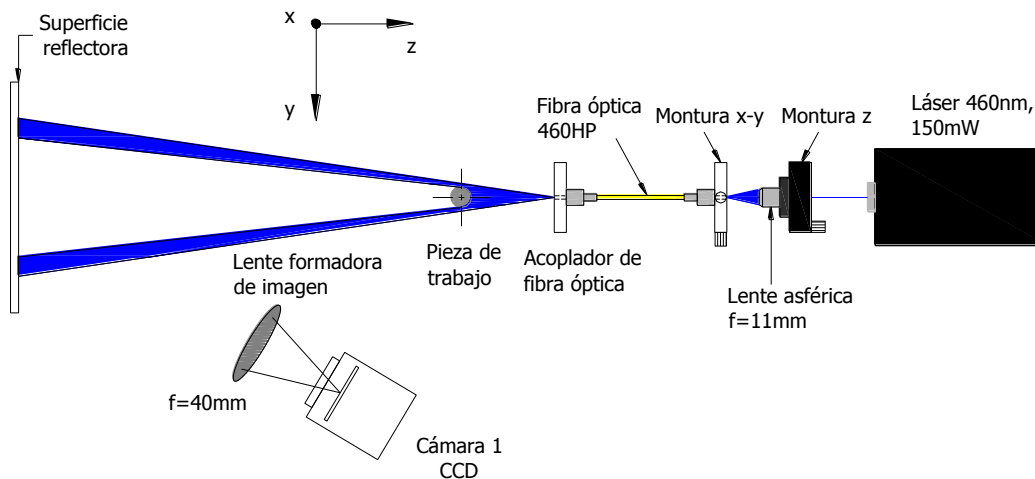


Figura 4.1 Diagrama esquemático del arreglo óptico DIFRACCIÓN- REFLEXIÓN, empleando como objeto de estudio una llave Allen.

Este sistema está basado en el filtraje espacial de un haz de luz láser con longitud de onda $\lambda=460\text{nm}$, empleando para esto una lente esférica y una fibra óptica monomodal.

Posteriormente se coloca el objeto de estudio en la posición 1 (donde su sección transversal tiene una dimensión de 0.8mm) y en base a la incidencia del haz de luz láser se genera la sombra del objeto, por ende un patrón de difracción en los bordes de la sombra, la cual es formada en una pantalla de material llamado granito (pantalla empleada para proyectar imágenes). Debido a la apertura del haz de luz láser la sombra también se expande, generándose una magnificación de los detalles.

Al acercarse más el objeto al haz de luz la magnificación es mayor, hasta llegar al límite en el cual el diámetro del haz de luz es menor a la distancia transversal que caracteriza el objeto. Obtenida la magnificación adecuada visualmente, se determina la distancia a la cual se colocara la pantalla reflectiva y la cámara CCD (1280 x 960 píxeles a 8bits) para la formación de la imagen. Calibrada la cámara en sus parámetros y en distancia teniendo como objetivo la observación del patrón de difracción (órdenes 1 de cada borde y orden 0), se obtiene la captura de la imagen.

A continuación se gira el objeto de estudio a la posición 2 (donde su sección transversal tiene una dimensión de 1mm) y se captura la imagen del patrón de difracción. Acorde a lo anterior se observa lo siguiente:

1. Debido a que la superficie reflectora es rugosa comparada con la longitud de onda (λ) del haz de luz láser genera una reflexión difusa o patrón moteado.
2. El cambio de la posición del objeto de estudio muestra un cambio en el perfil de difracción aumentando la distancia entre los órdenes 1 del patrón de difracción.
3. Por otra parte al magnificar el patrón de difracción mediante la apertura del haz de luz (frente de onda cilíndrico) se genera pérdida de intensidad de luz y pérdida de nitidez, con lo cual es necesario concentrar la luz empleando una lente condensadora o colimadora.
4. Al colimar la luz láser el patrón de difracción debe ser magnificado empleando para esto un objetivo de microscopio 10X como se observa en la *Figura 4.2*.

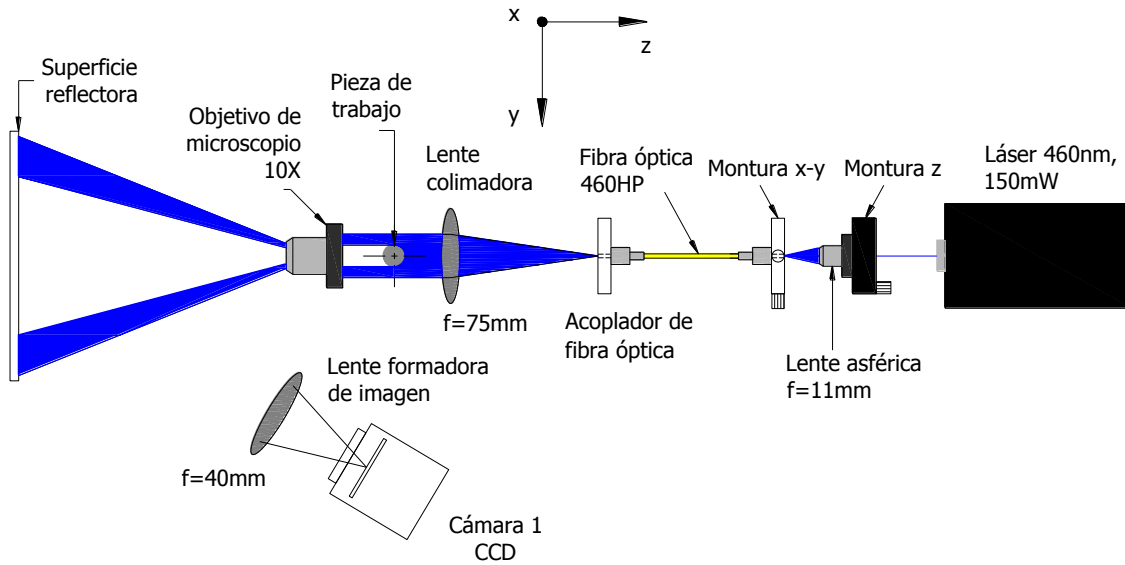


Figura 4.2 Diagrama esquemático del arreglo óptico DIFRACCIÓN- REFLEXIÓN con haz de luz colimado.

En base a la colimación del haz de luz láser se aumento la nitidez del patrón de difracción mejorando la imagen en la cámara CCD, pero a su vez la adición del objetivo de microscopio trajo como consecuencia una perdida mayor de intensidad y la falta de percepción en el cambio del patrón de difracción en base al cambio de la posición de la muestra.

4.1.2 POR TRANSMISIÓN

En la *Figura 4.3* se muestra un sistema óptico que emplea la transmisión como medio para la formación del plano imagen, esto modificando la ubicación de la cámara CCD y el empleo de una pantalla traslucida basado en el sistema de la *Figura 4.1*.

El objetivo de este sistema es mantener una posición paralela a la cámara CCD con respecto al plano imagen y analizar los problemas de reflexión difusa y perdida de intensidad presentados en el sistema de reflexión.

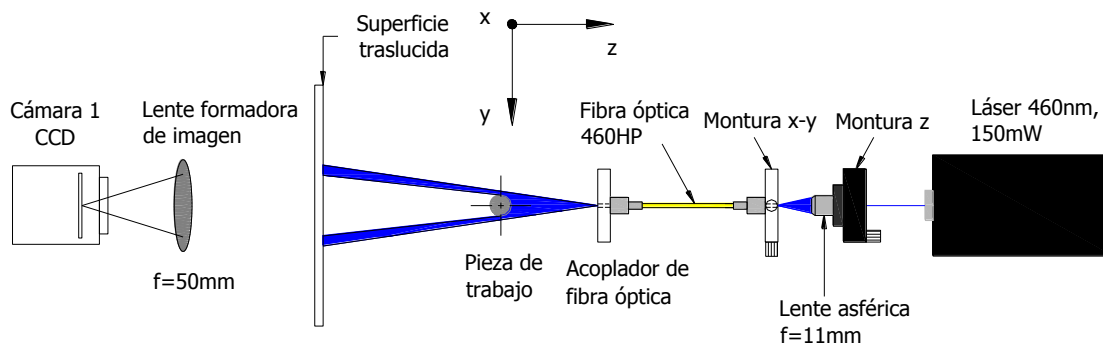


Figura 4.3 Diagrama esquemático del arreglo óptico DIFRACCIÓN-TRANSMISIÓN, empleando como objeto de estudio una llave Allen y la integración de una superficie traslucida.

Basado en la transmisión de diversas pantallas se selecciono como pantalla traslucida, papel pergamino vegetal, Acorde a lo anterior se observa lo siguiente:

1. Debido a la porosidad de la superficie traslucida se genera un patrón de moteado.
2. La intensidad resultante es menor a la obtenida por reflexión.
3. Para extender este arreglo a la pieza de trabajo con el diámetro objetivo (50mm) es necesario generar dos haces de luz, los cuales incidirán en cada borde de la pieza.

Con base en esto el sistema que emplea la transmisión es descartado y se continúa con las mejoras en el sistema de reflexión.

4.1.3 ARREGLO DE LUZ LÁSER DIFRACCIÓN-REFLEXIÓN MODIFICADO

Con base a las conclusiones anteriores, el sistema óptico para análisis de la pieza objetivo (eje de acero $\varnothing=50\text{mm}$) debe comprender:

1. Un arreglo de doble haz de luz (uno por borde de la pieza).
2. Luz láser filtrada espacialmente.
3. Emplear la reflexión para generar el plano imagen.
4. Magnificar el patrón de difracción sin emplear objetivos de microscopio.
5. Utilizar una superficie especular para el plano imagen con el objetivo de disminuir el patrón de moteado.

Acorde a estos parámetros en la *Figura 4.4* se muestra un diagrama esquemático del sistema resultante en el que se emplea como pieza de análisis dos ejes de acero inoxidable con diámetros $\varnothing_1= 37.804\text{mm}$ y $\varnothing_2= 37.823\text{mm}$.

A la salida de la fuente láser se coloca un cubo divisor de haz con el objetivo de tener dos haces de luz, los cuales se hacen pasar por dos lentes esféricas que acoplan la luz con la fibra óptica ($\text{NA}=0.13$), este proceso genera un filtraje espacial de los haces. A continuación se coloca el otro extremo de las fibras en el soporte a un ángulo de 95° con respecto a la horizontal, haciendo incidir el haz de luz en los bordes de la flecha y a través de la ubicación de las pantallas (acrílico blanco con cubierta de vinil blanco) a una distancia de 480 mm y un ángulo de 80° con respecto a z (ϕ). Este ángulo permite observar el patrón de difracción en una forma magnificada debido a que el plano imagen varía a medida que se proyecta en la pantalla. Lo anterior se resume como formación de imágenes a diferentes distancias con respecto al objeto.

Al formarse la difracción en las pantallas estos patrones se capturan por medio de las cámaras CCD (1280 x 960 pixeles a 8bits). Esto será aplicado tanto para el eje 1 y 2, con el objetivo de percibir la variación del patrón de difracción.

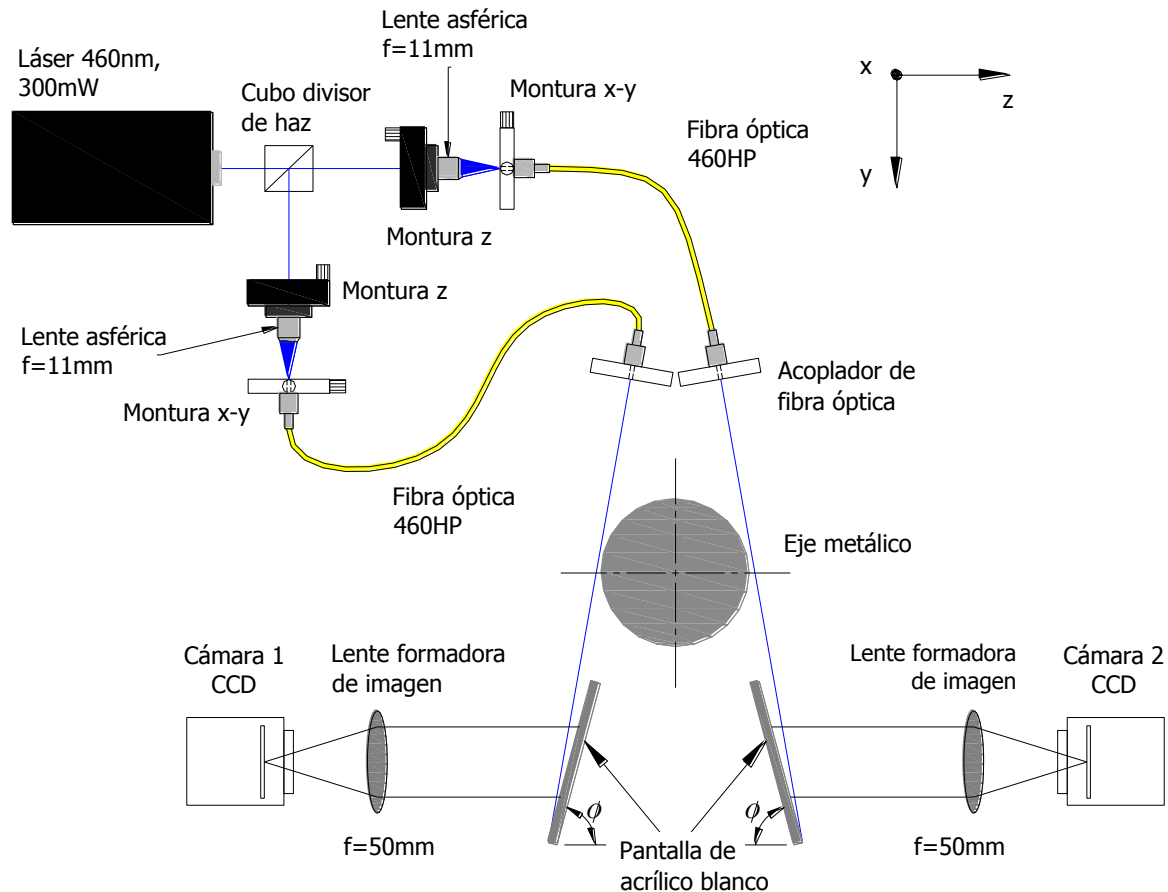


Figura 4.4 Diagrama esquemático del arreglo óptico DIFRACCION-REFLEXIÓN MODIFICADO, empleando dos haces de luz láser.

En base a este patrón, se observa nuevamente la variación de la distancia entre órdenes de difracción 1 del borde izquierdo y derecho, por lo cual la extrapolación del sistema funciona correctamente, pero debido a:

1. La dificultad en el ajuste del ángulo de proyección de la luz de cada brazo sobre los bordes del eje y al ángulo semejante entre las pantallas (ambas pantallas deben tener el mismo ángulo).
2. La nitidez del patrón debida al frente de onda esférico (esto afecta la resolución en la imagen).
3. La reflexión difusa de la superficie no especular con respecto a la longitud de onda (λ) del haz láser (se observa un patrón de moteado).
4. Movimiento no lineal del patrón de difracción debido al ángulo del plano imagen (se debe asegurar una superficie ópticamente plana).

El sistema óptico se modifica como se ilustra *Figura 4.5*, empleando una proyección de luz orthogonal con frente de onda plano (haz colimado), una incidencia del patrón de difracción directamente sobre el sensor CCD eliminando el ajuste angular de las pantallas, la reflexión difusa y obteniendo un movimiento lineal del patrón de difracción. Para este sistema se utiliza como objeto de estudio diez ejes de acero O1 rectificadas-templados con diámetros menores a $\varnothing=50\text{mm}$ acorde a especificaciones mostradas en el apéndice A.

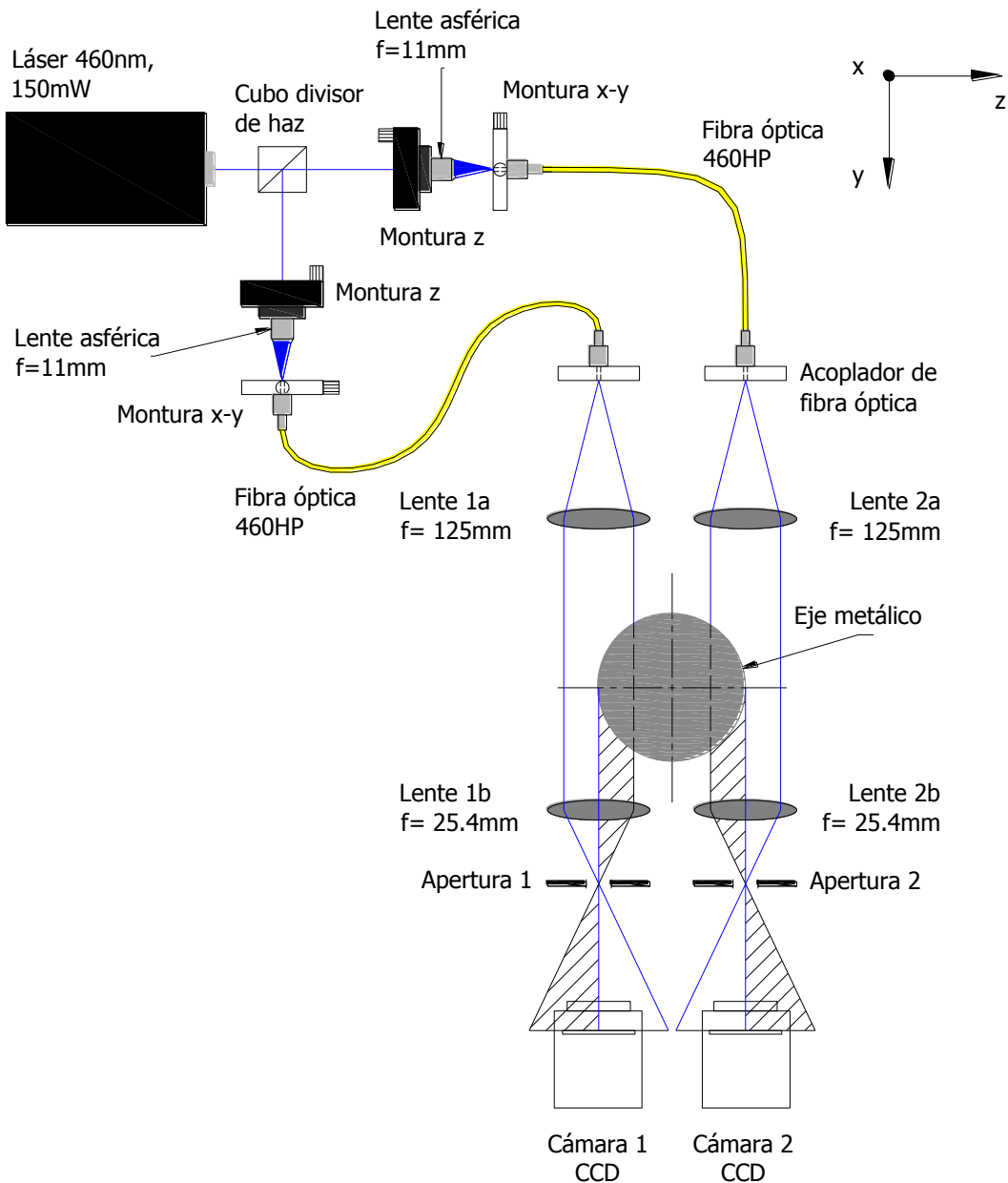


Figura 4.5 Diagrama esquemático del arreglo óptico DETECCIÓN DE DIFRACCIÓN, empleando dos haces de luz láser y el plano imagen formado en los sensores CCD.

En este sistema óptico los haces de luz que inciden sobre el borde de la flecha son frentes de onda planos, con lo cual el patrón de difracción es nítido pero debido a su tamaño es necesario magnificarlo con la finalidad de detectar cambios de milésimas de milímetro, en base a esto las lentes 1b y 2b son empleadas para magnificar el patrón de difracción conjuntamente con dos aperturas que evitan reflejos de todo haz que no llegue colimado a estas lentes. Consecuentemente el plano imagen de la difracción esta directamente formado en el sensor CCD (1280 x 960 pixeles a 8bits) de la cámara dando como resultado las imágenes mostradas en la *Figura 4.6*, en donde se muestra este patrón sin filtrar y filtrado.

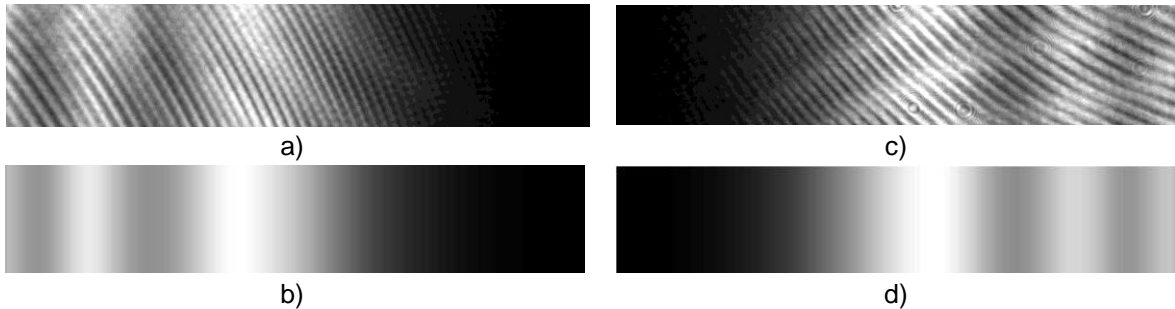


Figura 4.6 Patrón de difracción que se forma directamente en los sensores CCD, a) Borde izquierdo b) Borde izquierdo filtrado, c) Borde derecho de las muestras, d) Borde derecho de las muestras filtrado.

Con base en estos resultados se obtiene finalmente el método de adquisición del patrón de difracción para luz láser en cada borde.

4.2 ARREGLO DE LUZ BLANCA (SHADOWING CASTING)

La luz al incidir sobre un objeto no transparente es obstruida, dando lugar a una región oscura sin iluminación llamada sombra del objeto, las propiedades de la sombra se deducen en base a la ley de propagación rectilínea. Si la fuente es puntual, el límite de la sombra está nítidamente definida (difracción descuidada) y su sección, tal como se recibe en una pantalla perpendicular a la dirección típica de la luz, tendrá la misma forma que el obstáculo opaco formado cuando se ve desde la posición de la fuente [34].

Como se aprecia en los arreglos anteriores la fuente empleada es casi puntual divergente-monocromática (luz láser) a diferencia de la luz blanca que es una fuente divergente-policromática (compuesta por varias longitudes de onda del visible). Esto da como resultado una aberración cromática mayor, provocando una manipulación (colimación de la luz) de la luz poco controlada.

En la *Figura 4.7* se muestra el arreglo óptico inicial empleando dos lámparas de halógeno, integradas por una pantalla (vidrio esmerilado) la cual convierte la fuente incoherente-divergente a una fuente lambertiana (luz uniforme) logrando

haces paralelos. A su vez por medio de una lente con una distancia focal $f=25.4\text{mm}$ se logra la convergencia de la luz y focalización a la distancia focal de la lente. Adicional a esto se coloca un iris con el objetivo de eliminar aberraciones esféricas y filtrar solo algunos haces de luz, generando un sistema telecéntrico. Posteriormente se coloca una lente con distancia focal $f=50\text{mm}$ la cual llevara a cabo la colimación de los haces de luz que incidirán sobre los bordes del eje metálico (acero menores a $\varnothing=50\text{mm}$, ver apéndice A).

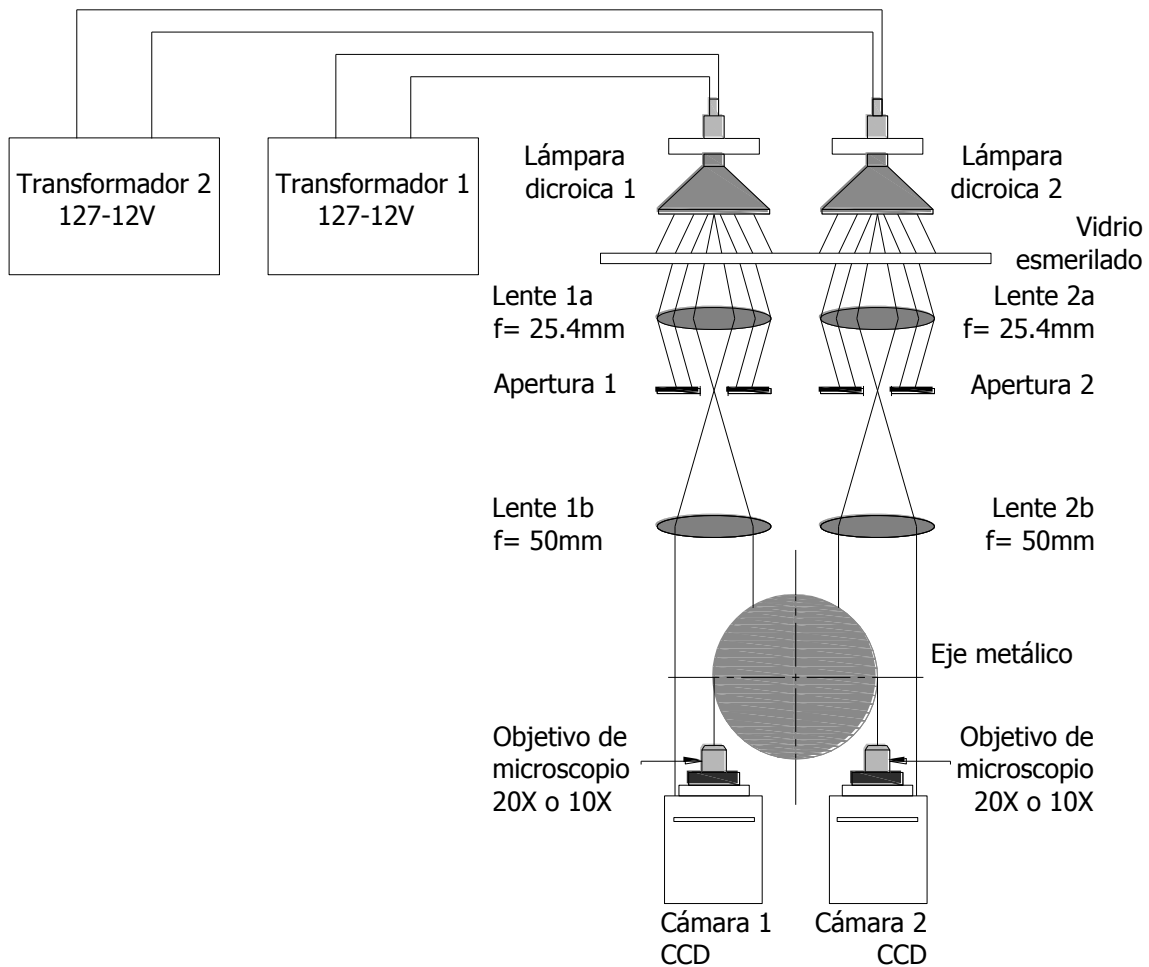


Figura 4.7 Diagrama esquemático del arreglo óptico PROYECCION DE SOMBRA versión 1, empleando como fuente de luz lámparas dicroicas.

A continuación mediante unos objetivos de microscopio enfocados en los bordes de la flecha se magnificara la imagen del borde y se encontrara el perfil del mismo a través de los sensores CCD (1280 x 960 pixeles a 8bits). Acorde a lo anterior se observa lo siguiente:

1. Debido a que la fuente de luz blanca es divergente-no puntual, además de que no es convertida en su totalidad a una fuente lambertiana empleando la

pantalla, se generan aberraciones esféricas y por ende una colimación de la luz deficiente (sistema no telecéntrico).

2. La distancia de ubicación del objetivo de microscopio no es la adecuada ya que el plano imagen se encuentra ubicado en el borde del eje y la distancia de trabajo del objetivo de microscopio 10X y 20X es 6.3 mm y 3.3 mm respectivamente, dando como resultado la observación de una sombra sin nitidez.

Acorde a las conclusiones anteriores, el sistema óptico de análisis de la pieza objetivo (ejes de acero O1 rectificadas-templados con diámetros menores a $\varnothing=50\text{mm}$) debe comprender:

1. Fuente de luz puntual.
2. Integración de una pantalla traslucida con superficie especular para la formación del plano imagen.
3. En base al plano imagen ubicar los objetivos de microscopio a su distancia de trabajo.

Por medio de lo anterior en la *Figura 4.8* se muestra el arreglo óptico resultante.

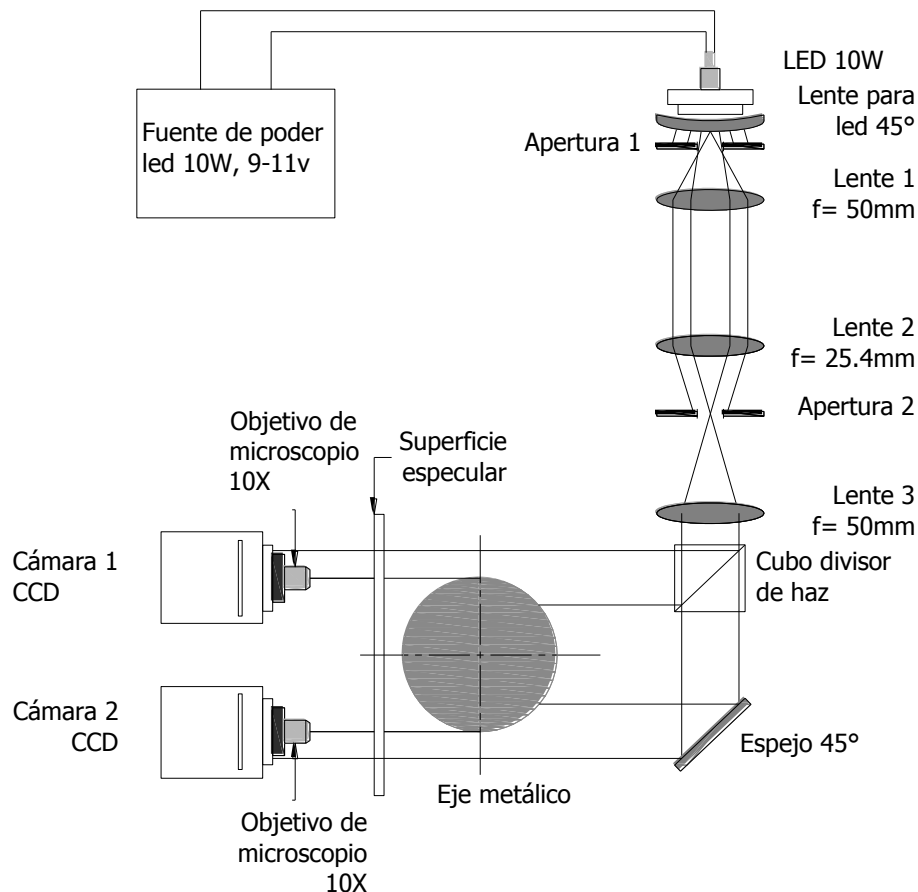


Figura 4.8 Diagrama esquemático del arreglo óptico PROYECCION DE SOMBRA versión 2, empleando como fuente de luz un LED de 10W y una superficie especular.

En esta configuración se emplea un solo LED 10W como fuente de luz, aproximándose así a una fuente puntual, posteriormente se coloca una lente condensadora (lente de 45°) de luz, sucesivamente la integración de una apertura (apertura 1) para limitar parte de la luz divergente y una lente colimadora (lente 1). Con el objetivo de eliminar aberraciones esféricas se adiciona una lente 2, otra apertura (apertura 2) y una lente 3 colimadora del haz resultante.

Finalmente con el empleo de un cubo divisor de haz se generan los dos brazos o haces de luz que incidirán sobre el borde del eje objetivo, para continuar su propagación por una superficie especular generándose la sombra del eje. Formada la sombra de los bordes del eje sobre el plano imagen, los objetivos de microscopio 10X magnifican la imagen y la cuál es formada sobre las cámaras CCD. De acuerdo a lo anterior se obtuvo el siguiente resultado:

1. La calidad del haz de luz es mayor debido al empleo del LED y el sistema telecéntrico.
2. Debido al empleo de la óptica para mejorar la calidad del haz, la pantalla especular y la magnificación del borde de la sombra, es necesario el empleo de un diodo LED de mayor potencia (mayor intensidad de luz) ya que el borde de la sombra no es identificado nítidamente por el sensor CCD.
3. Los elementos ópticos empleados para formar un sistema telecéntrico pueden ser reemplazados por un sistema comercial de iluminación telecéntrica o lámparas integradas con fibras ópticas, con el propósito de eliminar los elementos ópticos empleados y mejorar los haces de luz blanca resultantes.

Acorde a las anteriores observaciones se llevo a cabo la búsqueda de una fuente de luz comercial, integrada por un sistema telecéntrico con una potencia de salida mayor a 10W, teniendo como objetivo primordial la prueba y confirmación del principio de proyección de sombra. Bajo este perfil el sistema semejante a lo buscado es un proyector SONY 3LCD.

De lo anterior se estructura el sistema mostrado en la *Figura 4.9*, en el cual la luz blanca del proyector se hace incidir sobre el eje metálico formando la sombra sobre la superficie especular, a través de la ubicación de los objetivos de microscopio a su distancia de trabajo se logra la magnificación de los bordes de la sombra y la formación de la imagen sobre el sensor CCD (1280 x 960 pixeles a 8bits) de las cámaras (ver *Figura 4.10*).

Este sistema representa el método final de proyección de sombra a emplear para la ubicación de los bordes del eje metálico, y la señal de entrada al sistema.

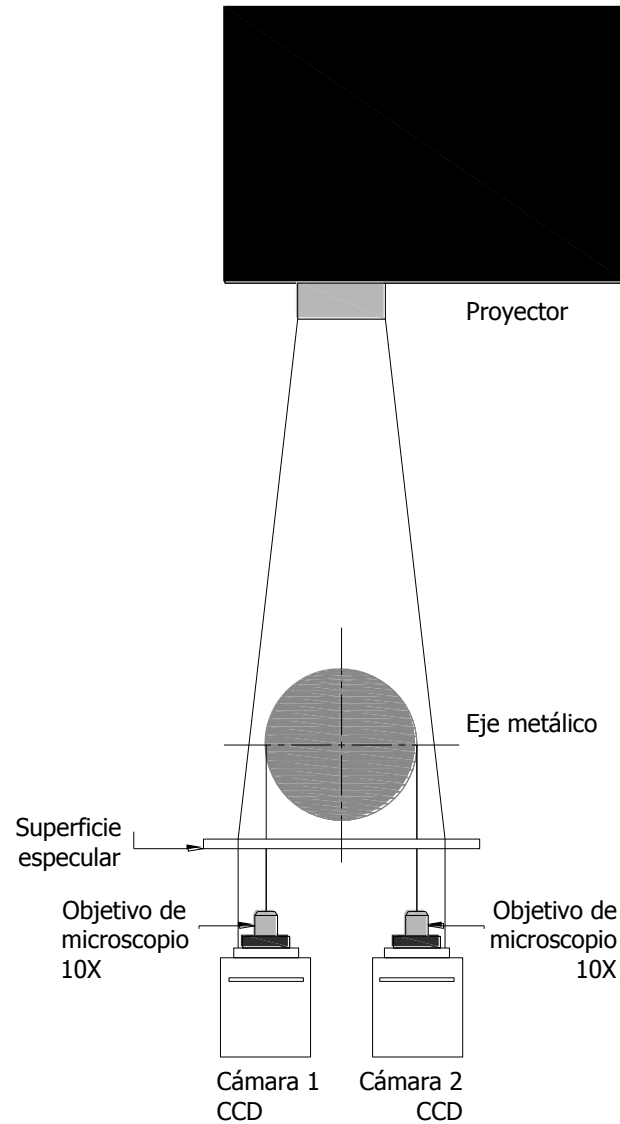
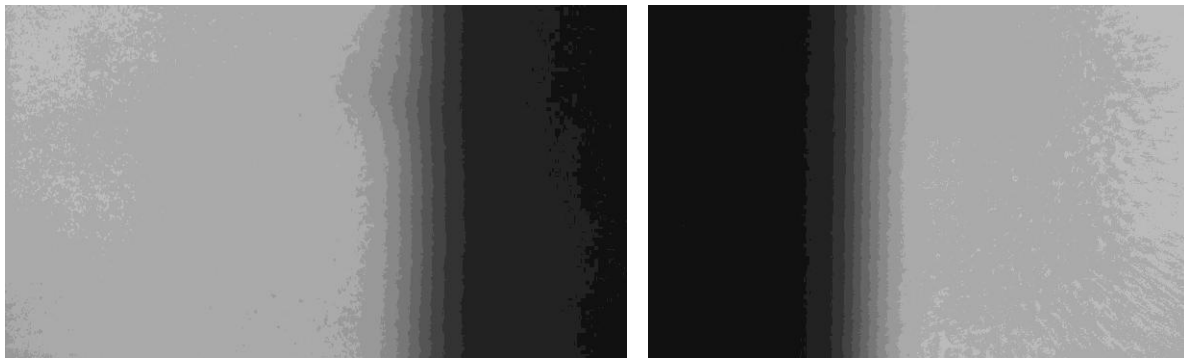


Figura 4.9 Diagrama esquemático del arreglo óptico PROYECCION DE SOMBRA versión 3, empleando como fuente de luz un proyector.



a)

b)

Figura 4.10 Sombra proyectadas directamente en la superficie espejadora, magnificadas por objetivo de microscopio 10X y capturadas por las cámaras CCD, a) Borde izquierdo, b) Borde derecho de las muestras.

4.3 DESARROLLO DE SISTEMA DE CAPTURA EN TIEMPO REAL

Como etapa inicial para la adquisición y procesamiento de las imágenes obtenidas por proyección de sombra y difracción, se desarrollo un software de captura y PDS en tiempo real empleando el lenguaje de programación MATLAB. Este software está integrado por varias funciones y estructurado acorde a la *Figura 4.11*.

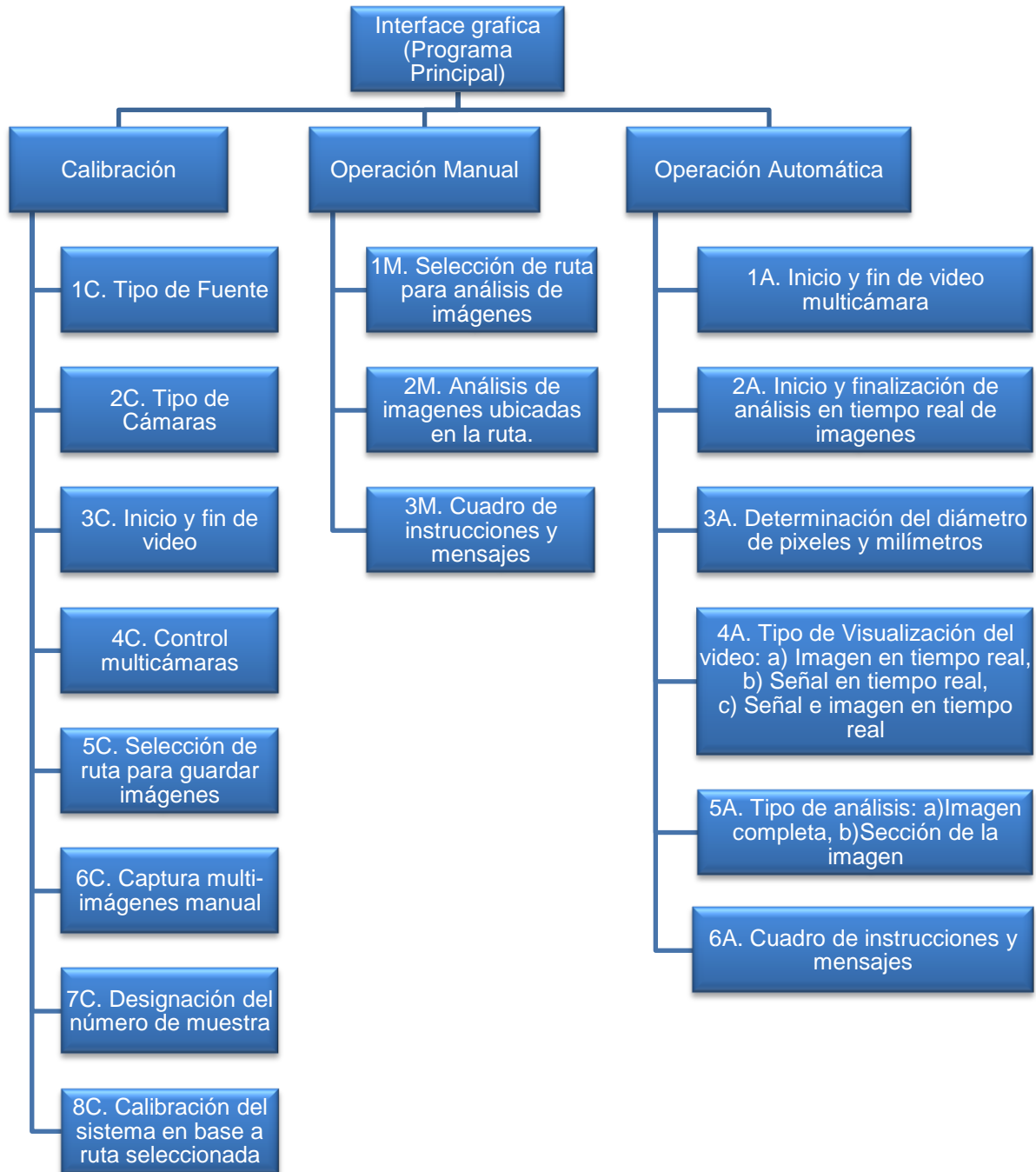
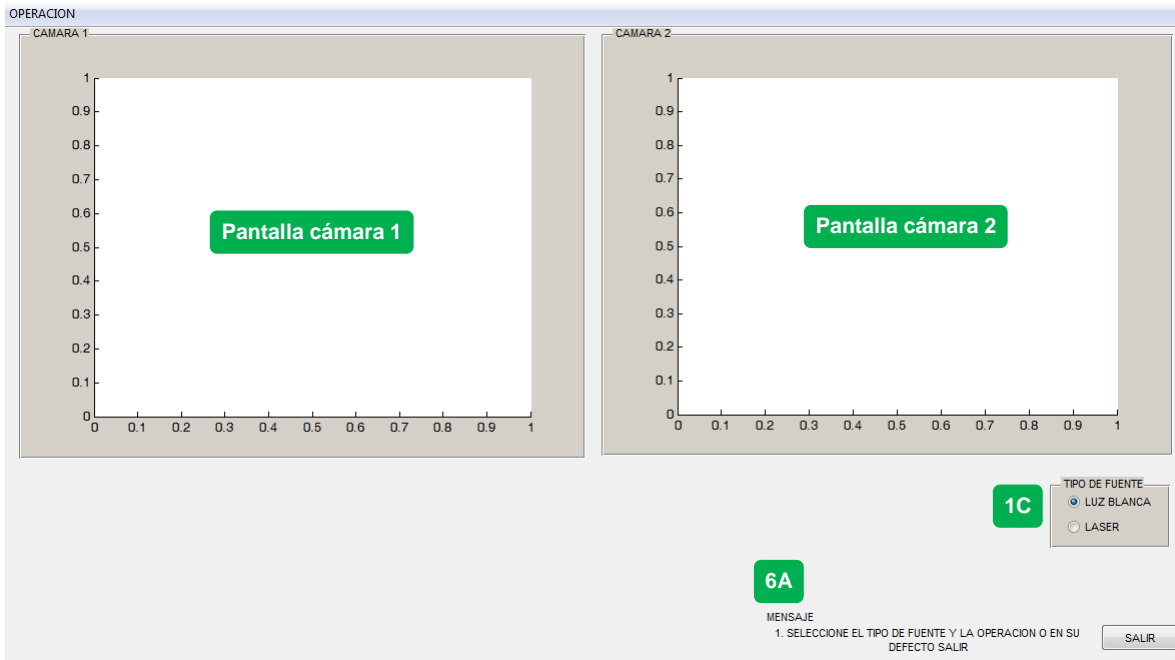
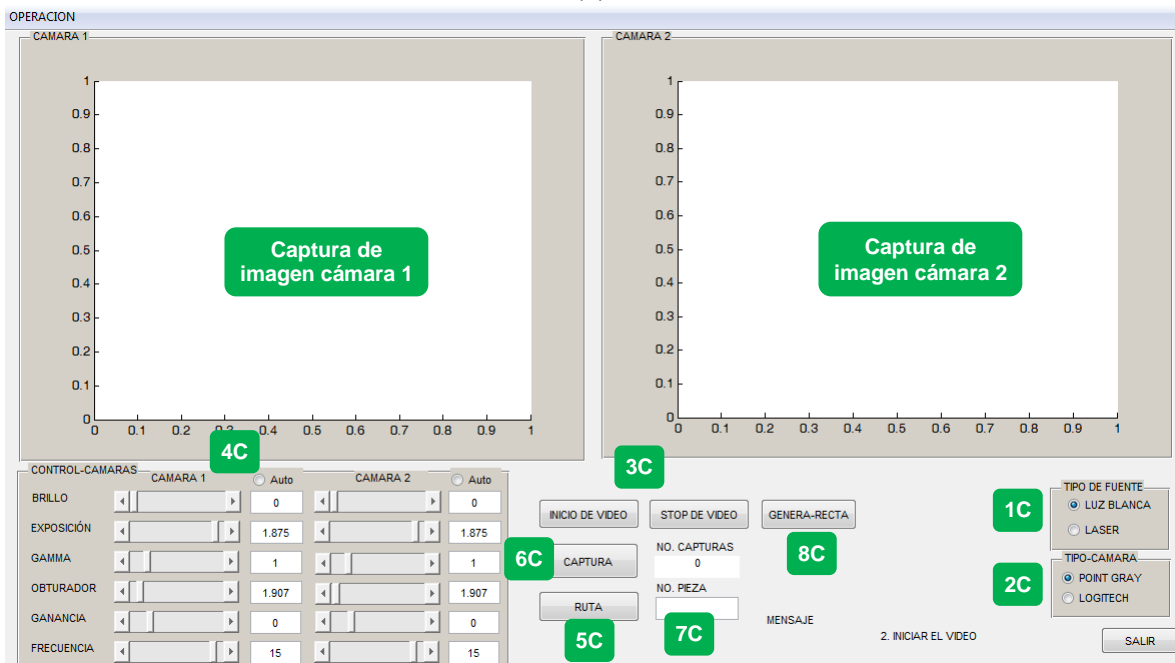


Figura 4.11 Estructura general del sistema de captura y PDS en tiempo real para identificación de borde y determinación de diámetros.

Conforme a la estructura del software de adquisición y PDS las tres principales operaciones de este sistema son: La Calibración, Operación Manual y Automática, que son ilustradas en forma consecutiva en las *Figura 4.12* y *Figura 4.13*.

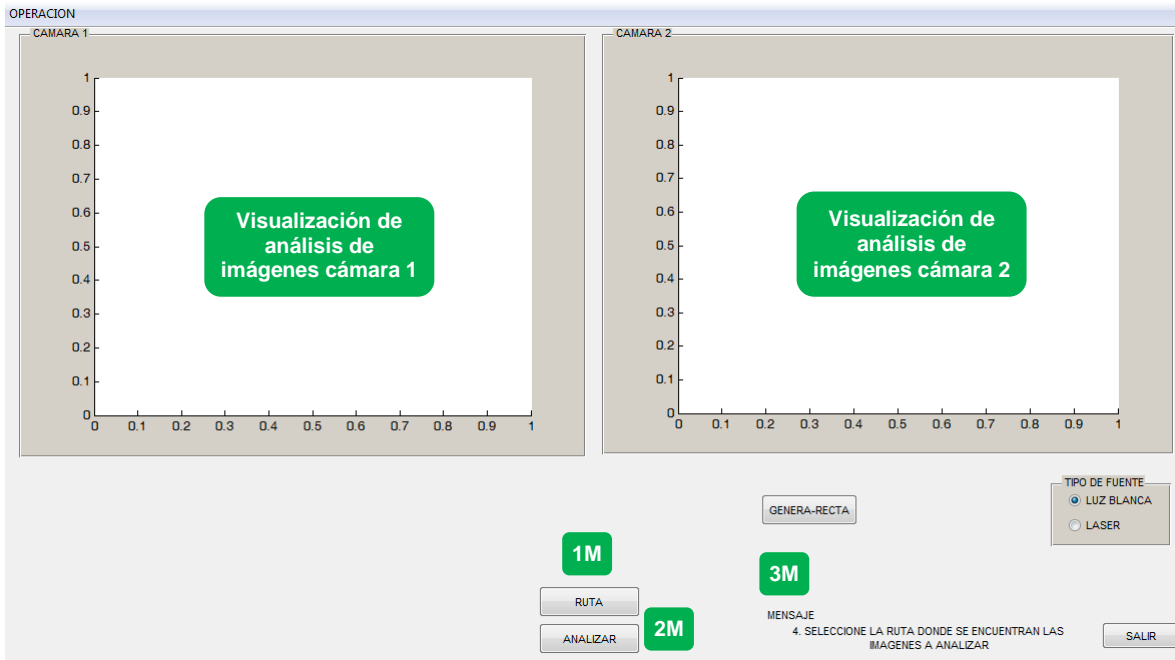


(a)



(b)

Figura 4.12 Interface gráfica del software de captura y PDS en tiempo real para identificación de borde y determinación de diámetros; (a) Pantalla de inicio, (b) Sección de calibración del sistema.



(a)



(b)

Figura 4.13 Interface gráfica del software de captura y PDS en tiempo real para identificación de borde y determinación de diámetros; (a) Operación manual, (b) Operación automática.

Una vez iniciado el programa (*Figura 4.12(a)*) el procedimiento de calibración del sistema (*Figura 4.12(b)*) tiene como función principal la inicialización de valores tales como: tipo de luz, tipo de cámaras, calibración de las propiedades de las cámaras (brillo, tiempo de exposición, etc.), captura de las imágenes (formato de archivo) en forma manual y calibración del arreglo.

La sección de calibración del sistema está integrada por las siguientes etapas:

- a) Etapa de calibración manual del arreglo óptico
 - Ajuste de la geometría óptica del prototipo y alineación perpendicular de las dos cámaras CCD (son iguales) con respecto a los haces de luz por medio de un sistema de micro bench SM1 (Thorlabs).
- b) Determinación del campo de visión.

b1) Sistema de luz láser

Considerando:

$$m = \frac{H'}{H} = \frac{l'}{f} \quad \text{Ecuación 4.1}$$

donde:

H' = Tamaño final del patrón de difracción.

l' = Distancia entre el foco de la lente y el plano de formación de imagen.

H = Tamaño inicial del patrón de difracción (1.08mm).

f = Distancia focal de la lente.

m = Parámetro de magnificación.

Teniendo un campo de visión de $H' = 4.86$ mm (dado por el tamaño del CCD), un tamaño inicial del patrón de difracción $H = 1.8$ mm se determina el parámetro de magnificación por medio de la *Ecuación 4.1*:

$$m = \frac{H'}{H} = \frac{4.86}{1.08} = 4.5$$

Considerando una lente con distancia focal $f = 25.4$ mm, se determina l' :

$$l' = mf = (4.5)(25.4 \text{ mm}) = 114.3 \text{ mm}$$

Con lo anterior es posible dimensionar el arreglo experimental y seleccionar el tipo de montura, así como la posición de la cámara y la lente.

b2) Sistema de luz blanca

Considerando el mismo campo de visión de $H' = 4.86$ mm, un tamaño inicial de la sombra del borde $H = 0.486$ mm y la *Ecuación 4.1*, se determina la magnificación que tendrá la sombra:

$$m = \frac{H'}{H} = \frac{4.86}{0.486} = 10$$

Con base en esto se selecciona un objetivo de microscopio 10X con distancia de trabajo de 6.3 mm para obtener el valor aproximado de la magnificación requerida.

- c) Calibración automática o manual de las propiedades de las cámaras (brillo, tiempo de exposición, etc.). Las cuales se muestran en la *Tabla 4.1*:

Propiedad	Luz Láser	Luz Blanca
Brillo	0%	0%
Exposición	1.115 EV (valor de exposición)	1.033 EV (valor de exposición)
Obturador	0.383 s	56.39 s
Ganancia	0 dB	0 dB
Cuadros por segundo	1.875 fps	1.875 fps

Tabla 4.1 Parámetros de calibración de las cámaras CCD para el sistema luz laser y luz blanca.

- d) Captura de las imágenes de calibración utilizando dos muestras patrón (piezas 1 y 10 de la *Tabla A. 4* del apéndice A). Conociendo la ubicación de los bordes se pueden determinar los parámetros del modelo de ajuste matemático que convertirá la dimensión de pixeles a milímetros (interpolación del valor medido en pixeles con respecto a los valores medidos en las piezas patrón).

Por su parte la operación manual (*Figura 4.13(a)*) tiene como finalidad analizar imágenes de muestras capturadas y archivadas con anterioridad, para la determinación de sus diámetros.

Así mismo la operación automática (*Figura 4.13(b)*) basa su principio de operación en la captura y análisis de imágenes en tiempo real, obteniendo el valor del diámetro de la muestra en forma inmediata. Además de estar integrada por una función de visualización y tipo de análisis. Donde el tipo de visualización es una herramienta de ayuda para ilustrar tanto el patrón de difracción o el perfil de sombra y la imagen real de las cámaras, como se muestra en la *Figura 4.14*.

De igual forma el tipo de análisis determina si el perfil de difracción o perfil de sombra es obtenido en base a toda la imagen adquirida o de una sola sección de esta.

En el caso del hardware, este sistema lo integran dos cámaras monocromáticas CCD-USB CML-13S2MC marca PointGray 1280x960 a 8 bits de profundidad, operadas mediante el controlador multi cámara Flycapture2_x86 distribuido por la marca PointGray para software con versión MATLAB2012B o más actual. Además de un computador con procesador Intel Core 2 Duo, memoria RAM 4GB y sistema operativo a 32bits.

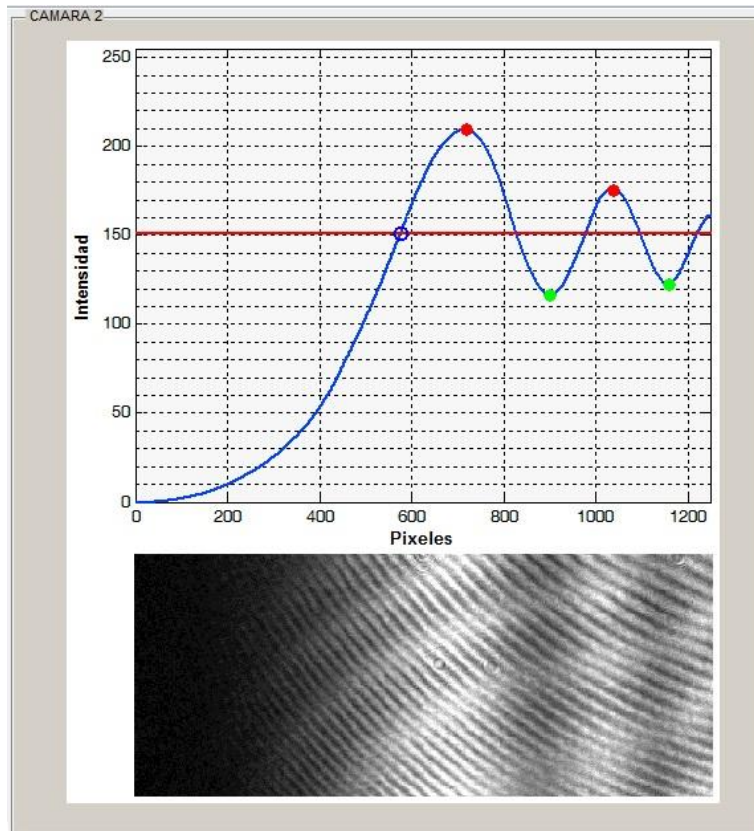


Figura 4.14 Visualización simultánea de patrón de difracción e imagen real de la cámara 2.

4.4 ADQUISICIÓN DE IMÁGENES Y DETECCIÓN DE BORDES

Acorde a los sistemas de adquisición de imágenes, detección de difracción y proyección de sombra de cada borde *Figura 4.5* y *Figura 4.9*. Se lleva a cabo la secuencia de adquisición de imágenes mostrada en la *Figura 4.15* para 3 pruebas, empleando una muestra de 10 piezas (ver *Figura 4.16*) las cuales presentan una variación de unos cuantos micrómetros en su diámetro ilustradas en el apéndice A *Tabla A. 1*, además de llevar a cabo una repetibilidad de 6 veces para cada muestra, simultáneamente se mantiene una temperatura de 19.9°C como primera etapa (primera secuencia de pruebas):

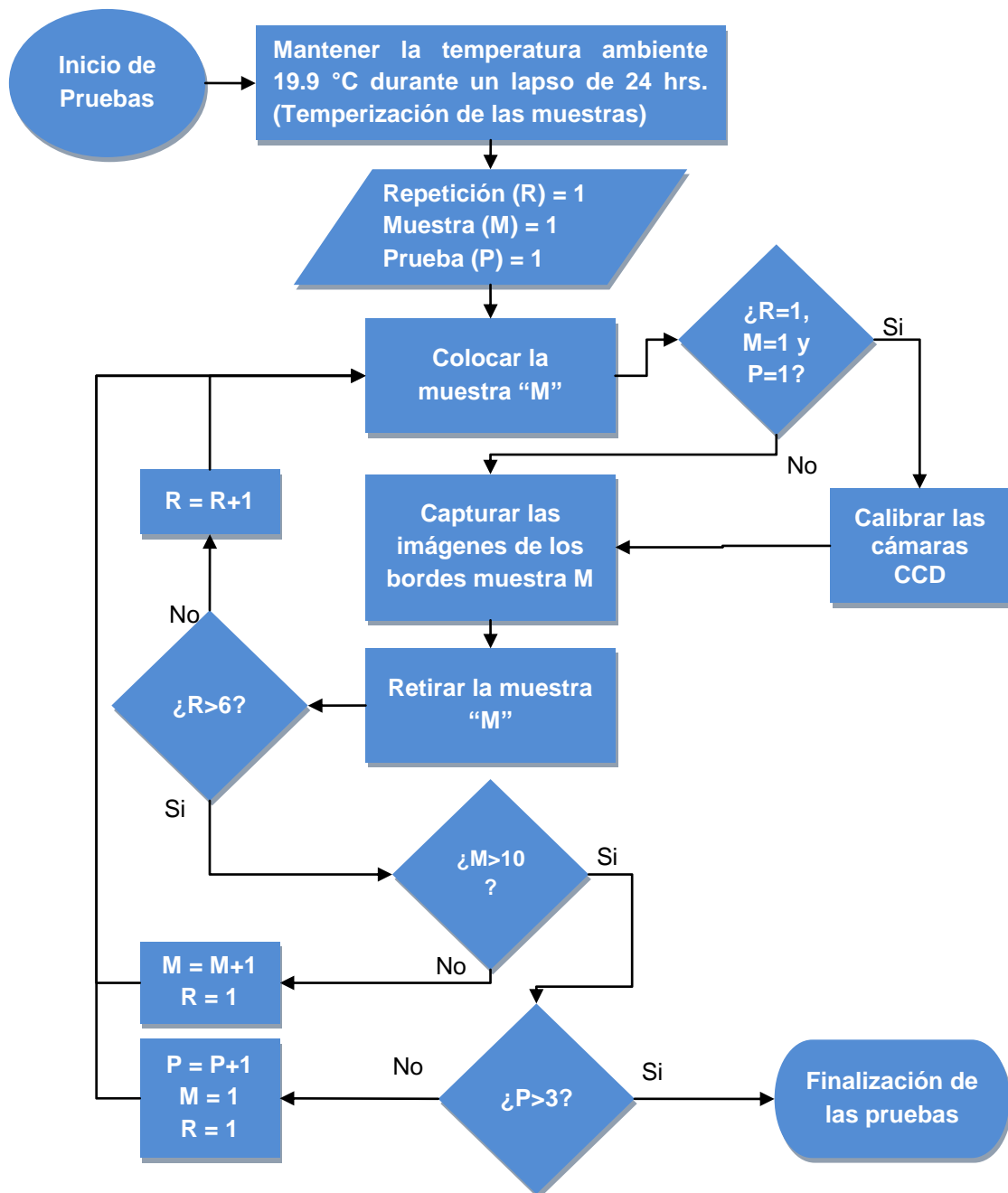


Figura 4.15 Secuencia de operación utilizada en la adquisición de imágenes empleando para una muestra de 10 piezas, controlando la temperatura ambiente en dos etapas T1 = 19.9°C y T2= 24.2°C, respectivamente.

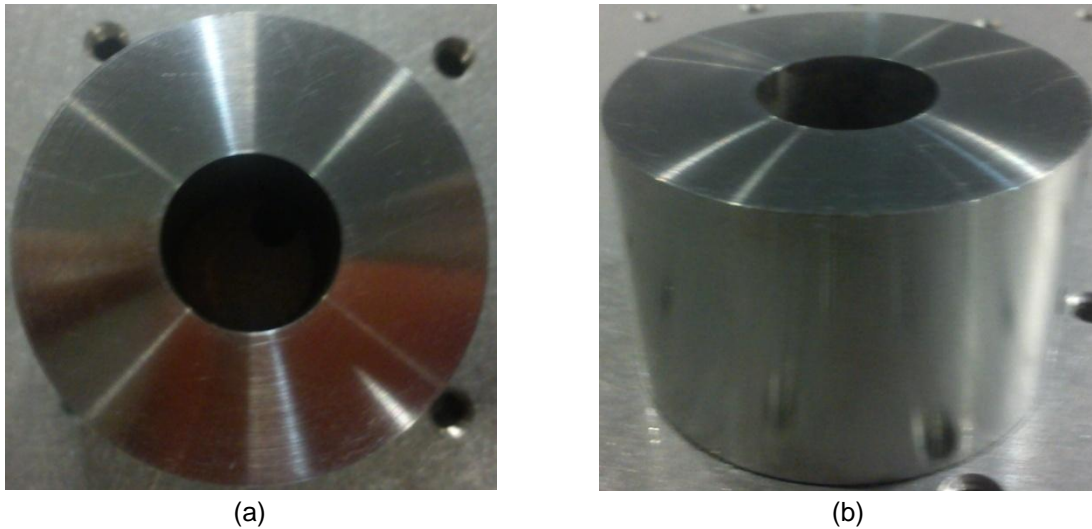


Figura 4.16 Eje metálico material O1 templado y rectificado empleado como objeto de estudio, $\varnothing < 50\text{mm}$.

Posteriormente a la etapa uno (Temperatura = 19.9°C) se iniciara el proceso de temperizado de las piezas a una temperatura = 24.2°C por un lapso de 24hrs, procediendo con la secuencia de operación mostrada en la *Figura 4.15*.

Finalizado el proceso de adquisición de imágenes (360 imágenes; 18 imágenes por muestra y por etapa), se procede a la búsqueda del algoritmo de procesamiento digital de señales para la identificación del borde de la flecha, la determinación de la distancia en pixeles existente entre el borde del eje y el borde de la cámara (zona de la sombra, ver *Figura 4.17*).

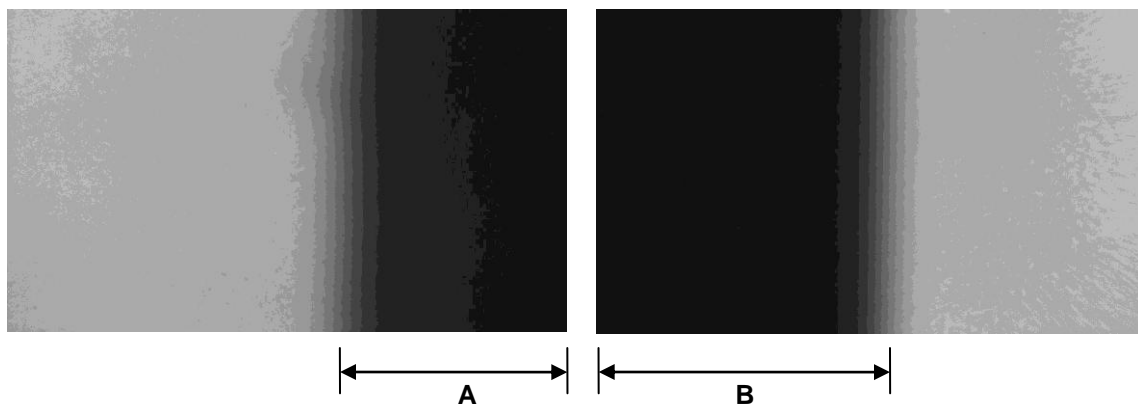


Figura 4.17 Determinación de la ubicación de los bordes del eje metálico con respecto a los bordes de las cámaras. A = Distancia del borde izquierdo; B = Distancia del borde derecho.

4.4.1 DETECCIÓN DE BORDE POR DIFRACCIÓN

Con base a las imágenes adquiridas empleando el sistema de detección de difracción, se procede a la estructuración del algoritmo de PDS (procesamiento digital de señales) el cual es mostrado en la *Figura 4.18*.

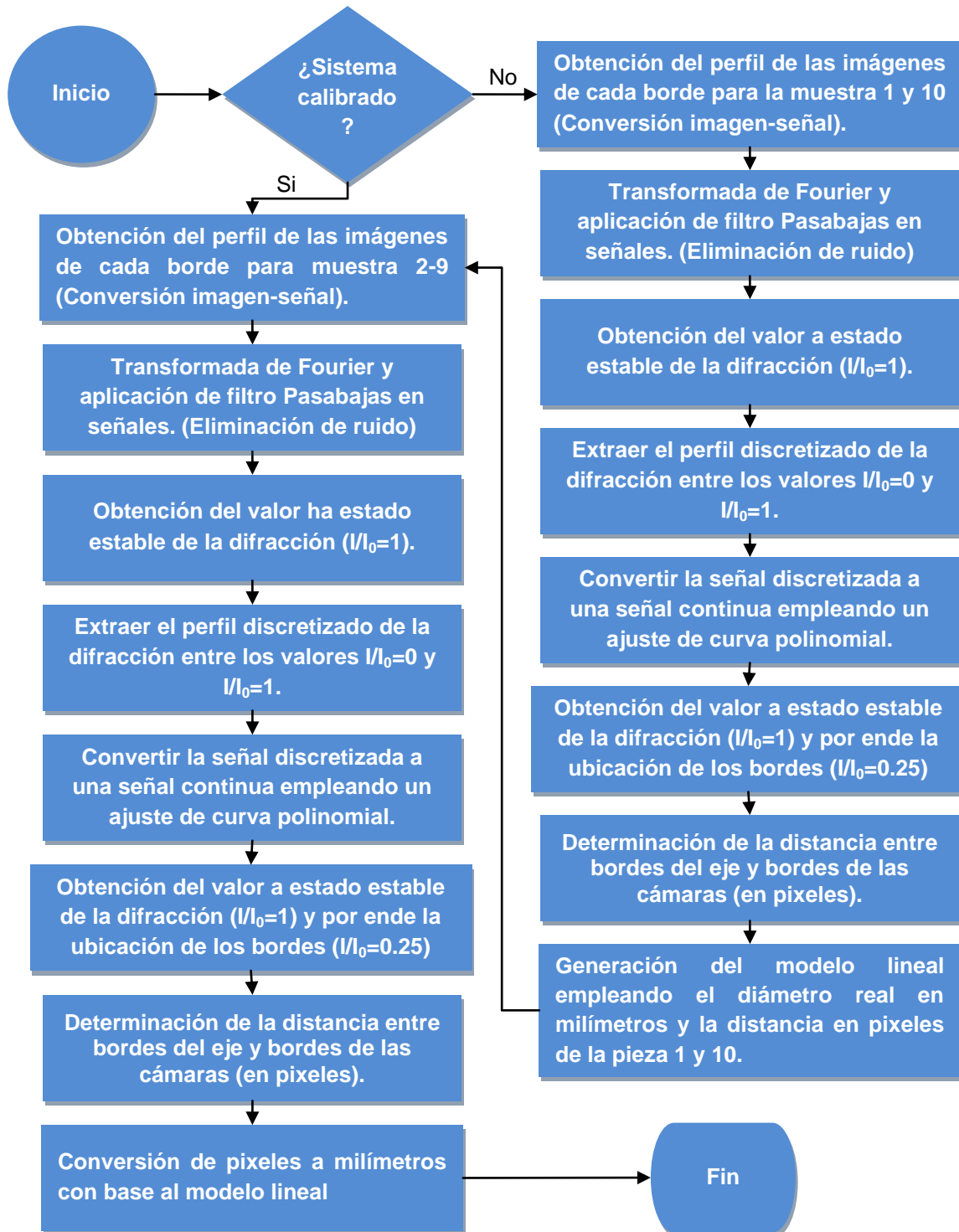


Figura 4.18 Diagrama de flujo del algoritmo para filtraje de señal, determinación de la ubicación de los bordes del eje metálico empleando el método de detección de difracción.

Con base al algoritmo anterior, a continuación se describen los distintos pasos del procesamiento de señales:

- A. Captura de las imágenes de difracción, en la *Figura 4.19(a)* se muestra la imagen del borde derecho como ejemplo.
- B. Obtención del perfil de difracción de las señales de entrada. En la *Figura 4.19(b)* se muestra el perfil derecho (ejemplo anterior).
- C. La *Figura 4.20(a)* muestra el resultado del filtraje a la señal anterior por medio de un filtro pasa bajas en el espacio de frecuencia.
- D. Para determinar el valor a estado estable del patrón de difracción ($I/I_0 = 1$) para la señal discreta en el intervalo $1 < x < 1290$ pixeles, se determinan los valores máximos y mínimos de la señal:

Condición 1	Condición 2	Resultado
Si $I(x - 1) < I(x) > I(x + 1)$	$e I(x) > I(x - 1) - \text{delta}$	$I(x) = \text{maximo}$
Si $I(x - 1) > I(x) < I(x + 1)$	$e I(x) < I(x - 1) - \text{delta}$	$I(x) = \text{minimo}$

Donde:

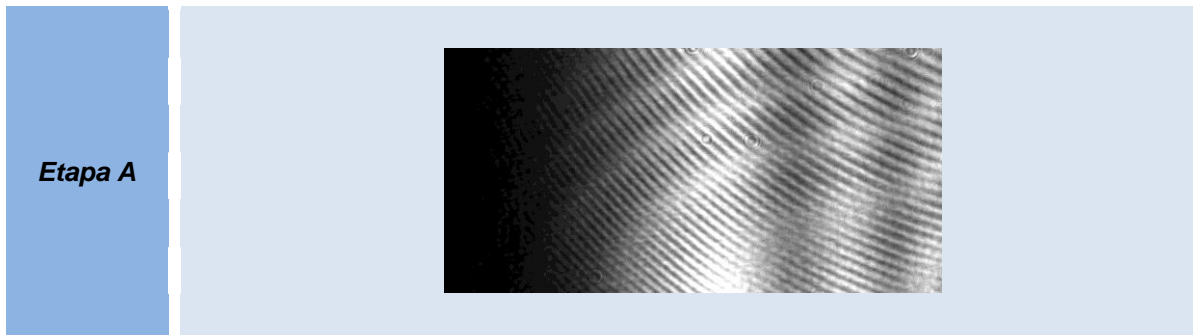
- a. Un valor máximo de $I(x)$ es asignado si su valor anterior y posterior son menores a él, además de ser precedido (a la izquierda) por un valor inferior en delta.
- b. Un valor mínimo de $I(x)$ es asignado si su valor anterior y posterior son mayores a él, además de ser precedido (a la izquierda) por un valor superior en delta.

Obtenidos los máximos y los mínimos de la señal se calcula el promedio o valor a estado estable por medio de la *Ecuación 4.2*:

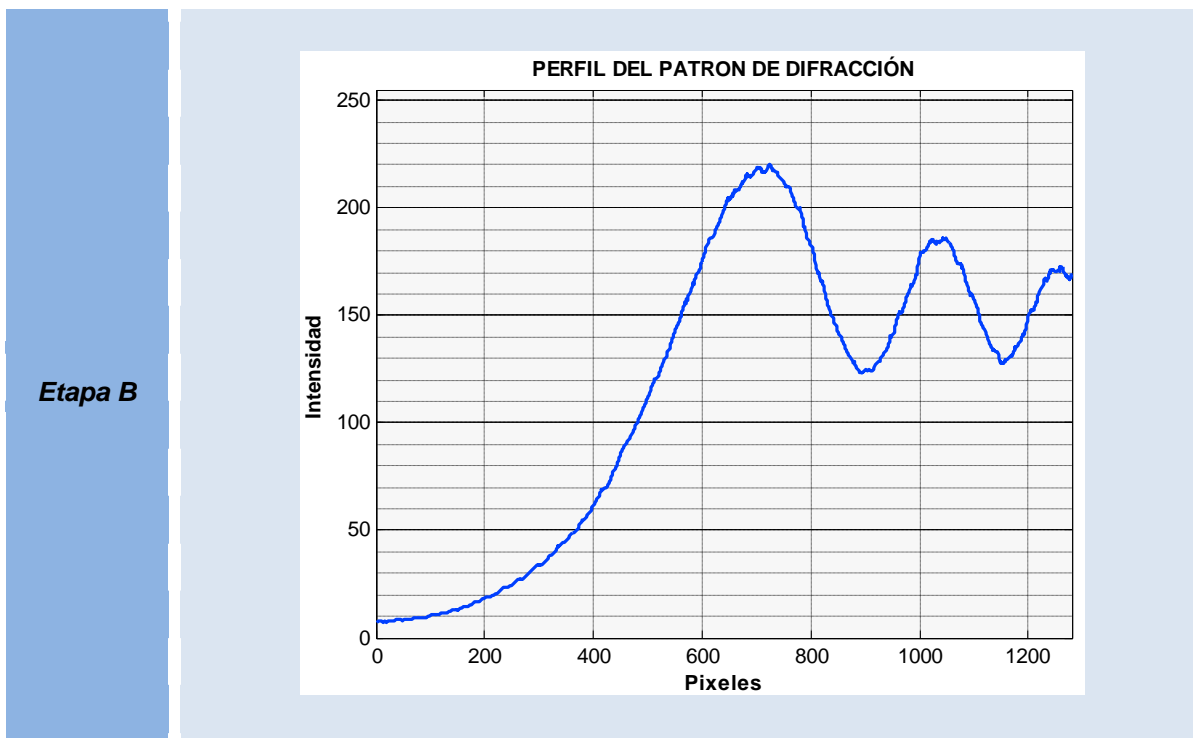
$$I(x)_{SE} = \sum_{i=1}^N \frac{I(x)_{i-max}}{N} + \sum_{j=1}^M \frac{I(x)_{j-min}}{N} \quad \text{Ecuación 4.2}$$

- E. Se extrae el perfil de difracción comprendido en el intervalo $I/I_0 = 0$ y $I/I_0 = 1$ y que es mostrado en la *Figura 4.20(b)*.
- F. Se realiza la conversión de la señal discreta a continua por modelado matemático (ver *Figura 4.21*).
- G. Obtención del valor a estado estable ($I/I_0 = 1$) y el valor donde se ubican los bordes del eje metálico ($I/I_0 = 0.25$) en base a la ecuación 4.3 (caso particular de la *Ecuación 2.25*), mostrado en la *Figura 4.21*.

$$I(x)_{borde} = \frac{1}{4} I(x)_{SE} \quad \text{Ecuación 4.3}$$

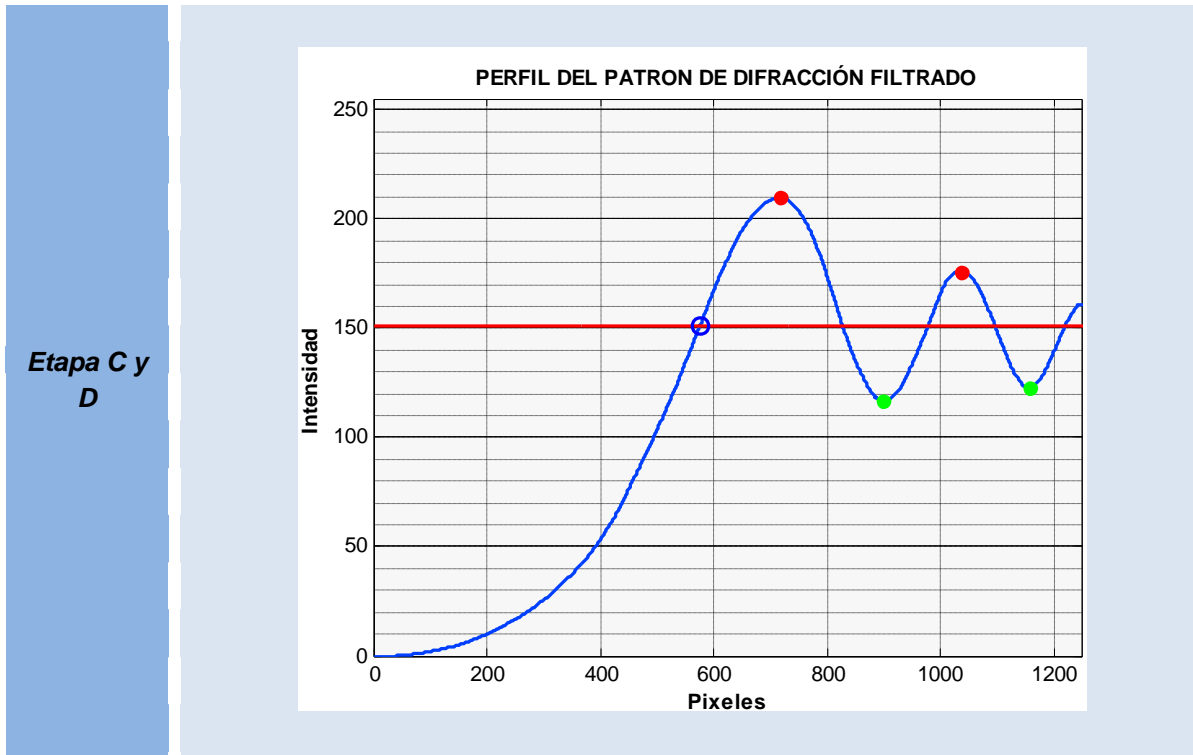


(a)

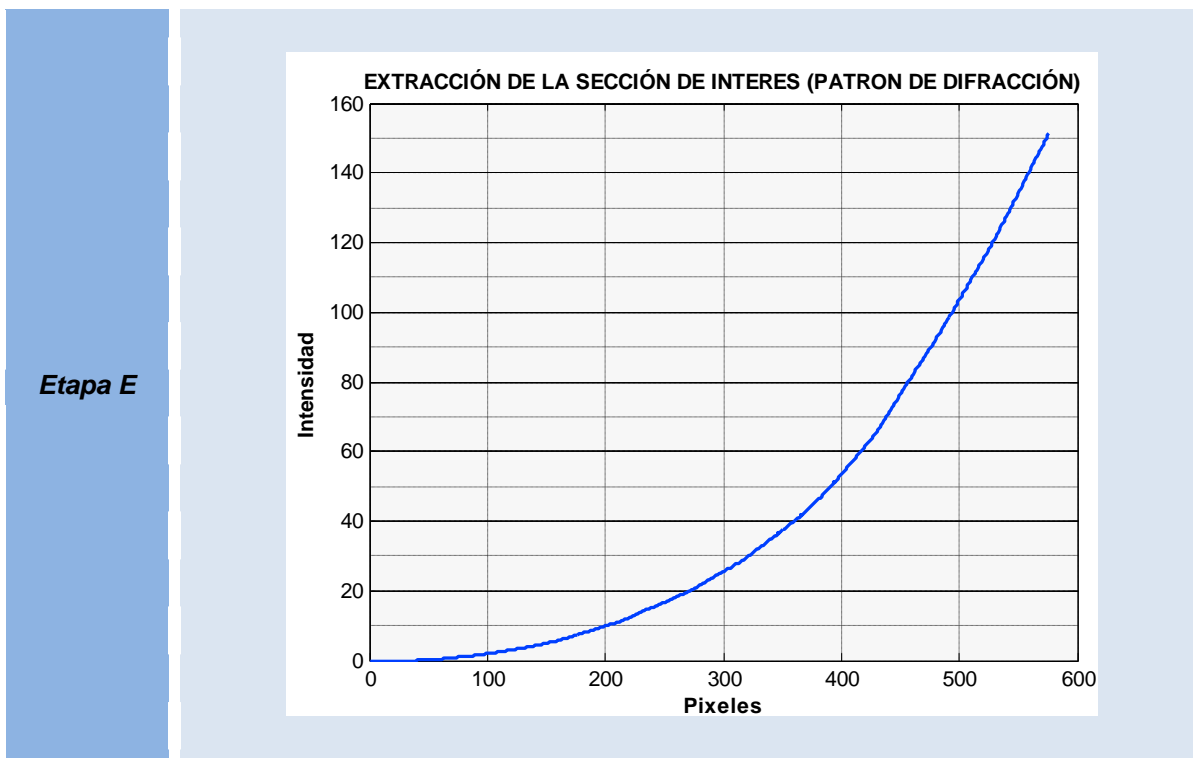


(b)

Figura 4.19 Etapa A y B del PDS (Procesamiento Digital de Señales) para ubicación de bordes empleando identificación de difracción; (a) Imagen de Difracción, (b) Perfil de difracción.



(a)



(b)

Figura 4.20 Etapa C, D y E del PDS en la identificación de difracción; (a) Perfil de difracción filtrado e identificación del valor ($I/I_0 = 1$), (b) Sección de interés del perfil de difracción.

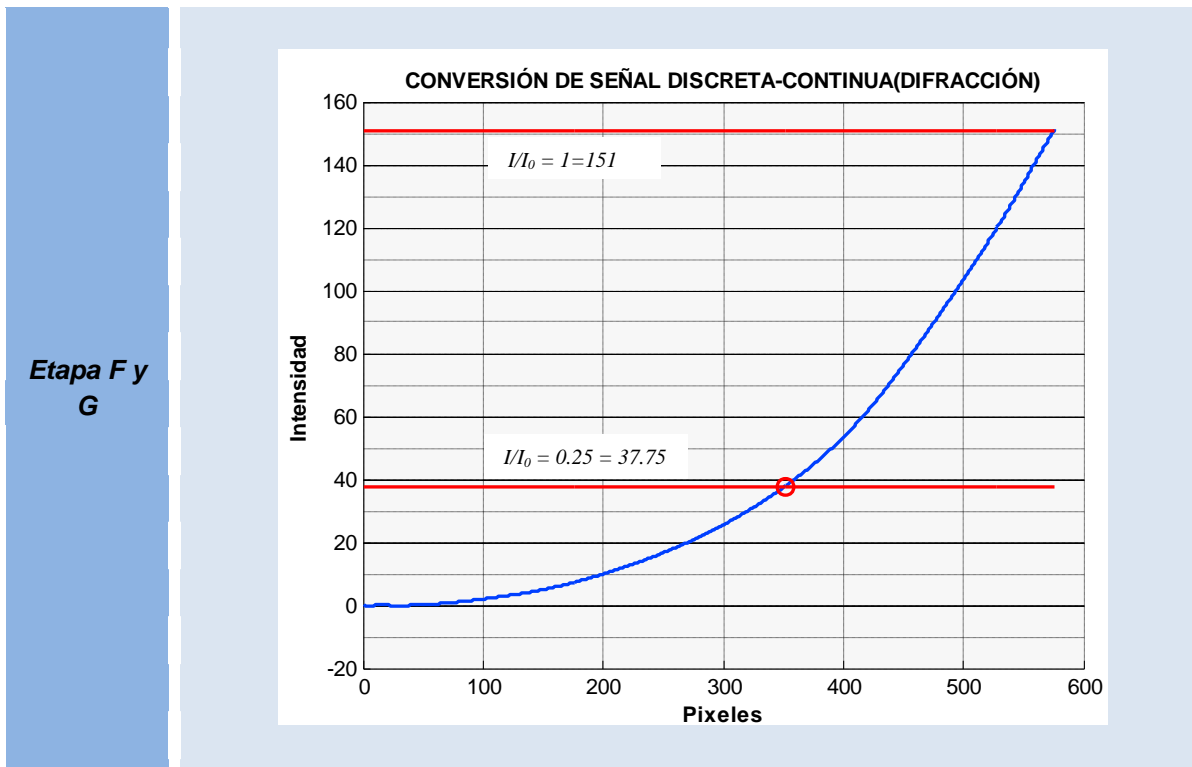


Figura 4.21 Etapa F y G del PDS en la identificación de difracción. Conversión de señal discreta a continua e identificación de la ubicación del borde.

4.4.2 DETECCIÓN DE BORDE POR PROYECCIÓN DE SOMBRA

Tomando como referencia el algoritmo mostrado en la *Figura 4.18* y la derivada de la señal para detección de bordes [35], se llevan a cabo las adecuaciones pertinentes para la estructuración del algoritmo de PDS del sistema de proyección de sombra ver la *Figura 4.22*.

Posteriormente se aprecia de forma visual cada etapa del procesamiento de señales:

- A. Captura de la imágenes de la proyección de sombra, mostradas en la *Figura 4.23(a)*.
- B. Obtención del perfil de proyección de sombra (señal de entrada). En la *Figura 4.23(b)* se muestra el perfil derecho (ejemplo anterior).
- H. La *Figura 4.24(a)* muestra el resultado del filtraje a la señal anterior por medio de un filtro pasa bajas en el espacio de frecuencia.
- C. Para determinación del punto de inflexión de la señal discreta se emplea la primera derivada. Representada matemáticamente de la siguiente forma:

$$I'(x) = \frac{d}{dx} I(x) \quad \text{Ecuación 4.4}$$

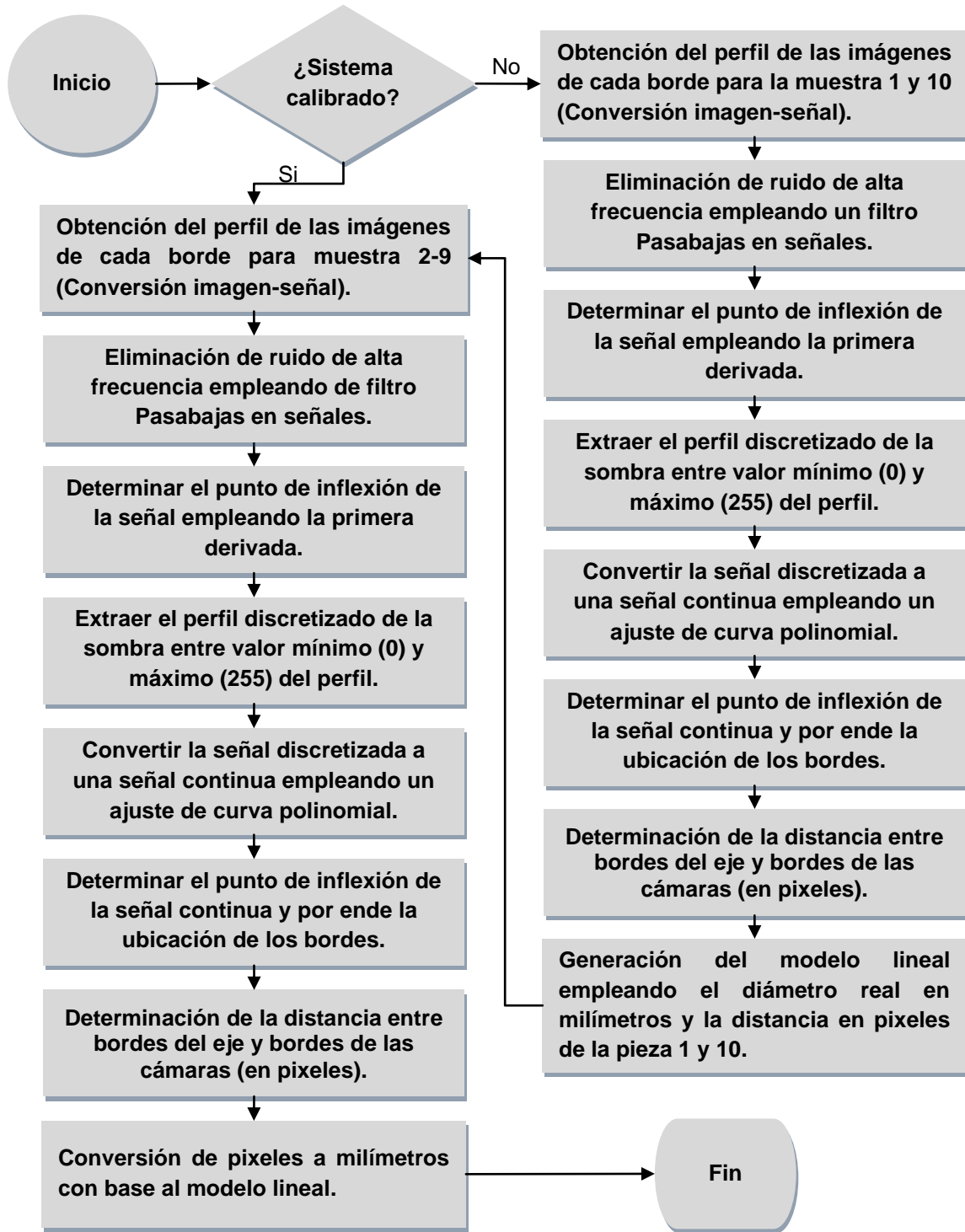


Figura 4.22 Diagrama de flujo del algoritmo para filtraje de señal, determinación de la ubicación de los bordes del eje metálico empleando el método de detección de difracción.

Con base en el intervalo $1 < x < 1290$ pixeles se determinan el valor máximo de la derivada:

Condición 1	Condición 2	Resultado
$Si I'(x - 1) < I'(x) > I'(x + 1)$	$e I'(x) > I'(x - 1) - \text{delta}$	$I'(x) = \text{máximo}$

Donde un valor máximo de $I'(x)$ es asignado si su valor anterior y posterior son menores a él, además de ser precedido (a la izquierda) por un valor inferior en delta. La ubicación del máximo de $I'(x)$ representa así mismo el punto de inflexión de $I(x)$.

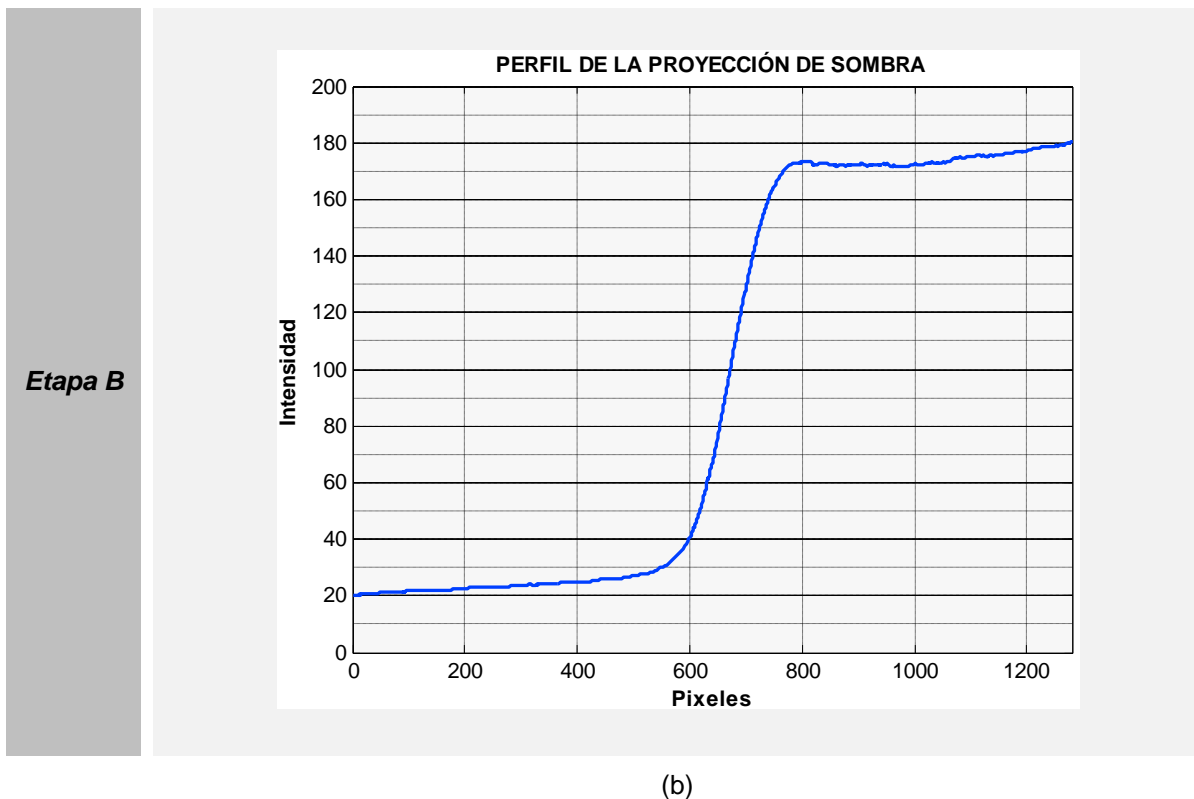
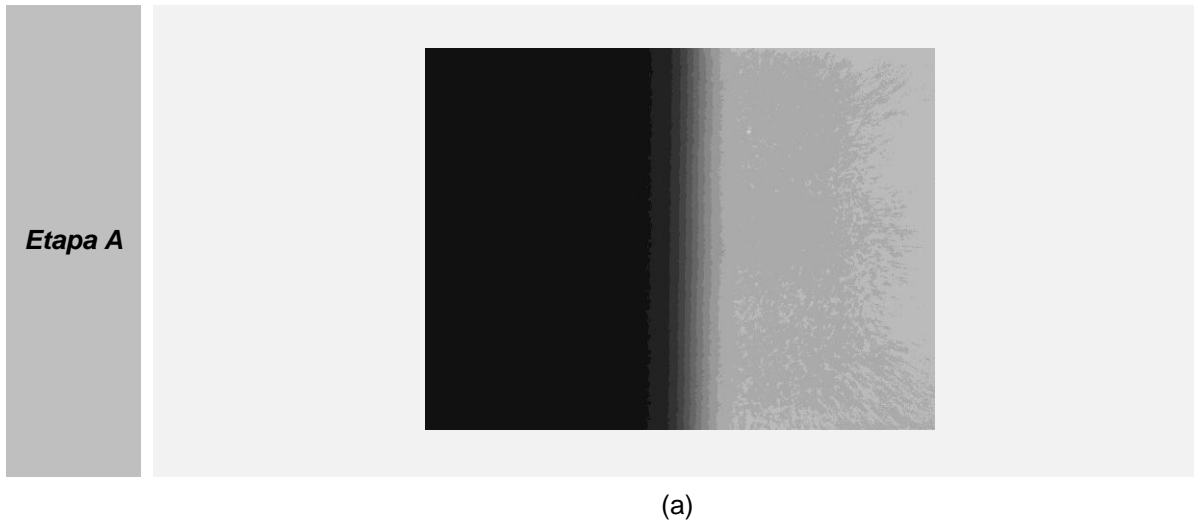


Figura 4.23 Etapa A y B del PDS (Procesamiento Digital de Señales) para ubicación de bordes empleando la proyección de sombra; (a) Imágenes de la proyección de sombra, (b) Perfil de proyección de sombra.

D. Se extrae el perfil de proyección de sombra comprendido entre su valor mínimo y máximo, indicado en la *Figura 4.24(b)*.

- E. Se realiza la conversión de la señal discreta a continua por modelado matemático (ver *Figura 4.25*).
- F. Finalmente se determina el punto de inflexión de la señal continua el cual representa la ubicación de los bordes del eje metálico (observar *Figura 4.25*).

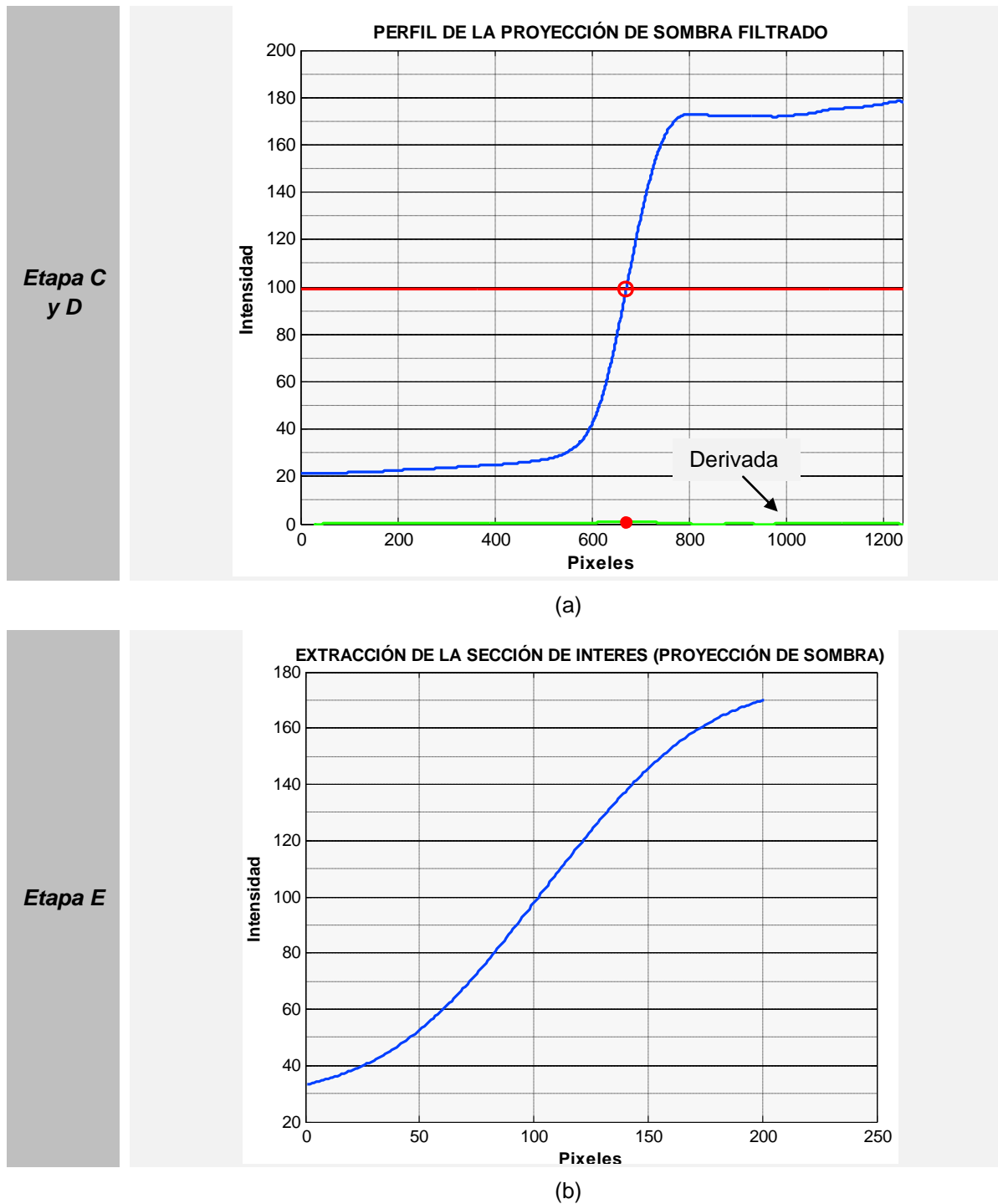


Figura 4.24 Etapa C, D y E del PDS en la proyección de sombra; (a) Perfil de la sombra filtrado e identificación del punto de inflexión, (b) Sección de interés del perfil de la sombra.

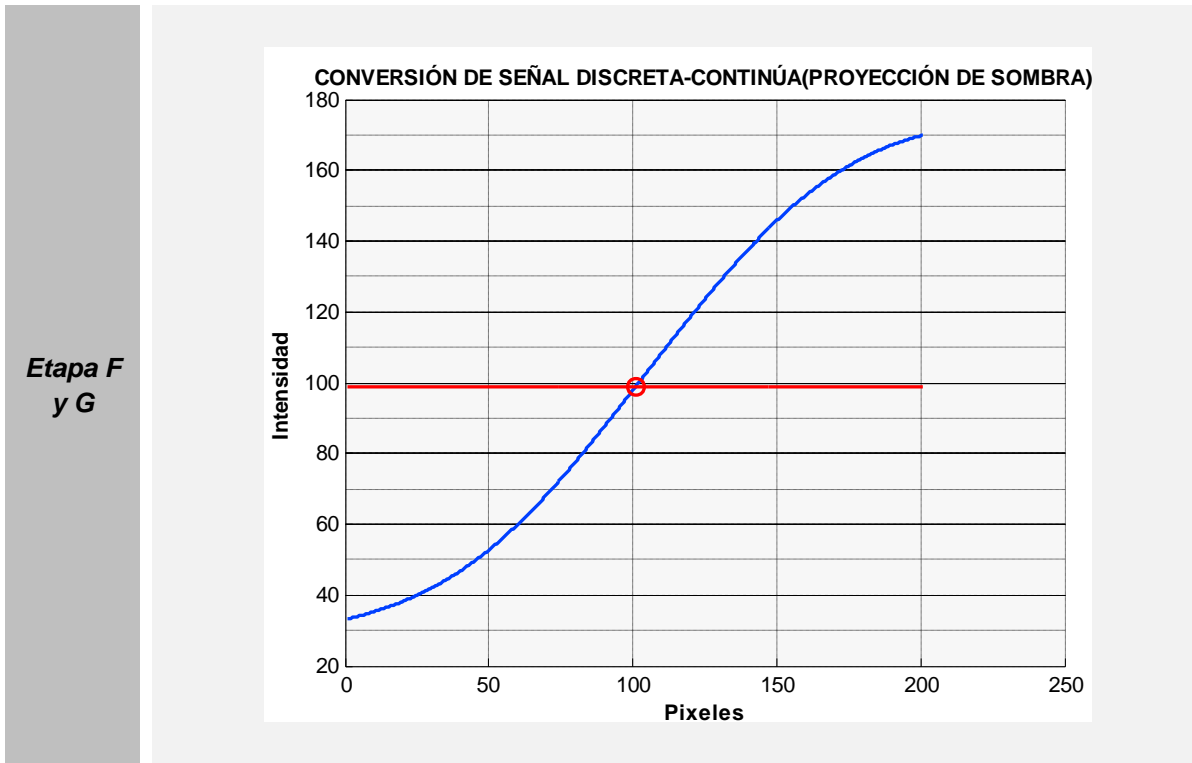


Figura 4.25 Etapa F y G del PDS en la proyección de sombra. Conversión de señal discreta a continua e identificación de la ubicación del borde.

4.5 RESULTADOS FINALES

En esta sección se presentan los resultados obtenidos en la medición de las diez piezas de control, empleando los sistemas mecánicos (Vernier y micrómetro) y sistemas ópticos [Detección de difracción (luz láser) y proyección de sombra (luz blanca)]. Teniendo como base de estudio las siguientes condiciones:

- A. Cambio de temperatura.
- B. Comparación de los métodos ópticos.
- C. Comparación de los métodos ópticos contra métodos mecánicos.

En todos estos estudios se emplean como parámetros:

- a. El intervalo de medición obtenido por tres mediciones y la media de estos intervalos.
- b. La desviación estándar de las mediciones obtenidas por tres mediciones y la media de estas desviaciones estándar.

A su vez se tomara como punto de referencia la medición de las piezas de control obtenida, bajo una temperatura de 19.9 °C con la máquina de medición por coordenadas (DIM-PT-001). Marca: Carl Zeiss, Modelo: C-400, ubicada en el

Laboratorio de metrología dimensional del Centro de Investigaciones en Óptica (CIO), el cual está acreditado ante ema (entidad mexicana de acreditación, a.c). Como parte adicional a las gráficas y resultados indicados a continuación en el apéndice B se muestran las gráficas de repetibilidad y caja para cada método con el propósito de mostrar parámetros estadísticos, como lo son: dispersión, mediana, cuarta dispersión, etc.

4.5.1 ESTUDIO POR CAMBIO DE TEMPERATURA

4.5.1.1 BASADO EN EL INTERVALO DE MEDICIÓN

A 19.9 °C se toman 3 mediciones por instrumento, dando como resultados los mostrados en las Figuras 4.26, 4.27, 4.28 y 4.29. En el caso específico del Vernier y Micrómetro la metodología empleada fue la siguiente:

- Fijación estática de los instrumentos de medición por medio de una montura mecánica, con el objetivo de eliminar errores por puntos de apoyo, paralaje y posición.
- Colocación de las muestras entre las puntas del instrumento y cierre de las mismas.
- Llevar a cabo una serie de seis mediciones y anotar los resultados obtenidos.

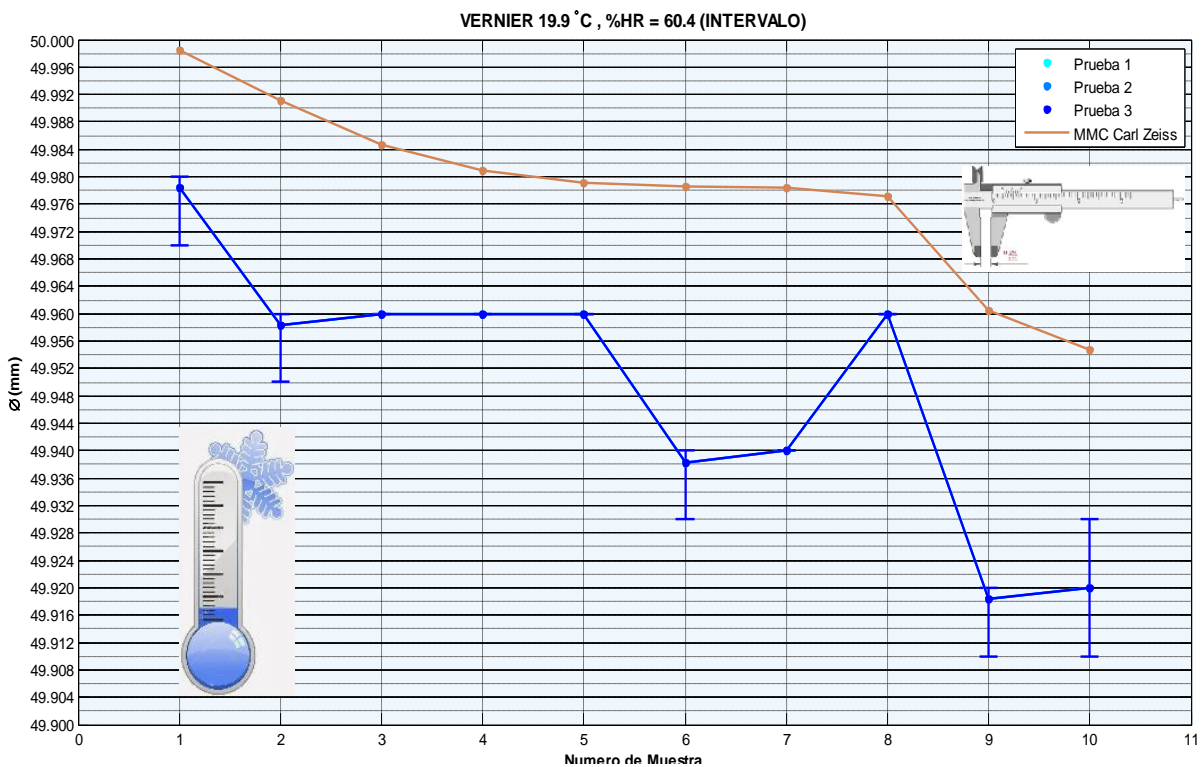


Figura 4.26 Intervalo de medición del diámetro para cada pieza de control, en tres pruebas diferentes, con un porcentaje de Humedad Relativa (%HR) =60.4 y empleando el Vernier.

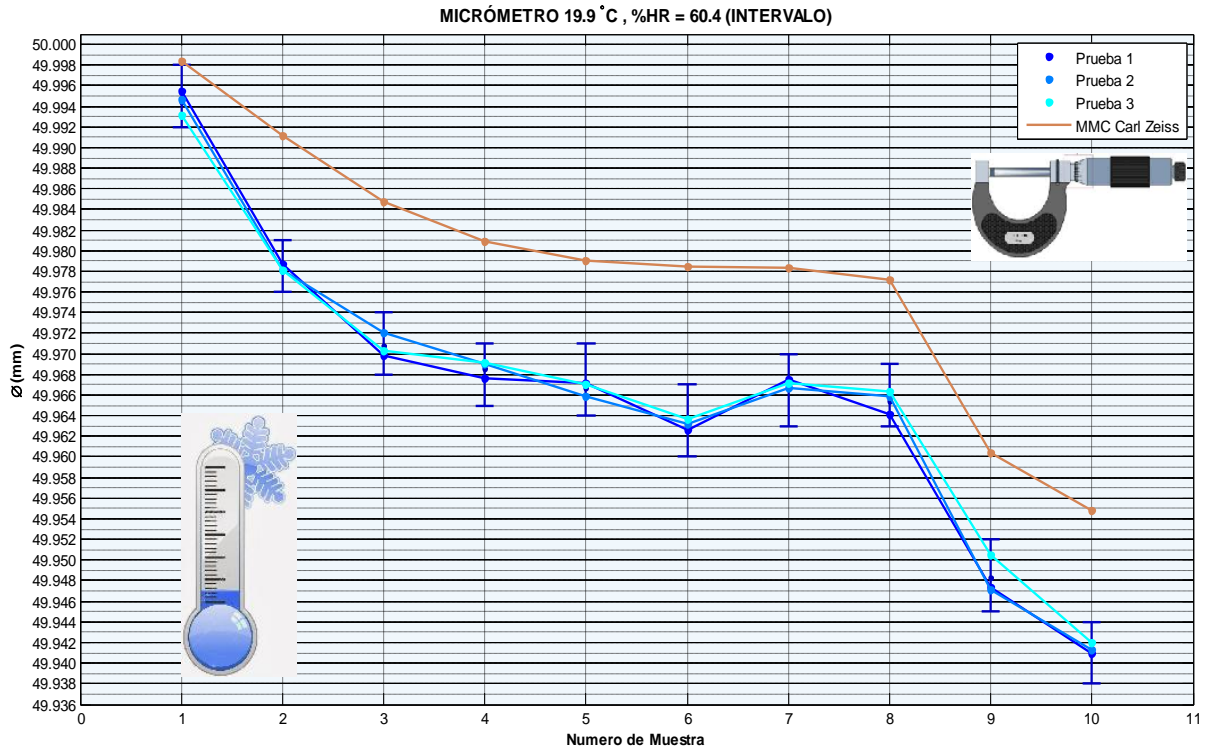


Figura 4.27 Intervalo de medición del diámetro para cada pieza de control, en tres pruebas diferentes, con un %HR =60.4 y empleando el Micrómetro.

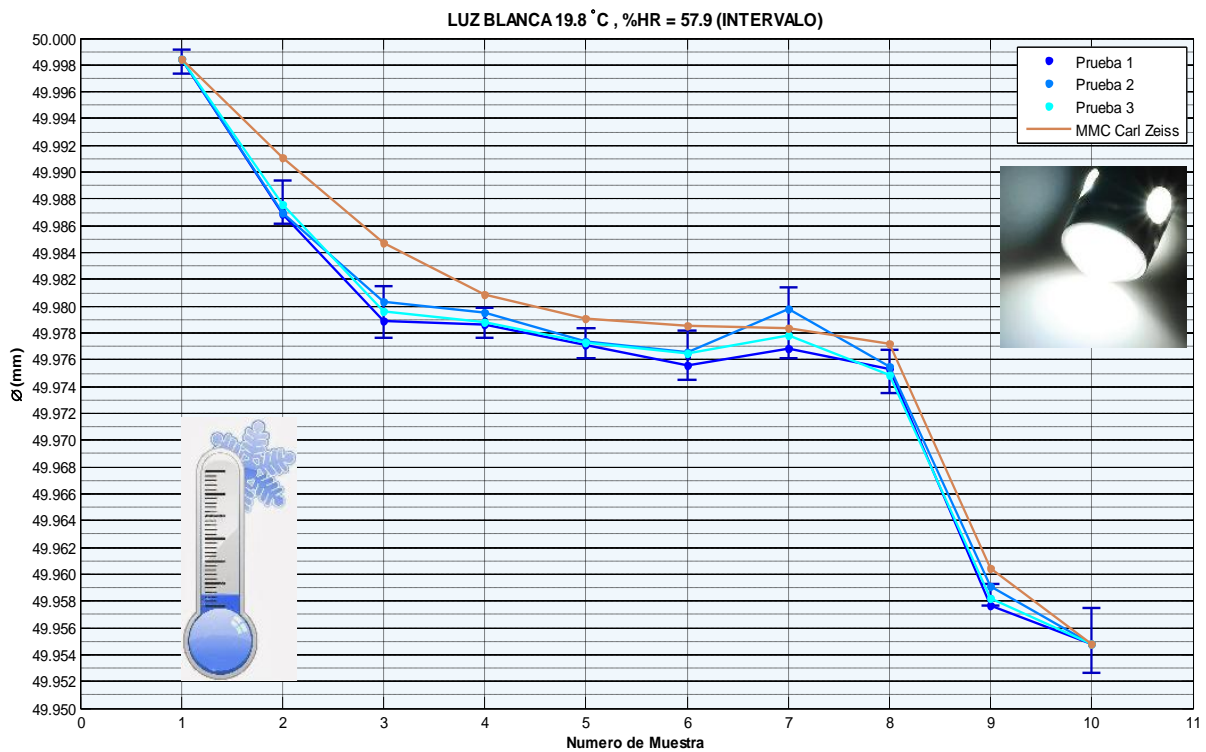


Figura 4.28 Intervalo de medición del diámetro para cada pieza de control, en tres pruebas diferentes, con un %HR =57.9 y empleando la Proyección de luz blanca como método remoto de medición.

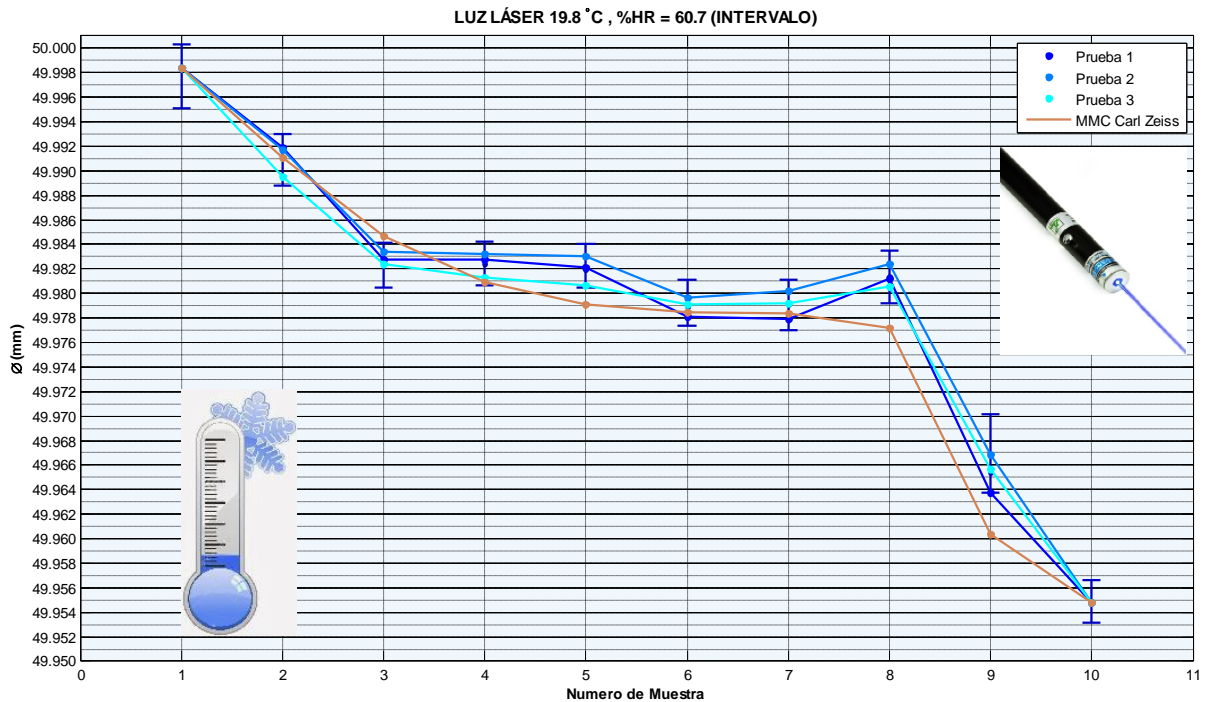


Figura 4.29 Intervalo de medición del diámetro para cada pieza de control, en tres pruebas diferentes, con un %HR =60.7 y empleando la Detección de difracción (luz láser) como método remoto de medición.

De la misma manera se vuelven a tomar 3 mediciones por instrumento, bajo la condición de 24.2 °C y se muestran los resultados en las Figuras 4.30, 4.31, 4.32, 4.33.

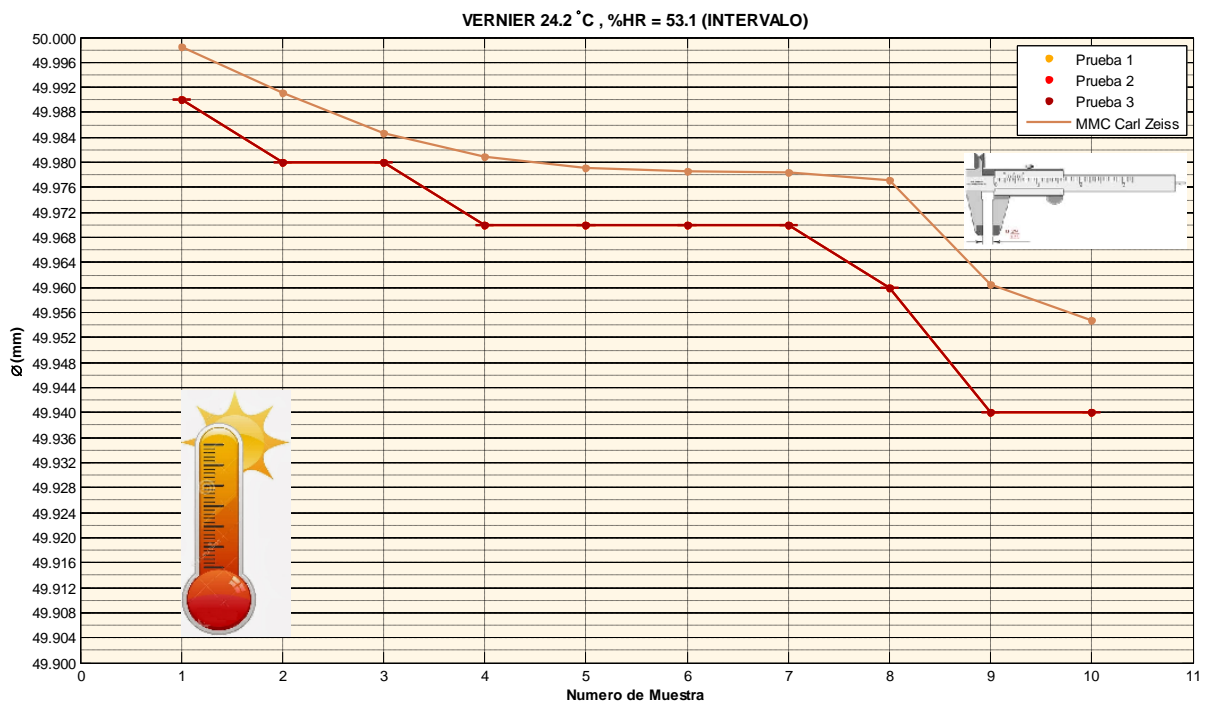


Figura 4.30 Intervalo de medición del diámetro para cada pieza de control, en tres pruebas diferentes, con un %HR =53.1 y empleando el Vernier.

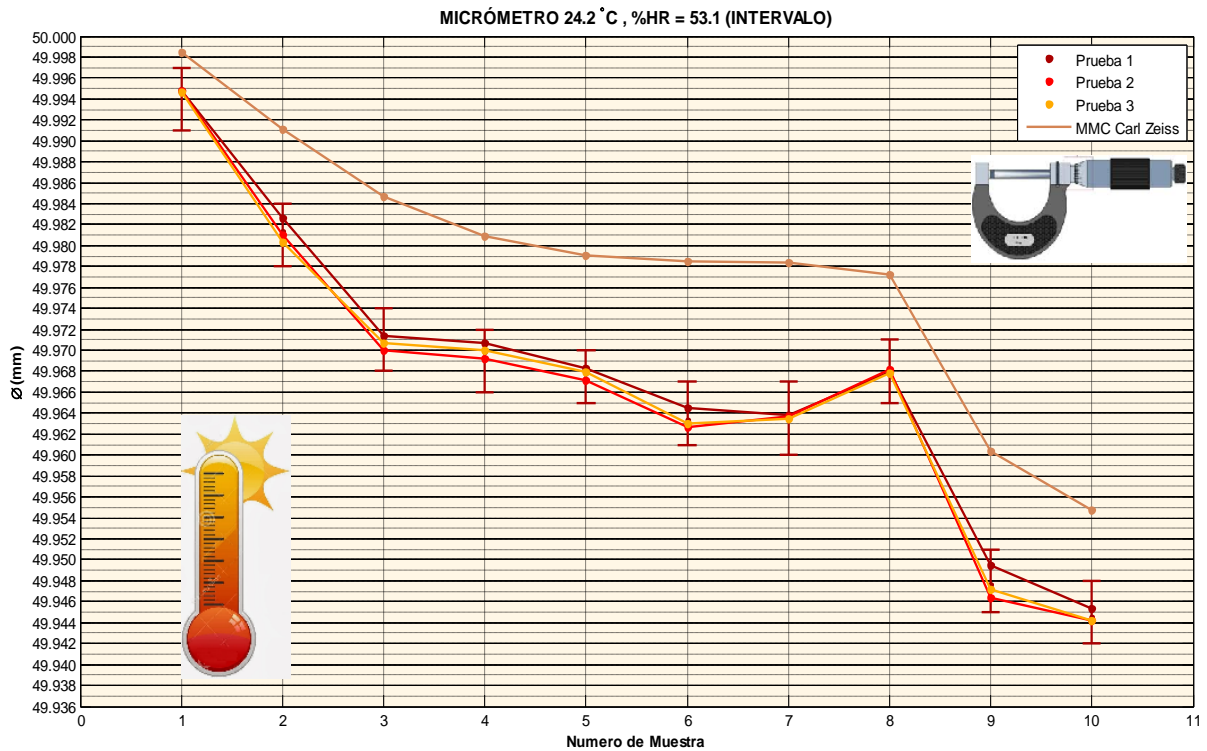


Figura 4.31 Intervalo de medición del diámetro para cada pieza de control, en tres pruebas diferentes, con un %HR =53.1 y empleando el Micrómetro.

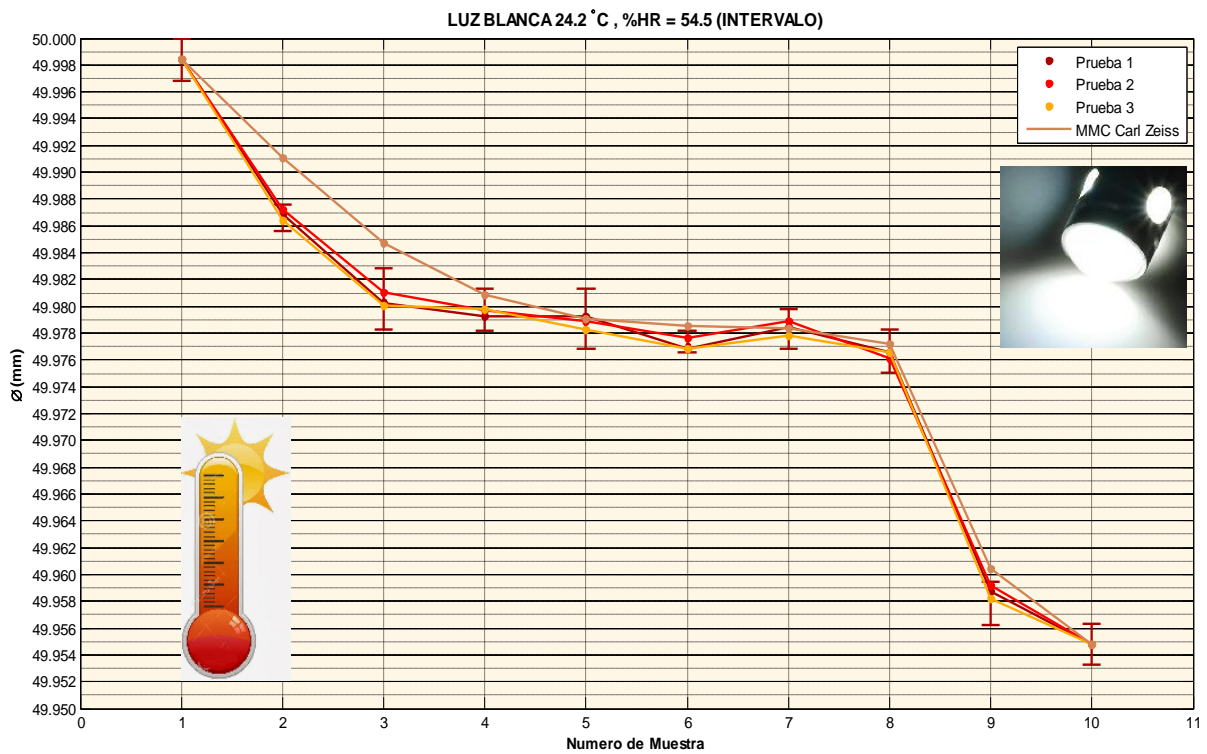


Figura 4.32 Intervalo de medición del diámetro para cada pieza de control, en tres pruebas diferentes, con un %HR =54.5 y empleando la Proyección de luz blanca.

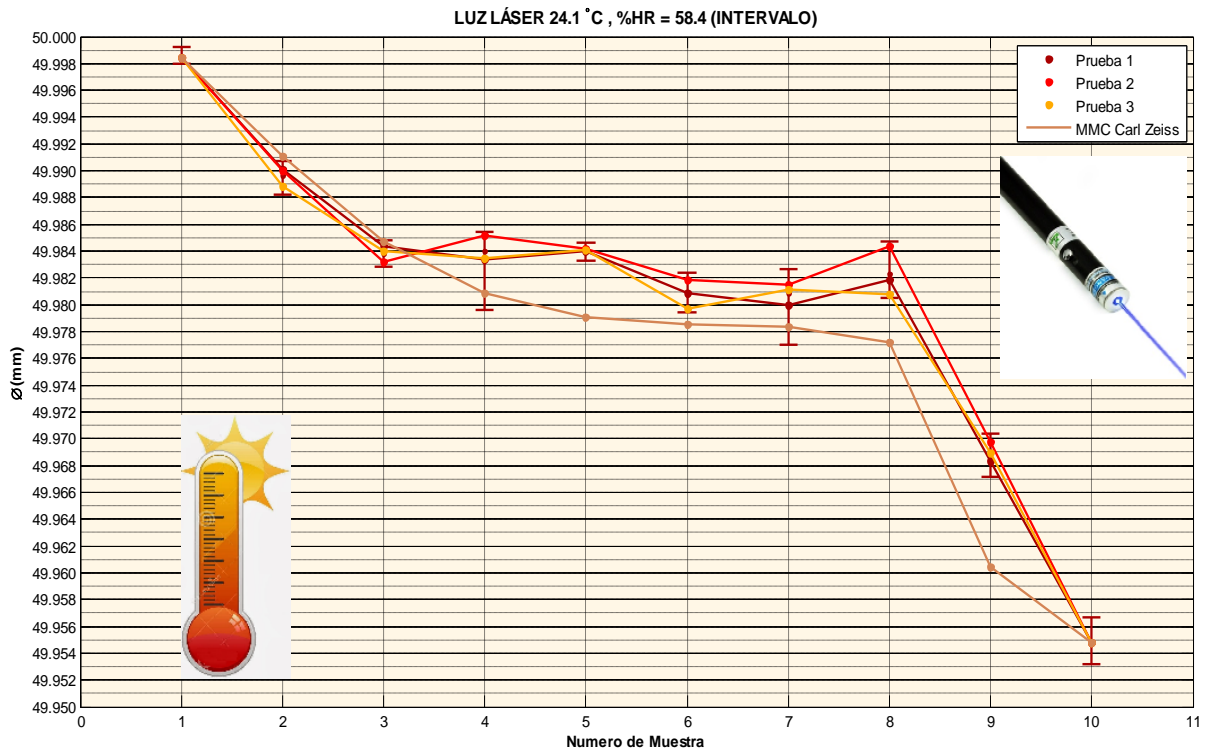


Figura 4.33 Intervalo de medición del diámetro para cada pieza de control, en tres pruebas diferentes, con un %HR =58.4 y empleando la Detección de Difracción.

De las pruebas anteriores se observa que los métodos mecánicos son más perjudicados por el cambio de temperatura en sus mediciones, siendo el Vernier el instrumento con mayor afectación. Las mediciones ópticas muestran un ligero cambio pero más uniforme a lo largo de todas las muestras.

Tomando como parámetros de estudio la media resultante de los tres intervalos de medición adquiridos previamente, se obtienen las gráficas de la *Figura 4.34* a la *Figura 4.41*.

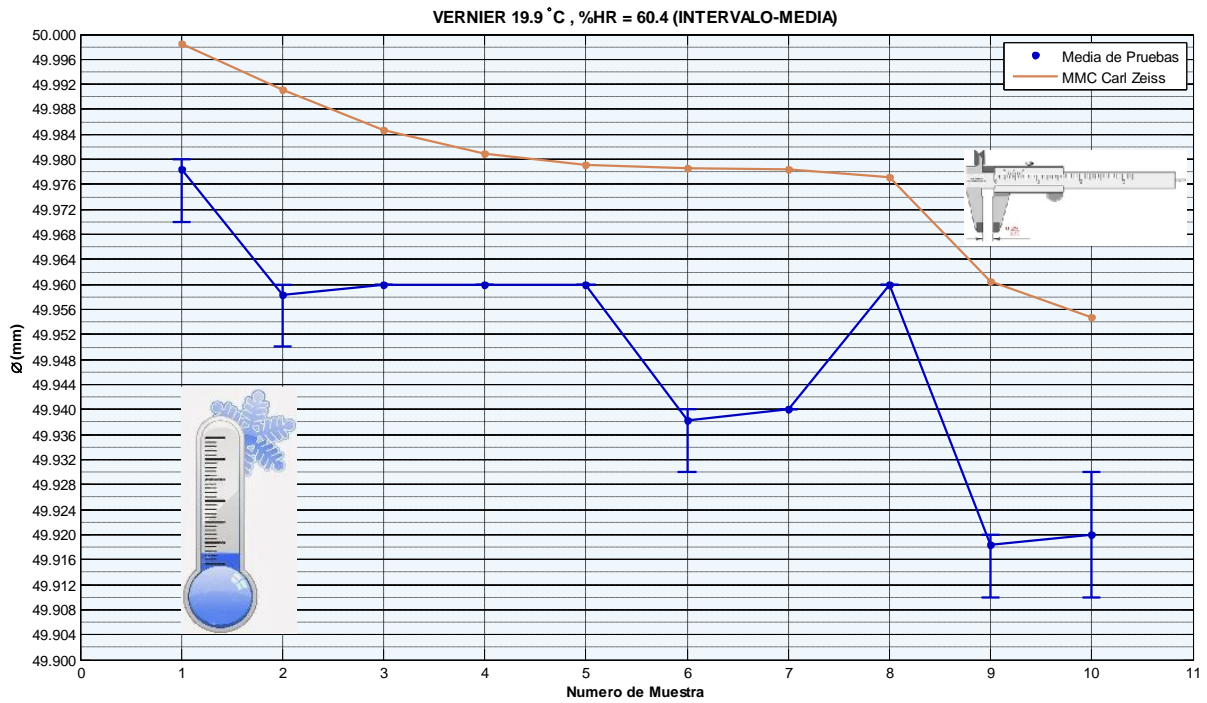


Figura 4.34 Media obtenida del diámetro para cada pieza de control, a temperatura de 19.9 °C y %HR= 60.4, empleando el Vernier.

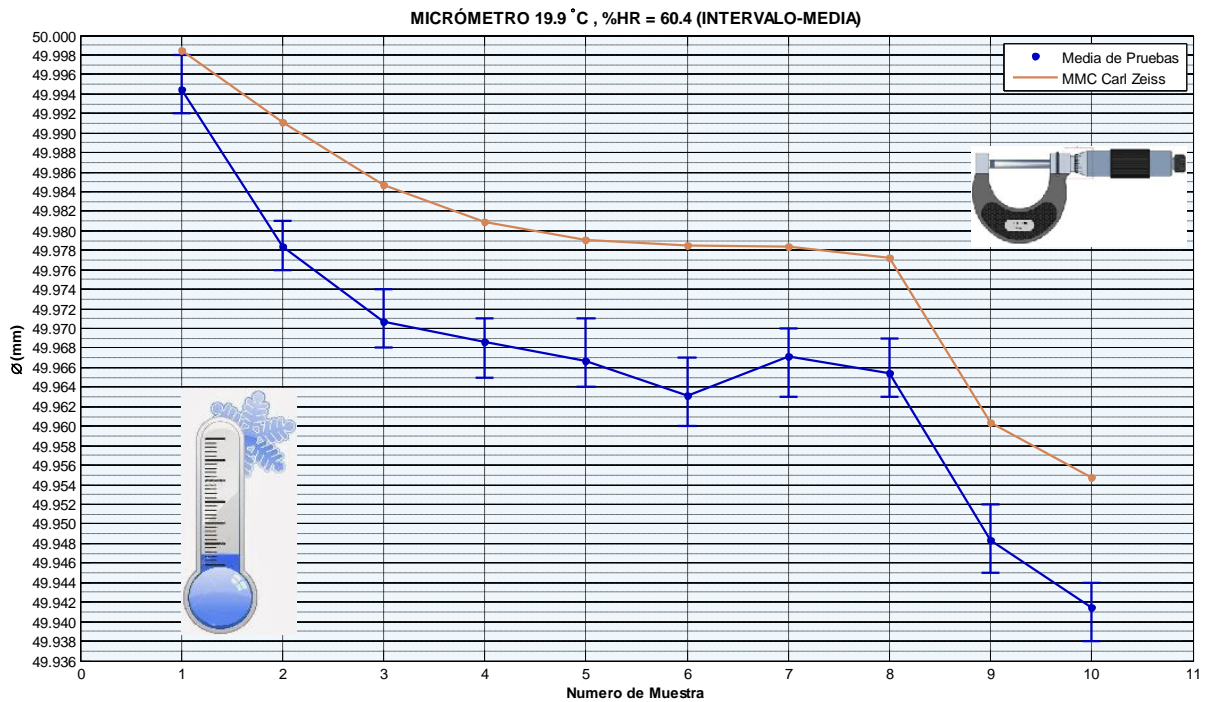


Figura 4.35 Media obtenida del diámetro para cada pieza de control, a temperatura de 19.9 °C y %HR =60.4, empleando el Micrómetro.

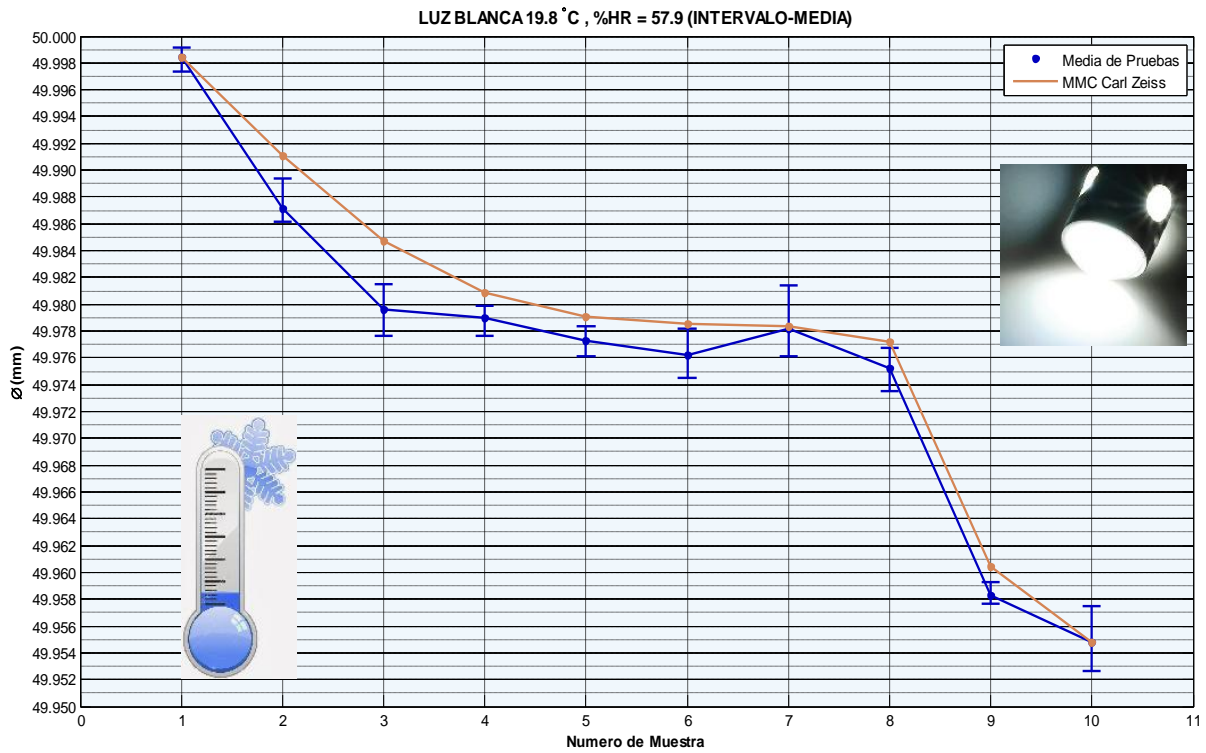


Figura 4.36 Media obtenida del diámetro para cada pieza de control, a temperatura de 19.9 °C y %HR =60.4, empleando la Proyección de luz blanca.

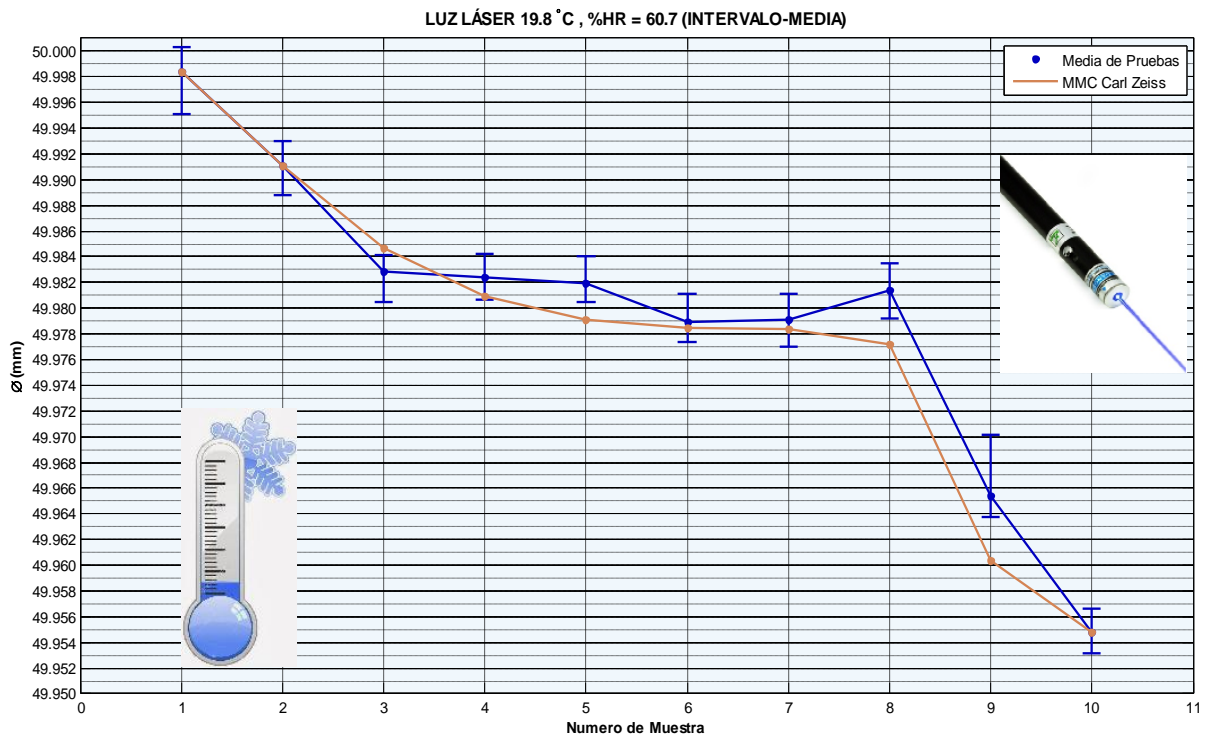


Figura 4.37 Media obtenida del diámetro para cada pieza de control, a temperatura de 19.9 °C y %HR =60.4, empleando la Detección de Difracción.

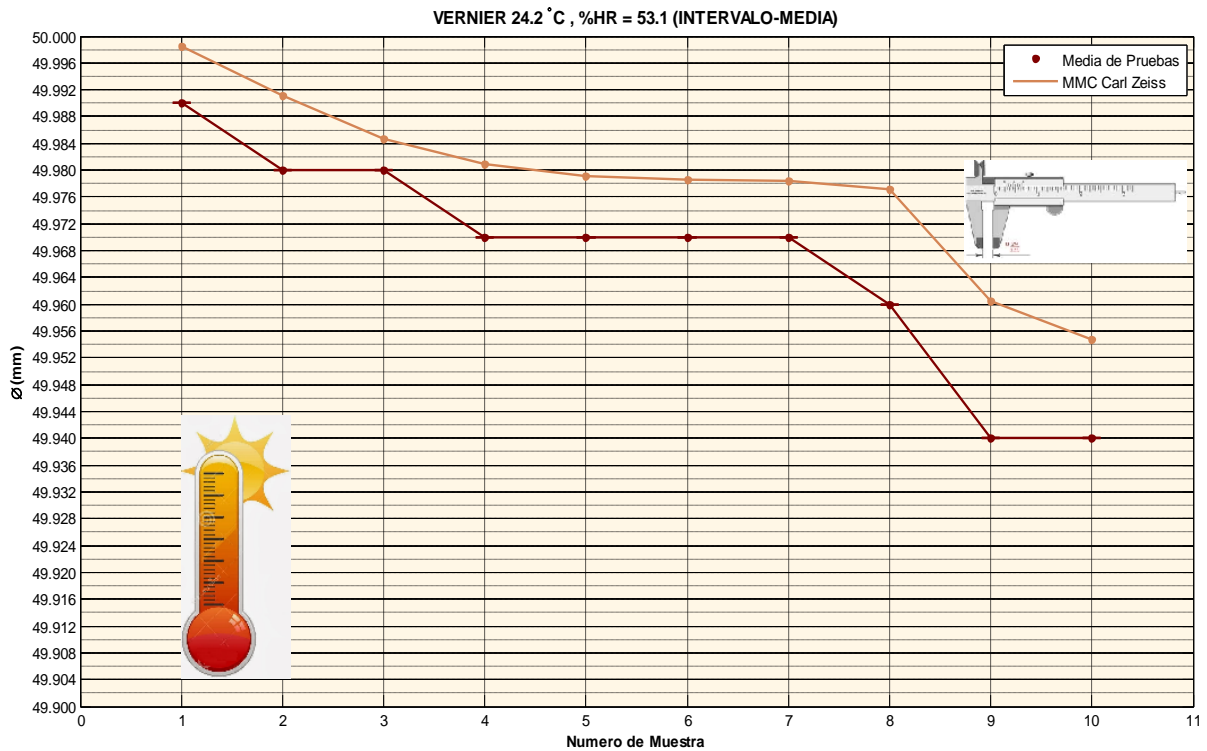


Figura 4.38 Media obtenida del diámetro para cada pieza de control, a temperatura de 24.2 °C y %HR =53.1, empleando el Vernier.

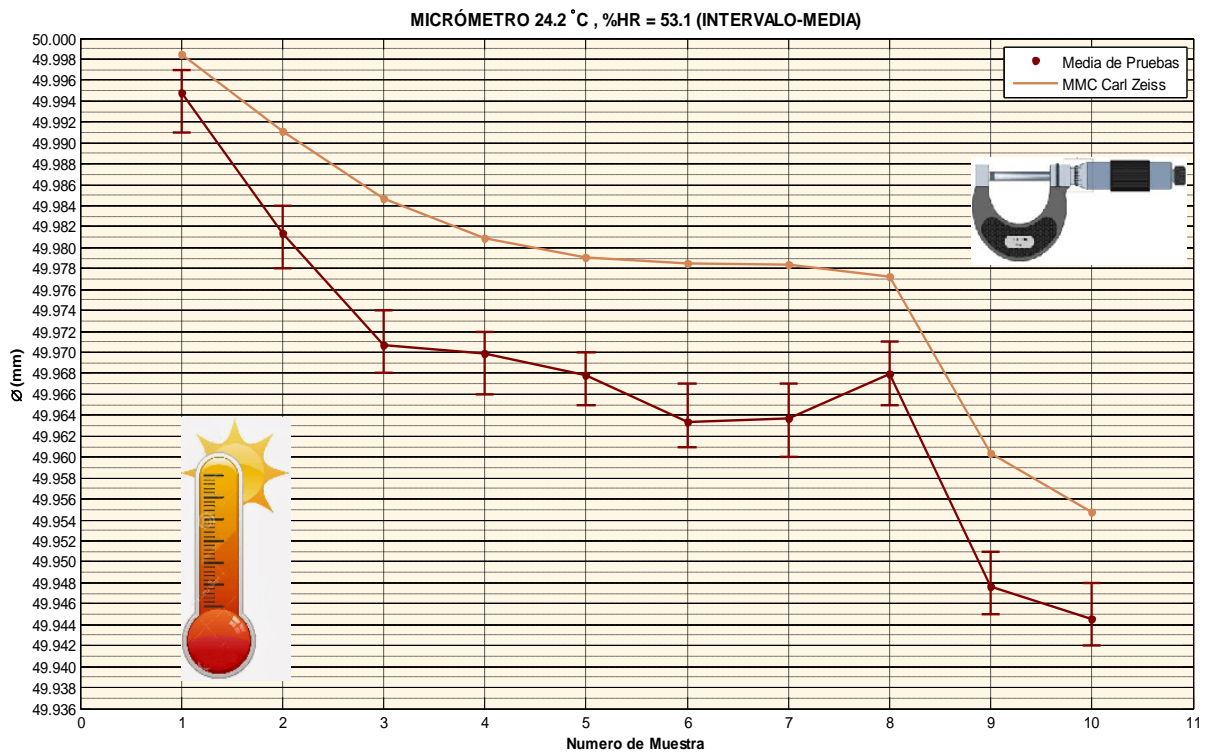


Figura 4.39 Media obtenida del diámetro para cada pieza de control, a temperatura de 24.2 °C y %HR =53.1, empleando el Micrómetro.

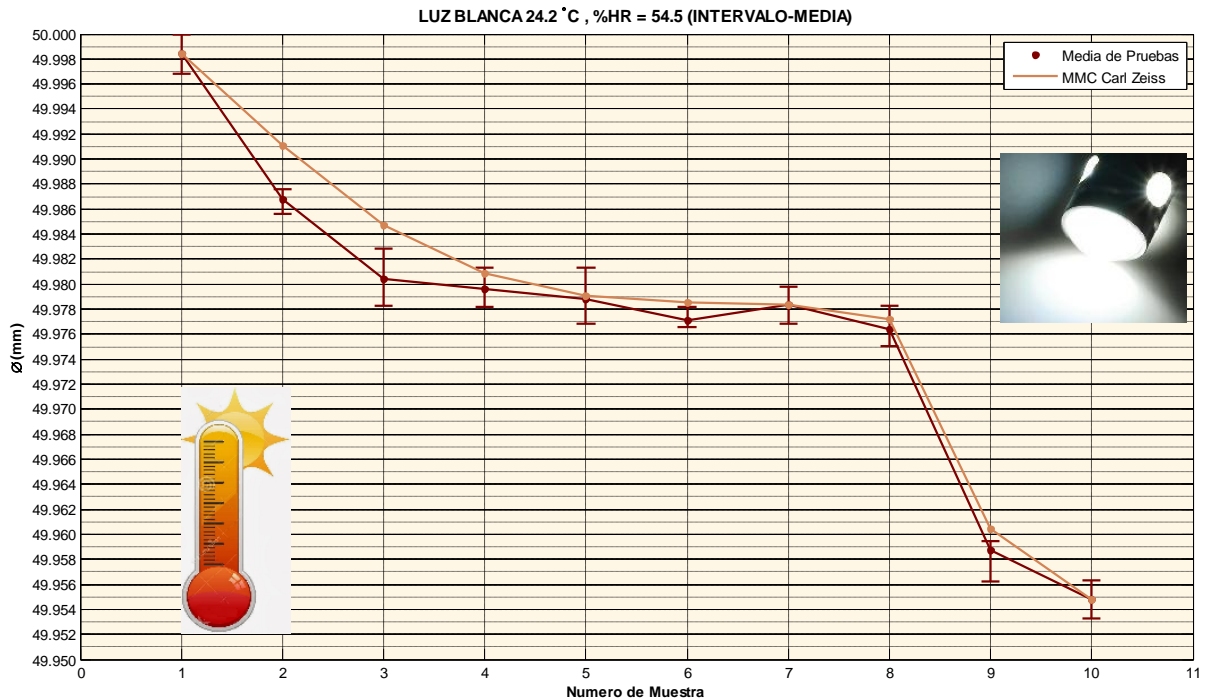


Figura 4.40 Media obtenida del diámetro para cada pieza de control, a temperatura de 24.2 °C y %HR =54.5 empleando la Proyección de luz blanca.

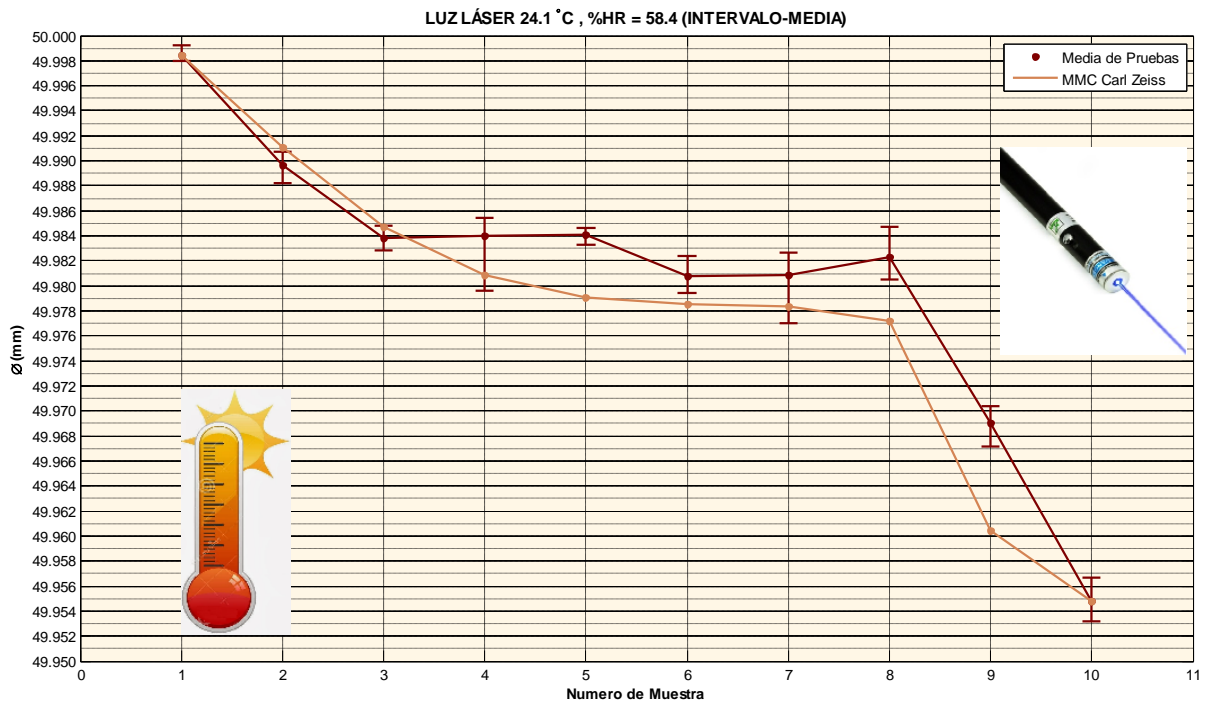


Figura 4.41 Media obtenida del diámetro para cada pieza de control, a temperatura de 24.2 °C y %HR =58.4, empleando la Detección de difracción.

En base a los resultados mostrados, es posible observar una respuesta más constante (mismo perfil) con los métodos ópticos que con los de contacto (referirse a la *Tabla 4.2* para su análisis cualitativo).

Con el propósito de observar y confirmar la dilatación de las piezas de control debida al efecto de temperatura, en la siguiente secuencia de gráficas se muestra la comparación entre las pruebas a distintas temperaturas (*Figura 4.42 a 4.45*).

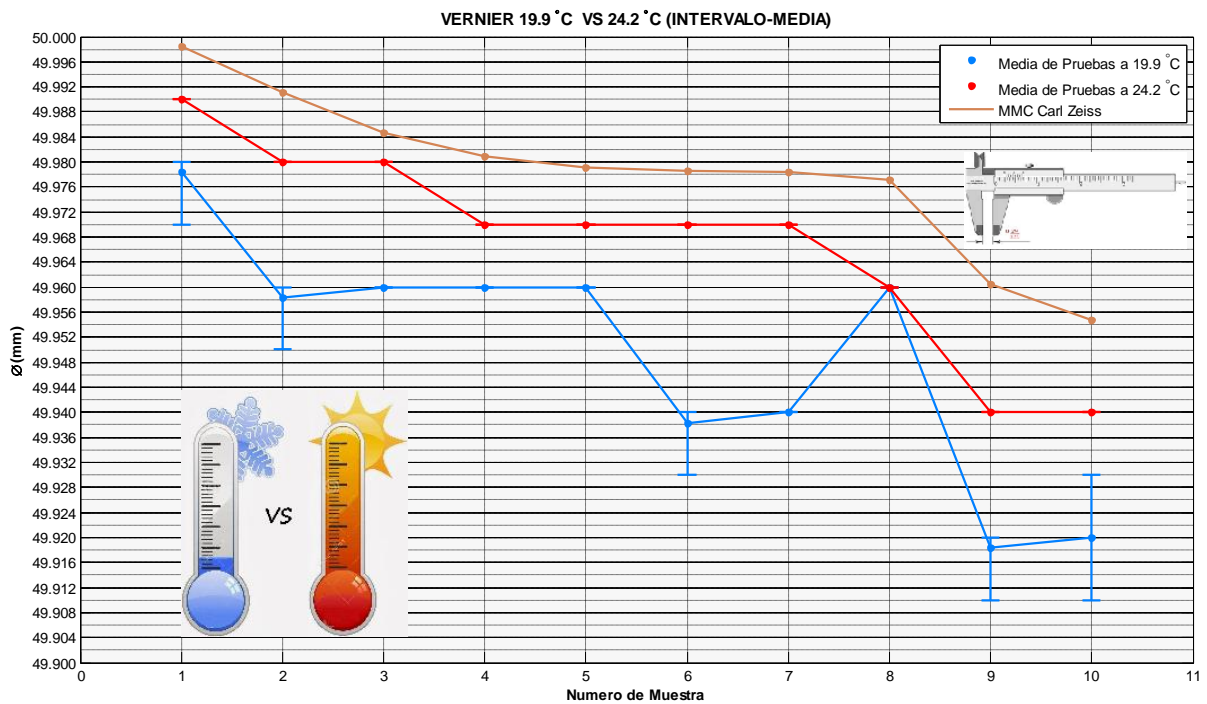


Figura 4.42 Gráfica comparativa de la medición del diámetro para cada pieza de control, a distintas temperaturas, empleando el Vernier.

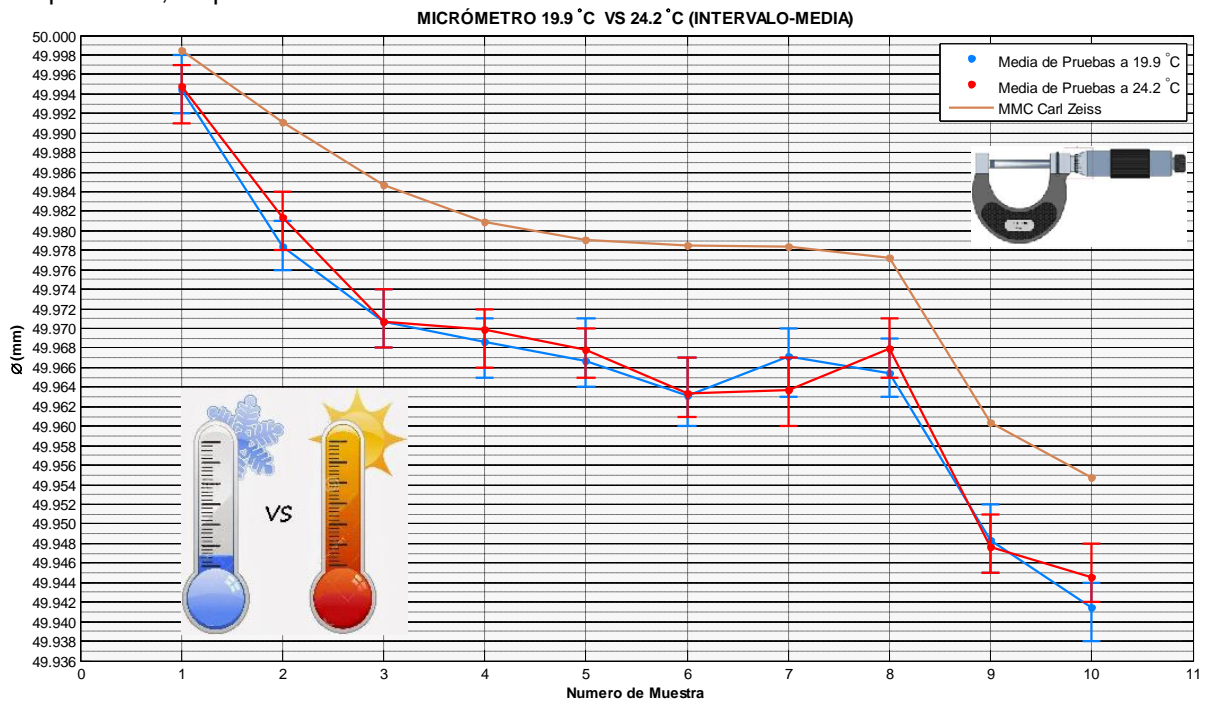


Figura 4.43 Gráfica comparativa de la medición del diámetro para cada pieza de control, a distintas temperaturas, empleando el Micrómetro.

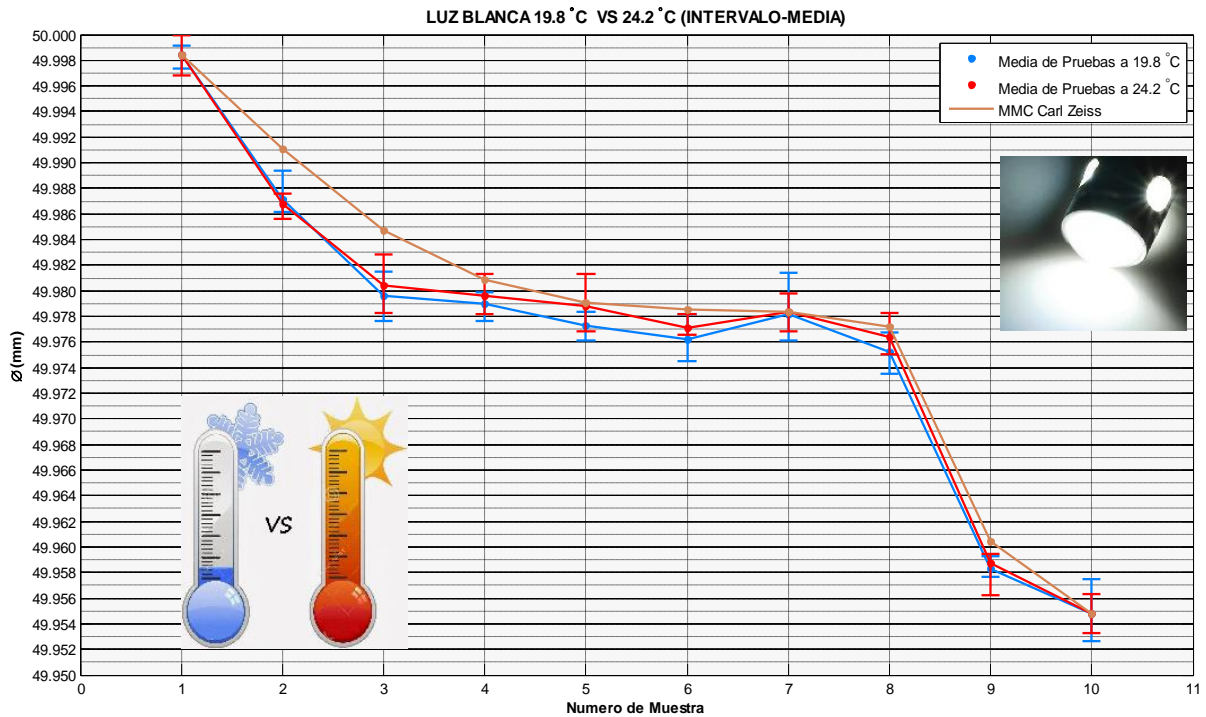


Figura 4.44 Gráfica comparativa de la medición del diámetro para cada pieza de control, a distintas temperaturas, empleando la Proyección de luz blanca

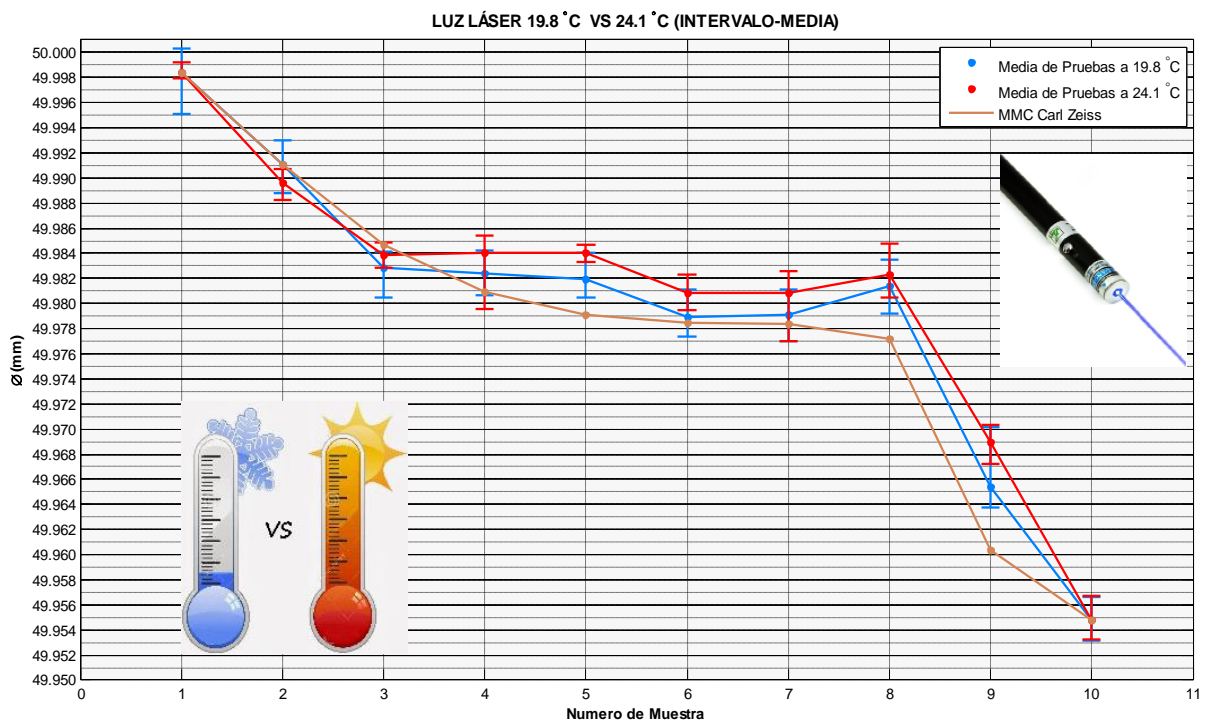


Figura 4.45 Gráfica comparativa de la medición del diámetro para cada pieza de control, a distintas temperaturas, empleando la Detección de difracción.

Con base en la *Ecuación 3.4* y considerando un coeficiente de dilatación $\alpha=12.3 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$, un diámetro promedio $L = 49.9783$ y un cambio de temperatura de $\Delta T = 4$ $^\circ\text{C}$ se determina el cambio dimensional esperado:

$$\Delta L = L_0[(\alpha \Delta T)] = 49.9783[(12.3 \times 10^{-6})(4)] = 0.002 \text{ mm}$$

Así mismo se presentan los resultados obtenidos por los 4 métodos de medición en la *Tabla 4.2*:

Método de medición	Cambio dimensional
Vernier	0.03 mm
Micrómetro	0.003 mm
Luz blanca	0.002 mm
Luz láser	0.003 mm

Tabla 4.2 Cambio dimensional con base al cambio de temperatura (dilatación de las muestras).

Fundamentado en el grupo de graficas obtenidas y el análisis cuantitativo del estudio por cambio de temperatura se confirma la ventaja de medir con medios de no contacto ya que tienen mejor respuesta a variaciones de temperatura.

4.5.1.2 BASADO EN LA DESVIACIÓN ESTANDAR DE LA MEDICIÓN

Considerando como parámetros de estudio la desviación estándar (σ) con respecto a la media de las tres pruebas, las mismas condiciones de temperatura y %HR, en este apartado se ilustrarán gráficas para cada método de medición (*Figura 4.46 a 4.53*), donde I designa el rango de la σ .

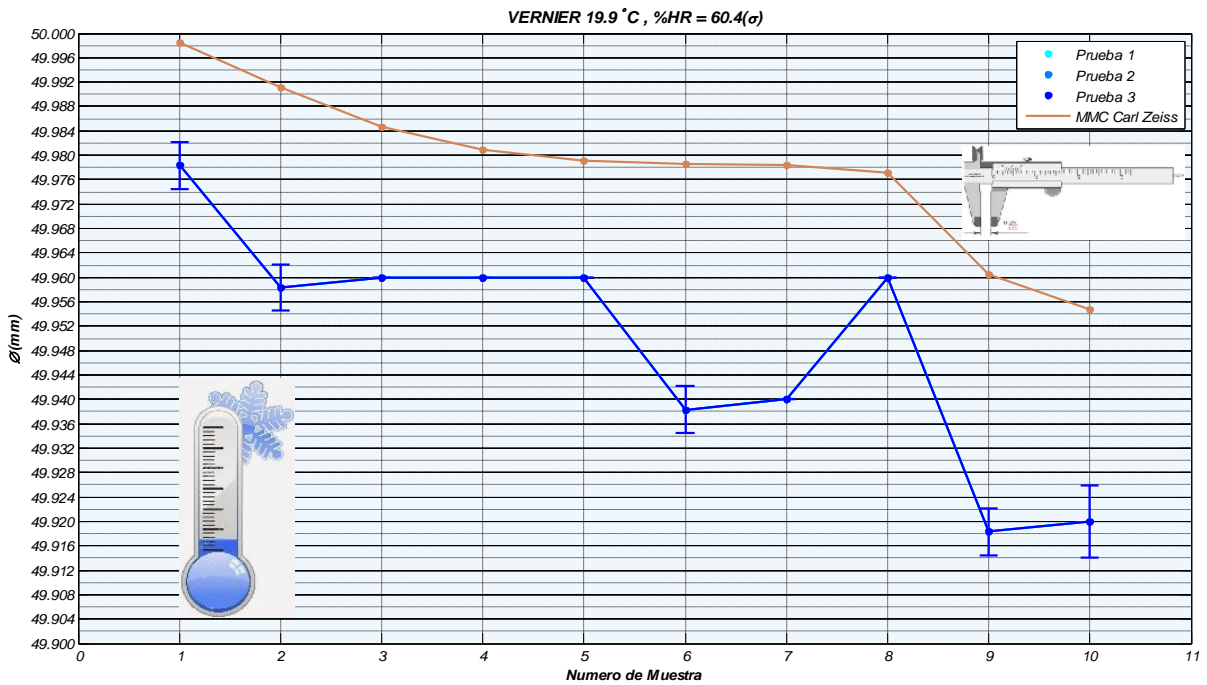


Figura 4.46 Desviación estándar (σ) de la medición del diámetro para cada pieza de control, empleando el Vernier.

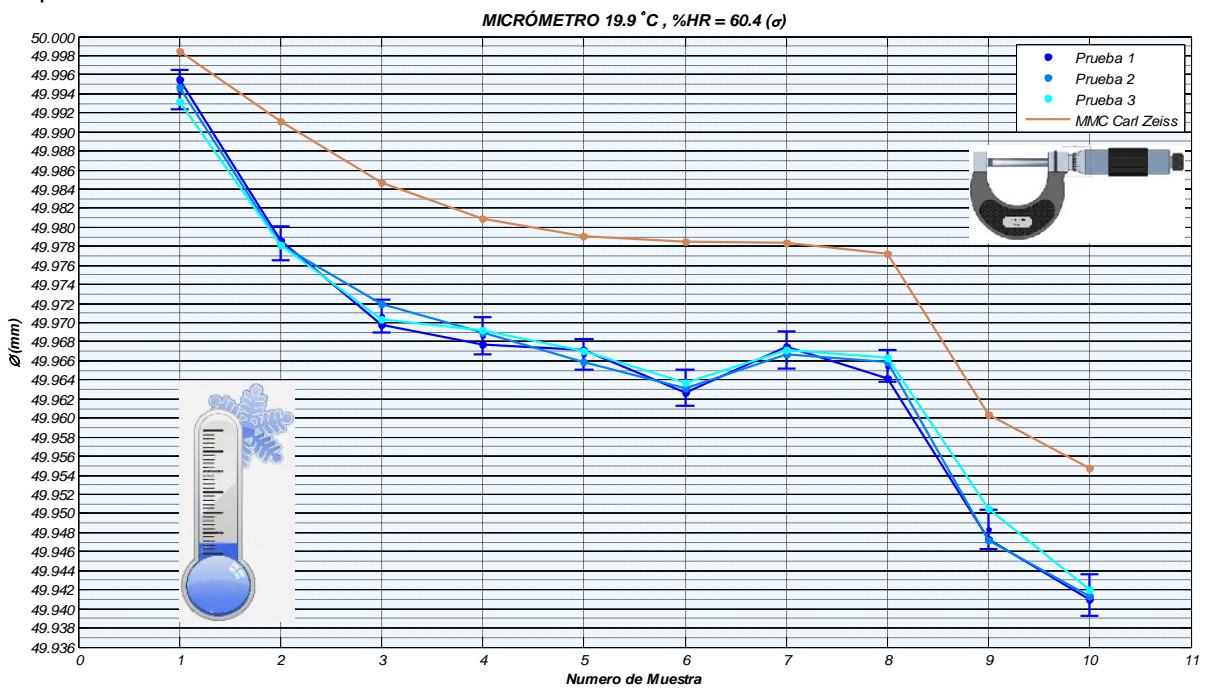


Figura 4.47 Desviación estándar (σ) de la medición del diámetro para cada pieza de control, empleando el Micrómetro.

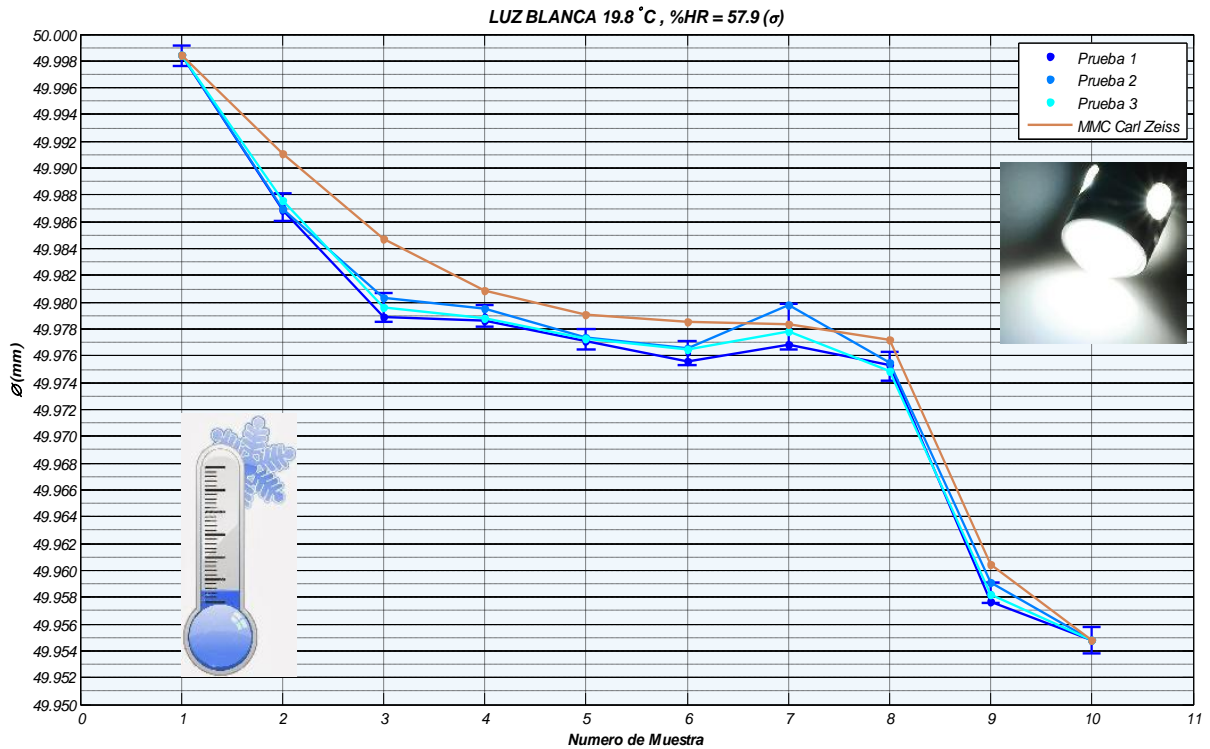


Figura 4.48 Desviación estándar (σ) de la medición del diámetro para cada pieza de control, empleando la Proyección de luz blanca.

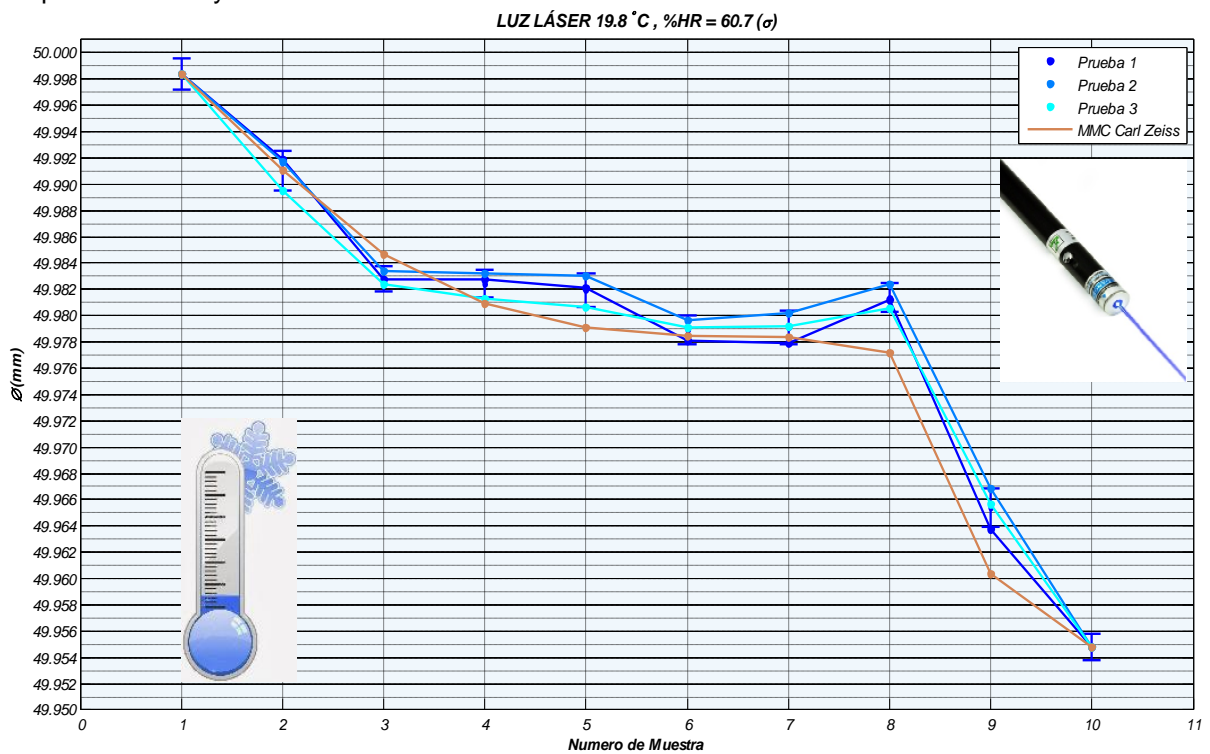


Figura 4.49 Desviación estándar (σ) de la medición del diámetro para cada pieza de control, empleando la Detección de difracción.

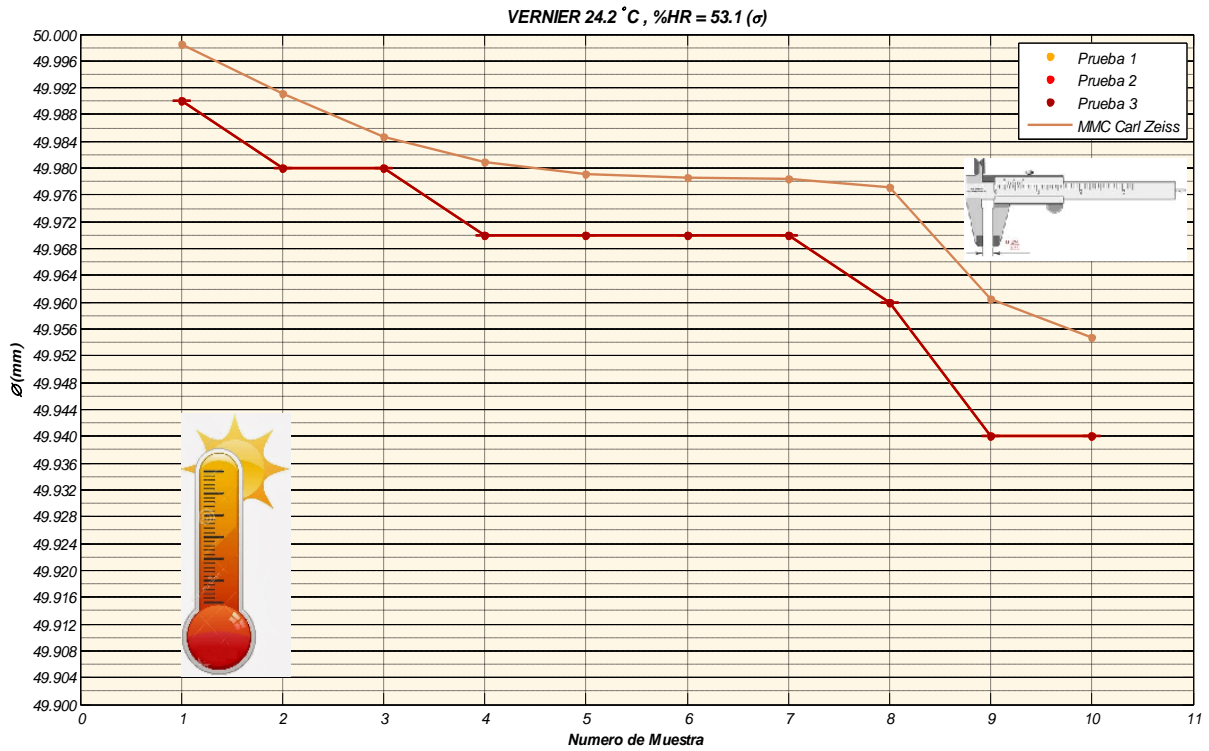


Figura 4.50 Desviación estándar (σ) de la medición del diámetro para cada pieza de control, empleando el Vernier.

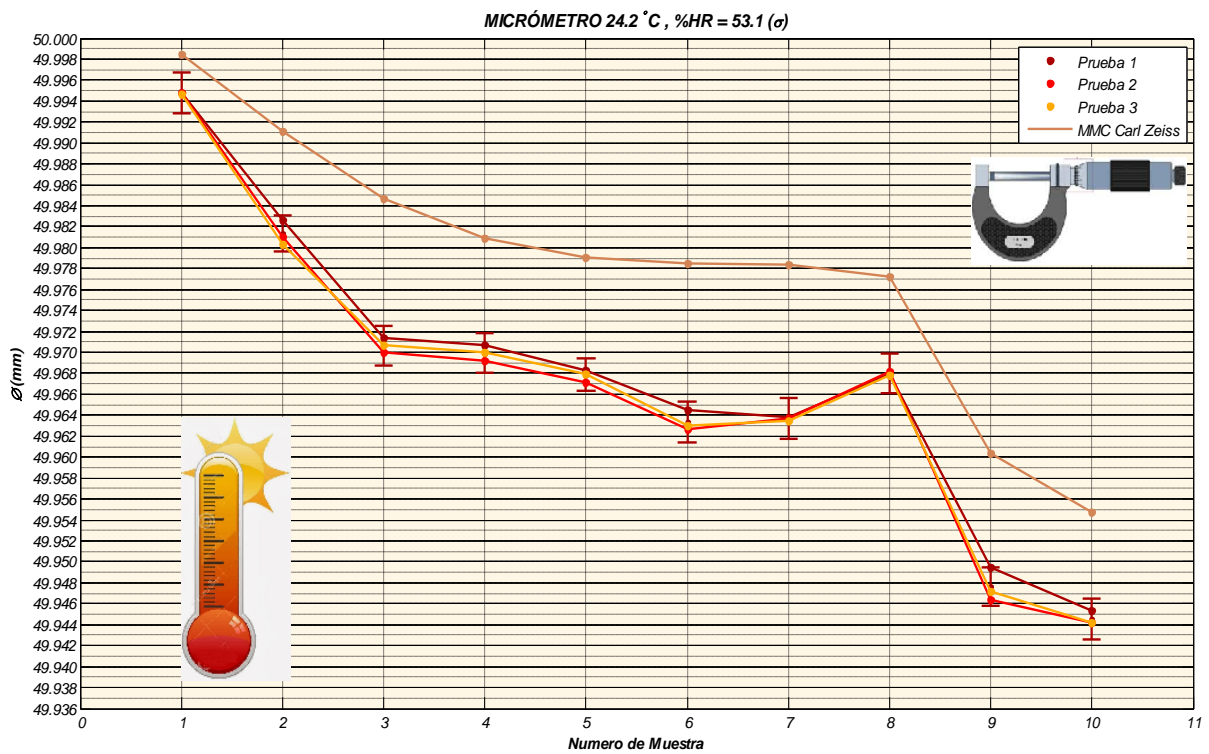


Figura 4.51 Desviación estándar (σ) de la medición del diámetro para cada pieza de control, empleando el Micrómetro.

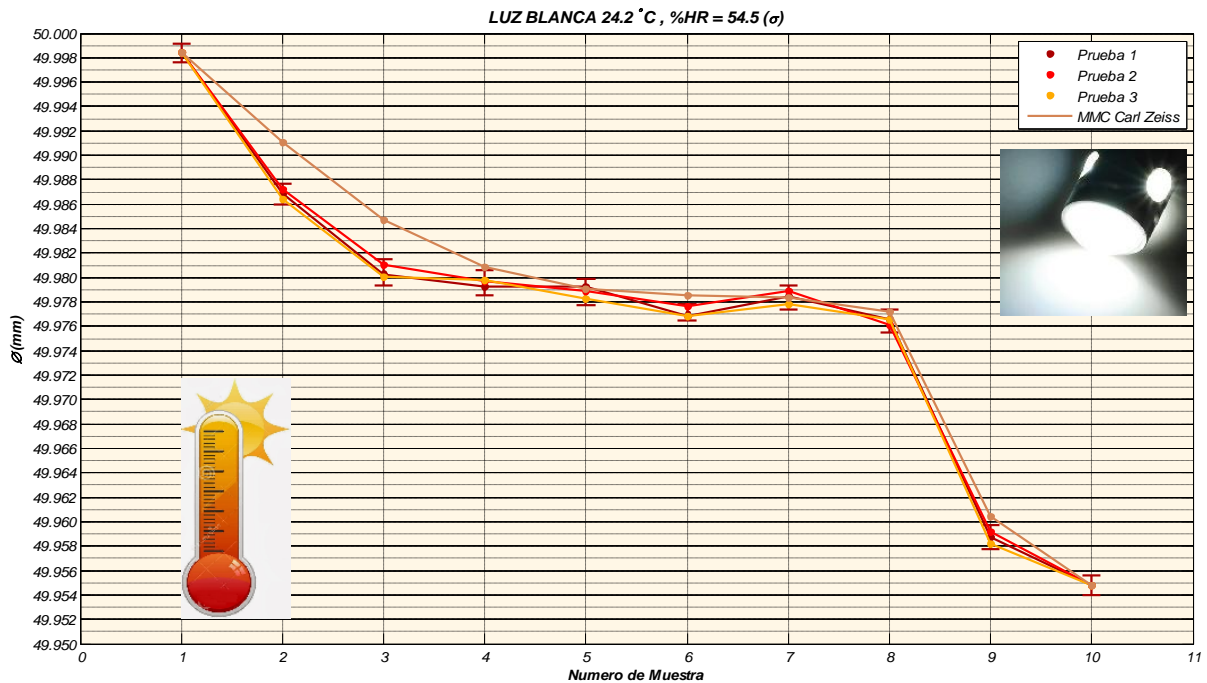


Figura 4.52 Desviación estándar (σ) de la medición del diámetro para cada pieza de control, empleando la Proyección de la luz blanca.

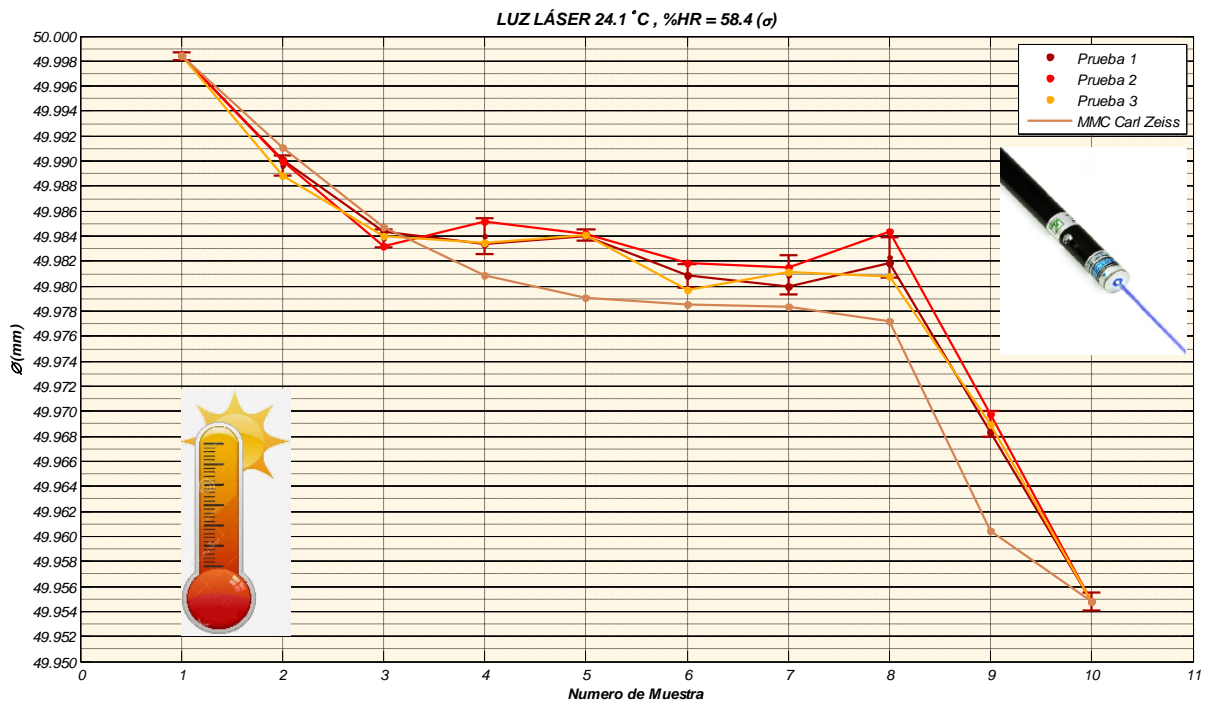


Figura 4.53 Desviación estándar (σ) de la medición del diámetro para cada pieza de control, empleando la Detección de difracción.

De lo anterior se percibe que aún con la desviación estándar (medida de dispersión estadística), los métodos mecánicos son más perjudicados por el cambio de temperatura en sus mediciones y que los métodos ópticos muestran un cambio más uniforme a lo largo de todas las muestras.

Además se observa una disminución en la amplitud de la σ . A continuación se muestra el valor de la σ junto con la media (σ - media) para cada pieza medida bajo las mismas condiciones de temperatura y humedad relativa (Figura 4.54 a Figura 4.61).

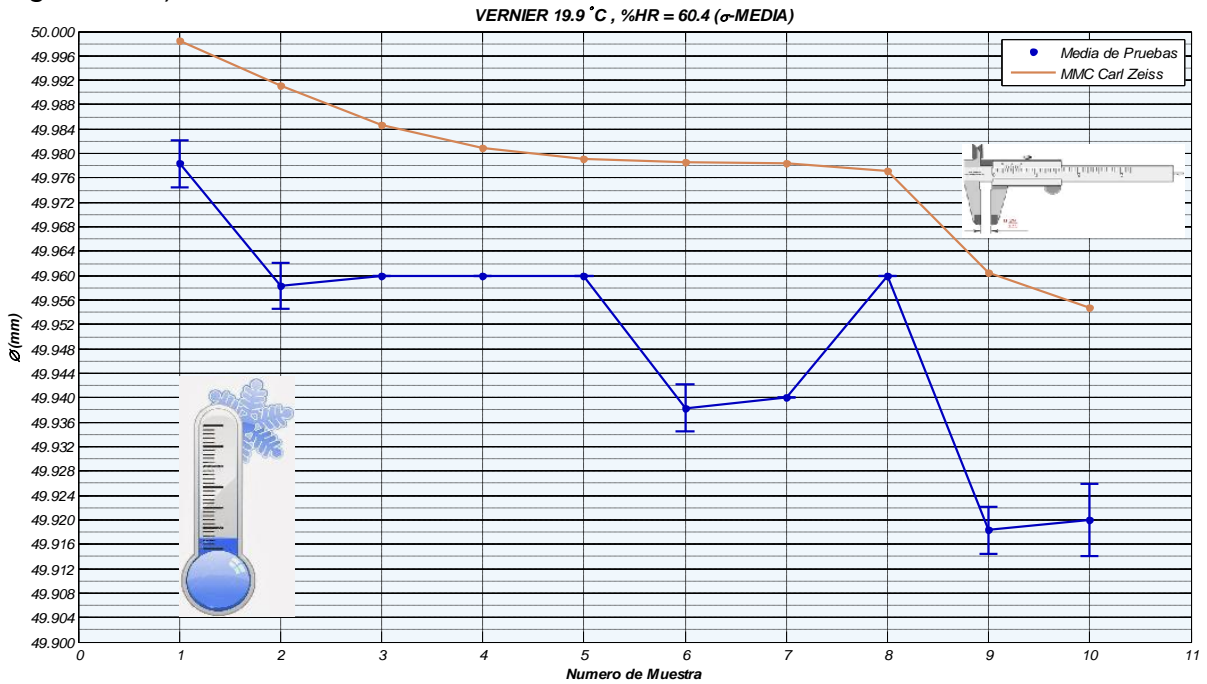


Figura 4.54 Desviación estándar con media de las tres mediciones (σ - media) del diámetro para cada pieza de control, empleando el Vernier.

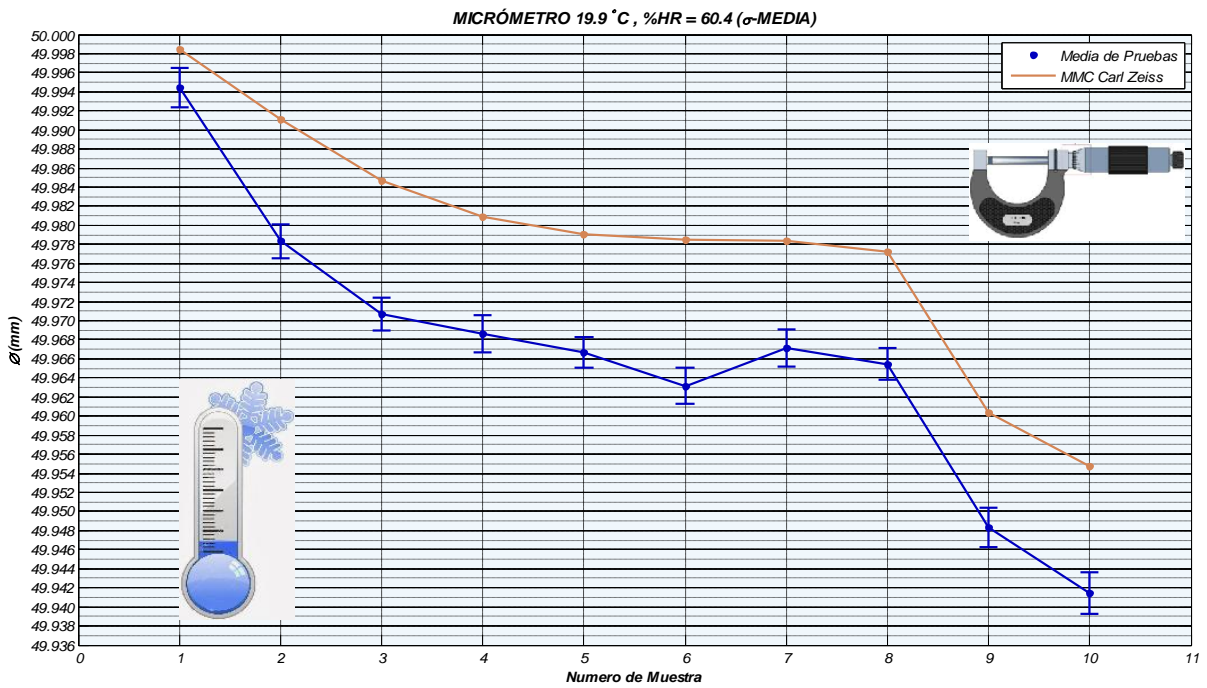


Figura 4.55 Desviación estándar con media de las tres mediciones (σ - media) del diámetro para cada pieza de control, empleando el Micrómetro.

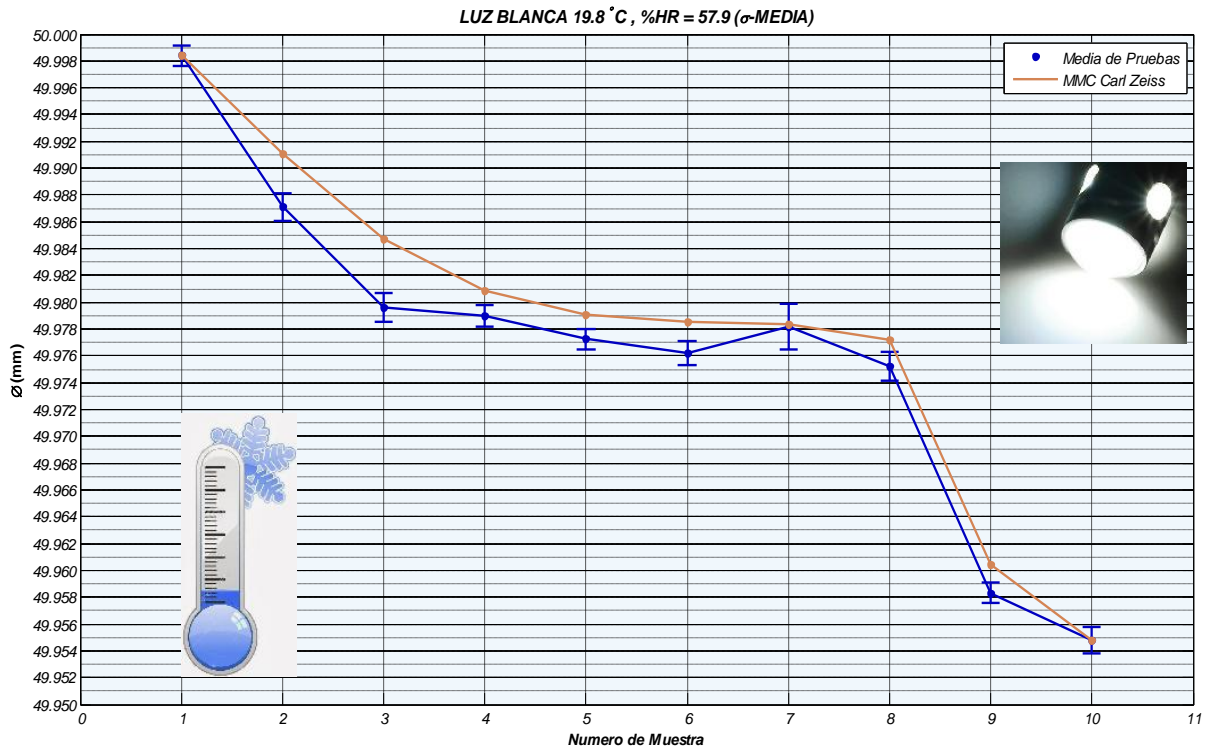


Figura 4.56 Desviación estándar con media de las tres mediciones (σ - media) del diámetro para cada pieza de control, empleando la proyección de luz blanca.

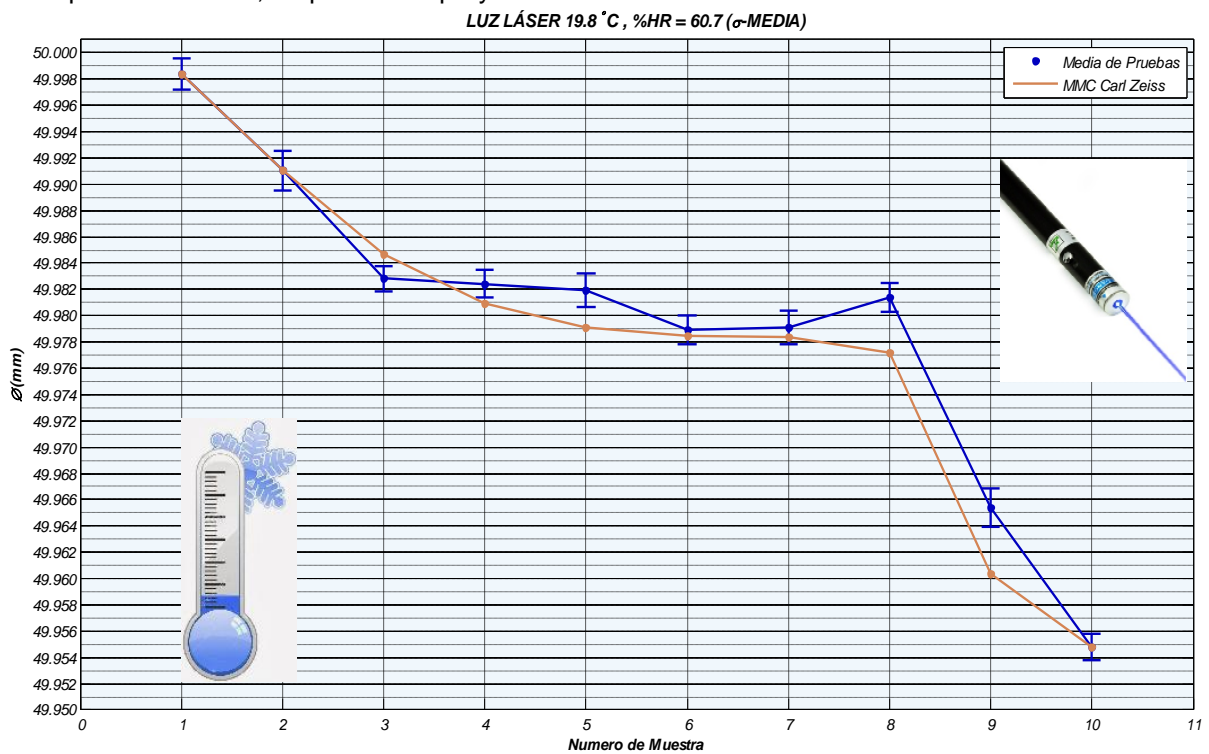


Figura 4.57 Desviación estándar con media de las tres mediciones (σ - media) del diámetro para cada pieza de control, empleando la detección de difracción.

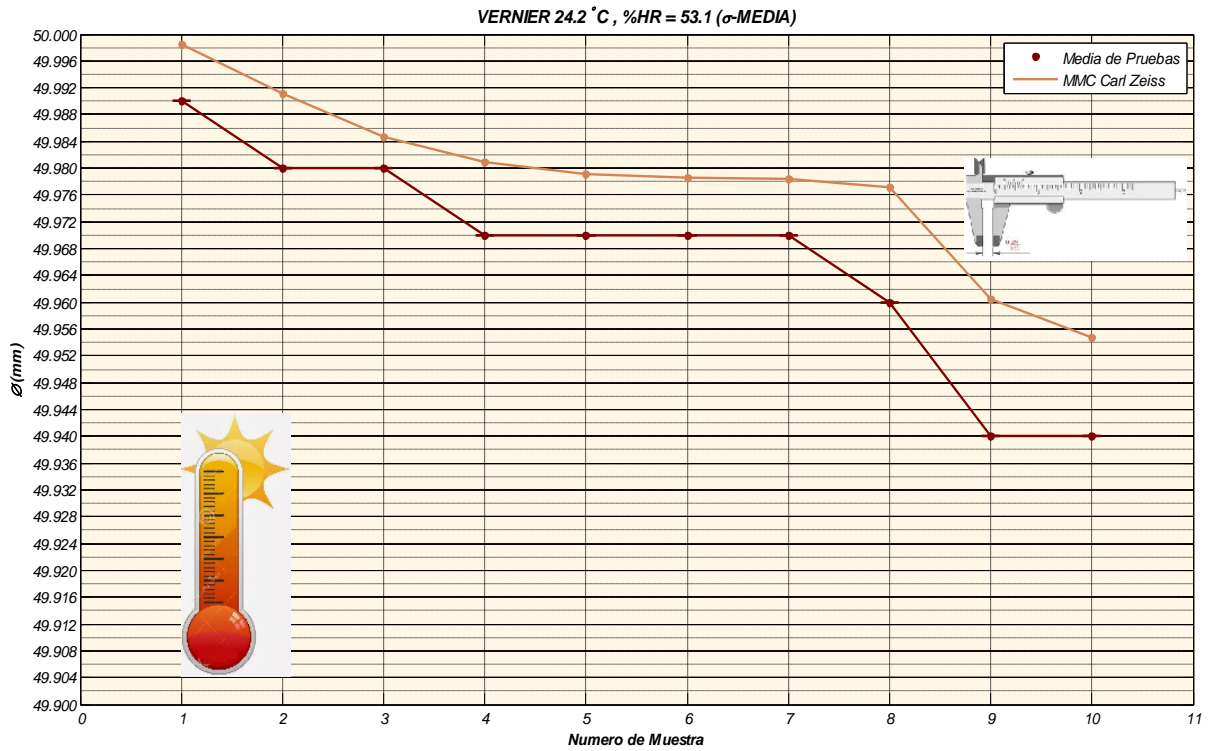


Figura 4.58 Desviación estándar con media de las tres mediciones (σ - media) del diámetro para cada pieza de control, empleando el Vernier.

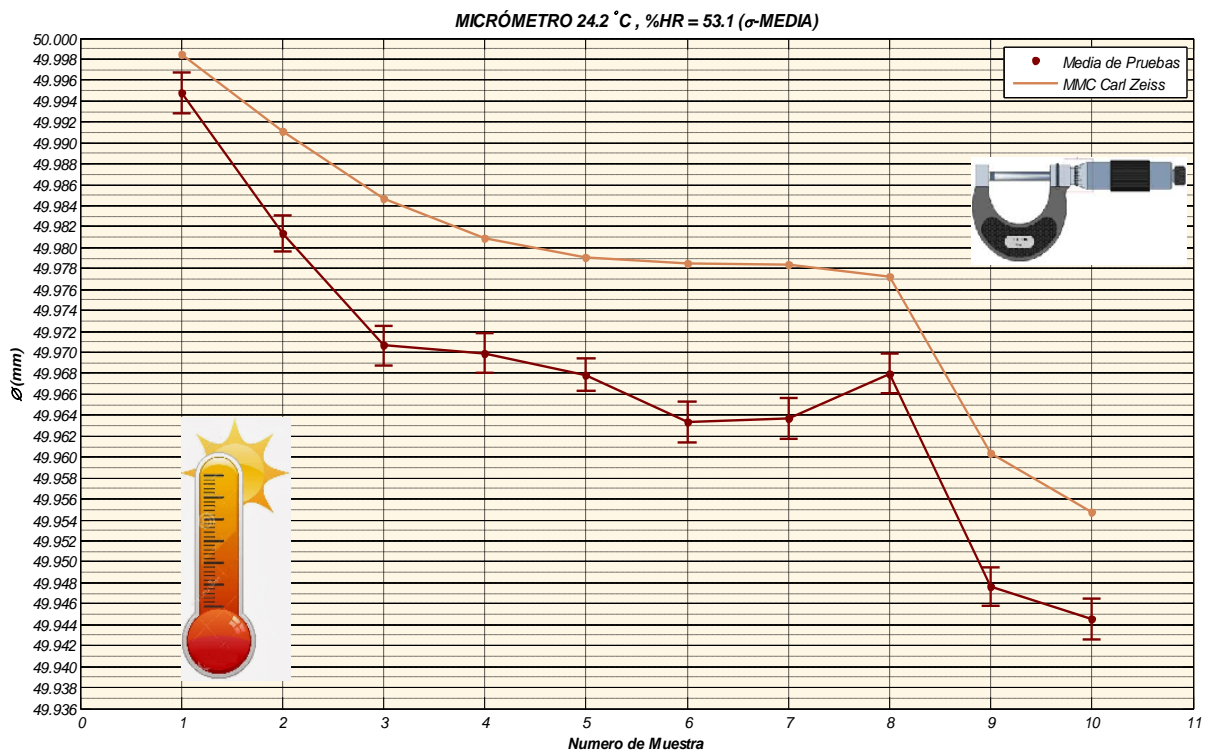


Figura 4.59 Desviación estándar con media de las tres mediciones (σ - media) del diámetro para cada pieza de control, empleando el Micrómetro.

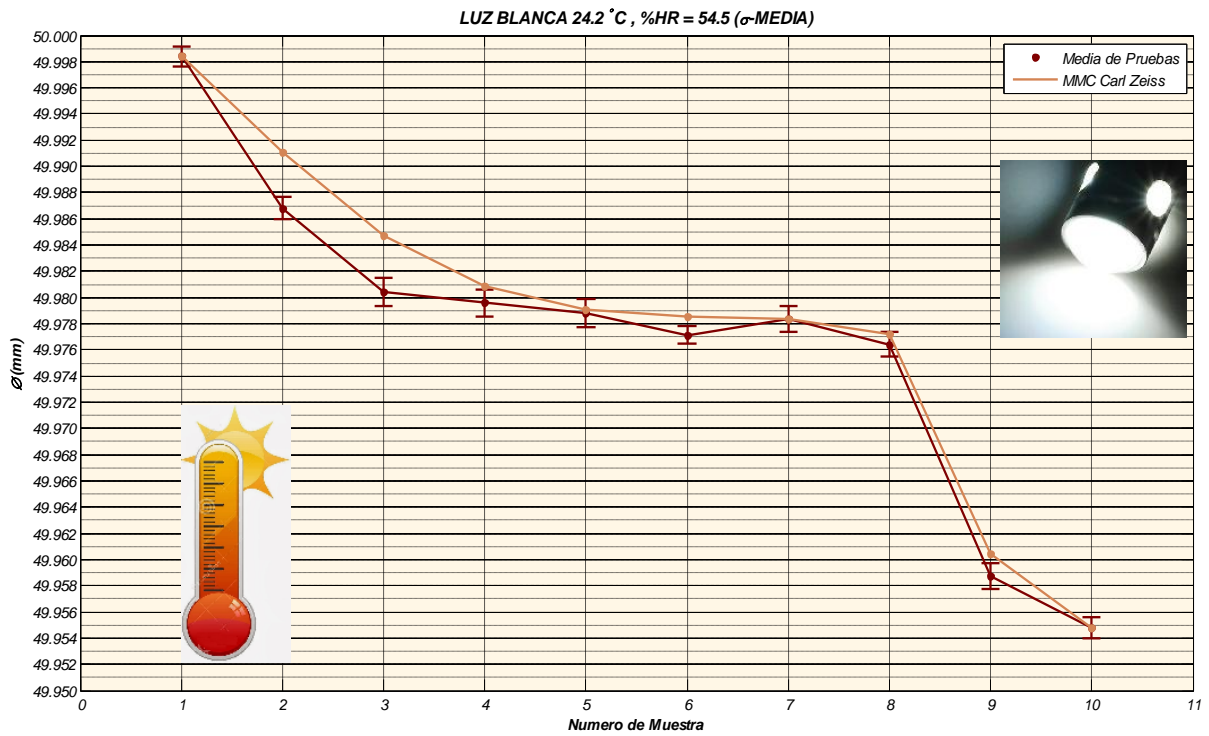


Figura 4.60 Desviación estándar con media de las tres mediciones (σ - media) del diámetro para cada pieza de control, la proyección de luz blanca.

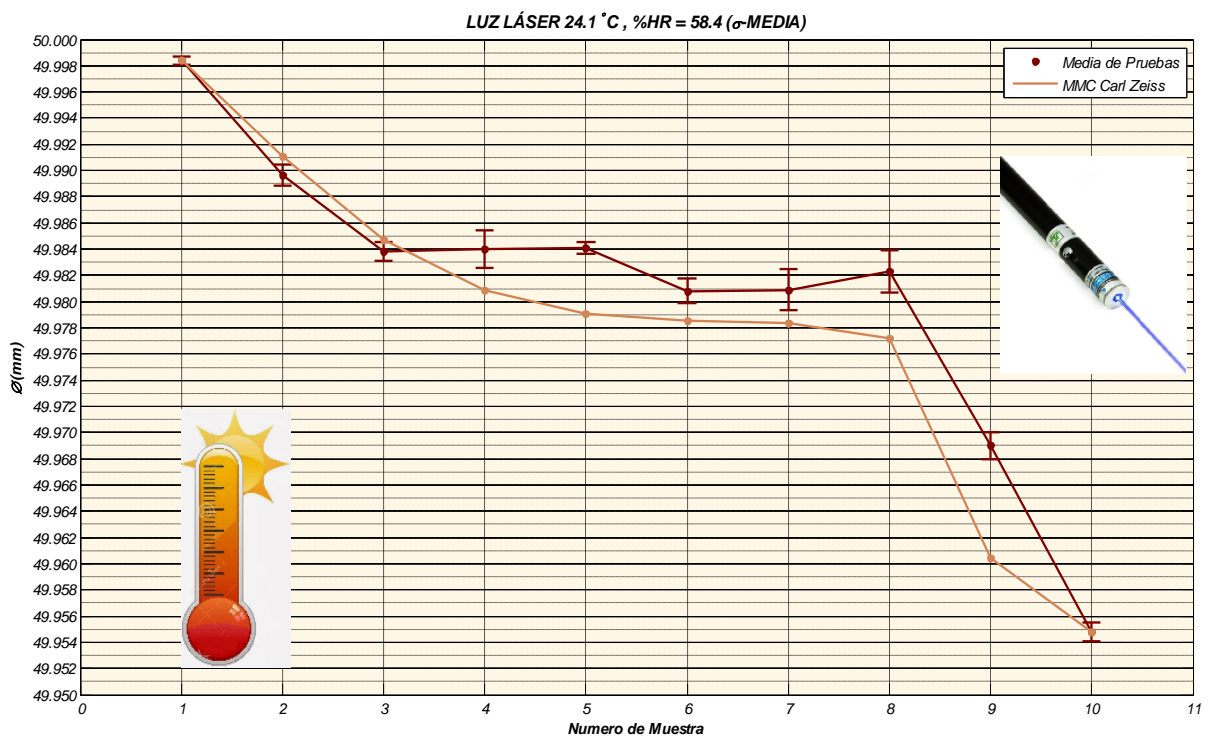


Figura 4.61 Desviación estándar con media de las tres mediciones (σ - media) del diámetro para cada pieza de control, empleando la detección de difracción.

En base a los resultados anteriores, se confirma que la respuesta de los métodos ópticos muestra un perfil constante a diferencia de la observada en los métodos de

contacto (Vernier y micrómetro). Con el propósito de comparar las mediciones obtenidas por cada uno de los métodos analizados (Vernier, micrómetro, luz blanca y laser) a diferente temperatura se muestra en las *Figura 4.62 a la Figura 4.65* ésta comparación en base a la σ -media para cada técnica.

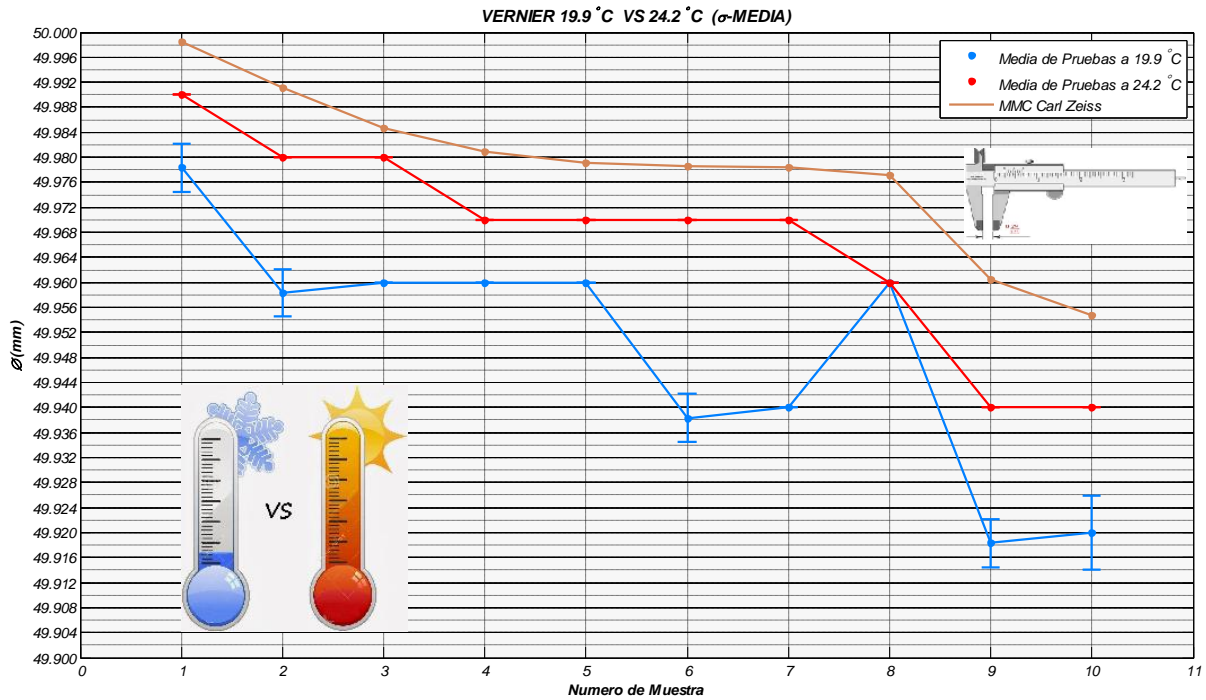


Figura 4.62 Gráfica comparativa de la desviación estándar-media de las mediciones, basada en la variación de temperatura y empleando el Vernier

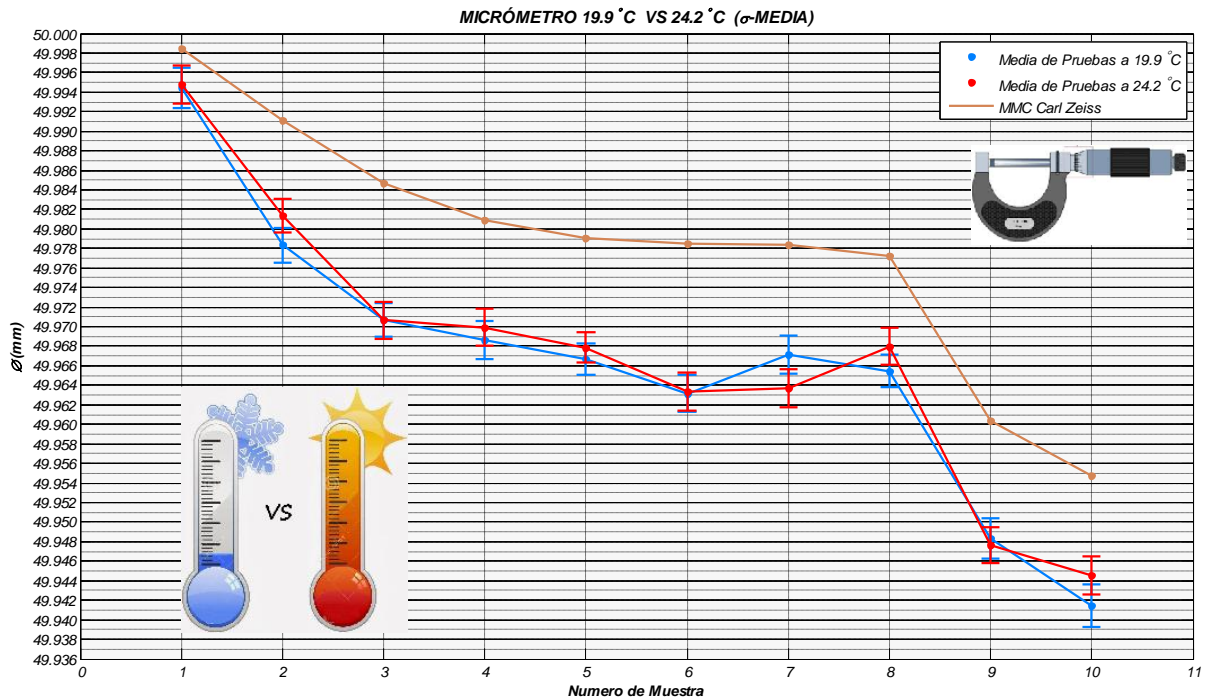


Figura 4.63 Gráfica comparativa de la desviación estándar-media de las mediciones, basada en la variación de temperatura y empleando el Micrómetro.

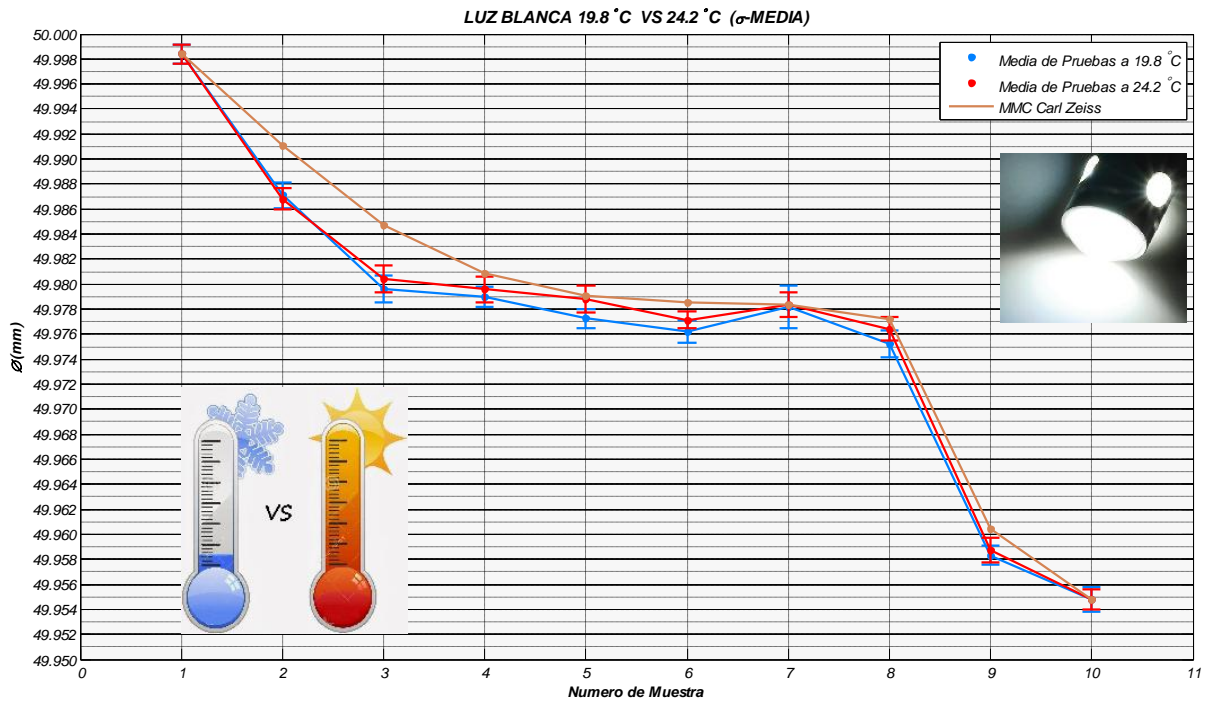


Figura 4.64 Gráfica comparativa de la desviación estándar-media de las mediciones, basada en la variación de temperatura y empleando la Proyección de luz blanca.

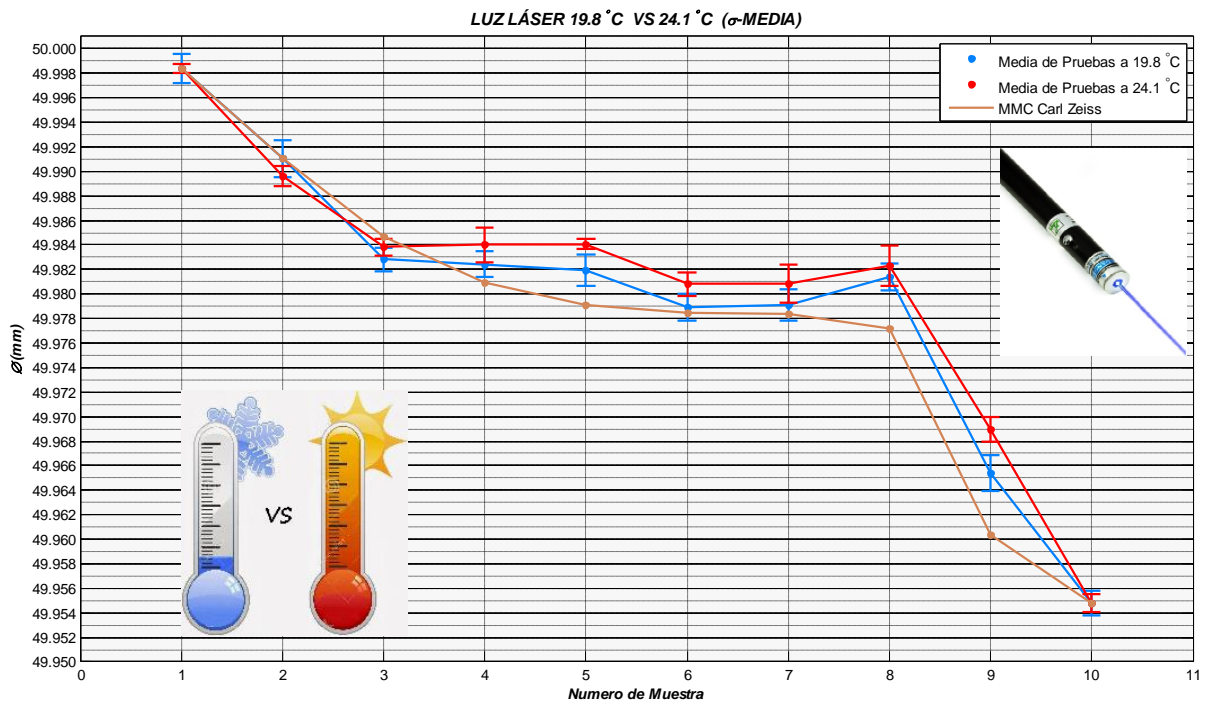


Figura 4.65 Gráfica comparativa de la desviación estándar-media de las mediciones, basada en la variación de temperatura y empleando la Detección de difracción.

Se confirma después de este análisis las ventajas de emplear técnicas ópticas para la medición ya que no sufren de dilatación térmica inducida como sus contrapartes mecánicas.

4.5.2 ESTUDIO COMPARATIVO DE MÉTODOS ÓPTICOS

Teniendo como elementos de estudio el intervalo de medición y la media de las 3 pruebas se comparan los resultados de las pruebas ópticas como se muestra en la *Figura 4.66* y *Figura 4.67*.

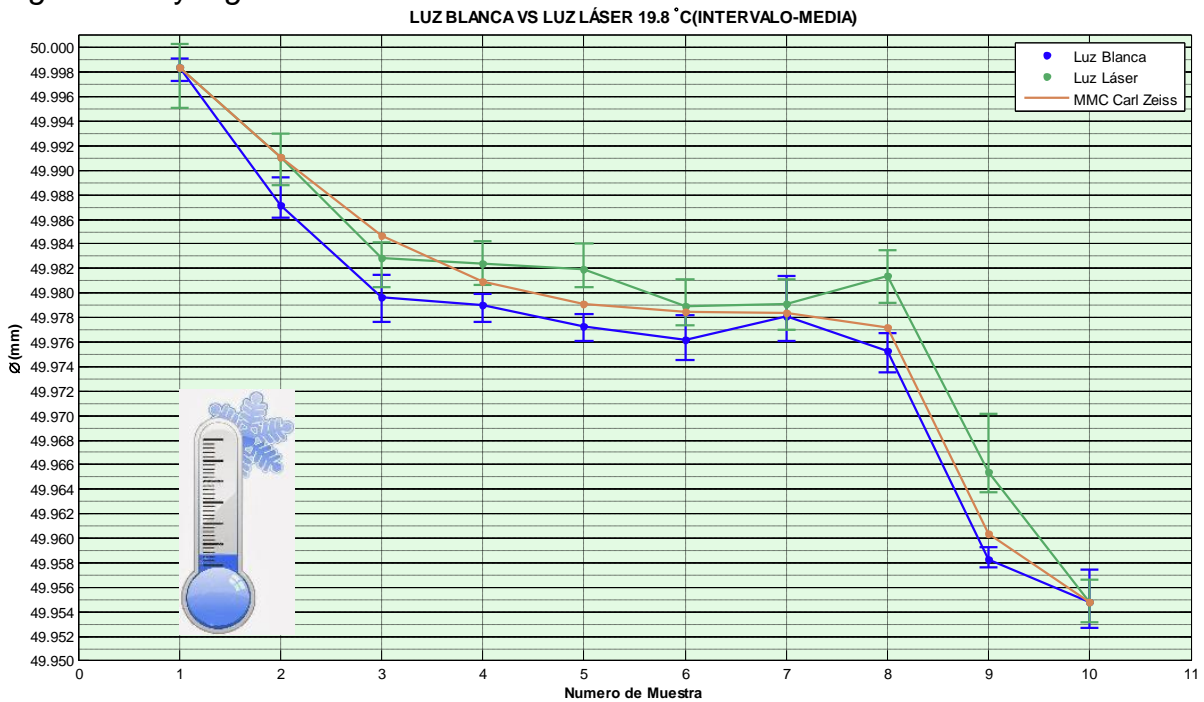


Figura 4.66 Gráfica comparativa de los métodos ópticos remotos de medición, empleando como punto comparativo el intervalo de medición medio.

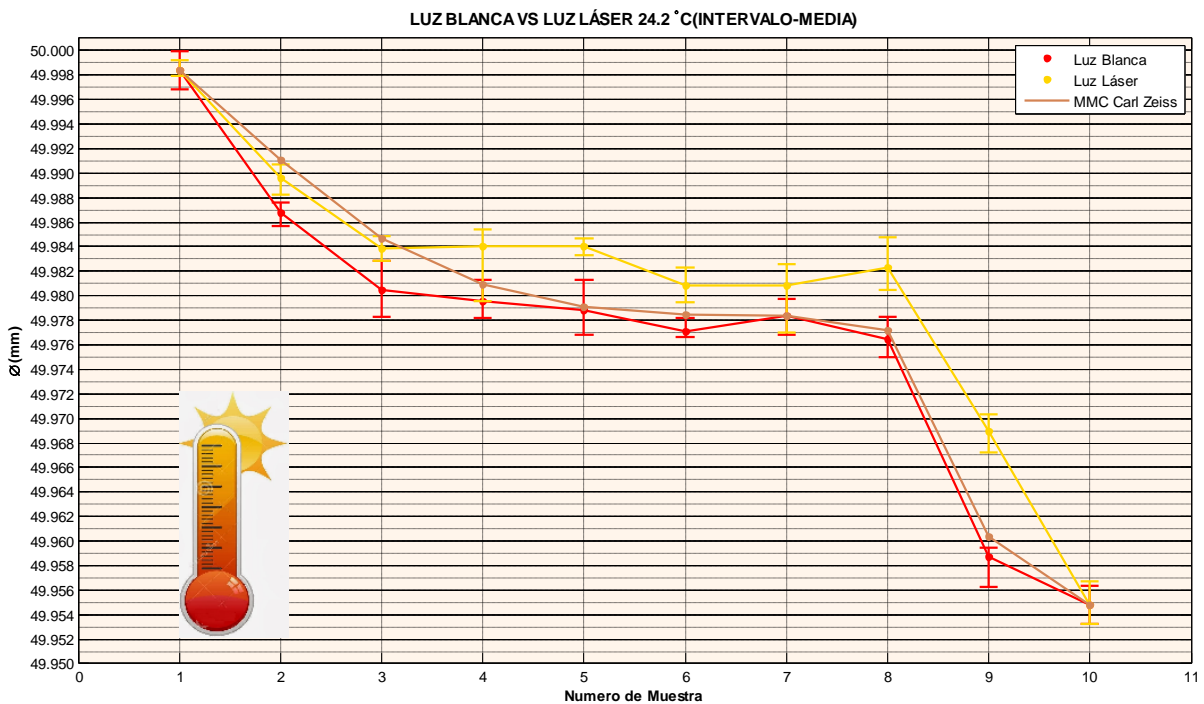


Figura 4.67 Gráfica comparativa de los métodos ópticos remotos de medición, empleando como punto comparativo el intervalo de medición medio.

Similar a la sección previa se muestra un análisis empleando la σ -media en las dos técnicas ópticas (ver *Figura 4.68* y *Figura 4.69*).

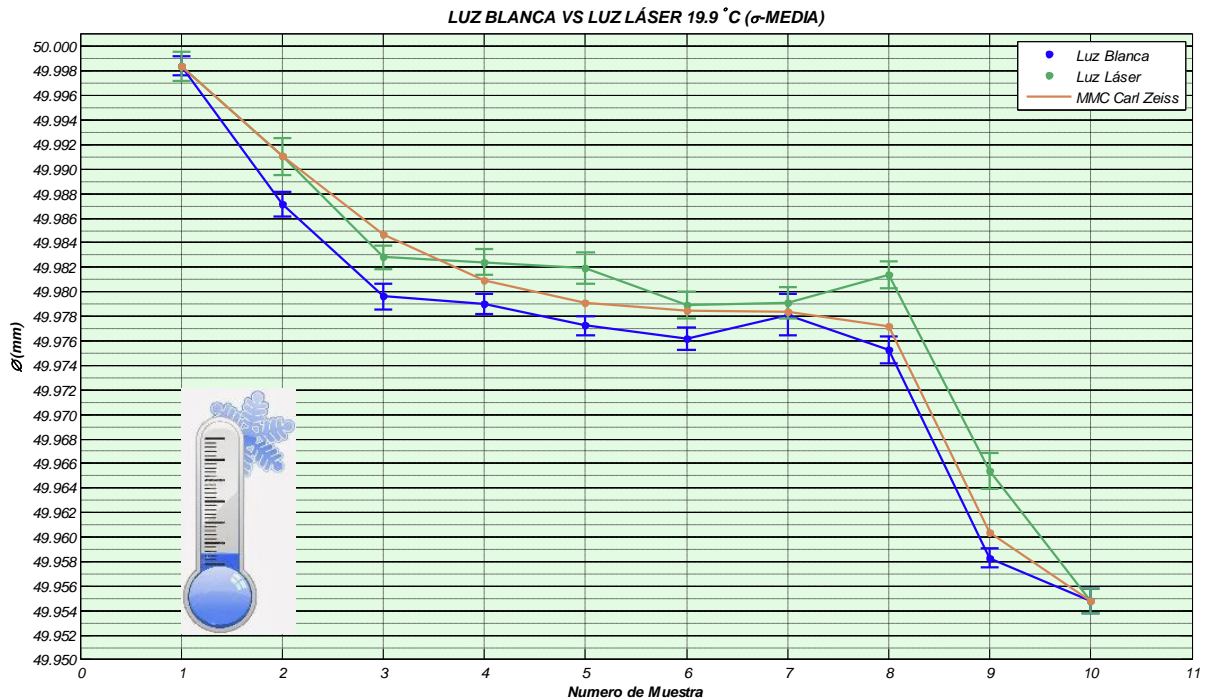


Figura 4.68 Gráfica comparativa de los métodos ópticos remotos de medición, empleando como punto comparativo la desviación estándar-media de la medición.

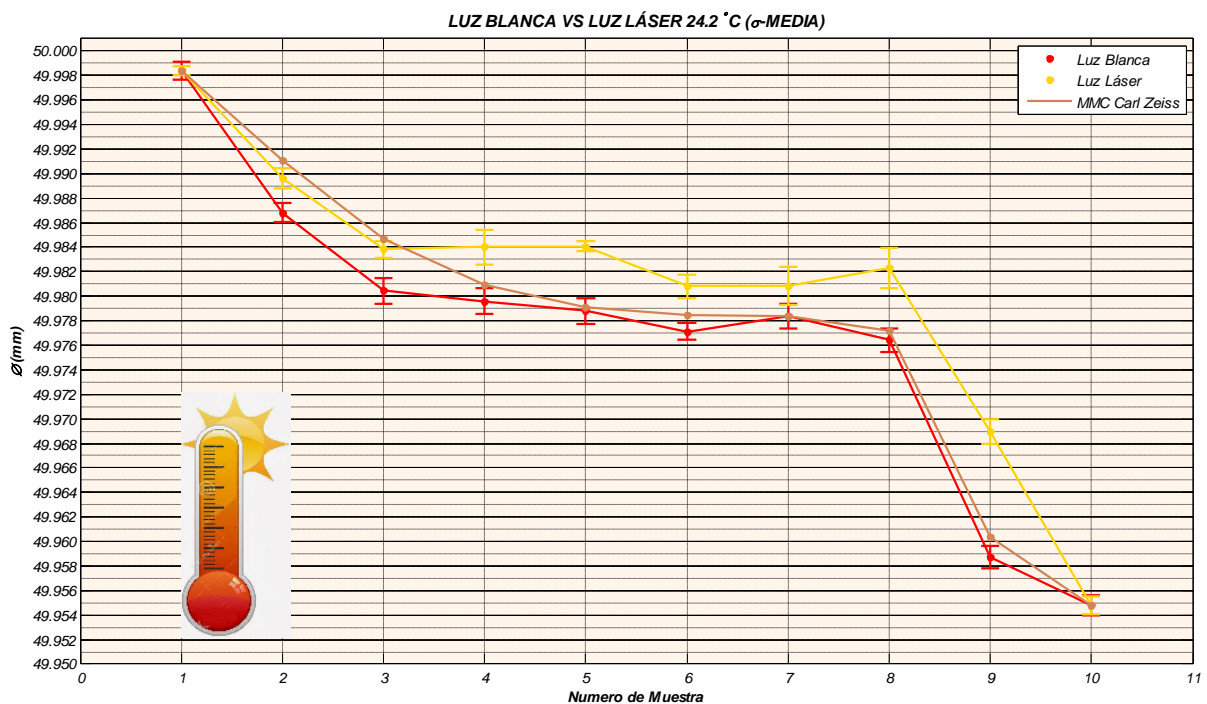


Figura 4.69 Gráfica comparativa de los métodos ópticos remotos de medición, empleando como punto comparativo la desviación estándar-media de la medición.

Aunque los dos perfiles de medición de los métodos ópticos son parecidos, el método de luz blanca empleado es ligeramente más cercano al perfil obtenido de la máquina MMC. Lo anterior es una respuesta contraria a lo originalmente esperado, pero que demuestra la mejora en resolución de ésta técnica por medio de los algoritmos selectivos.

4.5.3 ESTUDIO COMPARATIVO DE MÉTODOS ÓPTICOS CONTRA MECÁNICOS

Finalmente, en las *Figuras 4.70 y 4.71* se comparan todos los métodos utilizados (ópticos y mecánicos) y su respuesta σ -media.

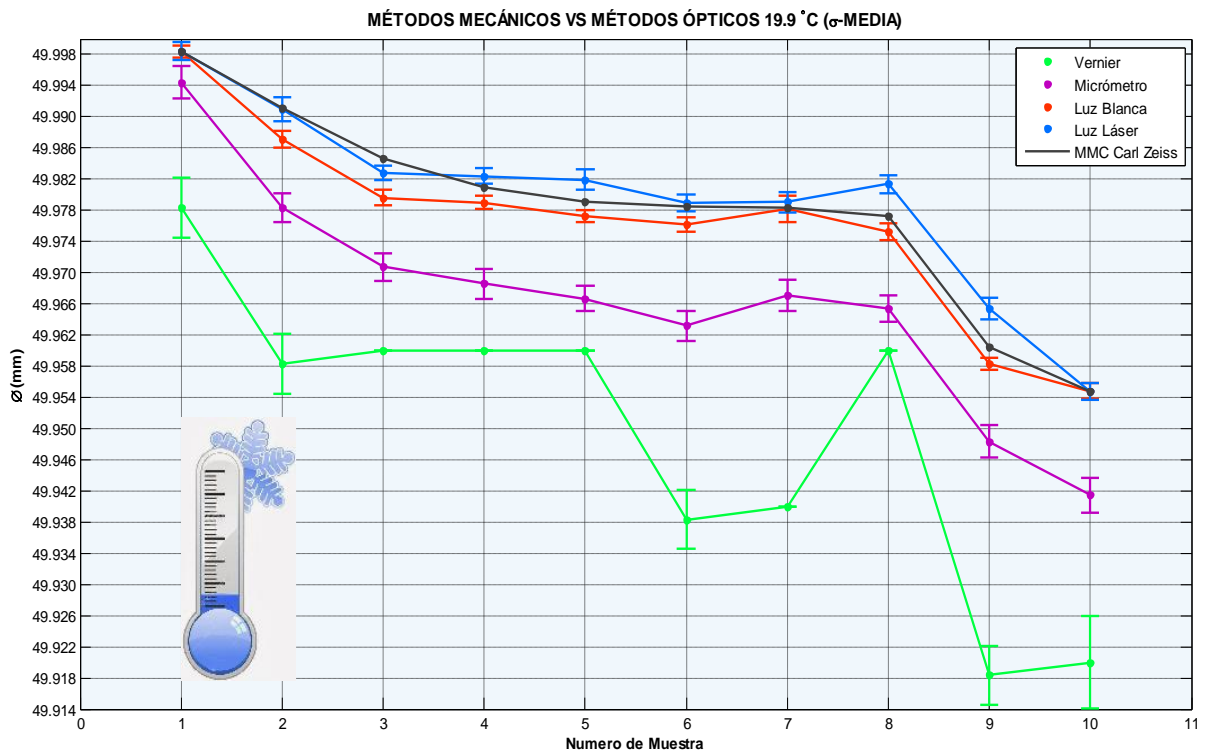


Figura 4.70 Gráfica comparativa de los métodos ópticos remotos de medición y mecánico, empleando como punto comparativo la desviación estándar-media de la medición.

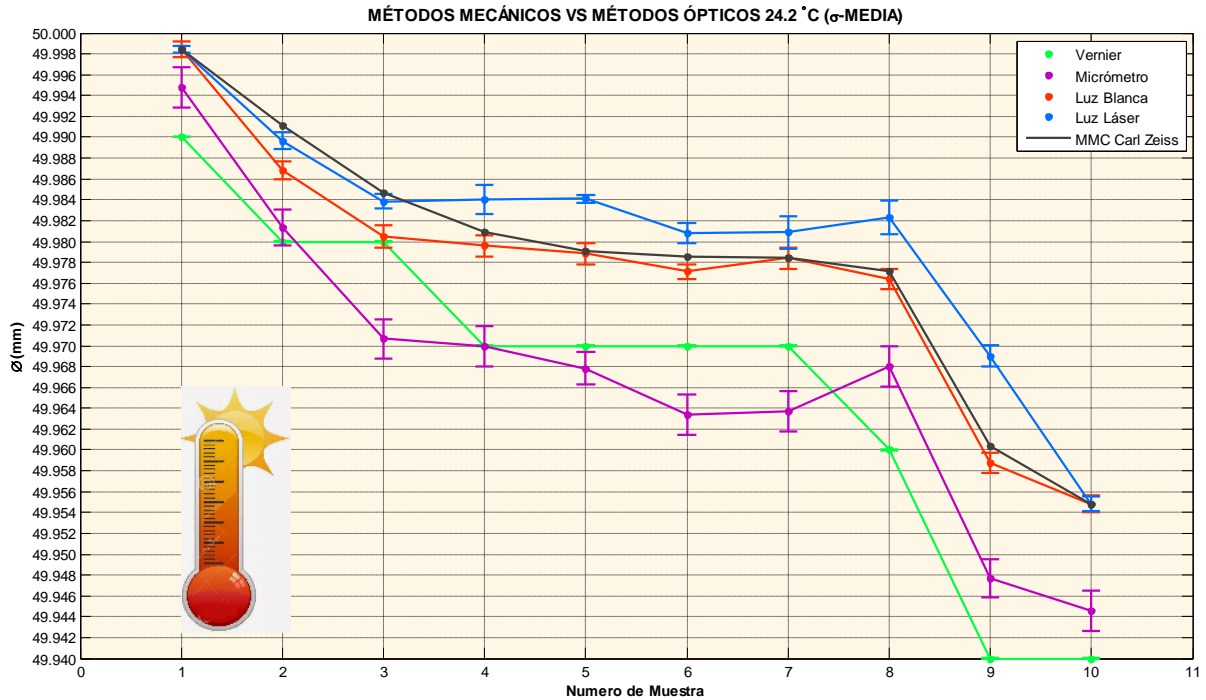


Figura 4.71 Gráfica comparativa de los métodos ópticos remotos de medición y mecánico, empleando como punto comparativo la desviación estándar-media de la medición.

Como se observa en las figuras anteriores, el perfil de medición por métodos ópticos tiene un menor error relativo con respecto al sistema de referencia (MMC) en comparación a los métodos mecánicos.

Del estudio anterior que generó todas las gráficas, se puede llevar a cabo un análisis cuantitativo con los principales indicadores que son:

- Incertidumbre o error
- Error relativo

Para estimar el error de la medición se calcula:

- a) El valor mínimo y máximo de cada medición (intervalos de medición).
- b) Se determina la incertidumbre mediante la *Ecuación 3.1* y se selecciona la mayor de las mediciones.

Método de medición	Incertidumbre
Vernier	0.02 mm
Micrómetro	0.007 mm
Luz blanca	0.005 mm
Luz láser	0.006 mm

Tabla 4.3 Valores de incertidumbre de las mediciones empleando sistemas mecánicos y ópticos, basadas en el intervalo de medición.

- c) Empleando la *Ecuación 3.3* se determina el error relativo con respecto a la medición de la MMC.
- d) Finalmente se selecciona el valor mayor que comprenda todos los errores.

Método de medición	Error relativo
Vernier	0.08%
Micrómetro	0.03%
Luz blanca	0.01%
Luz láser	0.003%

Tabla 4.4 Características de error relativo de las mediciones empleando sistemas mecánicos y ópticos, basadas en el intervalo de medición.

4.6 RESOLUCIÓN DE LA MEDICIÓN EN SISTEMAS ÓPTICOS REMOTOS

Acorde a las *Figura 4.66* y *Figura 4.67* se observa que el intervalo de error en las mediciones de los métodos ópticos remotos se encuentra en un rango de 0.005 a 0.006mm por lo cual su resolución e incertidumbre se muestra en la *Tabla 4.5*.

Método de medición	Intervalo	Resolución	Incertidumbre
Proyección de Sombra(Luz blanca)	49.955 – 49.998mm	0.001 mm	±0.0025 mm
Detección de difracción (Luz láser)	49.955 – 49.998mm	0.001 mm	±0.003 mm

Tabla 4.5 Características de resolución e incertidumbre de las mediciones empleando sistemas ópticos remotos, basadas en el intervalo de medición.

Considerando:

$$\bar{X} = \frac{X_1 + X_2 + X_3 \dots + X_{N-1} + X_N}{N} = \frac{\sum_{j=1}^N X_j}{N} \quad \text{Ecuación 4.5}$$

donde:

X_j : Medición repetida en mm por pieza.

N : Numero de mediciones repetidas en mm por pieza ($N=10$).

\bar{X} : Media aritmética.

Se determina la desviación estándar, o como se le llama en forma común, desviación de la media cuadrática [36] mediante la *Ecuación 4.6*.

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^N (X_j - \bar{X})^2}{N}} \quad \text{Ecuación 4.6}$$

donde:

s : Desviación estándar.

Empleando a su vez el método no sesgado, debido a que la muestra “ N ” que es menor a 30 se reemplaza N por $N-1$ [36][37], Ecuación 4.7.

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^N (X_j - \bar{X})^2}{N - 1}} \quad \text{Ecuación 4.7}$$

Con base en esto, en las *Figura 4.68* y *Figura 4.69* se presentan los resultados del criterio de asignación de incertidumbre (desviación estándar) para los métodos de ópticos de medición remota, los cuales se muestran en la *Tabla 4.6* para una confiabilidad del 68.27% y en la *Tabla 4.7* para una confiabilidad del 95.45%. La cual es determinada a través de la *Ecuación 4.8* [30][31] y la tabla de confianza [36].

$$z = \frac{\sqrt{n}}{s} e \quad \text{Ecuación 4.8}$$

donde:

z = Nivel de confiabilidad.

e = Error.

n = Numero de datos.

Método de medición	Intervalo	Resolución	Incertidumbre
Proyección de Sombra(Luz blanca)	49.955 – 49.998mm	0.001 mm	±0.002 mm
Detección de difracción (Luz láser)	49.955 – 49.998mm	0.001 mm	±0.002 mm

Tabla 4.6 Características de resolución e incertidumbre de las mediciones empleando sistemas ópticos remotos, basadas en la desviación estándar con una confiabilidad del 68.27%.

Método de medición	Intervalo	Resolución	Incertidumbre
Proyección de Sombra(Luz blanca)	49.955 – 49.998mm	0.001 mm	±0.004 mm
Detección de difracción (Luz láser)	49.955 – 49.998mm	0.001 mm	±0.004 mm

Tabla 4.7 Características de resolución e incertidumbre de las mediciones empleando sistemas ópticos remotos, basadas en la desviación estándar con una confiabilidad del 95.45%.

5. DISCUSIONES Y CONCLUSIONES

A través de este trabajo de tesis se concluye que tanto el sistema de proyección de sombra (luz blanca) como el sistema de identificación de difracción (luz láser) son sistemas ópticos remotos confiables para la identificación de los bordes rectos en ejes o flechas manufacturadas con una resolución en micrómetros, un error de ± 0.003 mm y un error relativo con respecto al sistema de referencia (maquina de medición por coordenadas) de 0.01%.

Por otra parte las gráficas comparativas de cambio de temperatura demuestran que la variación dimensional debido a esta condición es asimismo identificada por los dos sistemas ópticos-remotos.

Simultáneamente, la comparación entre sistemas ópticos y mecánicos comprueba la eficiencia de los sistemas ópticos-remotos ya que aunque los sistemas mecánicos indiquen resoluciones de 0.001mm, como es el caso del micrómetro, su incertidumbre se encuentra en un intervalo ± 0.0035 mm, adicional al error relativo de 0.03% con respecto a la medición resultante del sistema de referencia, el cual es mayor en comparación a los sistemas ópticos-remotos.

Aunque los dos sistemas ópticos-remotos son confiables y similares en resolución, su mayor diferencia se debe a la fuente de luz empleada, ya que a nivel costo-beneficio una fuente de luz blanca es menos costosa que una fuente de luz láser, dando como resultado una ventaja inherente del sistema de proyección de sombra.

Adicionalmente, se puede indicar que los sistemas de medición son afectados en gran medida por el polvo y grasa integrada al objeto a medir, ya que como emplean la magnificación de la sombra y difracción del borde, a su vez se magnifican elementos externos que podrán afectar la visión del borde real. Otra excepción es la medición de piezas transparentes, ya que la luz pasa a través del objeto logrando reflexiones que afectaran la identificación del borde. Debido a estas condiciones estos sistemas deben ser diseñados bajo una estructura semi-hermética, además de que los objetos deben ser no transparentes (ejes metálicos), libres de polvo y grasa o algún otro líquido que impida la identificación acertada del borde recto.

Independientemente de sus desventajas, estos sistemas ópticos-remotos son relevantes ya que en base a la difracción y proyección de sombra de un borde

recto, se identifica y mide el diámetro de una pieza metálica con una resolución en micrómetros, sin necesidad del contacto físico empleando unos cuantos elementos ópticos, un par de cámaras CCD de bajo costo y la implementación de un software de procesamiento digital de señales.

Debido a sus ventajas con respecto a otros sistemas mecánicos, tales como:

- La simplicidad de los sistemas de medición remota.
- Operación automática y en tiempo real.
- Alta resolución a un bajo costo.
- Medición dimensional lineal tanto de espesores, diámetros externos, alturas, etc.
- Implementación directa en el proceso productivo.

Pueden ser considerados sistemas de bajo costo y reductores de tiempo de inspección, lo cual se refleja en un costo-beneficio a nivel industrial.

5.1 TRABAJO A FUTURO

Como parte de las mejoras a los sistemas de medición remota se encuentran:

1. Diseño y fabricación de la estructura semi- hermética para la protección de los dispositivos ópticos.
2. Diseño y fabricación de la estructura mecánica para montaje e instalación del dispositivo.
3. Diseñar un mecanismo de ajuste para la calibración de las cámaras.
4. Diseño de sistemas compactos y portátiles.
5. Integración del sistema comercial de iluminación de luz blanca que reemplazara al proyector.
6. Aumentar la magnificación de la captura del borde y la resolución de las cámaras con el objetivo de aumentar la resolución en la medición.
7. Selección y empleo de software de procedencia libre para la generación de algoritmos robustos, disminuyendo el costo del sistema final.
8. Integrar al software el error generado en la medición debido a cambios de temperatura.
9. Con respecto al sistema de detección de difracción, selección y empleo de un diodo laser de bajo costo.
10. Implementación de los sistemas bajo condiciones industriales (vibración, ruido, polvo, cambios de temperatura) con el objetivo de estudiar su respuesta.

6. REFERENCIAS

- [1]. http://www.cenam.mx/Dimensional/lab_MMC.aspx
- [2]. <http://www.ema.org.mx/portal/index.php/Conozca-a-Nuestros-Acreditados/conozca-a-nuestros-acreditados.html>
- [3]. T. Yandayan and M. Burdekin, “*In- process dimensional measurement and control of workpiece accuracy*”, Elsevier Internal Journal of Machine tools and Manufacture 38, 1423–1439 (1997).
- [4]. Carlos González González y Ramon Zeleny Vázquez, “*Metrología Dimensional*”, Mc Graw Hill, 1a. Edición, 1999.
- [5]. Guang Wei and Qingchang Tan, “Measurement of shaft diameters by machine vision”, Applied Optics 50, 19 (2011).
- [6]. E. Milana, P. Marconi, G. Graziani, O. Emilia, “*Opto- Electronic Measuring Apparatus for Checking Linear Dimensions*”, Patent number US5841542 (1998).
- [7]. M. Ring, J. Weber, H. Ackerman, “*Method and apparatus for the optical electronic measurement of a work piece*”, Patent number US4854707 (1989).
- [8]. E. Hecht, “*Óptica*”, E.D. Pearson, Addison-Wesley, 3era. Edición, 2003.
- [9]. Daniel H. Malacara, “*Óptica Básica*”, FCE (Fondo de cultura económica), 2a. Edición, 2004.
- [10]. Goodman Joseph W., “*Introduction to Fourier Optics*”, Roberts & Company Publishers, 3ra.Edición, 2005.
- [11]. Max Born and Emil Wolf, “*Principles of Optics*”, Pergamon Press, 6a. Edición, 1980.
- [12]. John G. Proakis and Dimitris G. Manolakis, “*Digital Signal Processing*”, Prentice Hall, 4a. Edición, 2007.
- [13]. Rafel C. Gonzalez, Richard E. Woods and Sreven L. Eddins, “*Digital Image Processing using MATLAB*”, Pearson Prentice Hall, 1a. Edición, 2004.
- [14]. Gonzalo Pajares Martinsanz y Jesús M. de la Cruz García, “*Vision por Computador Imágenes digitales y de aplicación*”, Ra-Ma, 2a. Edición, 2007.
- [15]. Carlos González González y Ramon Zeleny Vázquez, “*Metrología*”, Mc Graw Hill, 2a. Edición, 1998.

- [16]. H. Robert Galicia, N. Garcia, A. Herrera, J. Mayén, M. Mendez, S. Sanchez, *"Metrología geométrica dimensional"*, AGT editor, 1a edición, 1992.
- [17]. K. Vacharanukul, S. Mekid, *"In-process dimensional inspection sensors"*, Elsevier Measurement 38, 204–218 (2005).
- [18]. Norma ISO 1101.
- [19]. María Moro Piñeiro, *Metrología: Introducción, "Conceptos e Instrumentos"*, Universidad de Oviedo, 1a. Edición, 2000.
- [20]. Connier L. Dotson, *"Fundamentals of Dimensional Metrology"*, Thomson Delmar Learning, 5a. Edición, 2006.
- [21]. K. Takesa, H. Sato, Y. Tani, and T. Sata, *"Measurement of diameter using charge coupled device (CCD)"*, CIRP Ann. 33, 377–381 (1984).
- [22]. A. Harding, *"Measurement on the move; non-contact gauging of tube diameter and shape"*, Mechanical Working and Steel Processing Conference Proceedings, 1998, p. 559.
- [23]. Q. Song, D. Wu, J. Liu, C. Zhang, and J. Huang, *"Instrumentation design and precision analysis of the external diameter measurement system based on CCD parallel light projection method"*, Proc. SPIE 7156, 71562I (2008).
- [24]. Q. Song, D. Wu, J. Liu, C. Zhang, and J. Huang, *"Optical path design of the external diameter measurement system based on CCD and parallel light projection method with double light paths"*, Proc. SPIE 6625, 66251U (2007).
- [25]. Q. Song, D. Wu, J. Liu, C. Zhang, and J. Huang, *"Signal processing method of the diameter measurement system based on CCD parallel light projection method"*, Proc. SPIE 6829, 68291V (2007).
- [26]. Xinwen Gao, Wei Ding, Tongyue Gao and Zhengbang Gong, *"High Precision Contactless Object-diameter measurement using IR light source"*, IEEE 978-1-4244-4795-4 (2009).
- [27]. Catalogo Mitutoyo (2013).
- [28]. C. Sun, Q. You, Y. Qiu and S. Ye, *"Online machine vision method for measuring the diameter and straightness of seamless steel pipes"*, Opt. Eng. 40, 2565–2571 (2001).

-
- [29]. G.Y. Zhang, X.P. Xu, X.H. Fu, L. Yang, C.Z. Li, “*The measurement and control of diameter in large-scale part processing*”, Journal of Materials Processing Technology 129 (2002) 653.
- [30]. J.A. Muñoz-Rodríguez and R. Rodríguez- Vera, “*Shape detection using light line and Bezier approximation network*”, Imaging Science Journal, Vol. 55, pp. 29-39 (2007).
- [31]. J.A. Muñoz-Rodríguez, “*Binocular imaging of a laser stripe and approximation networks for shape detection*”, International Journal of Imaging Systems and Technology, Vol. 17(2), pp. 62-74 (2007).
- [32]. J.A. Muñoz-Rodríguez, “*Shape connection by pattern recognition and laser metrology*”, Applied Optics, Vol. 47, pp. 3590-3608 (2008).
- [33]. Soraya A. Khodier, “*Measurement of wire diameter by optical diffraction*”, Elsevier Optics & Laser Technology 36, 63-67 (2004).
- [34]. W.H. Fincham and M.H. Freeman, “*Optics*”, Butterworth-Heinemann Ltd, 9a. Edición, 1980.
- [35]. Bo Su, Guoteng Duan, “*Research on high accuracy diameter measurement system with CCD*”, Proc. SPIE 8194, 81942Y (2011).
- [36]. Murray R. Spiegel y Larry J. Stephens, “*Estadística*”, Mc Graw Hill, 3era. Edición, 2002.
- [37]. Berta Oda Noda, “*Introducción al análisis gráfico de datos experimentales*”, Facultad de ciencias, UNAM 3era. Edición, 2013.
- [38]. Jay L. Devore, “*Probabilidad y estadística para ingeniería y ciencia*”, Thomson Learning, 5ta. Edición, 2000.

APENDICE A. MAQUINADO DE LAS PIEZAS PATRÓN

Como parte de la etapa de preparación del proceso experimental, se llevo a cabo la cotización y supervisión para la fabricación de muestras de control, las cuales son cilindros metálicos de material O1 templadas y rectificadas, con una variación de unos cuantos micrómetros en su diámetro, ver *Figura A. 1* y *Tabla A. 1*.

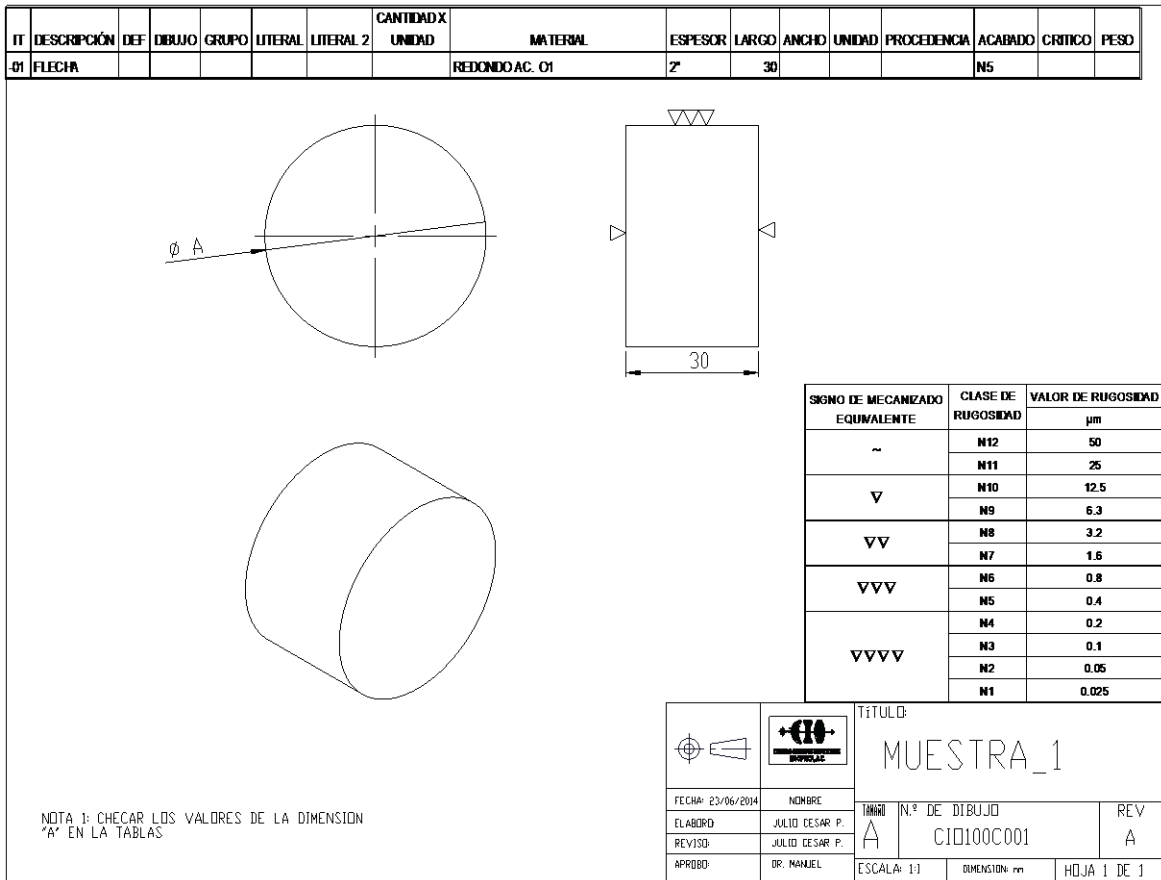


Figura A. 1 Plano de especificaciones para la fabricación de las muestra de control.

Muestra	A, Ø(mm)	Cantidad
1	50.000	1
2	49.994	1
3	49.987	1
4	49.985	1
5	49.983	1
6	49.981	1
7	49.979	1
8	49.977	1
9	49.970	1
10	49.968	1

Tabla A. 1 Especificación de la acotación "A" para la fabricación de las muestras.

Donde el acero O1 es un acero grado herramienta compuesto químicamente por (ver *Tabla A. 2*):

C (%)	Mn (%)	Si (%)	Cr (%)	W (%)
0.95	1.25	0.30	0.50	0.50

Tabla A. 2 Composición química del acero O1.

Y teniendo como propiedades mecánicas las ilustradas en la *Tabla A. 3*:

Temperatura de temple(°C)	Dureza HRC	Resistencia al impacto (ft-lb)
800	60	30

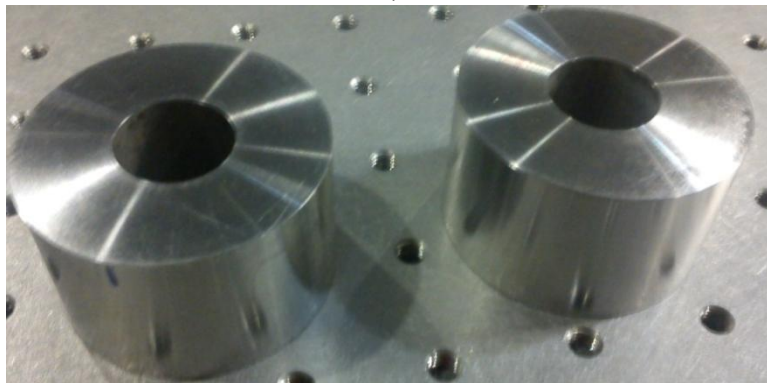
Tabla A. 3 Propiedades mecánicas del acero O1; HRC: Dureza Rockwell C.

La metodología de fabricación fue la siguiente:

- a) Maquinado de los cilindros empleando un torno CNC (control numérico por computadora).
- b) Endurecido de las piezas, con el objetivo de asegurar el diámetro deseado de las piezas.
- c) Finalmente el rectificado de las piezas y obtención de las muestras de control ver *Figura A. 2*.



a)



b)

Figura A. 2 Muestras obtenidas en el proceso de fabricación, a) Vista superior, b) Vista Isométrica.

Posterior a la etapa de fabricación, estas muestras se trasladaron al proceso de inspección, el cual se llevo a cabo en el Laboratorio de metrología dimensional del Centro de Investigaciones en Óptica (CIO), acreditado ante ema(entidad mexicana de acreditación, a.c), con numero de acreditación D-85 a partir del 21 de octubre del 2009.

Quienes llevaron a cabo las mediciones del diámetro de cada muestra bajo una condiciones de temperatura a 19.9°C y empleando la máquina de medición por coordenadas (DIM-PT-001). Marca: Carl Zeiss, Modelo: C-400, que tiene una resolución de 0.0001mm, basados en la siguiente metodología:

1. Limpieza de la muestra
2. Temperizado de la muestras (mantener la muestra a una temperatura de 19.9°C durante un lapso de 24 hrs).
3. Sujeción de una muestra a la vez en la mesa de la máquina de medición por coordenadas.
4. Medición de las muestras empleando 50 puntos de la parte superior y 50 puntos de la parte inferior de la muestra.
5. Segunda medición de las muestras, para corroboración de resultados.
6. Reporte de las mediciones encontradas y variación en micrómetros (ver *Tabla A. 4*) respecto a los diámetros especificados en *Tabla A. 1*.

Muestra	A, Ø(mm)	Medición
1	50.000	49.9984
2	49.994	49.9896
3	49.987	49.9847
4	49.985	49.9809
5	49.983	49.9785
6	49.981	49.9791
7	49.979	49.9772
8	49.977	49.9717
9	49.970	49.9604
10	49.968	49.9548

Tabla A. 4 Medición resultante de los cilindros metálicos empleando la máquina de medición por coordenadas bajo una temperatura de 19.9 °C.

APENDICE B. GRÁFICAS DE REPETIBILIDAD Y CAJA

Como parte complementaria a las gráficas mostradas en la sección de resultados, se adicionan gráficas de repetibilidad y de caja. Donde la repetibilidad es determinada mediante la *Ecuación B. 2* y *B2* [31].

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^N (X_j - \bar{X})^2}{N}}$$

Ecuación B. 1

$$\%rep = \frac{\bar{X} - s}{\bar{X}}$$

Ecuación B. 2

donde:

%rep: Porcentaje de repetibilidad.

x_m : Valor medio de la medición.

s : Desviación estándar.

y los diagramas de caja muestran características tales como:

- a) Centro.
- b) Dispersión.
- c) Naturaleza y magnitud de cualquier desviación de la simetría.
- d) Identificación de puntos inusuales (atípicos), observaciones que están muy lejos del cuerpo principal de los datos.

A su vez estos diagramas están basados en medidas que son resistentes a la presencia de unos cuantos puntos atípicos: la mediana y una medida de dispersión llamada cuarta dispersión.

El diagrama de caja se basa en cinco cantidades:

- a) Valor mínimo.
- b) Cuarto inferior.
- c) Mediana.
- d) Cuarto superior.
- e) Valor máximo.

Donde el cuarto inferior, cuarto superior y la cuarta dispersión están dados por [38]:

$$\text{Cuarto inferior} = \begin{cases} \text{mediana de las mínimas } n/2 \text{ observaciones, } n \text{ par} \\ \text{mediana de las mínimas } (n + 1)/2 \text{ observaciones, } n \text{ par} \end{cases}$$

$$\text{Cuarto superior} = \begin{cases} \text{mediana de las máxima } n/2 \text{ observaciones, } n \text{ par} \\ \text{mediana de las máxima } (n + 1)/2 \text{ observaciones, } n \text{ par} \end{cases}$$

$$\text{Cuarta dispersión} = \text{cuarto superior} - \text{cuarto inferior}$$

Con base en la repetibilidad de las mediciones en la *Figura B. 1* a *Figura B. 8* se muestra el comportamiento en cada método de medición, considerando dos distintas temperaturas.

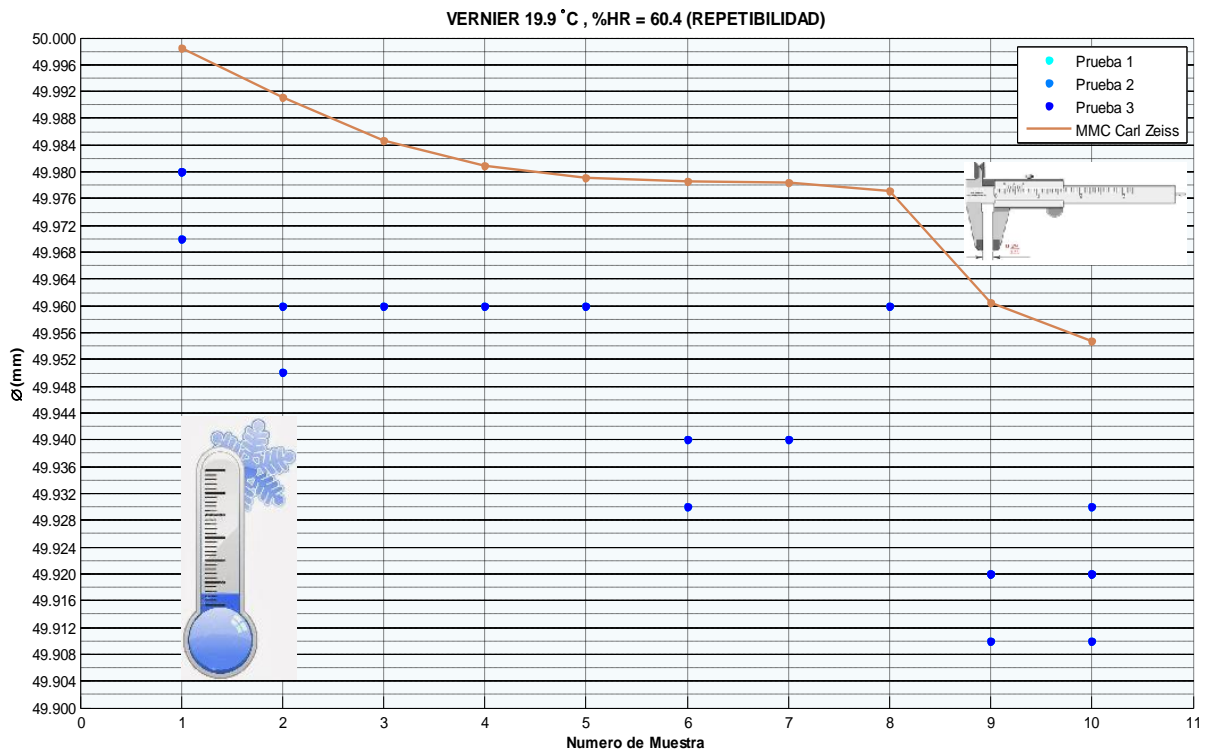


Figura B. 1 Gráfica de repetibilidad en la medición del diámetro para cada pieza de control, en tres pruebas diferentes, a temperatura 19.9 °C y %HR =60.4 (Humedad relativa) empleando el Vernier como instrumento de medición.

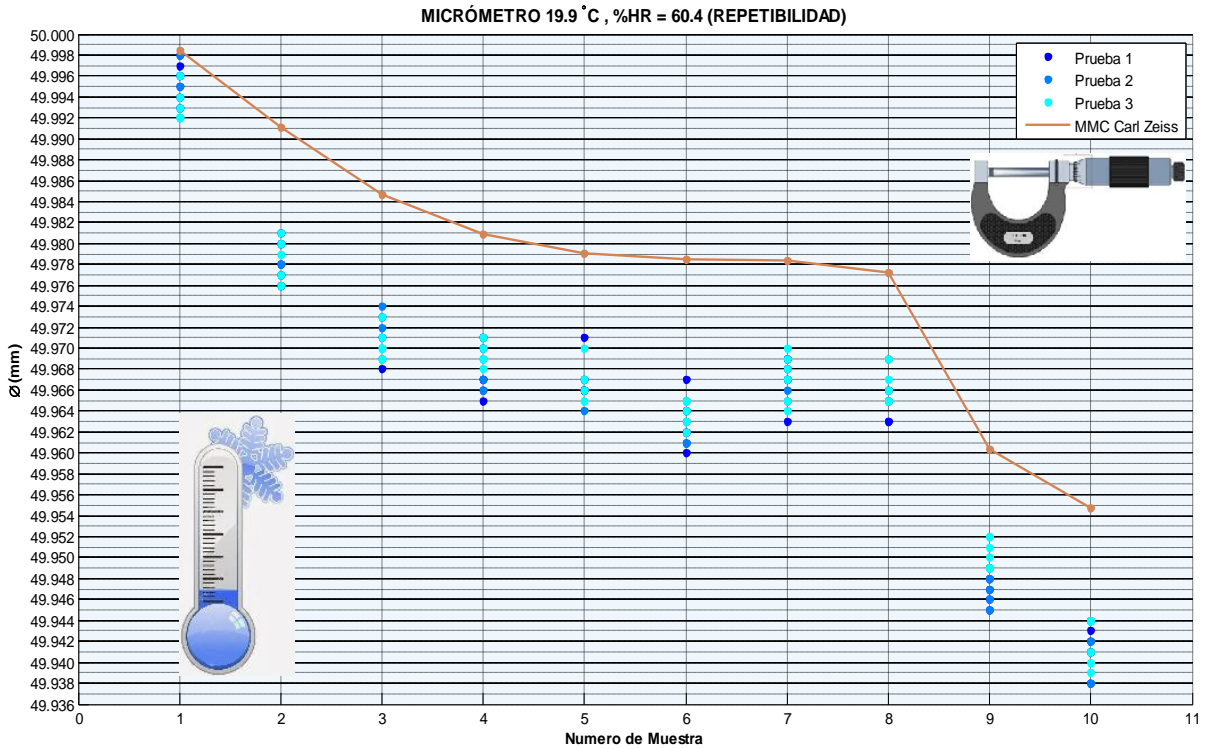


Figura B. 2 Gráfica de repetibilidad en la medición del diámetro para cada pieza de control, en tres pruebas diferentes, a temperatura 19.9 °C y %HR =60.4 (Humedad relativa) empleando el Micrómetro como instrumento de medición.

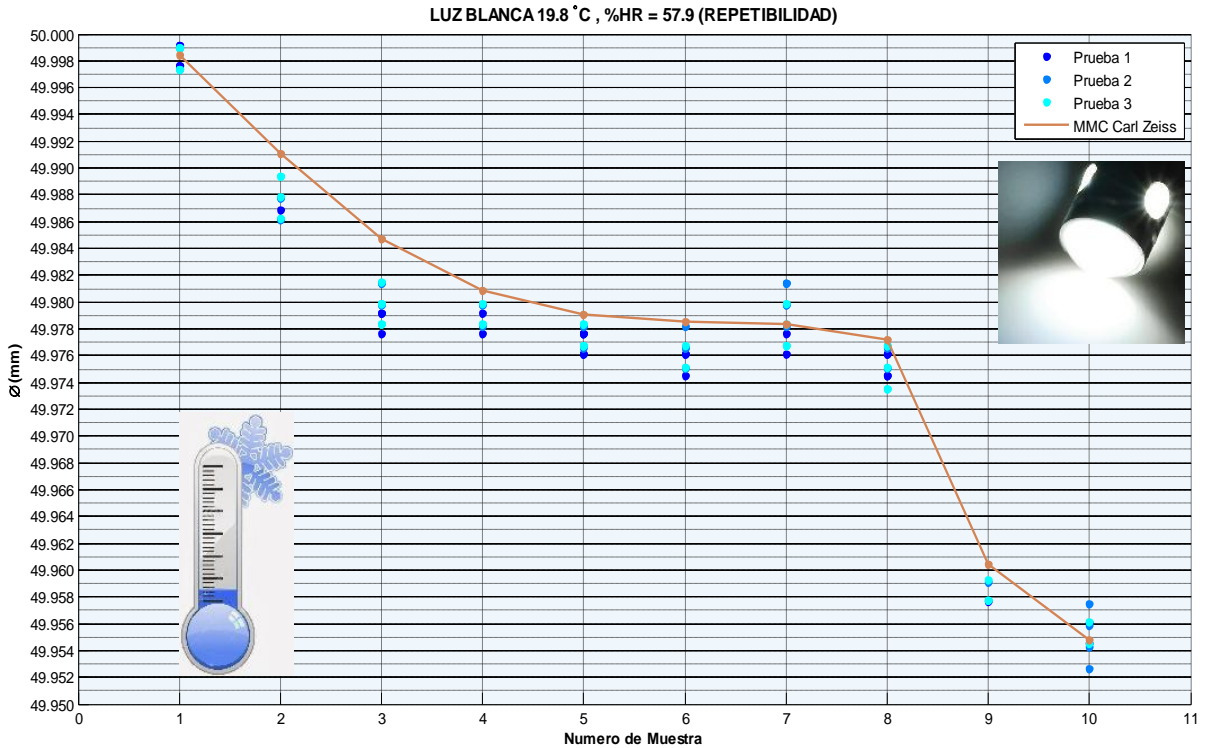


Figura B. 3 Gráfica de repetibilidad en la medición del diámetro para cada pieza de control, en tres pruebas diferentes, a temperatura 19.9 °C y %HR =57.9 (Humedad relativa) empleando la Proyección de luz blanca como método remoto de medición.

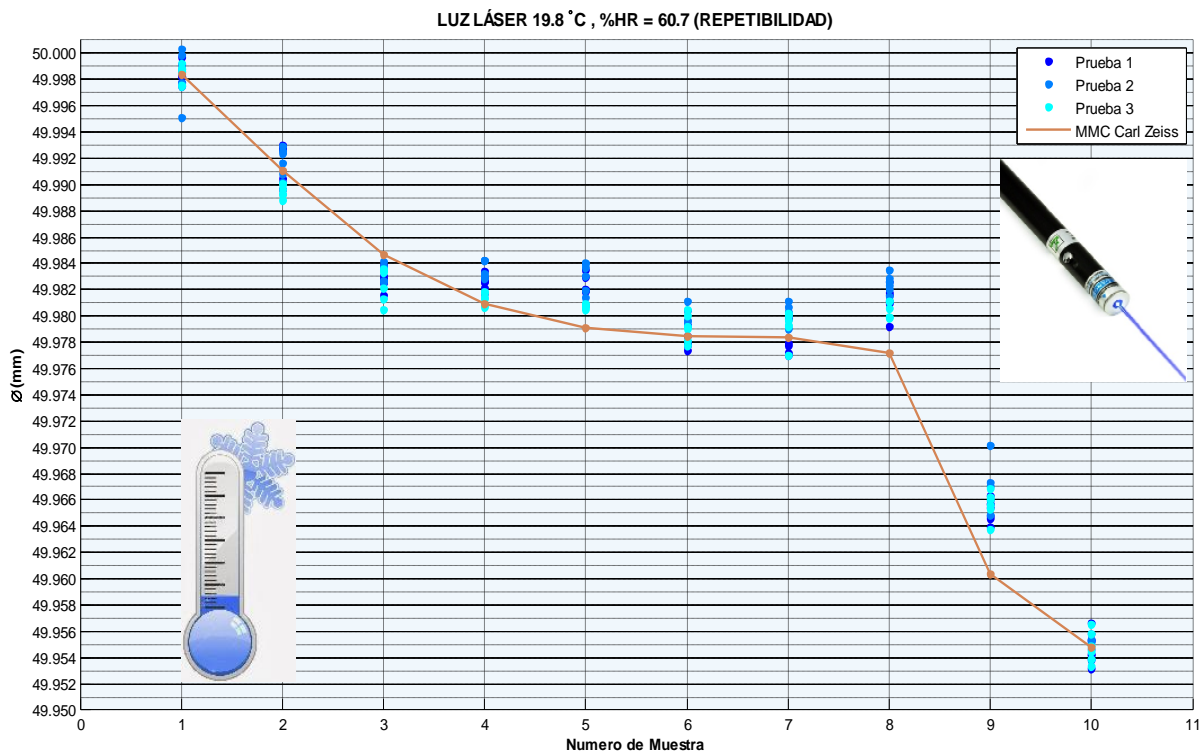


Figura B. 4 Gráfica de repetibilidad en la medición del diámetro para cada pieza de control, en tres pruebas diferentes, a temperatura 19.9 °C y %HR =60.7 (Humedad relativa) empleando la Detección de difracción (luz láser) como método remoto de medición.

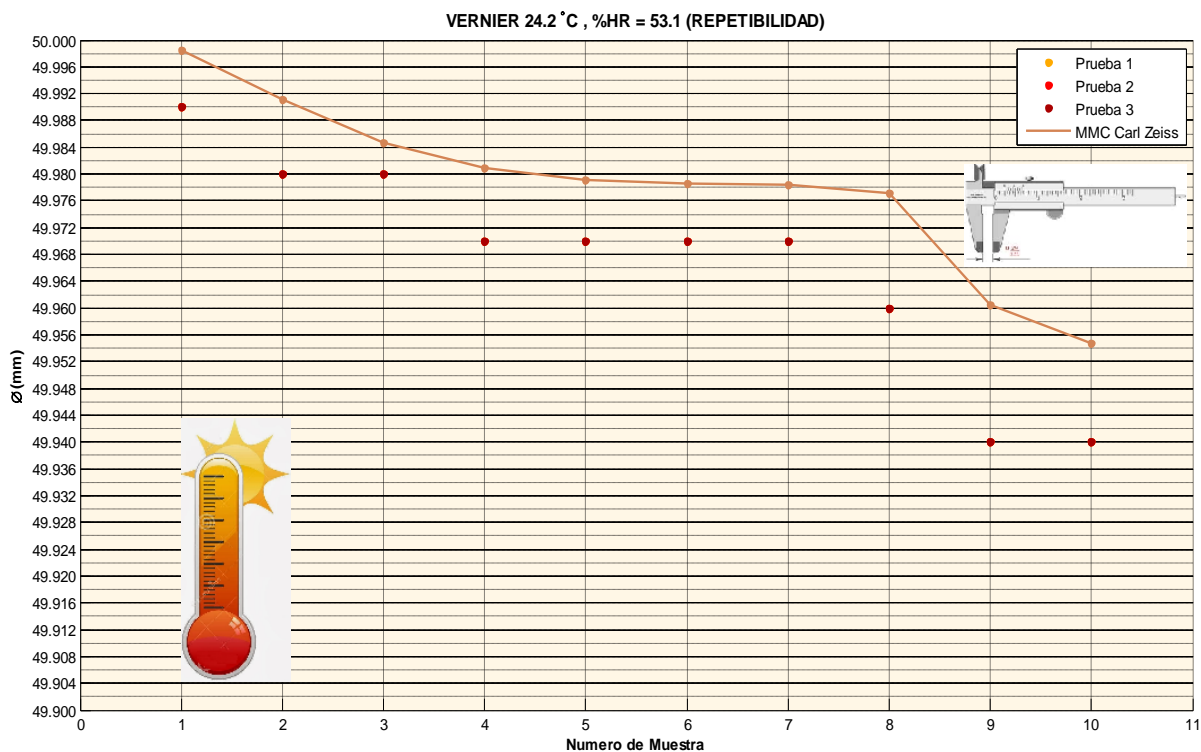


Figura B. 5 Gráfica de repetibilidad en la medición del diámetro para cada pieza de control, en tres pruebas diferentes, a temperatura 24.2 °C y %HR =53.1 (Humedad relativa) empleando el Vernier como instrumento de medición.

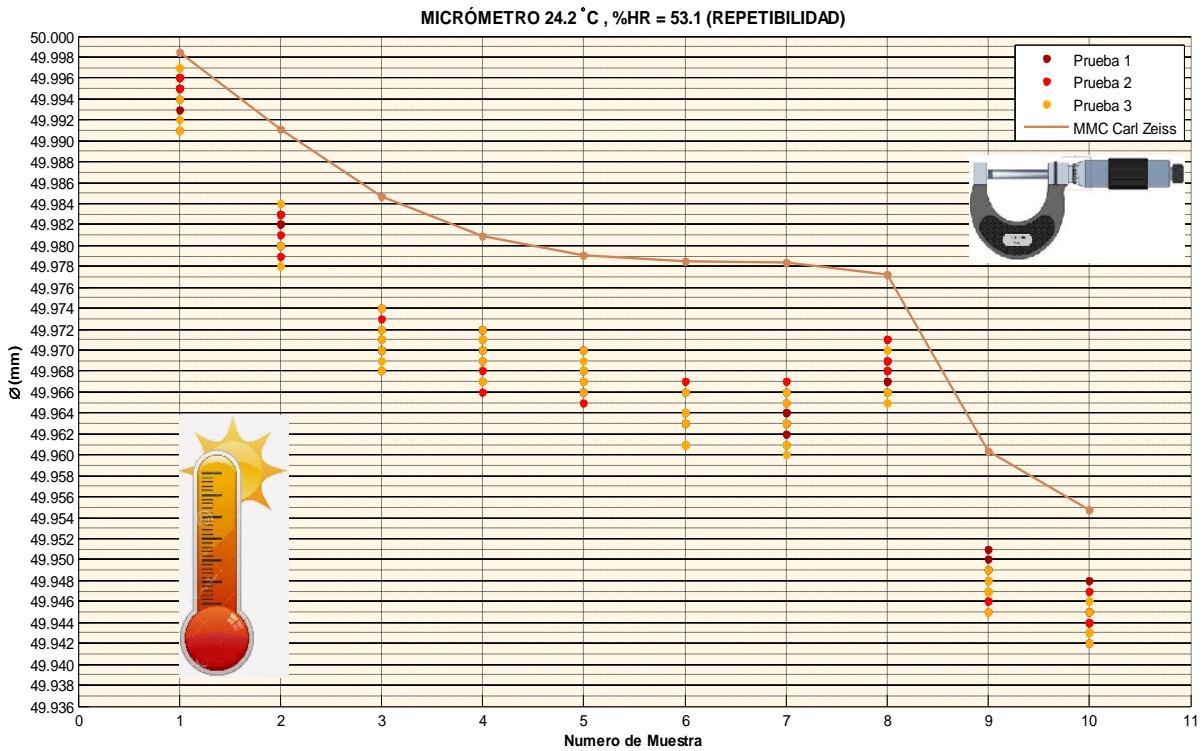


Figura B. 6 Gráfica de repetibilidad en la medición del diámetro para cada pieza de control, en tres pruebas diferentes, a temperatura 24.2 °C y %HR =53.1 (Humedad relativa) empleando el Micrómetro como instrumento de medición

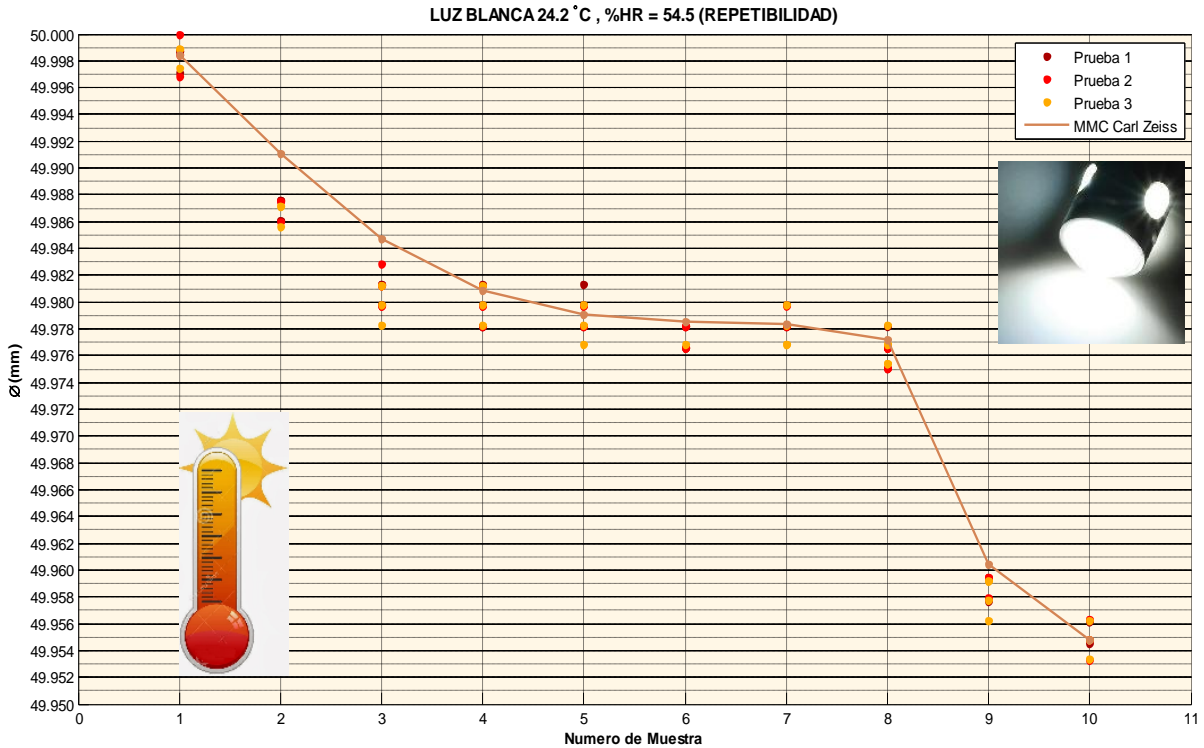


Figura B. 7 Gráfica de repetibilidad en la medición del diámetro para cada pieza de control, en tres pruebas diferentes, a temperatura 24.2 °C y %HR =54.5 (Humedad relativa) empleando la Detección de difracción (luz láser) como método remoto de medición.

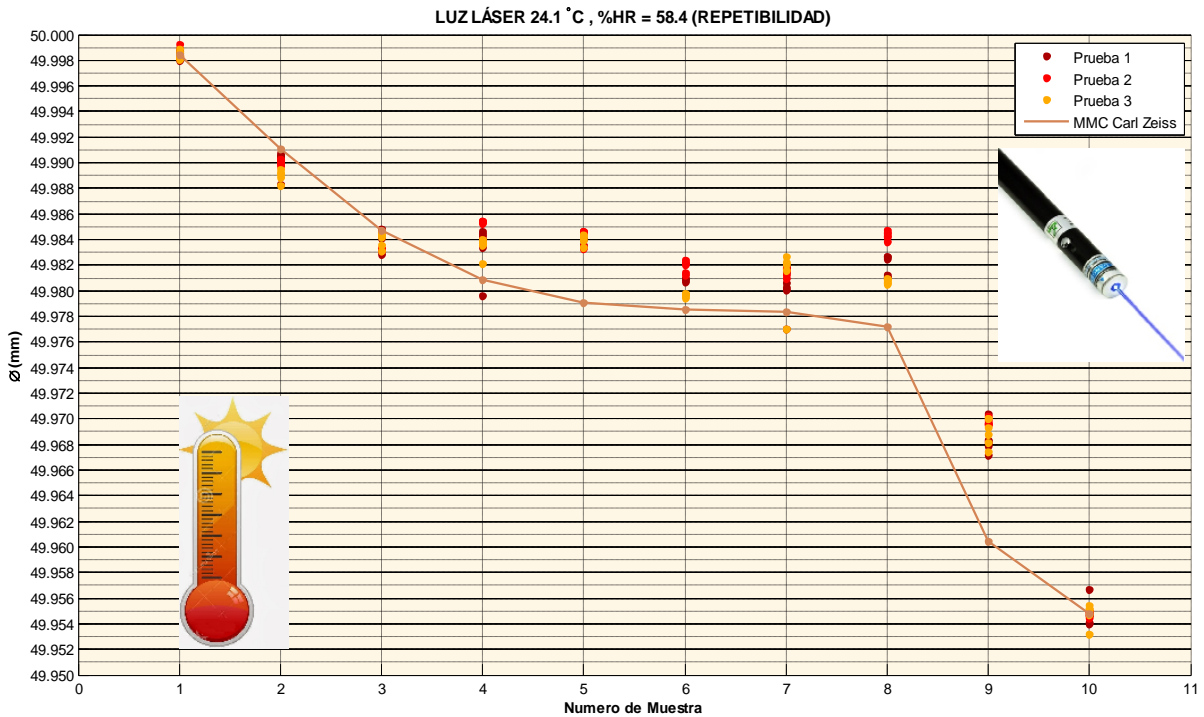


Figura B. 8 Gráfica de repetibilidad en la medición del diámetro para cada pieza de control, en tres pruebas diferentes, a temperatura 24.2 °C y %HR =58.4 (Humedad relativa) empleando la Detección de difracción (luz láser) como método remoto de medición.

Teniendo como base de estudio la precisión e incertidumbre generada por los sistemas ópticos. En la *Figura B. 9* y *Figura B. 10* se muestran gráficas comparativas de estos métodos.

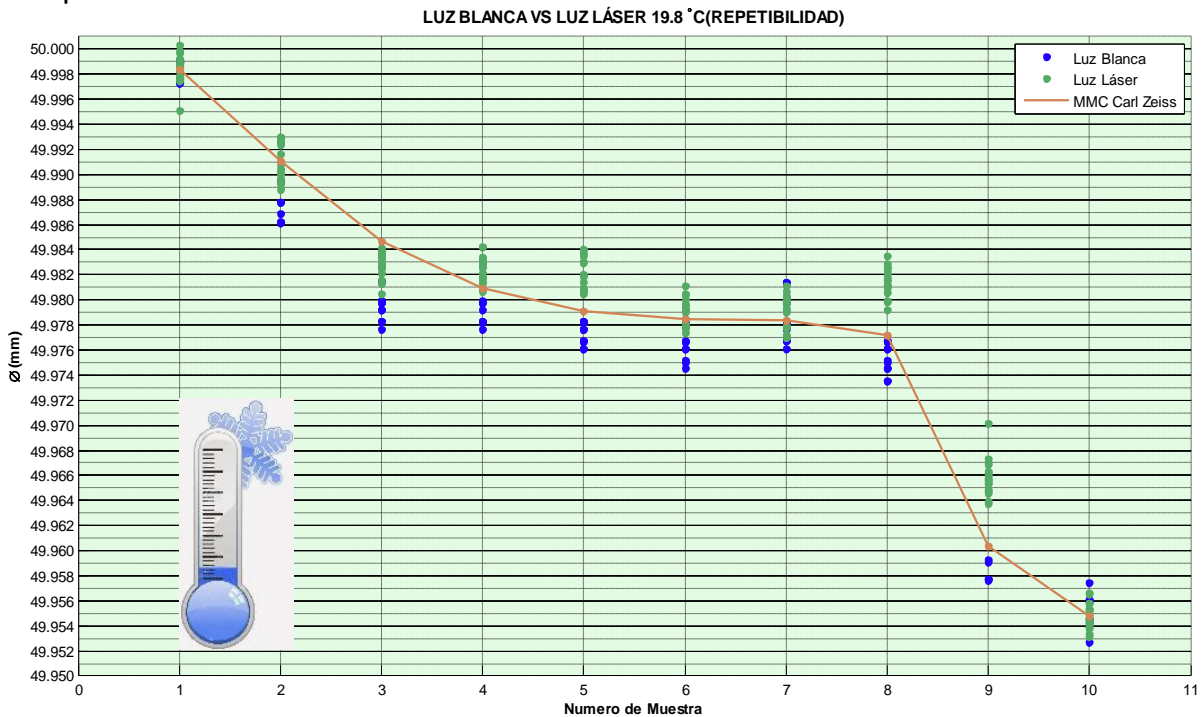


Figura B. 9 Gráfica comparativa de los métodos ópticos remotos de medición, empleando como punto comparativo la repetibilidad de la medición medio, a una temperatura promedio de 19.9 °C.

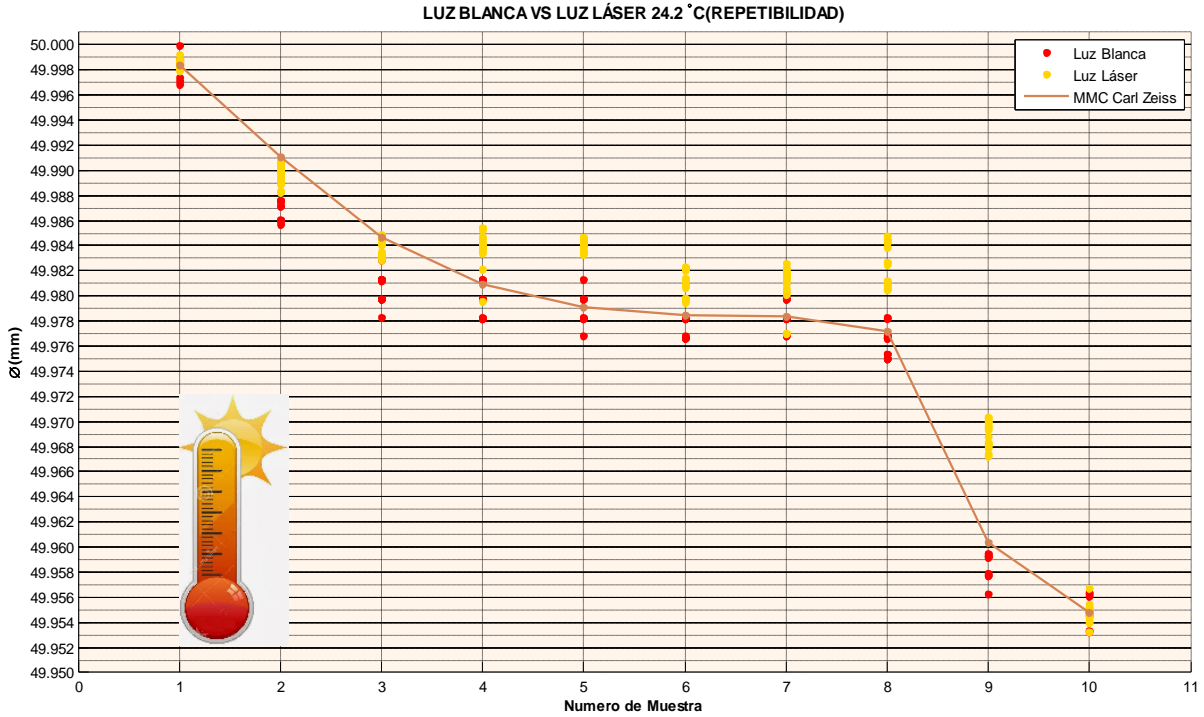


Figura B. 10 Gráfica comparativa de los métodos ópticos remotos de medición, empleando como punto comparativo la repetibilidad de la medición medio, a una temperatura promedio de 24.2 °C.

Con el propósito de visualizar parámetros estadísticos tales como: la dispersión, mediana y cuarta dispersión, en la *Figura B. 11* a *Figura B. 18* se muestran los diagramas de caja para cada método de medición.

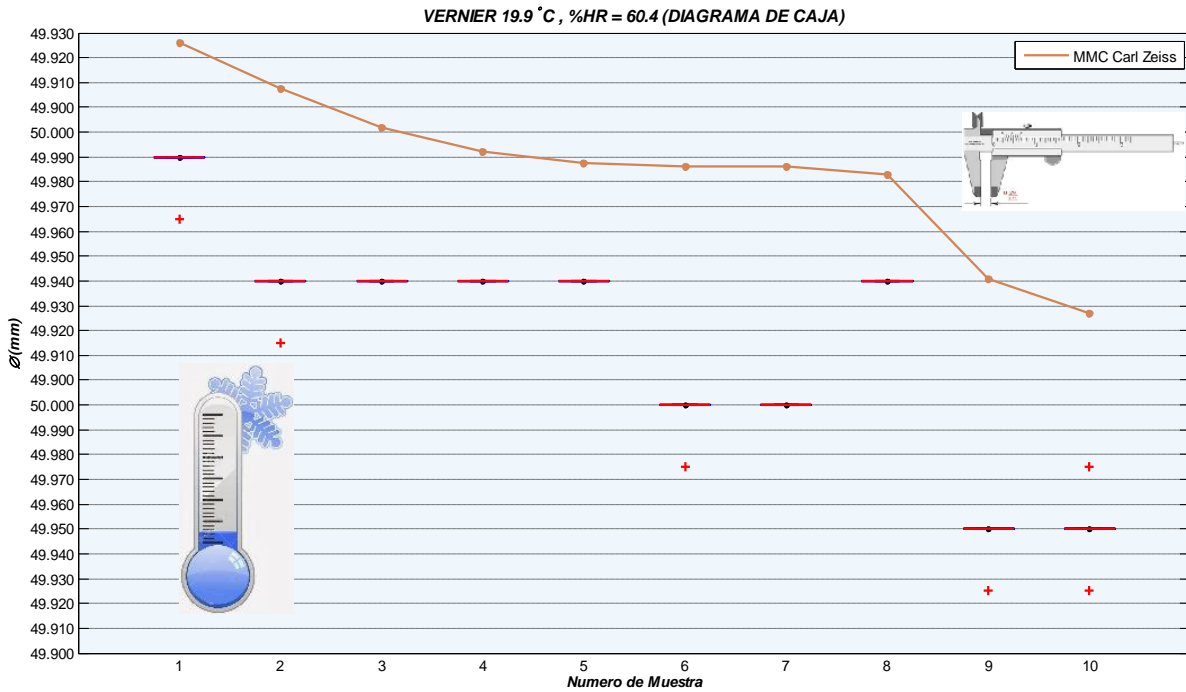


Figura B. 11 Diagrama de caja obtenido en la medición del diámetro para cada pieza de control, en tres pruebas diferentes, a temperatura 19.9 °C y %HR =60.4 (Humedad relativa) empleando el Vernier como instrumento de medición.

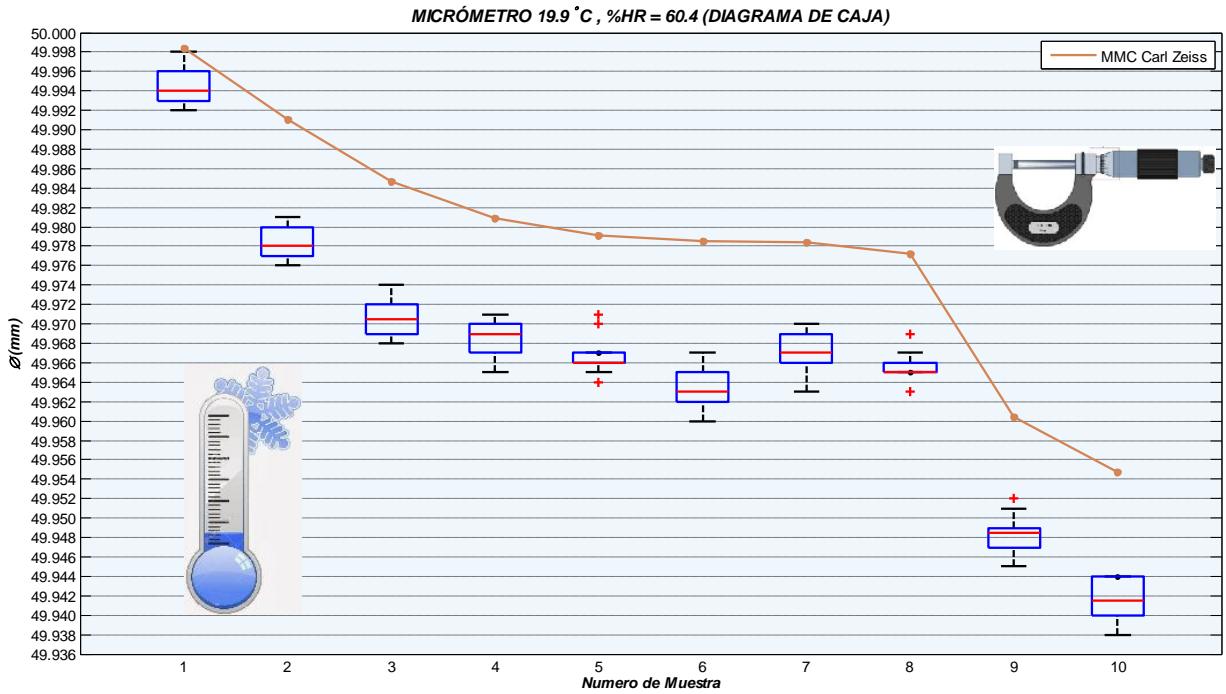


Figura B. 12 Diagrama de caja obtenido en la medición del diámetro para cada pieza de control, en tres pruebas diferentes, a temperatura 19.9 °C y %HR =60.4 (Humedad relativa) empleando el Micrómetro como instrumento de medición.

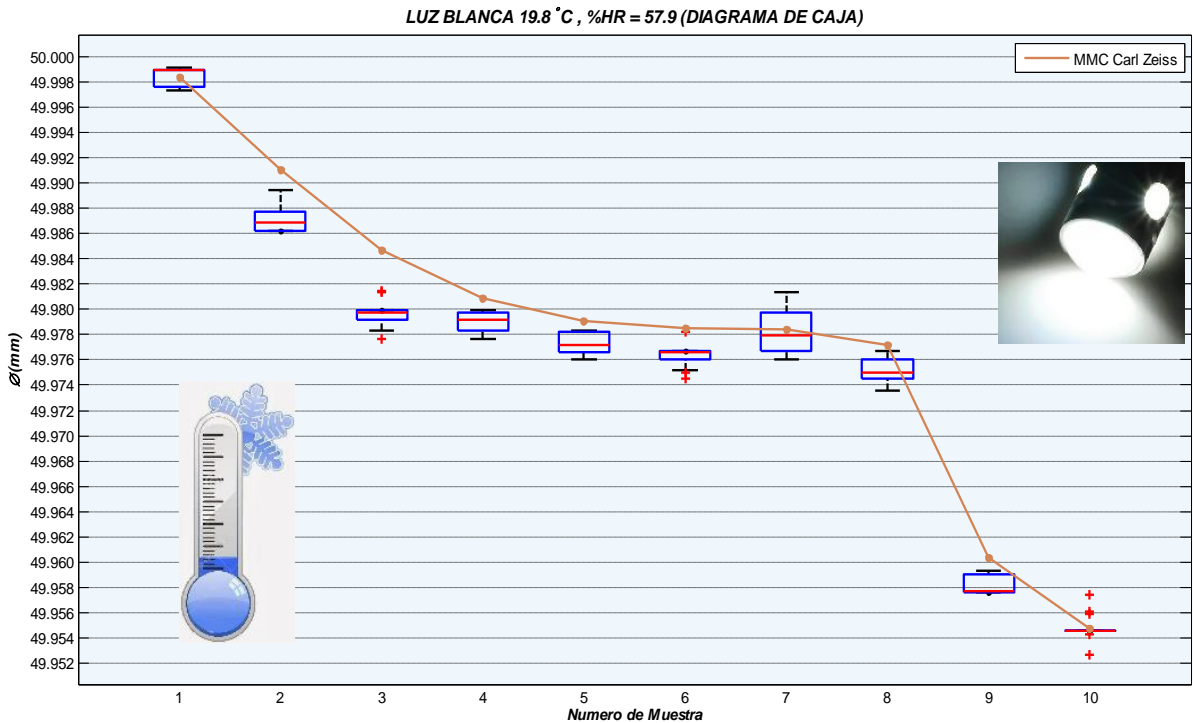


Figura B. 13 Diagrama de caja obtenido en la medición del diámetro para cada pieza de control, en tres pruebas diferentes, a temperatura 19.9 °C y %HR =57.9 (Humedad relativa) empleando la Proyección de luz blanca como método remoto de medición.

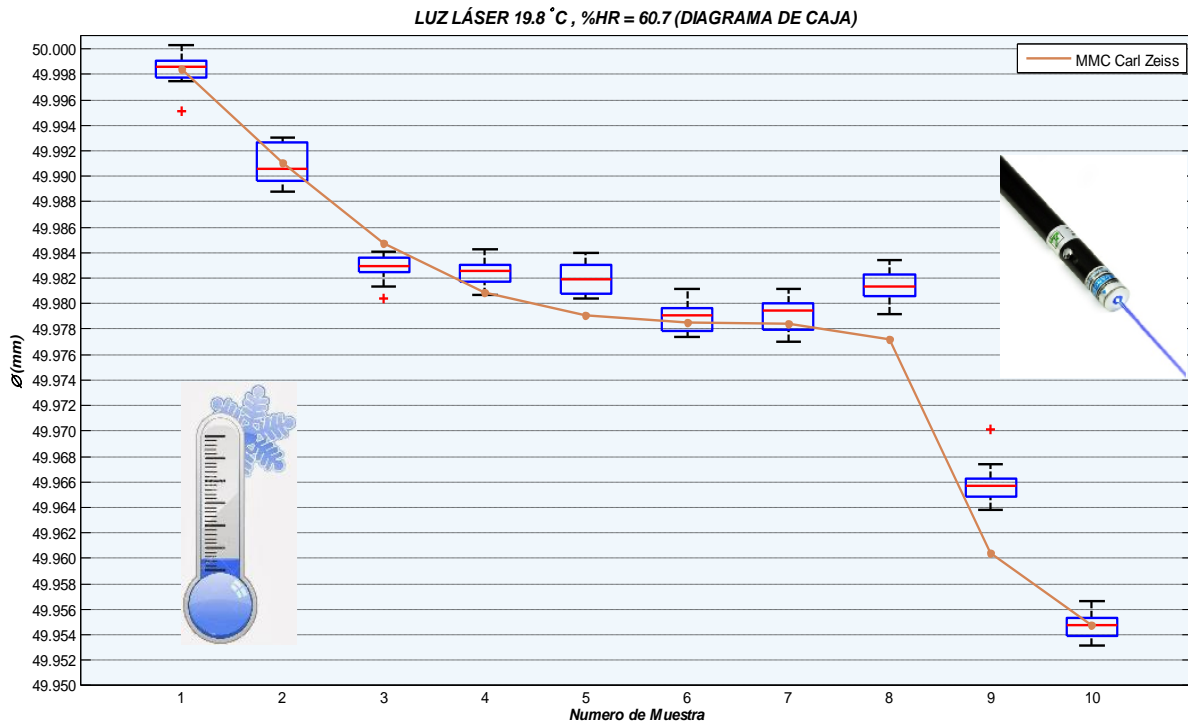


Figura B. 14 Diagrama de caja obtenido en la medición del diámetro para cada pieza de control, en tres pruebas diferentes, a temperatura 19.9 °C y %HR =60.7 (Humedad relativa) empleando la Detección de difracción (luz láser) como método remoto de medición.

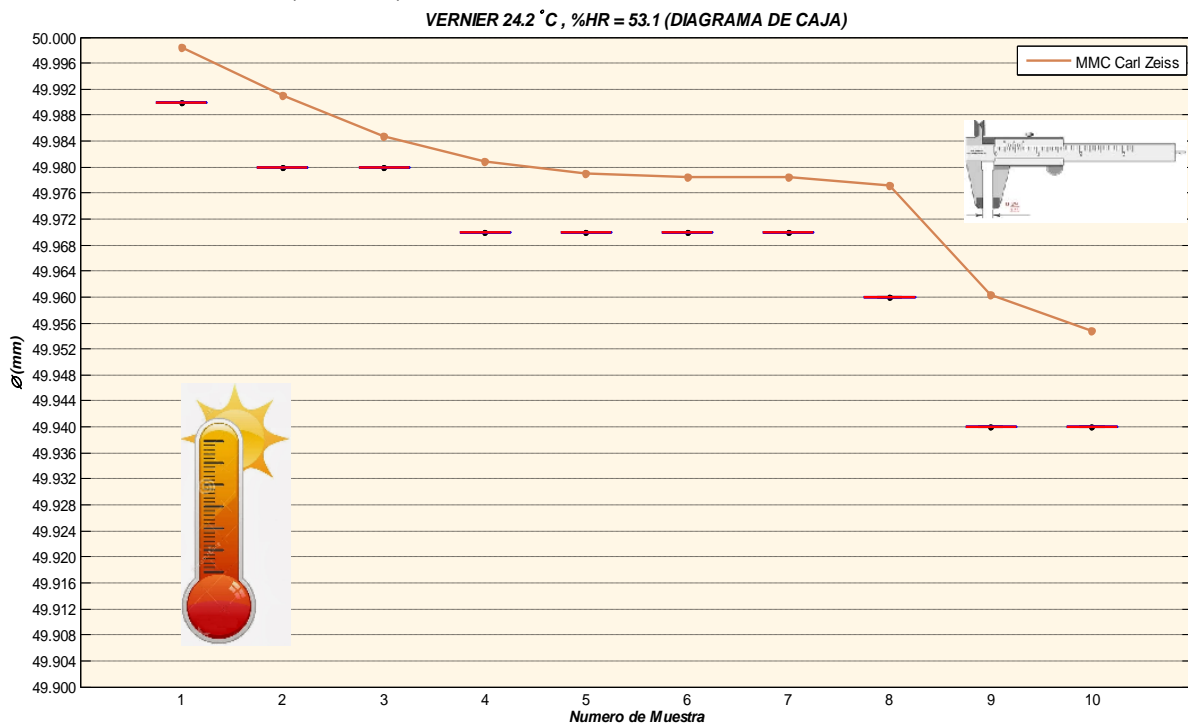


Figura B. 15 Diagrama de caja obtenido en la medición del diámetro para cada pieza de control, en tres pruebas diferentes, a temperatura 24.2 °C y %HR =53.1 (Humedad relativa) empleando el Vernier como instrumento de medición.

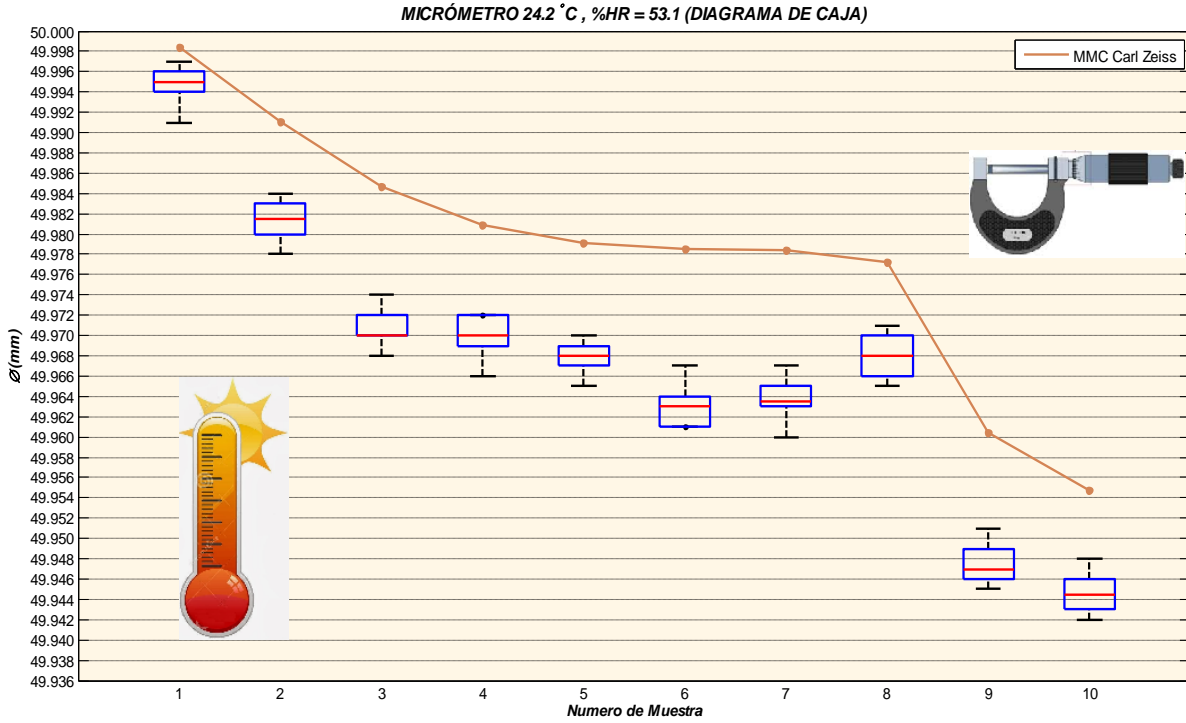


Figura B. 16 Diagrama de caja obtenido en la medición del diámetro para cada pieza de control, en tres pruebas diferentes, a temperatura 24.2 °C y %HR = 53.1 (Humedad relativa) empleando el Micrómetro como instrumento de medición.

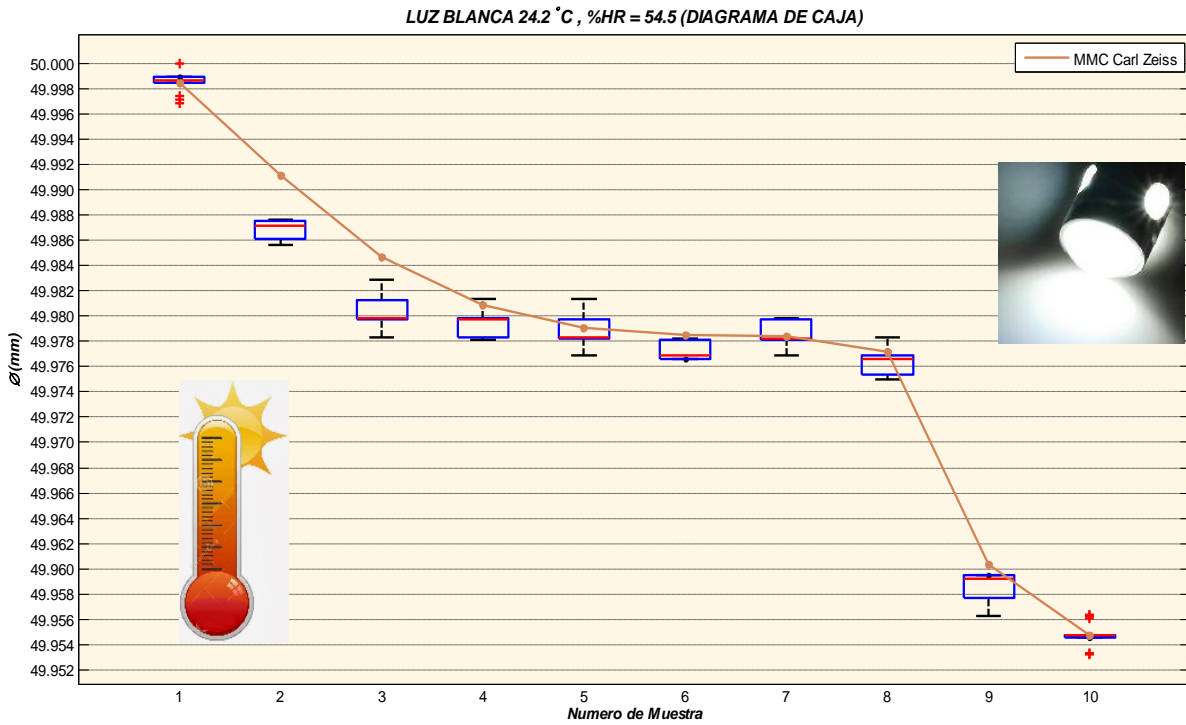


Figura B. 17 Diagrama de caja obtenido en la medición del diámetro para cada pieza de control, en tres pruebas diferentes, a temperatura 24.2 °C y %HR = 54.5 (Humedad relativa) empleando la Proyección de luz blanca como método remoto de medición.

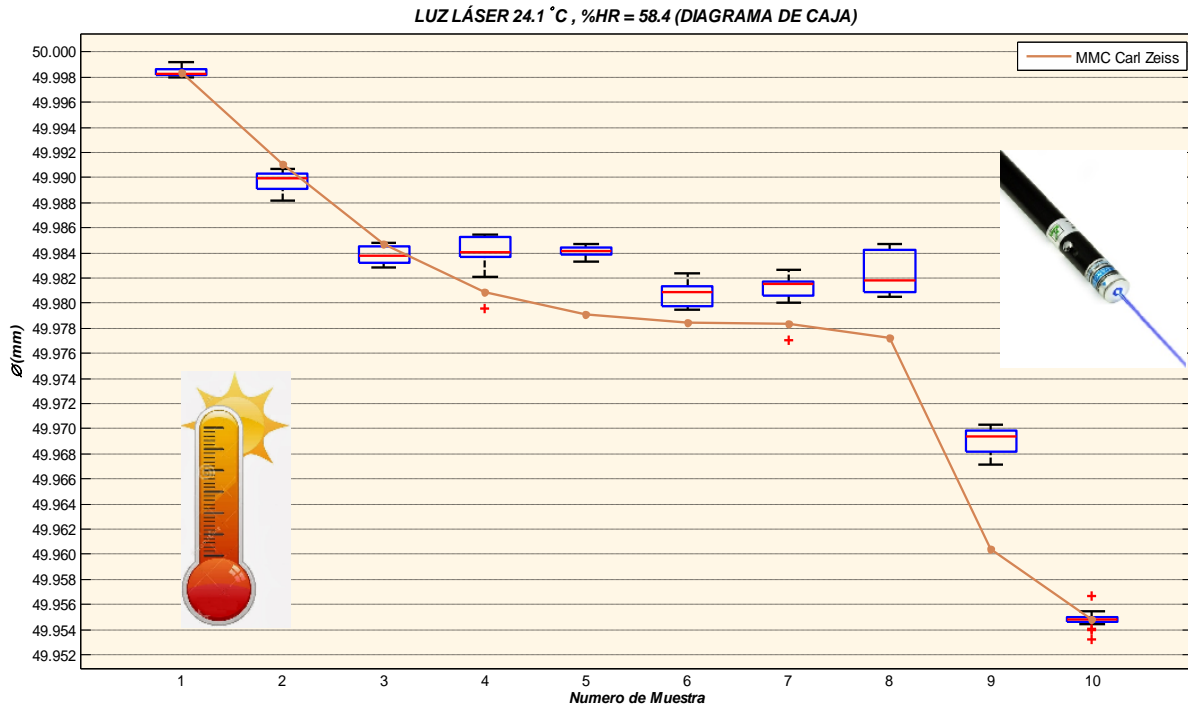


Figura B. 18 Diagrama de caja obtenido en la medición del diámetro para cada pieza de control, en tres pruebas diferentes, a temperatura 24.2 °C y %HR =58.4 (Humedad relativa) empleando la Detección de difracción (luz láser) como método remoto de medición.

APENDICE C. CARTA DE ENLACE CON LA INDUSTRIA

MOSED

**MORELOS # 105 NTE. COL. CENTRO CP. 36300
SAN FRANCISCO DEL RINCÓN, GUANAJUATO.
RFC.: SEVE 700316 M40
Email: moldesmosed@yahoo.com.mx**

**PLACAS Y MOLDES PARA ALTA-
FRECUENCIA Y PLASTISOL**

ácido, pantógrafo y electroerosión.

Tel. Y fax: 476 74 4 32 53 ID: 92*896463*1

San Francisco del Rincón, Gto. 2 de Agosto del 2014

**Dr. Luis Armando Díaz Torres
Director de Formación Académica
Centro de Investigaciones en Óptica, A.C.**

Presente.

Sirva la presente para hacer constar que el Ing. Julio Cesar Pachuca Saucedo, estudiante de la Maestría en Optomecatrónica del Centro de Investigaciones en Óptica, A.C., se encontró realizando en nuestra empresa, en el periodo del 18 de Julio de 2014 al 2 de Agosto del 2014 el proyecto denominado:

**MEDICIÓN REMOTA Y EN TIEMPO REAL DE DIÁMETROS EXTERNOS EN FLECHAS
MANUFACTURADAS POR MEDIO DE DIFRACCIÓN Y PROYECCIÓN DE SOMBRA.**

Cabe mencionar que se encontró desarrollando las siguientes actividades:

1. Análisis del proceso productivo y la metodología de inspección dimensional de las piezas manufacturadas.
2. Análisis de las posibles condiciones físicas para el desarrollo del proyecto.
3. Análisis para la mejora en el proceso de inspección dimensional de cilindros metálicas.

A petición del interesado, se expide la presente para los fines que haya lugar.

Atentamente.

Jesus Antonio Serrano Vázquez
Gerente General
MOLDES MOSED