



POSGRADO INTERINSTITUCIONAL EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA

---

---

---

CENTRO DE INGENIERIA Y DESARROLLO INDUSTRIAL

ACTUALIZACIÓN Y AUTOMATIZACIÓN DE SISTEMA ÓPTICO ZEISS  
PARA CALIBRACIÓN DE REGLAS DE ALTA EXACTITUD

## **TESIS**

QUE PARA OBTENER EL GRADO ACADEMICO DE:

**MAESTRO EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA EN LA ESPECIALIDAD DE  
MECATRÓNICA**

PRESENTA:

**ING. EDUARDO FRANCISCO HERRERA MARTÍNEZ**

DIRECTOR DE TESIS:

**DR. MIGUEL VILESID ALONSO**

**DR. HUGO JIMENEZ HERNÁNDEZ**

SANTIAGO DE QUERÉTARO, NOVIEMBRE 2017.



CIENCIA Y TECNOLOGIA

# Dedicatoria

*Este trabajo se lo dedico a Dios como parte de mi esfuerzo y gratitud.*

# Agradecimientos

Agradezco a Dios por la oportunidad de verme concluir mis estudios y complementar parte de mi vida profesional con un momento de gran felicidad.

Agradezco a mis padres por su ejemplo en el trabajo, dedicación, cariño y amor que han puesto a cada instante de sus vidas lo cual trato de reflejar al concluir este trabajo de investigación.

Agradezco a mi novia Karla Hernández por su motivación, cariño incondicional y espíritu de lucha que me impulsan a esforzarme y dar lo mejor de mí; siempre alentándome y dándome confianza para desafiar los nuevos retos personales que se presentan a diario en mi vida personal y profesional.

Doy gracias a mis compañeros de la Dirección de Metrología Dimensional del CENAM, por sus comentarios e interés en este trabajo de investigación. En especial a Carlos Colín Castellanos por su apoyo y experiencia en la especialidad los cuales me ayudaron a concluir este trabajo. Al Dr. Miguel Viliesid por la dirección del proyecto y al Dr. Ignacio Hernández por su interés, apoyo y seguimiento a lo largo de mi estancia en la maestría.

A mis profesores de CIDESI. Dr. Hugo Jiménez, Dr. Govinda Garcia, Dr. Tomas Salgado, Dr. Leonardo Baldenegro, M. Enrique Crespo, Dr. Alberto Soto, por compartir su experiencia y pasión en lo que hacen a través de sus clases, a ustedes les doy las gracias.

Agradezco a mi coordinadora de posgrado Bertha Velasco, la cual, con su gentileza me brindó el apoyo necesario para que mi estancia en PICYT fuera placentera y ahora pueda concluirla.

Agradezco mucho a CENAM por el interés y apoyo para poder realizar mis estudios de posgrado.

---

# Índice general

---

## Contenido

Resumen.....	1
Abstract .....	2
Introducción .....	3
Planteamiento del problema .....	4
Justificación.....	5
Objetivos .....	5
Objetivo Específicos.....	5
Hipótesis.....	6
Limitaciones .....	6
CAPÍTULO I.....	7
Antecedentes .....	7
1.1 Reglas de vidrio “line scales” .....	8
1.2 Sistemas de medición de reglas de los NMI.....	9
1.3 Medición de desplazamiento de platina .....	10
1.4 Sensor detector de trazos de línea .....	11
1.5 Sistemas metrológicos para de medición de reglas de algunos NMI .....	12
CAPÍTULO II.....	14
Sistema de Medición de Line Scales.....	14
2.1 Definición del problema.....	14
2.2 Metodología.....	15
2.3 Modelo matemático de medición .....	16
2.4 Parámetros de influencia de sistema de medición .....	17
2.4.1 Variables de influencia con IMD. ....	17
2.4.2 Condiciones de temperatura en la medición.....	17
2.4.3 Error de coseno de alineación del mensurando $\delta e_{\gamma}(x)$ .....	18
2.4.4 Error de Abbe $\delta e_{Abbe}(x)$ . ....	18

2.4.5	Error de alineación del mensurando $\delta ez(x)$ .....	20
2.4.6	Error de deformación del mensurando por apoyos.....	20
CAPÍTULO III .....		22
Detección de línea por procesamiento de imágenes.....		22
3.1	Detección de la posición del trazo de la línea .....	22
3.2	Imagen digital.....	22
3.3	Bordes en una imagen .....	23
3.4	Ruido en una imagen.....	23
3.5	Filtros en una imagen .....	24
3.5.1	Binarización.....	25
3.5.2	Filtro de Gauss.....	25
3.6	Gradiente .....	26
3.6.1	Detector de trazo de línea por Gradiente.....	26
3.7	Laplaciano “cruce por cero” .....	28
3.7.1	Detector de Gabor con Laplaciano cruce por cero.....	29
3.8	Técnicas de procesamiento de imágenes para la detección de posición del trazo de línea en la imagen .....	30
3.8.1	Algoritmo 1 Detector de trazo de línea por filtro Gaussiano y Gradiente.....	31
3.8.2	Algoritmo 2 Detector de trazo de línea por filtro Gaussiano y Laplaciano.....	32
3.9	Validación de técnica de detección de trazo de línea .....	32
3.9.1	Determinación de bordes con imagen sintética.....	33
3.9.2	Detección de bordes con máscaras en 1D y 2D Gauss y Gradiente .....	34
3.9.3	Detección de bordes con máscaras en 1D y 2D Gauss y Laplaciano .....	36
3.9.4	Detección de simetría de trazo de línea grabada en acero.....	38
3.9.5	Tamaño de pixel .....	40
3.9.6	Error de alineación, error de rectitud y error de enfoque .....	41
CAPÍTULO IV .....		43
Incertidumbre de medición.....		43
4.1	Método GUM .....	43
4.2	Coeficientes de sensibilidad .....	44
4.3	Estimación de incertidumbre del IMLS .....	47
CAPÍTULO V .....		51

Condiciones experimentales.....	51
5.1    Mensurando.....	51
5.2    Parámetros de calibración .....	53
CAPÍTULO VI.....	55
Análisis de resultados.....	55
Conclusiones .....	60
Recomendaciones para trabajos futuros .....	61
Referencias.....	62

---

# Índice de figuras

---

Figura 1. Medición de distancia entre simetría entre bordes de la línea. ....	9
Figura 2. Sistema de medición de VIM de Holanda. ....	10
Figura 3. Interferómetro para medición de desplazamiento IMD .....	10
Figura 4 (a) Sistema de detección de trazo de línea por fotodiodo, (b) Intensidad en el espectro del trazo de la línea medido por fotodiodo NIST.....	11
Figura 6. Metodología de medición. ....	15
Figura 7. Expansión térmica del material.....	17
Figura 8. Error de alineación del mesurando respecto a la cámara e IMD.....	18
Figura 9 Error de Abbe en la medición con el IMLS. ....	19
Figura 10 Perfil de rectitud de la guía del eje de medición. ....	19
Figura 11. Error de alineación del mesurando respecto a Z. ....	20
Figura 12. Error de deformación de las regla por apoyos. ....	21
Figura 13. Función bidimensional de línea, (a) imagen de la línea, (b) función escalón de la línea.....	22
Figura 14. Renglón de imagen de trazo de línea .....	23
Figura 15. Perdida de información por umbral de binarización.....	25
Figura 16. Función bidimensional de Gauss .....	26
Figura 18. Máximos y mínimos de la función gradiente.....	28
Figura 19. Simetría entre bordes de una línea referidos a un punto $P$ y una pëndiente $m$ . ....	28
Figura 20. Laplaciano de una función escalón en un renglón de la imagen.....	29
Figura 21. Imagen sintética de función escalón en un renglón, detección de bordes.....	33
Figura 22. Imagen sintética de función escalón del renglón $i$ .....	34
Figura 23. Función escalón convolución con Gaussiana y ruido Gaussiano.....	34
Figura 24. Función escalón convolución con Gaussiana y ruido uniforme.....	34
Figura 25. (a) Imagen “img0000” de trazo de línea grabado en metal, (b) Renglón de análisis de imagen, (c) Filtrado de renglón por Gauss con sigma igual a 7, (d) Función Gradiente de renglón.....	39
Figura 26. (a) Imagen “img00001” de trazo de línea grabado en metal, (b) Renglón de análisis de imagen, (c) Filtrado de renglón por Gauss con sigma igual a 7, (d) Función Gradiente de renglón.....	39
Figura 27. Características de la regla Mitutoyo HL250 .....	51

Figura 28. Interferómetro de medición de “line scale” IMLS actualizado..... 59

---

# Índice de tablas

---

Tabla I Características de sistemas de medición de reglas de NMI .....	12
Tabla II. Incertidumbre de medición reportada en CMC de longitud. ....	13
Tabla III. Comparación de técnicas de detección con grabado de marca en metal. ....	40
Tabla IV. Determinación del factor de tamaño de pixel .....	41
Tabla V. Parámetros de influencia y fuentes de incertidumbre en la calibración de reglas de alta exactitud con IMLS. ....	46
Tabla VI. Valores de parámetros de fuentes de incertidumbre en la calibración de reglas de alta exactitud con IMLS. ....	47
Tabla VII. CMC de longitud de NMI en la calibración de reglas de alta exactitud. ....	49
Tabla VIII. Características de sistemas de referencia de certificados de calibración. ....	52
Tabla IX. Valores de calibración de la regla Mitutoyo en los años 2002, 2010 y 2016. ....	53
Tabla X. Condiciones ambientales durante la calibración de la regla Mitutoyo. ....	54
Tabla XI. Corrección de valores tomando como referencia “0” la posición de 10 mm de la regla Mitutoyo. ....	56
Tabla XII. Errores de calibración corregidos con factor lineal. ....	58

---

## Índice de gráficas

---

Gráfica 1. Detección de borde izquierdo en 340.5 p con kernel Gauss y Gradiente en 1D. ....	35
Gráfica 2. Detección de borde derecho en 340.5 p con kernel Gauss y Gradiente en 1D. ....	35
Gráfica 3. Detección de borde izquierdo en 300.5 p con kernel Gauss y Gradiente en 2D. ....	36
Gráfica 4. Detección de borde derecho en 340.5 p con kernel Gauss y Gradiente en 2D. ....	36
Gráfica 5. Detección de borde izquierdo en 300.5 p con kernel Gauss y Laplaciano en 1D. ....	37
Gráfica 6. Detección de borde derecho en 340.5 p con kernel Gauss y Laplaciano en 1D. ....	37
Gráfica 7. Detección de borde izquierdo en 300.5 p con kernel Gauss y Laplaciano en 2D. ....	37
Gráfica 8. Detección de borde derecho en 340.5 p con kernel Gauss y Laplaciano en 2D. ....	38
Gráfica 9. Error en el eje Z respecto al recorrido de la platina en X. ....	42
Gráfica 10. Error de enfoque en la detección de la simetría del trazo de línea ....	42
Gráfica 11. Incertidumbre de medición en el alcance del sistema IMS. ....	47
Gráfica 12. Variables de influencia en la medición en la posición cero en el sistema IMS. ....	48
Gráfica 13. Variables de influencia en la medición en la posición 120 mm en el sistema IMS. ....	49
Gráfica 14. Variables de influencia en la medición en la posición 240 mm en el sistema IMS. ....	49
Gráfica 15. Error de medición de la regla Mitutoyo. ....	53
Gráfica 16. Gradiente de temperatura de laboratorio. ....	54
Gráfica 17. Resultados de medición con IMLS respecto a resultados de medición del PTB. ....	55
Gráfica 18. Resultados de medición cambiando la línea de referencia “0”. ....	56
Gráfica 19. Factor lineal de corrección. ....	57
Gráfica 20. Corrección de la curva de calibración mediante factor lineal. ....	58

---

## Abreviaturas

---

<b>BIPM</b>	Buro Internacional de Pesas y Medidas
<b>CCD</b>	Charge – Coupled – Device
<b>CENAM</b>	Centro Nacional de Metrología
<b>CIMAT</b>	Centro de Investigación en Matemáticas
<b>CMC</b>	Calibration and Measurement Capabilities
<b>CMOS</b>	Complementary metal-oxide-semiconductor
<b>DMD</b>	Dirección de Metrología Dimensional
<b>EI</b>	Escalas Interferométricas
<b>GUM</b>	Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement
<b>IDRA</b>	Índice de Refracción del Aire
<b>IMD</b>	Interferómetro para Medición de Desplazamiento
<b>IMLS</b>	Interferómetro para Medición de Líneas Escalas
<b>MEB</b>	Microscopio Electrónico de Barrido
<b>METAS</b>	Swiss Federal Institute for Metrology
<b>MIRS</b>	Metrology Institute of the Republic of Slovenia
<b>MMC</b>	Mínimos Cuadrados
<b>MMCO</b>	Máquina de Medición por Coordenadas por palpado Óptico
<b>MO</b>	Microscopio Óptico
<b>NIST</b>	National Institute of Standard and Technology
<b>NMI</b>	National Metrology Institute
<b>NMIJ</b>	National Metrology Institute of Japan
<b>NPL</b>	National Physical Laboratory
<b>NPLI</b>	National Physical Laboratory of India
<b>PTB</b>	Physikalisch Technische Bundesanstalt
<b>TF</b>	Transformada de Fourier
<b>VIM</b>	Vocabulario Internacional de Metrología

---

# Resumen

---

El presente trabajo muestra el desarrollo de un sistema para medición de reglas de vidrio de alta exactitud “*line scales*”, el cual se realiza al actualizar y automatizar una Máquina de Medición por Coordenadas por palpado Óptico MMCO. La actualización del sistema consiste en la ubicación del trazó de línea por medio de visión e interferometría laser para la medición del desplazamiento. Esto se realiza al incorporar óptica de amplificación, una cámara como sensor y hacer uso de técnicas de procesamiento de imágenes para determinar la posición de la línea con precisión subpixel y en conjunto con la medición de desplazamiento de la platina de medición, obtener la posición del trazó de la línea con una mejor precisión en el mundo real. Por otra parte se presenta un modelo de incertidumbre con el objeto de identificar las variables de mayor influencia en la medición para de esta manera tener un control y monitoreo adecuado en la calibración de la regla. Por último se valida el sistema mediante la calibración del mismo al utilizar una regla patrón cuyos valores de referencia son reportados por institutos nacionales de metrología Physikalisch Technische Bundesanstalt PTB de Alemania y National Institute of Standard and Technology NIST de Estados Unidos.

---

## Abstract

---

The present work shows the development of a system for measuring high accuracy glass rules "line scales", which is performed by updating and automating an MMCO Optical Sensing Coordinate Measuring Machine. The updating of the system consists in the measurement by means of vision and laser interferometry for the measurement of the displacement. This is done by incorporating optical amplification, a camera as a sensor and make use of image processing techniques to determine the position of the line with subpixel precision and in conjunction with the measurement of displacement of the measuring plate, obtain the position of the line with great accuracy in the real world. An uncertainty model is implemented in order to identify the variables of greatest influence in the measurement to have adequate control and monitoring in the calibration of the rule. Finally, the system is validated by calibrating it by using a standard rule whose reference values are reported by the primary laboratories of measurement Physikalisch Technische Bundesanstalt PTB of Germany and National Institute of Standard and Technology NIST of the United States, in this way Determine the measurement accuracy and uncertainty estimation of the proposed system.

---

# Introducción

---

El proyecto de investigación propone la actualización y automatización de un sistema óptico comercial para calibrar reglas de vidrio. Para el desarrollo del proyecto se realizó un estudio del estado del arte de sistemas similares de calibración de “*line scales*” de Institutos Nacionales de Metrología NMI, [1] y [2]. Por lo general estos instrumentos parten como base de sistemas comerciales como maquinas unidimensionales y sistemas de visión por coordenadas en dos y tres dimensiones. La actualización y automatización de estos sistemas se refieren a la implementación de arreglos ópticos y técnicas de visión para sensar el trazo de línea de la regla a nivel nano y el uso de Escalas de Interferométricas EI para la medición a nivel macro. Un punto importante en la infraestructura son las condiciones ambientales del laboratorio, tales como, temperatura, presión y humedad las cuales son fuentes importantes de incertidumbre en la medición.

El desarrollo de este proyecto consiste en actualizar un microscopio de medición marca CARL ZEISS Jena, propiedad de la Dirección de Metrología Dimensional DMD del Centro Nacional de Metrología CENAM. Se incorpora un sistema interferométrico y óptica lineal marca HP para la medición del desplazamiento del eje  $X$  de la platina de medición. El sistema de visión incorpora una cámara CMOS, óptica de amplificación, iluminación y se desarrolla un algoritmo por procesamiento de imágenes para la detección del trazo de la línea de la regla en la captura de la imagen. La medición se realiza de forma *out line*, a través de la medición de la posición del trazo de la línea en la platina de medición, más la posición del trazo de línea en la imagen y se relaciona mediante un factor de tamaño de pixel.

Para determinar la exactitud del sistema en la calibración de reglas de alta exactitud se desarrolló un modelo de incertidumbre basado en la *Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement* GUM [5] (equivalente a la norma NMX-CH-140-IMNC 2002 Guía para la Expresión de la incertidumbre en las Mediciones), que involucra las variables de influencia debidas a las condiciones ambientales a saber; temperatura, presión y humedad, además de la resolución, repetibilidad, errores de alineación y errores mecánicos. La validación del sistema se realiza a través de la calibración de una regla patrón con valores de referencia obtenidos por una técnica superior en los institutos nacionales de metrología INM de Alemania PTB y Estados Unidos NIST.

# Planteamiento del problema

El presente proyecto muestra la actualización de un sistema óptico para la calibración de reglas de alta exactitud “*line scales*”, dichas reglas son un subgrupo de las llamadas “*Line standard*” tal como se menciona el apéndice C de las CMC de longitud (Calibration and Measurement Capabilities) por el BIPM (International Bureau of Weights and Measures) y cuyas características según la norma japonesa JISB7541 [6] se pueden resumir en el grado de exactitud 01 y 0, material de fabricación vidrio y propiedades mecánicas de estabilidad en el tiempo, resistencia a la corrosión y perfil rectangular.

La actualización del sistema de calibración de reglas consta de tres partes principales. La primera se refiere a la instrumentación, la cual consiste en incorporar EI a través de un arreglo interferométrico tipo Michelson para la medición de desplazamiento del eje  $X$  de la platina del microscopio, como en [7] y [8]. Se incorporan unidades de monitoreo de condiciones ambientales para temperatura, presión y humedad, con el objeto de corregir la medición por interferometría a través del Índice de Refracción del Aire IDRA [9]. Como parte del sistema de visión, se incorpora una cámara tipo CMOS, óptica de amplificación e iluminación por transmisión para obtener alta calidad de resolución en la imagen del trazo de la línea. Se habilita el movimiento automático del eje  $X$  de la platina de medición, al incorporar mecánica de transmisión y electrónica de control para de esta manera tener un instrumento autónomo.

La segunda parte propone una metodología de calibración de “*line scales*”, debido a que en la literatura metrológica no existe una norma como tal, se adopta el método propuesto por los INM [10] y [11]. El método consiste en ubicar el trazo de la línea a través de una geometría de simetría determinada por el borde derecho e izquierdo de la misma, la cual sirve como referencia de posición en la imagen y en el plano  $XY$  del sistema de medición. Por lo tanto uno de los objetivos específicos de este trabajo es definir las técnicas de procesamiento de imágenes que permiten localizar con gran precisión la ubicación del trazo de la línea en la imagen y extrapolarlo al mundo real.

El tercer punto es conocer mediante un presupuesto de incertidumbre las variables de influencia en la medición de reglas de vidrio de alta exactitud. El proceso es identificar que variables son despreciables y cuáles no, para de esta manera tener una mayor control, o en su defecto un monitoreo adecuado para realizar las compensaciones correspondientes en la medición

Las variables de influencia consideradas en este trabajo son:

- Las condiciones ambientales del laboratorio: temperatura, presión y humedad que relaciona el IDRA en la medición con EI y la influencia de la temperatura en el mensurando a través de coeficiente de expansión térmica del material.

- Los esfuerzos generados por la sujeción y soporte de la regla.
- Los errores de alineación Coseno y Abbe que relacionan la posición en alineación de los elementos cámara - mensurando - EI
- Errores de detección de trazo de línea que relaciona al sistema de visión, a través de las aberraciones de la óptica de amplificación, iluminación y algoritmo de detección.
- Y errores relacionados con perturbaciones mecánicas (vibraciones) que afectan al sistema de medición; que aunque no se pueden corregir, se debe considerar su contribución en el modelo de estimación de incertidumbre

## Justificación

La calibración de “*line scales*” es uno de los servicios de mayor solicitud para el laboratorio de micrometrología de la DMD del CENAM. El laboratorio cuenta con tres sistemas de visión comerciales los cuales atienden la demanda de los servicios de calibración para centros de investigación, laboratorios secundarios e industria en el país. Actualmente la fabricación de “*line scales*” ha rebasado la exactitud de sistemas comerciales de visión por coordenadas, debido a la mejora en la fabricación de reglas, por ejemplo: el grado de exactitud, propiedades en los materiales, grabado de trazo de las marcas, etc. De tal manera que INM se han visto en la necesidad de diseñar y/o actualizar sus sistemas de medición con el propósito de obtener una mayor exactitud y menor incertidumbre en la calibración.

## Objetivos

### Objetivo General

Contar con un sistema de medición de reglas de vidrio “*line scales*” que cumpla con las necesidades metrológicas para reglas de alta exactitud grado 01 y 0 según la norma japonesa JISB7541 y de esta manera ofrecer servicios de calibración de menor incertidumbre.

### Objetivo Específicos

- Identificar las características base para la medición de “*line scales*” a través de sistemas de medición propuestos en la literatura metrológica.
- Proponer una metodología de calibración para “*line scales*”.
- Analizar técnicas de procesamiento de imágenes para la relación en posición en la ubicación de los trazos de las líneas de la regla.
- Incorporar el modelo de EI para la medición de uno de los ejes de la platina de medición e identificar sus errores de medición

- Identificar las variables de influencia en la medición a través del análisis en la estimación de incertidumbre según la GUM.
- Implementar la mecánica de transmisión y electrónica de control adecuado para obtener un sistema autónomo.

## Hipótesis

Es posible medir reglas de vidrio “*line scales*” con incertidumbres de medición menores a 0.7  $\mu\text{m}$  en un alcance de medición de 0 hasta 240 mm con técnicas de procesamiento de imágenes y medición de desplazamiento por interferometría laser.

## Limitaciones

El trabajo de investigación muestra limitaciones en cuanto a infraestructura. El principal punto corresponde a la resolución del sistema de visión, el cual se limita a una óptica de amplificación de hasta 10x y resolución del sensor CMOS de la cámara de 2592x1944 pixeles que en combinación determinan el tamaño de pixel.

El segundo punto se refiere a la medición del desplazamiento de la platina de medición sobre el eje  $X$ , medido por una EI o Interferómetro de Medición de Desplazamiento IMD con óptica lineal de un eje, que, aunque es factible utilizarlo como primera aproximación para medir longitud, la configuración no compensa errores de rectitud de la platina sobre el recorrido de la guía, lo que puede repercutir en errores de longitud en la medición

El tercer punto relaciona la entrada manual de datos para compensación de las variables del IDRA en el software de medición del IMD, debido a que existen errores en la toma de lectura al no ser en tiempo real.

### Antecedentes

---

La calibración de reglas de alta exactitud es uno de los servicios con mayor demanda en el laboratorio de micrometrología de la DMD del CENAM. La calibración de “*line scales*” tiene como objetivo dar trazabilidad a la unidad de longitud a sistemas de visión y microscopia, por ejemplo, Microscopios Ópticos MO, Microscopios Electrónicos de Barrido MEB y MMCO en una y dos dimensiones, con el objeto de conocer el error de medida e incertidumbre de medición del sistema y a su vez diseminar la unidad de longitud en el sector industrial y de investigación en el país.

Como parte de la acreditación del servicio de calibración de “*line scales*” en los CMC, la DMD participó en la EUROMET Key Comparison, EUROMET.L-K7 [12] *Calibration of line scales*, el laboratorio piloto de la comparación fue Metrology Institute of the Republic of Slovenia MIRS, en conjunto con METAS de Suiza y NPL de Reino Unido. Dicha comparación tiene como objetivo demostrar la equivalencia metrológica en la calibración de “*line scales*”, servicio ofrecido por los NMI para los clientes, enlistados en el apéndice C del acuerdo de mutuo reconocimiento [BIPM, 1999]. La comparación tuvo 31 participantes los cuales acordaron utilizar sistemas y métodos de calibración como habitualmente se ofrece a sus clientes. El artefacto expuesto a medición fue una regla de vidrio (cuarzo) con amplitud de medición de 100 mm y división mínima de 0.1 mm, la regla fue fabricada por el NPL. El CENAM participó en la comparación con una MMCO marca Leitz, modelo Libra 200, sistema de referencia actual para la medición de reglas en la DMD. Las conclusiones con base en los resultados de la comparación se enumeran a continuación:

1. La incertidumbre de medición del servicio de calibración de “*line scales*” que ofrece CENAM es mayor en comparación con la incertidumbre que ofrecen otros NMI.
2. La característica de simetría que define la posición de la línea en la regla es susceptible a error debido a la poca cantidad de puntos que definen el borde izquierdo y derecho del trazo de línea y es fuente importante de incertidumbre.
3. El alcance de medición del sistema actual está limitado de 0 hasta 150 mm en el eje  $X$  y en caso de una regla de mayor alcance es necesario hacer traslape.
4. La óptica de amplificación de hasta 200x del sistema de medición está por debajo de las amplificaciones usadas de por lo menos 1200x en la mayoría de los NMI
5. El método de medición del sistema actual contra la escala de microscopio limita la exactitud de medición, debido a que están inmersos diferentes errores como: resolución, errores de factor de escala y posicionamiento, por lo que la estimación de incertidumbre es superior respecto al reportado en otros NMI.

Las limitantes de medición del uso de MMCO se refieren principalmente a las escalas de medición cuyas características se pueden resumir en las siguientes:

- La resolución de un sistema de medición óptico con escalas de  $0.2 \mu\text{m}$  e interpolado hasta  $0.1 \mu\text{m}$
- El grado de exactitud de las escalas que se relaciona con la resolución y repetibilidad del sistema de medición, la cual puede oscilar entre  $0.1$  y  $1$  micrómetros.
- La corrección por factor de escala de los ejes de medición, que aunque es medida y corregida a través de un factor lineal o un mapa de compensación, el procedimiento no permite llegar a una corrección “cero” en su totalidad y se considera fuente importante de error en la medición.
- La temperatura y el coeficiente de expansión térmica del material de las escalas y el mensurando, debido a que no siempre la relación es la misma y las escalas pueden crecer y decrecer de forma diferente durante la calibración. Por lo tanto es necesario medir puntualmente la temperatura de las escalas, lo cual no es una tarea fácil, ya que en la mayoría de los casos hay dificultad de acceso de las sondas para tocar la escala, además que el contacto se hace en un área muy pequeña. Otra forma de aplicar esta corrección es medir temperatura de forma indirecta a través de bloques igualadores, con la condición de que el material de los bloques sea similar al de las escalas, lo que representa una limitante de corrección y es fuente de incertidumbre importante en el modelo de medición.

## 1.1 Reglas de vidrio “line scales”

Las reglas de vidrio son patrones físicos que relacionan posición a través del grabado de sus marcas. Dependiendo de su aplicación el alcance de medición se encuentra en el orden de fracciones de milímetro hasta decenas de metros y su exactitud de posición se puede determinar en el orden de los nanómetros hasta decenas de micrómetros. Su aplicación principal se relaciona con la medición y ajuste de sistemas de visión, de aquí la importancia de conocer con precisión el error de medición de este tipo de instrumentos, además, que existe la necesidad de NMI en diseñar sus propios sistemas de medición, debido a que los sistemas comerciales no cuentan con la exactitud e incertidumbre de medición requerida.

En la literatura como tal no existe una norma que especifique como realizar la calibración de reglas. Aunque existe normas como JIS B7516, JIS B7153, JIS B7541 que se refieren a la composición del sistema de medición, especificaciones de material, grado, tolerancias y dimensiones de la regla, no se especifica de una manera clara el cómo medirlas, por lo tanto se siguen recomendaciones hechas por los Institutos Nacionales de Metrología (NMI) para su calibración.

Para calibrar y determinar el error de medida de la regla, es necesario definir los trazos de línea mediante una característica geométrica que permita definir un criterio único de posición; la cual se obtiene al determinar los bordes derecho e izquierdo de cada línea y determinar su simetría, ver figura 1.

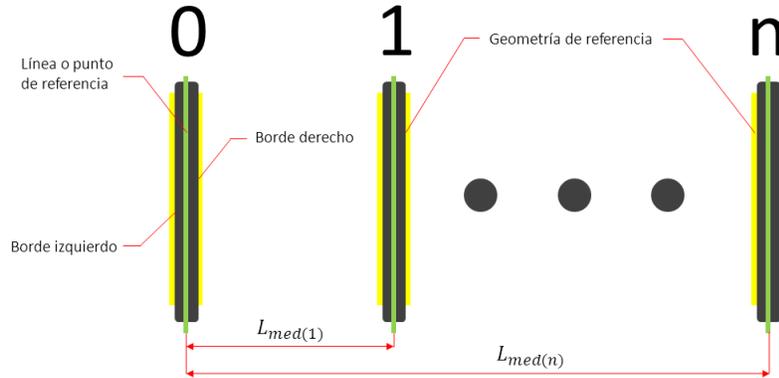


Figura 1. Medición de distancia entre simetría entre bordes de la línea.

De tal forma que la distancia entre líneas de la regla se calcula a partir de la distancia de las simetrías de cada trazo de línea respecto a una referencia, que por lo general es la línea cero y el error de medición  $E$  se determina a través de la longitud medida menos su longitud nominal tal como se describe la ecuación 1.

$$E_i = L_{med(i)} - L_{Nominal} \quad (1)$$

## 1.2 Sistemas de medición de reglas de los NMI

El método de medición de reglas ha evolucionado al paso de los años, por ejemplo, el laboratorio primario de Estados Unidos NIST reporta un sistema de medición de reglas graduadas desde 1965 [1], el cual fue desarrollado en respuesta de la redefinición del metro en 1960 y que a lo largo del tiempo ha evolucionado hasta tener hoy en día un sistema de referencia de alta calidad metrológica a nivel mundial. Actualmente diferentes NMI [2] [3] [4] se han visto en la necesidad de mejorar tanto sus sistemas de medición, como las instalaciones de laboratorios con el fin de garantizar alta exactitud en sus mediciones. En la mayoría de los casos el diseño del nuevo instrumento parte como base de sistemas comerciales con el objetivo de aprovechar el sistema de guiado de los ejes  $XYZ$ , tales como, máquinas unidimensionales, microscopios ópticos y sistemas de visión de dos y tres ejes.

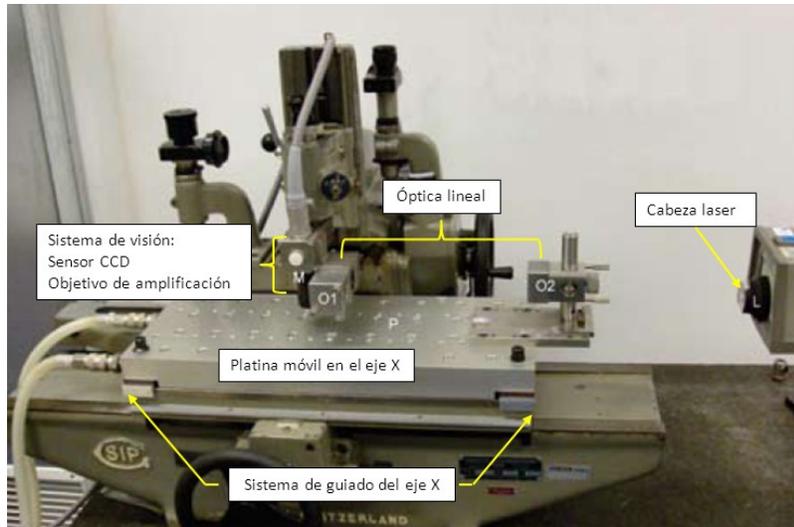


Figura 2. Sistema de medición de VIM de Holanda.

### 1.3 Medición de desplazamiento de platina

Una de las etapas en la actualización del sistema es medir el desplazamiento del eje donde es colocada y alineada la regla. Este desplazamiento está dado por el movimiento de la platina de medición sobre las guías del sistema mecánico. La medición se obtiene al incorporar IMD a través de un arreglo óptico tipo Michelson, en donde el interferómetro se fija a la parte estática de la estructura con el objetivo de ser referencia en la medición y el retro-reflector es sujeto a la parte móvil (platina o carro) tal como se muestra en la figura 3. Aunque esta opción es la más recurrente por los laboratorios en ocasiones queda limitada debido a que no se perciben errores de rectitud como cabeceo y alabeo y por lo tanto se recurre a arreglos ópticos más complejos con el fin de medir y corregir dichos errores en el desplazamiento tal como [2] y [7] por citar algunos.

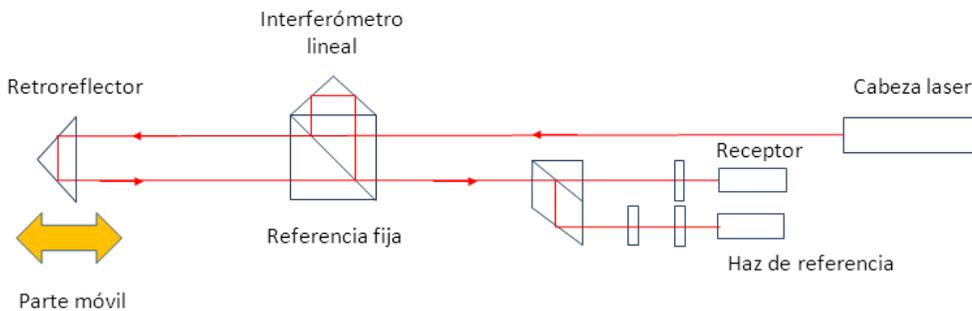


Figura 3. Interferómetro para medición de desplazamiento IMD

## 1.4 Sensor detector de trazos de línea

Para la ubicación de trazo de la línea se pueden utilizar sensores tipo foto detector, cámara CCD o CMOS, cuyo objetivo es obtener la posición del trazo de la línea en el plano a través de la simetría de sus bordes. En el caso de un fotodiodo permite encontrar el espectro del trazo de la línea al ser iluminado y los bordes derecho e izquierdo se identifican a través de la intensidad media del espectro de la curva obtenida, por lo tanto, la simetría será el punto medio entre ambos bordes, la cual relaciona la posición de la platina de medición medida por el IMD y define la posición del trazo de la línea el plano. Tal como se muestra en la figura 4

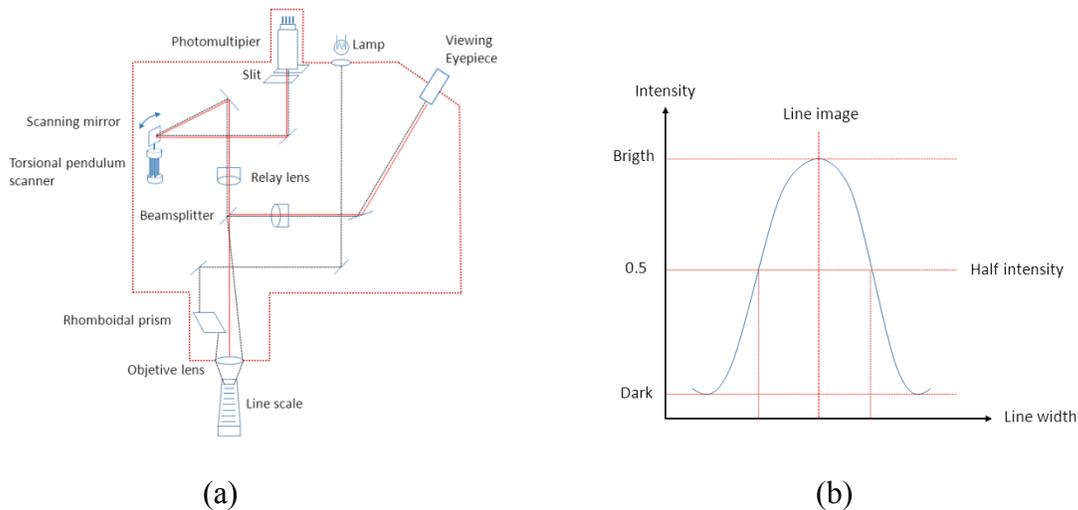


Figura 4 (a) Sistema de detección de trazo de línea por fotodiodo, (b) Intensidad en el espectro del trazo de la línea medido por fotodiodo NIST.

Para el caso de la medición con cámara, método “*out line*”, inicialmente se captura una imagen digital y mediante el procesamiento de la imagen se definen los bordes derecho e izquierdo del trazo de la línea. La simetría de la línea estará definida por el punto medio de los bordes, mismo que determina la posición del trazo de la línea en el plano de la imagen a nivel subpixel. La posición de la línea en el mundo real está dada por la ecuación 2, donde  $PL$  es igual a la posición de la línea en la imagen  $PLI$  por el tamaño de pixel  $\beta$  de la cámara, más la posición de la platina de medición  $PP$ .

$$PL = PLI * \beta + PP \quad (2)$$

El valor de  $\beta$  depende de la combinación de la óptica de amplificación y resolución de la cámara, cualquier mejora en resolución de alguno de estos dos elementos mejora la resolución del tamaño de pixel.

## 1.5 Sistemas metrológicos para de medición de reglas de algunos NMI

En la tabla 1 se muestra un resumen de las características de algunos sistemas de medición de reglas de alta exactitud. En esta se detalla el nombre de laboratorio NMI, tipo de estructura del sistema, si cuenta o no con aislamiento mecánico y ambiental, el número de arreglos de IMD, tipo de sensor para detección de trazo de línea y funcionamiento manual o automático. Una característica general en los sistemas de medición de reglas es el aislamiento a perturbaciones mecánicas, por lo tanto la mayoría de laboratorios utilizan placas muy pesadas ya sea de hormigón o granito en conjunto con sistemas neumáticos [12] con el fin de minimizar las vibraciones que afecten al IMD, a los sensores, óptica y hasta la propia regla. Otra similitud entre laboratorios es la opción de utilizar una estructura comercial, arreglos interferométricos para medición de desplazamiento de más de un eje, el uso de una cámara como sensor y funcionamiento autónomo, el cual permite alta repetibilidad de las condiciones en la medición. La exactitud de este tipo de sistemas se debe en gran parte a la infraestructura, la cual depende del control de las condiciones ambientales, la rectitud en el sistema de guiado y la resolución del sensado de trazo de línea.

NMI	Estructura Comercial	Aislamiento		IMD		Óptica		Sensor para detección de línea		Movimiento	
		Vibración	Vacío	1	2	Lineal	Diferencial	Cámara	Fotodiodo	Manual	Automático
BEV Austria	✓			✓		✓		✓		✓	
GUM Polonia	✓	✓		✓		✓		✓			✓
METAS Suiza	✓	✓			✓		✓	✓			✓
NPL R. Unido	✓	✓			✓		✓	✓			✓
PTB Alemania		✓	✓		✓		✓		✓		✓
NIST EUA		✓	✓		✓	✓			✓		✓
INMETRO Brasil	✓			✓		✓		✓			✓

Tabla I Características de sistemas de medición de reglas de NMI

La tabla II muestra el servicio de calibración de reglas de alta exactitud que ofrece CENAM en comparación con los distintos laboratorios primarios de medición, a través del alcance e incertidumbre de medición y técnicas similar de sensado de trazo de línea. Para fines de esta comparación la incertidumbre de medida de cada NMI se calculó a una longitud de 240 mm, la cual es el alcance de medición del sistema de medición propuesto. Cabe mencionar que la medición realizada por los laboratorios PTB, NIST y NMIJ se realiza al vacío, lo que implica un IDRA igual a uno y se traduce en menor incertidumbre de medición con el IMD. En el caso de los laboratorios restantes presentan condiciones similares de medición, lo que ejemplifica la

comparación. En forma global CENAM es el laboratorio que ofrece la mayor incertidumbre de medición por debajo del laboratorio NPLI de la india, el cual ofrece una incertidumbre 48% menor a la que ofrece CENAM. De ahí de la necesidad de mejora del servicio de calibración de reglas de alta exactitud a través del sistema propuesto en este trabajo.

NMI	Alcance de medición mm	Incertidumbre* μm	NMI	Alcance de medición mm	Incertidumbre* μm
BEV AUSTRIA	0.01 – 3000	0.46	GUM POLONIA	1 – 500	0.221
NIM CHINA	1 – 1000	0.12	CEM ESPAÑA	0.01 – 100	0.093
MIKES FINLANDIA	0.01 – 1165	0.02	METAS SUIZA	0.01 – 600	0.031
NPLI INDIA	0.01 – 100	0.85	NPL REINO UNIDO	0.01 – 400	0.13
INRIM ITALIA	0.1 – 280	0.223	PTB ALEMANIA	0.01 – 280	0.037
NMIJ JAPON	0.01 – 1000	0.066	NIST EUA	0.002 – 1000	0.027
VSL HOLANDA	0.01 – 100	0.094	CENAM MÉXICO	0.01 – 300	1.25

Tabla II. Incertidumbre de medición reportada en CMC de longitud.

Sistema de Medición de Line Scales

2.1 Definición del problema

Para el desarrollo del Interferómetro para Medición de Lines Scales IMLS el cual se propone en este trabajo, se pretende aprovechar la estructura de un sistema de visión comercial, el cual consta de una platina con sistema de guiado en el plano  $XY$ , una columna con sistema de guiado en el eje  $Z$  y óptica de amplificación. Para la medición de desplazamiento del eje  $X$  se incorpora un IMD que da trazabilidad a la unidad de longitud en una amplitud de medición de 240 mm. El sistema de visión consta de iluminación por transmisión a través de una lámpara y un lente colimador, un objetivo de amplificación de 10x y una cámara CMOS la cual funciona como sensor. La resolución de detección del sistema de visión depende de la resolución en la cámara que es de 2592 x 1944 y la máxima amplificación de la imagen, que en conjunto obtienen una ventana de análisis de 0.66 x 0.49 mm, tal como se muestra en la figura 5. Las condiciones ambientales son monitoreadas por sensores de temperatura en la regla para corregir la longitud a 20 °C con el coeficiente de expansión térmica del material, sensores de temperatura en el aire, la medición de humedad y la medición de presión, para la corrección del índice de refracción del aire en la medición con el IMD a través de la ecuación corregida de Edlen [9].

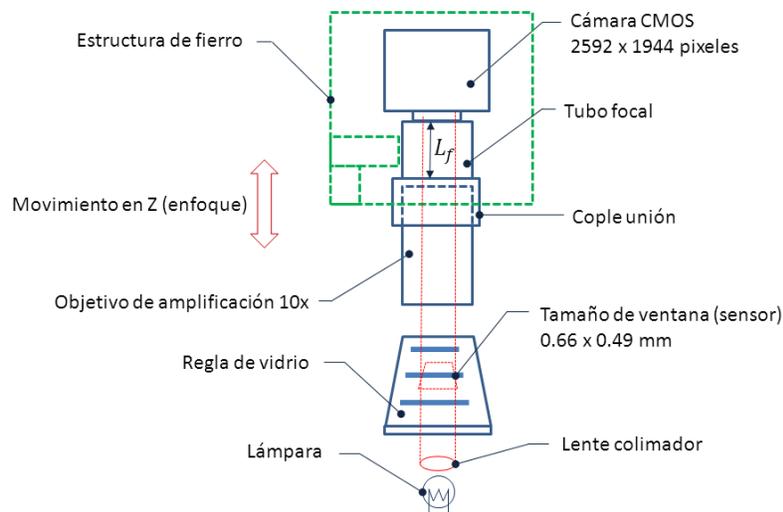


Figura 5. Sistema de visión del IMLS

## 2.2 Metodología

La metodología para la calibración de reglas de vidrio con el IMLS relaciona principalmente dos mediciones. La primera se refiere a determinar la posición real  $PR_i$  del trazo cada línea de la regla, la cual depende de la posición de la platina de medición  $PL_i$  medida por el IMD, la detección del trazo de línea mediante la captura y medición en la imagen  $PP_i$  y la determinación de un factor de tamaño de pixel  $\beta$ . La segunda medición se refiere a las condiciones ambientales las cuales son medidas y corregidas puntualmente durante la medición de la regla. La temperatura del aire, presión y humedad compensan el IDRA en la medición con el IMD y la temperatura del mensurando determina la corrección por temperatura debido al coeficiente de expansión térmica del material de la regla, tal como ejemplifica la figura 6.

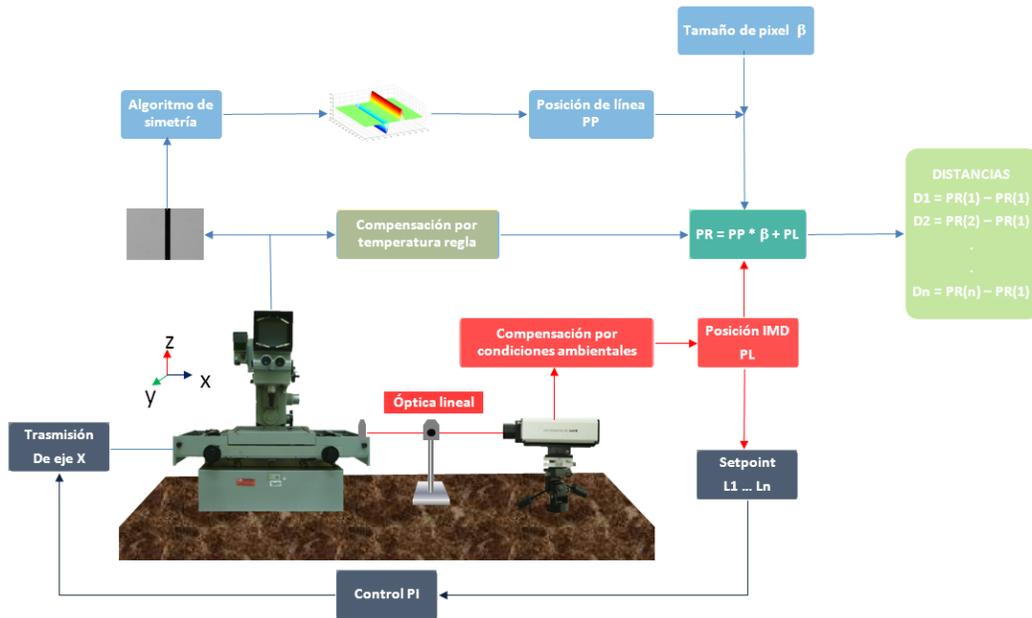


Figura 6. Metodología de medición.

Por lo tanto la longitud medida  $L_{med(i)}$  se define como la posición de línea de interés  $PR_i$  menos la posición de línea de referencia que por lo general es la línea cero  $PR_0$ , tal como se muestra en la ecuación 3.

$$L_{med(i)} = PR_i - PR_0 \quad (3)$$

Y el error de medición  $E_i$  se calcula como la longitud medida  $L_{med(i)}$  menos la longitud nominal  $L_{Nominal}$  tal como se muestra en la ecuación 4.

$$E_i = L_{med(i)} - L_{Nominal} \quad (4)$$

## 2.3 Modelo matemático de medición

El modelo matemático de medición proporciona un panorama detallado de las variables de influencia en la medición de longitud  $L_{med}$  del mensurando con el sistema de medición. Las variables de influencia en la medición estarán determinadas por la influencia en la medición del desplazamiento de la platina medido por el IMD, la detección de la posición de la línea medida por la cámara mediante un algoritmo de procesamiento de la imágenes, las condiciones ambientales del laboratorio, los errores de alineación, la deformación del mensurando y los errores en la mecánica del sistema. De esta manera el modelo matemático está dado por la ecuación 5.

$$L_{med} = \frac{m\lambda}{n_f} - L_{CM} \frac{1}{n_i} - \frac{1}{n_f} \cos \theta_1 + L\alpha_e \Delta t_e + \delta e_{cos x} + \delta e_{Abbe y x} + \delta e_{Abbe z x} + \delta e_{plano z(x)} + \delta e_{sop} + \delta l_{res} + \delta l_{rep} + \delta l_{foc} \quad (5)$$

Donde la  $L_{med}$  está dada por:

- Influencia de medición por el IMD.
  - $m$  Número de franjas.
  - $\lambda$  Longitud de onda.
  - $n_i$  Índice de refracción del aire inicial.
  - $n_f$  Índice de refracción del aire final.
  - $L_{CM}$  Longitud de camino muerto.
  - $\theta_1$  Ángulo de error de alineación.
- Influencia de temperatura del laboratorio.
  - $\alpha_e$  Coeficiente de expansión térmica de la “Line Scale”.
  - $\Delta t_e$  Diferencia de temperatura de “Line Scale” respecto a 20 °C.
- Errores de alineación en el sistema
  - $\delta e_{cos(x)}$  Error de alineación de la “line Scale” respecto al eje horizontal de la cámara y la trayectoria de laser del IMD.
  - $\delta e_{Abbe y(x)}$  Error de alineación del haz del IMD respecto al rasó de los trazos de la “line scale” en el eje Y.
  - $\delta e_{Abbe z(x)}$  Error de alineación del haz del IMD respecto al rasó de los trazos de la “line scale” en el eje Z.
  - $\delta e_{Plano z(x)}$  Error de alineación del plano de apoyo (vidrio) de la “line scale” en la platina de medición respecto al eje Z
- Error por deformación del mensurando.
  - $\delta e_{sop}$  Error por deformación debido a la sujeción y apoyos del “Line Scale”

- Error por detección de la línea en el sensor.
  - $\delta l_{res}$  Error de resolución.
  - $\delta l_{rep}$  Error de repetibilidad.
  - $\delta l_{foc}$  Error de detección por pérdida de enfoque.

## 2.4 Parámetros de influencia de sistema de medición.

### 2.4.1 Variables de influencia con IMD.

La medición de la posición del desplazamiento de la platina sobre el eje  $X$  está determinada por las variables de influencia que afectan al IMD, tales como el número de franjas  $m$ , la longitud de onda  $\lambda$ , la longitud del camino muerto  $L_{CM}$  la cual depende del tipo de arreglo interferométrico, la corrección por el índice de refracción del aire con la ecuación de Edlen  $n_i$  y  $n_f$  y la alineación de laser respecto al desplazamiento de la platina a lo largo del eje  $X$  la cual se traduce por un error de coseno tal como se relaciona a través de la ecuación 6.

$$L_{IMD} = \frac{m\lambda}{n} - L_{CM} \frac{1}{n_i} - \frac{1}{n_f} \cos \theta \quad (6)$$

### 2.4.2 Condiciones de temperatura en la medición.

Los gradientes de temperatura del laboratorio durante la calibración del mensurando son fuente de influencia en el incremento de longitud  $\Delta L$  de la regla. La relación involucra el coeficiente de expansión térmica del material  $\alpha_e$ , la desviación de la temperatura de la escala  $\Delta t$  respecto a 20 °C y la longitud de la escala  $L_0$ , tal como lo describe la ecuación 7.

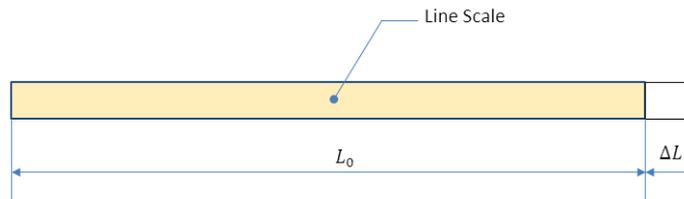


Figura 7. Expansión térmica del material

$$\Delta L = L_0 \alpha_e \Delta t \quad (7)$$

### 2.4.3 Error de coseno de alineación del mensurando

$\delta e_{y(x)}$ .

Una fuente más de incertidumbre en la medición de reglas de alta exactitud corresponde a los errores de alineación de la escala respecto al sistema de medición. El primer error  $e_{y x}$  relaciona la alineación del mensurando sobre la platina de medición, en relación con la cámara, y la alineación IMD. Este error se determina geoméricamente como un error de coseno de la regla y está determinado por la ecuación 8.

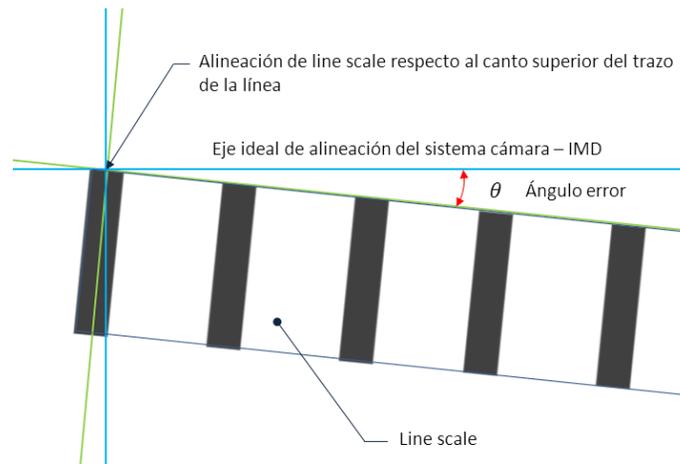


Figura 8. Error de alineación del mensurando respecto a la cámara e IMD.

$$e_{y(x)} = L \frac{1}{\cos \theta} - 1 \quad (8)$$

### 2.4.4 Error de Abbe $\delta e_{Abbe y x}$ Y $\delta e_{Abbe z(x)}$

El error de Abbe es el segundo error de alineación y se refiere al principio de Abbe donde “*el instrumento de medida debe estar construido siempre de manera que la distancia a medir sea continuación en línea recta de la escala graduada que constituye la referencia de medida. En caso de que el eje de medida y de la escala no sean coincidentes y se encuentren separados por cierta distancia (distancia Abbe), entonces la longitud leída coincidirá con la longitud de medida, solo si, el sistema móvil se desplaza paralelamente a la escala sin rotación alguna. Si el sistema sufre algún tipo de rotación entre la posición inicial y final, entonces la longitud leída sobre la escala no coincidirá con la longitud medida.*”

En el caso del IMLS el error de Abbe amplificará de forma longitudinal los errores angulares inherentes al movimiento de la platina de medición sobre la guía del eje  $X$ , tales como, el error de cabeceo en el plano  $XZ$ , y el error de roll en el plano  $XY$ , además se debe tener en cuenta los errores de coincidencia al enrasar el haz laser del IMD con los trazos del Line Scale a través de las distancia Abbe en los ejes  $Y$  y  $Z$ , tal como se muestra en la figura 9 y 10.

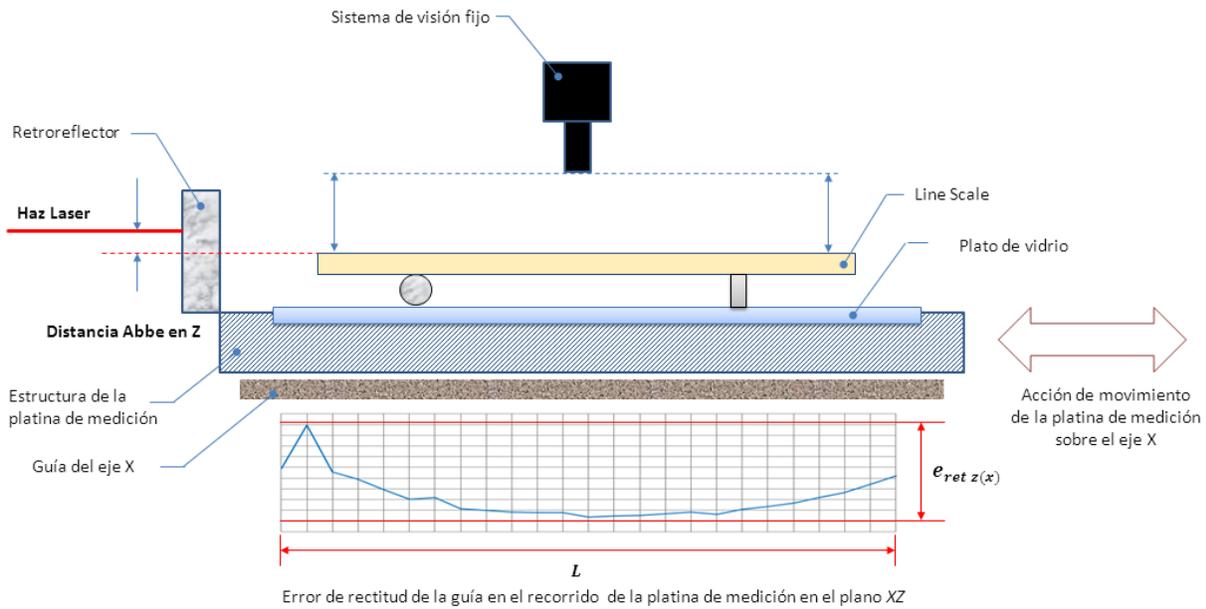


Figura 9 Error de Abbe en el plano  $XZ$  en la medición con el IMLS.

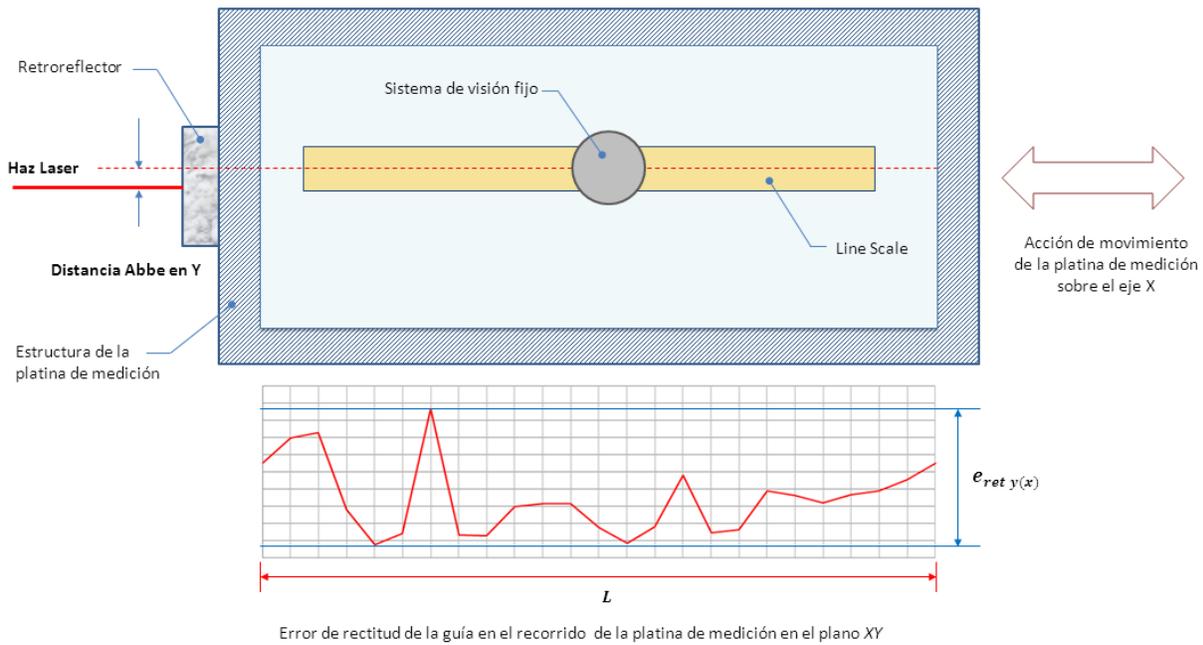


Figura 10 Error de Abbe en el plano  $XY$  en la medición con el IMLS.

De tal manera que el error de rectitud da lugar a un error de medida de longitud  $e_L$ , el cual está determinado por la distancia Abbe  $d_{Abbe}$  y un ángulo  $\alpha$  (ver ecuación 9),

$$e_L = d_{Abbe} \alpha \tan \alpha \quad (9)$$

Donde  $\alpha$  se determina por el arco tangente del error de rectitud  $e_{ret}$  entre la longitud del desplazamiento de la platina  $L$ , tal como se muestra en la ecuación 10.

$$\alpha = \arctan \frac{e_{ret}}{L} \quad (10)$$

### 2.4.5 Error de alineación del mensurando $\delta e_{z(x)}$ .

El tercer error de alineación relaciona el eje Z a través de la distancia que guarda la cámara con la horizontal de recorrido de la platina de medición  $e_{z(x)}$ . Este error se refiere a la nivelación del plato de vidrio sobre el cual descansa la regla en la estructura de la platina. El error aunque puede ser corregido no deja de ser despreciable y debe ser considerado como un error del mensurando sobre el eje z, que representa un error de enfoque en la captura de la imagen del trazo de la línea, ver figura 11.

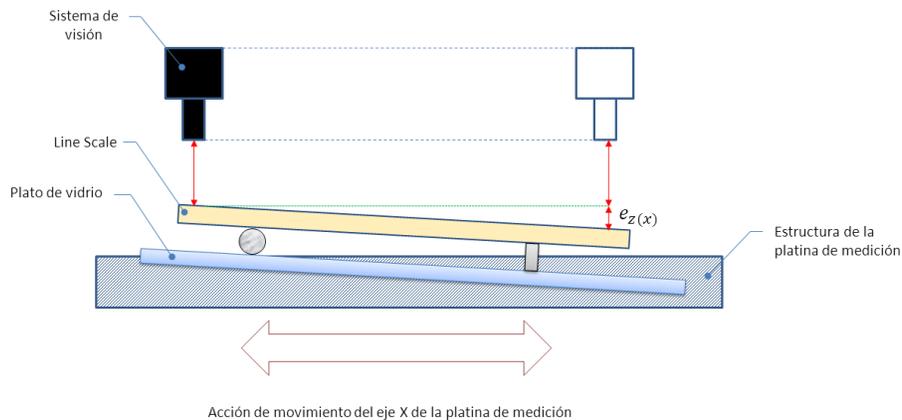


Figura 11. Error de alineación del mensurando respecto a Z.

### 2.4.6 Error de deformación del mensurando por apoyos.

El cuarto error relaciona la deformación de la regla debido a los puntos de apoyo donde es soportada. En lo general el criterio de los NMI es utilizar los puntos Airy [referencia] con el objetivo de que los extremos de la regla queden paralelos el uno con el otro. La contribución del error  $e_{sop}$  depende de la deformación plástica del material por lo que es necesario tener un conocimiento estricto del mismo. Cabe mencionar que la sujeción y soporte de la regla debe estar libre de esfuerzos por lo que se recomienda dos soportes cilíndricos como apoyos, o en su

defecto un cilindro y un bloque, para de esta manera la regla se encuentre libre de crecer y decrecer por el efecto de la temperatura, tal como se muestra en la figura 12.

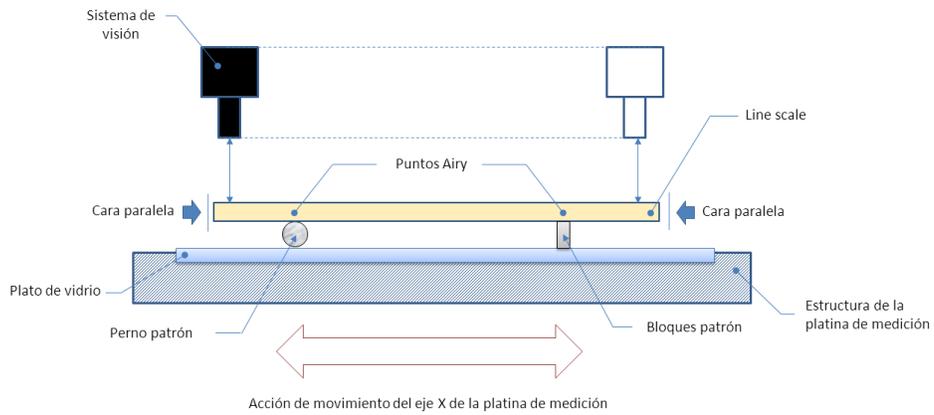


Figura 12. Error de deformación de las regla por apoyos.

## Detección de línea por procesamiento de imágenes

### 3.1 Detección de la posición del trazo de la línea

Una fuente más de incertidumbre en la medición de  $L_{med}$  es la detección del trazo de la línea en la imagen. El error de detección está dado por la resolución del sistema de visión  $\delta l_{res}$  que relaciona: el algoritmo de procesamiento de imágenes y el tamaño de pixel, el cual está en función de la resolución del sensor CMOS de la cámara y la óptica de amplificación. La repetibilidad  $\delta l_{rep}$  y el error debido a enfoque  $\delta l_{foc}$  también son otros parámetros de error que en conjunto definen la exactitud de detección del sistema de visión.

La exactitud de la técnica de procesamiento de la imagen dependerá del criterio de filtrado de la imagen, el detector de bordes del trazo de la línea y la técnica de ajuste para el cálculo de simetría entre bordes la cual define la posición de la línea en el plano  $XY$  del sistema de medición. Para la validación de la técnica se utilizaron imágenes sintéticas de función escalón con bordes conocidos a las que se agregó perturbaciones de ruido uniforme y gaussiano en distintos niveles, con el objetivo de probar y determinar las ventajas y desventajas del uso de cada técnica.

### 3.2 Imagen digital

Una imagen digital puede ser expresada como una función bidimensional  $f_{(i,j)}$  en el plano  $XY$ , en el caso de la imagen de una línea se representa como una función escalón tal como se muestra en la figura 13.

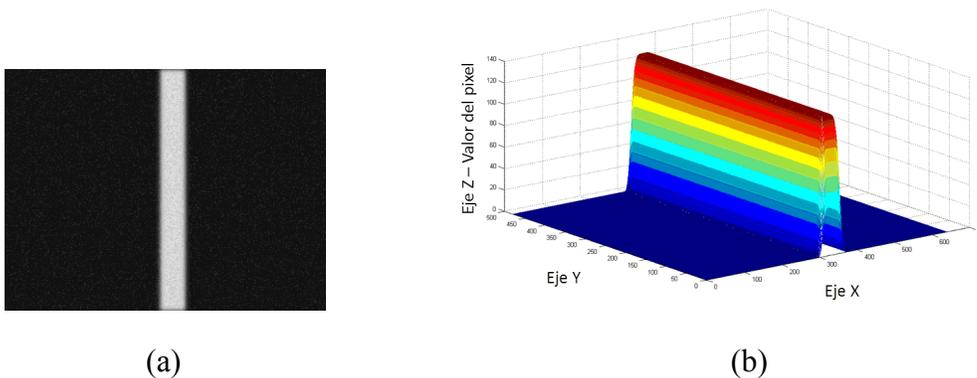


Figura 13. Función bidimensional de línea, (a) imagen de la línea, (b) función escalón de la línea.

Las técnicas de detección del trazo de línea de la regla mediante procesamiento de imágenes siguen la misma metodología propuesta por NMI para la calibración y tienen como objetivo

determinar una característica que defina la posición del trazo de la línea primeramente en la imagen, para posteriormente extrapolar su posición al mundo real. Cabe mencionar que las técnicas propuestas en este trabajo no son únicas, los algoritmos son susceptibles a mejora y pueden tomarse como base para la programación de algoritmos más complejos. El detector de trazo de línea parte como base en la detección de los bordes en la imagen, el cual consta de un proceso de filtrado en el dominio espacial y un proceso de derivación a través del Gradiente o Laplaciano. La simetría entre bordes estará dada por un ajuste lineal entre los bordes a través de Mínimos Cuadrados MMC.

### 3.3 Bordes en una imagen

Un borde puede ser definido como un cambio abrupto que define una frontera entre dos regiones de una imagen y se identifican a través de cambios de intensidad entre pixeles. Los métodos de detección de borde involucran el operador convolución a través de una máscara o kernel  $H$  la cual tiene como objeto determinar las razones de cambio en una imagen.

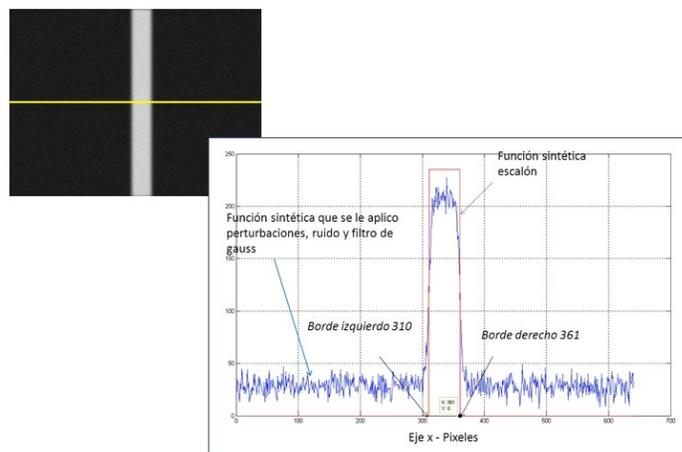


Figura 14. Renglón de imagen de trazo de línea

Las variables que involucran la selección de un detector de bordes están determinadas por la orientación, ruido ambiental y estructura. La sensibilidad de dirección en la detección está dada por el tipo de arreglo el cual puede ser optimizado para determinar bordes en horizontal, vertical y diagonal [14] y la detección de bordes puede verse afectado por ruido en la imagen lo que da como resultado bordes falsos [13].

### 3.4 Ruido en una imagen

*“En algoritmos de procesamiento de imágenes para la detección de bordes el ruido se determina por fluctuaciones espurias en el valor del pixel introducidas por la adquisición de*

la imagen por el sistema” [Truco, pp 321]. Donde las fluctuaciones asociadas al sistema involucran el proceso de captura, deficiencias producidas por iluminación, aberraciones de la óptica y el canal de adquisición. El ruido  $v$  es considerado como variaciones aleatorias de los niveles de gris en la imagen, los cuales se pueden representar de forma aditiva.

$$f_{ruido\ i,j} = f_{original\ i,j} + v(x,y) \quad (10)$$

Es importante conocer el ruido al que está sometido el sistema para de esta manera contrarrestar adecuadamente las variaciones de intensidad asociadas a la imagen.

### 3.5 Filtros en una imagen

El proceso de filtrado en una imagen es el conjunto de técnicas que tienen por objeto resaltar características de interés, por ejemplo el suavizar una imagen al reducir la cantidad de variaciones de intensidad entre pixeles, eliminar ruido asociado a la adquisición de la imagen por el sistema, detección de bordes, esquinas, etc.. El proceso de filtrado se puede llevar a cabo sobre dominios espaciales de forma lineal, no lineal y dominios de frecuencia. La transformación con filtros espaciales, se pueden aplicar de forma global donde cada pixel de salida depende solo de pixel de entrada, o puede ser aplicada de forma local, tal como se va utilizar en este proyecto, donde el pixel de salida depende de la vecindad local del pixel de entrada, tal como se muestra en la ecuación 11, donde  $f$  representa la imagen a procesar,  $G$  es la imagen procesada y  $T$  es un operador definido por alguna vecindad entre pixeles.

$$G(x,y) = T(f(x,y)) \quad (11)$$

Una forma de realizar este proceso de transformación local es mediante el operador convolución y el uso de una máscara  $H$  con dimensiones de  $n \times m$  (ecuación 12), donde los valores de los elementos de esta matriz tienen como objetivo determinar una propiedad de la imagen.

$$G(x,y) = h(x,y) * f(x,y) \quad (12)$$

En el caso de los filtros en dominio de la frecuencia, estos procesan la imagen sobre el dominio de la Transformada de Fourier TF, el concepto parte en descomponer una señal como la suma de armónicos con diferentes frecuencias, donde cada armónico representa la variación de intensidad de forma espacial, por lo tanto la TF de una imagen finita en el intervalo  $M \times N$  representada por una función  $f$  no es más que una transformación de un dominio espacial a un dominio de la frecuencia sin perder información, cuyos ejes determinan la amplitud y la frecuencia para cada dirección de la imagen. Esta transformación está dada por el operador convolución, donde la máscara  $w$  es un filtro en dominio de la frecuencia.

$$G(x,y) = w(\rho,\varphi) \otimes f(x,y) \quad (13)$$

Las características que se pueden observar en el espectro de la frecuencia en la imagen son: zonas homogéneas representadas por bajas frecuencias, zonas de transición entre píxeles representadas por altas frecuencias y zonas periódicas que dan lugar a picos de misma intensidad y periodicidad.

### 3.5.1 Binarización

Esta técnica de filtrado muestra ser la más sencilla de implementar, consiste en un proceso de reducción de información de la imagen en la que persisten únicamente dos estados uno y cero (blanco y oscuro). El proceso de binarización permite segmentar la imagen a través de un umbral  $T$  la región del trazo de la línea de la imagen  $I$ .

$$B_{x,y} = \begin{cases} 1 & \text{si } I_{x,y} > T \\ 0 & \text{si } I_{x,y} \leq T \end{cases}$$



Figura 15. Pérdida de información por umbral de binarización.

La principal ventaja de aplicar este filtro es el reducido tiempo computacional del procesamiento de la imagen; aunque por otra parte la técnica presenta inconvenientes debido a la pérdida de información al depender de umbral  $T$  y no considerar un criterio único para la reducción de ruido en la imagen. En la figura 15 se muestra en (b), (c) y (d) los distintos niveles de umbral al aplicar la técnica de binarización en la imagen (a), cada caso en particular causar incerteza en la detección de bordes en el trazo de línea debido a la pérdida de información en la imagen, por lo que para este trabajo esta técnica no será considerada para el análisis.

### 3.5.2 Filtro de Gauss

Este filtro es una media ponderada donde los pesos toman la forma de una campana de Gauss, y la varianza  $s^2$  es un indicador del nivel de suavizado; es decir, una campana más ancha indica una varianza grande, lo que produce un mayor suavizado en la imagen y una campana

pequeña indica una campana más estrecha y por lo tanto produce un menor suavizado. Normalmente el suavizado Gaussiano se aplica en dos dimensiones y los pesos de la máscara dependen de la distancia del pixel central. Una propiedad interesante es que el filtro Gaussiano es separable, es decir, se puede obtener un suavizado 2D aplicando dos máscaras Gaussianas una horizontal y una vertical [13].

$$G(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp\left(-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}\right) \quad (14)$$

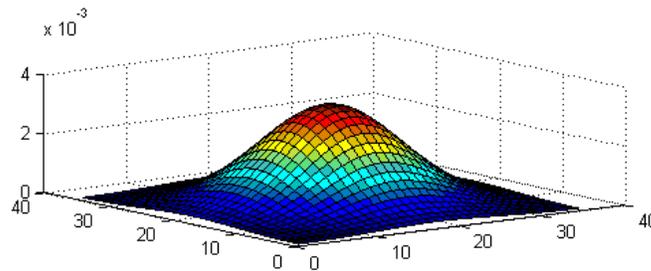


Figura 16. Función bidimensional de Gauss

## 3.6 Gradiente

El gradiente se define como el uso de la derivada parcial en los ejes  $XY$  de una imagen  $I$  (ecuación 15). El método de detección es mediante el operador convolución a través de una máscara  $H$  de  $3 \times 3$ , donde la localización de máximos y mínimos de la función representa los bordes de la imagen.

$$\nabla f(x, y) = \frac{\partial f(x, y)}{\partial x} + \frac{\partial f(x, y)}{\partial y} \quad (15)$$

La magnitud está representada por la ecuación 16

$$\nabla f \approx \frac{\partial f}{\partial x} + \frac{\partial f}{\partial y} \quad (16)$$

Y la dirección de vector gradiente estará dada por la ecuación 17.

$$\alpha(x, y) = \tan^{-1} \frac{\frac{\partial f}{\partial y}}{\frac{\partial f}{\partial x}} \quad (17)$$

### 3.6.1 Detector de trazo de línea por Gradiente.

La máscara  $H$  de convolución en realidad representa la operación de razón de cambio en una vecindad de píxeles, es decir, la diferencia que existe entre las regiones de niveles de gris de la imagen y están dadas en la literatura por los operadores Prewit, Sobel y Frei-Chen, estas dos últimas con la ventaja de proporcionar un suavizado, además del efecto de derivación [15]. El requisito de un operador de derivación, es que la suma de los coeficientes de la máscara sea nula, es decir que la detección en una zona uniforme de la imagen sea cero.

$$H_{Prewit} = \begin{matrix} -1 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 1 \end{matrix} \quad H_{Sobel} = \begin{matrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{matrix} \quad H_{Frei-Chen} = \begin{matrix} -1 & 0 & 1 \\ -\frac{1}{2} & 0 & \frac{1}{2} \\ 1 & 0 & 1 \end{matrix}$$

Al aplicar el gradiente en la función  $f_{ixj}$  del trazo de la línea ó primitiva, el borde izquierdo y derecho de la misma quedan representados como los máximos  $x_{max}$  y mínimos  $x_{min}$  de la función, que a su vez representan la razón de cambio en la transición de píxeles de la imagen, tal como se muestra en las figuras 17 y 18.

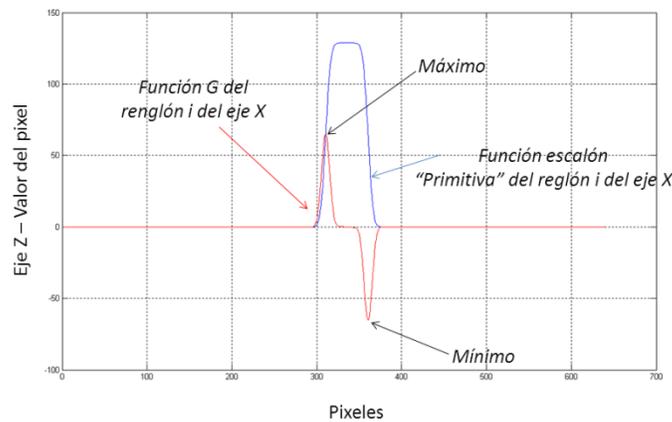


Figura 17. Gradiente de una función escalón en un renglón de la imagen.

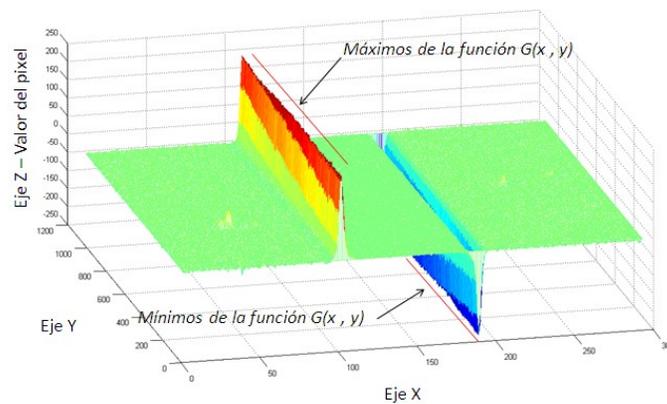


Figura 18. Máximos y mínimos de la función gradiente.

La característica de simetría de la línea se obtiene primeramente a través del punto medio  $x_m(i)$  de cada renglón  $i$  de los máximos  $x_{\max(i)}$  y mínimos  $x_{\min(i)}$  de la función (ver ecuación 18).

$$x_{m(i)} = \frac{x_{\min(i)} + x_{\max(i)}}{2} \quad (18)$$

El criterio de MMC da solución a la posición de la línea en la imagen (cálculo de simetría) a través de la linealización de los puntos medios  $x_m$  en forma de una pendiente  $m$  y ordenada  $b$  que representan la solución al sistema matricial  $Au = B$ ; donde la matriz  $A$  representa el número del renglón  $i$  donde fue localizado punto medio,  $u$  es un vector con elementos  $m$  y  $b$  y la matriz  $B$  representa los puntos medios del trazo de línea, tal como se muestra en la ecuación 19 y figura 19.

$$A = \begin{matrix} 1 & 1 \\ 1 & 2 \\ 1 & 3 \\ \vdots & \vdots \\ 1 & i \end{matrix}; \quad u = \begin{matrix} m \\ b \end{matrix}; \quad B = \begin{matrix} x_{m(1)} \\ x_{m(2)} \\ x_{m(3)} \\ \vdots \\ x_{m(i)} \end{matrix} \quad (19)$$

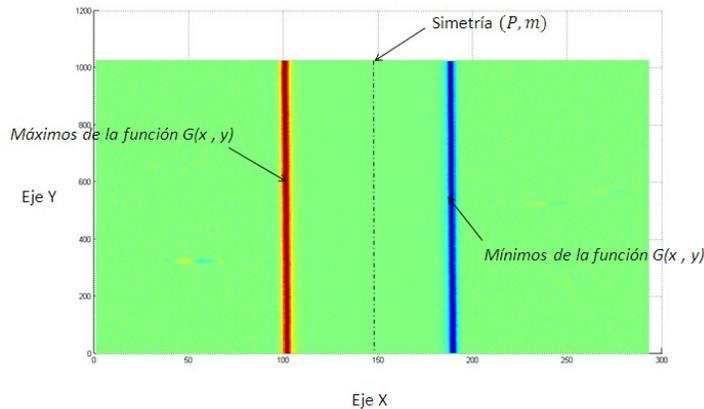


Figura 19. Simetría entre bordes de una línea referidos a un punto  $P$  y una pendiente  $m$ .

La técnica es sencilla de aplicar y muestra ser eficiente en el cálculo de simetría entre bordes al obtener una referencia de posición  $P$  de la línea en la imagen.

### 3.7 Laplaciano “cruce por cero”

El laplaciano se relaciona con la derivada de orden dos en una imagen y responde a las transiciones de intensidad de esta (ver ecuación 20). La segunda derivada tiene una respuesta más fuerte a los detalles como puntos aislados y líneas, aunque es muy sensible al nivel de ruido.

$$\nabla^2 f(x,y) = \frac{\partial^2 f(x,y)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 f(x,y)}{\partial y^2} \quad (20)$$

El uso más generalizado en la detección de bordes es a través de la propiedad del cruce por cero. El concepto se basa en la convolución con el Laplaciano de una función Gaussiana de la ecuación 21 y 22.

$$h_\sigma(x,y) = \exp\left(-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}\right) \quad (21)$$

$$\nabla^2 h_\sigma = \frac{r^2-2\sigma^2}{\sigma^4} \exp\left(-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}\right) \quad (22)$$

Una opción más de detección de cruce por cero es mediante la interpolación lineal de los píxeles vecinos a la solución de cambio de signo de la función laplaciano, y la solución a cero de la recta de interpolación, mismo que fue adoptado para la detección de bordes en este trabajo.

### 3.7.1 Detector de Gabor con Laplaciano cruce por cero.

El uso del laplaciano o segunda derivada tiende a dar información más relevante en la detección de los bordes. Este criterio tiene la ventaja de ser más preciso en comparación con el gradiente y uso de máximos y mínimos, debido a que la detección de bordes se realiza a nivel subpixel y no pixel como la técnica anterior. Esta técnica al igual que la del gradiente no está exenta a ruido por lo que es necesario complementarla con un filtro pasa bajas como es el Gaussiano, donde la varianza  $s^2$  indicará el nivel de suavizado, ver figura 20.

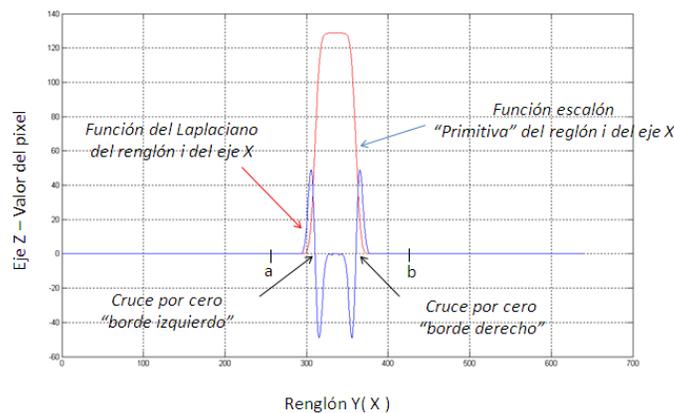


Figura 20. Laplaciano de una función escalón en un renglón de la imagen.

Para este caso particular la detección de borde izquierdo  $x_{izq(i)}$  y derecho  $x_{der(i)}$  está dada por solución de cruce por cero de las rectas de interpolación  $f(x_{izq(i)})$  y  $f(x_{der(i)})$ , de los píxeles

adyacentes al cambio de signo de la función laplaciano. Al igual que la técnica anterior la simetría entre bordes está dada por la linealización por MMC de los puntos medios  $x_{m(i)}$  y la solución  $u$  del sistema  $Au = B$ . Una desventaja de esta técnica es que se limita a operar con imágenes con poco nivel de ruido y continuidad en bordes bien definidos. En general para reglas de alta exactitud la técnica es suficiente y en conjunto con un filtro pasa bajas darán como resultado una mejor aproximación al cálculo de simetría.

### 3.8 Técnicas de procesamiento de imágenes para la detección de posición del trazo de línea en la imagen

Las técnicas de procesamiento para detección de trazo de línea en la imagen se basa en tres criterios: reducción de ruido en la imagen a través de la aplicación de un filtro espacial como Gauss, un método de segmentación para detección de los bordes del trazo de la línea a través del Gradiente y laplaciano y por último el cálculo de simetría a través de la linealización de los puntos medios de los bordes a través de la ecuación de la recta  $y = mx + b$  donde  $b$  representa la posición de la línea en el plano de la imagen y  $m$  la pendiente de la recta.

A continuación en los puntos 3.10.1 y 3.10.2 se presenta en forma de pseudocódigo los algoritmos de detección de trazo de línea que relacionan el proceso de filtrado, la detección de bordes y posición del trazo de la línea en el plano a través de MMC.

### 3.8.1 Algoritmo 1 Detector de trazo de línea por filtro Gaussiano y Gradiente

**Algoritmo 1.** *Detector de posición de línea por Filtro y Gradiente*

1. Filtrado de la imagen  $I$  mediante la convolución con el kernel  $W$  de Gauss :

$$f(x, y) = W(x, y) \otimes I(x, y)$$

2. Obtener el borde mediante el Gradiente  $G(x, y) = \frac{df}{dx}$  por la convolución con la máscara  $H_{Prewitt}$
3. Definir los bordes izquierdo y derecho mediante la localización del máximo  $x_{\max(i)}$  y mínimos  $x_{\min(i)}$  de cada renglón  $i$  de la función Gradiente  $G(x_i)$ .
4. Determinar el punto medio entre bordes por cada renglón  $i$ :

$$x_{m(i)} = \frac{x_{\min(i)} - x_{\max(i)}}{2} + x_{\min(i)}$$

5. Linealizar los puntos medios de los renglones  $x_{m(i)}$  mediante MMC y obtener la ecuación de la recta simétrica a los bordes  $y_{sim} = mx + b$ , donde  $b$  representa la posición de la recta en el plano  $XY$  de la imagen y  $m$  su pendiente.

### 3.8.2 Algoritmo 2 Detector de trazo de línea por filtro Gaussiano y Laplaciano

**Algoritmo 2.** Detector de posición de línea por Filtro y Laplaciano

1. Filtrado de la imagen  $I$  mediante la convolución con el kernel  $W$  de Gauss:

$$f(x, y) = W(x, y) \otimes I(x, y)$$

2. Obtener el Gradiente  $G(x, y) = \frac{df}{dx}$  mediante la convolución con la máscara  $H_{Prewitt}$
3. Obtener el Laplaciano  $L(x, y) = \frac{dG}{dx}$  mediante la convolución con la máscara  $H_{Prewitt}$
4. Definir los intervalos de búsqueda  $b$  de los bordes izquierdo y derecho mediante la localización del máximo  $x_{\max(i)}$  y mínimos  $x_{\min(i)}$  de cada renglón  $i$  de la función Gradiente  $G(x_i)$ .

$$b_{izq(i)} = x_{\max-1} < x_{\max} < x_{\max+1} ; b_{der(i)} = x_{\min-1} < x_{\min} < x_{\min+1}$$

5. Determinar  $m$  y  $b$  de las funciones de las rectas  $f(x)_{izq}$  y  $f(x)_{der}$  que pasa por el intervalo de búsqueda de los bordes  $b_{izq}$  y  $b_{der}$ .

$$f(x)_{izq(i)} \Rightarrow m = \frac{L(x_{\max+1}) - L(x_{\max-1})}{x_{\max+1} - x_{\max-1}}, b = L(x_{\max+1})$$

$$f(x)_{der(i)} \Rightarrow m = \frac{L(x_{\min+1}) - L(x_{\min-1})}{x_{\min+1} - x_{\min-1}}, b = L(x_{\min+1})$$

6. Se determina el borde de la función a través cruce por cero de las funciones  $f(x)_{izq}$  y  $f(x)_{der}$  al igualar a cero las rectas de forma  $f(x) = mx + b$ :

$$x_{izq(i)} = \frac{-b_{izq}}{m_{izq}} + x_{\max-1}; \quad x_{der(i)} = \frac{-b_{der}}{m_{der}} + x_{\min-1}$$

7. Determinar el punto medio entre bordes por cada renglón  $i$ :

$$x_{m(i)} = \frac{x_{der(i)} - x_{izq(i)}}{2} + x_{der(i)}$$

8. Linealizar los puntos medios de los renglones mediante MMC y obtener la ecuación de la recta simétrica a los bordes  $y_{sim} = mx + b$ , donde  $b$  representa la posición de la recta en el plano  $XY$  de la imagen y  $m$  pendiente.

### 3.9 Validación de técnica de detección de trazo de línea

Las dos técnicas de detección fueron probadas a través de un banco de imágenes donde se evalúan características de nivel de ruido, discontinuidad en trazos de línea y definición de los bordes, con objeto de determinar las límites de detección.

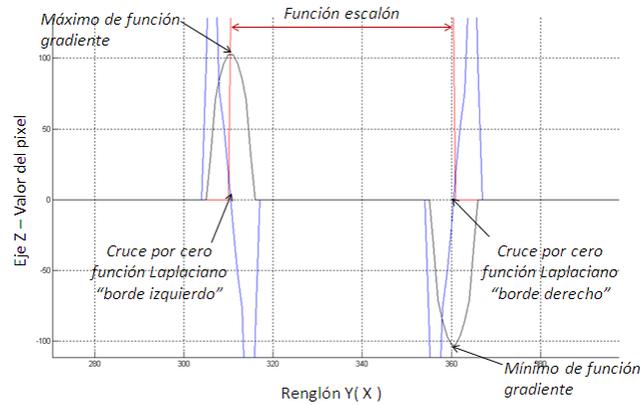


Figura 21. Imagen sintética de función escalón en un renglón, detección de bordes.

Para la validación de la técnica se utilizaron imágenes sintéticas de una función escalón con bordes y ancho de línea conocidos, las cuales fueron manipuladas por el operador convolución a través de una Gaussiana y se agregaron perturbaciones de ruido uniforme y gaussiano. El objetivo de la prueba es determinar el correcto cálculo de la simetría del trazo de línea, a través de la exactitud en la detección de los bordes en la imagen y la determinación del ancho de línea, con el fin de buscar la combinación del método de filtrado y derivación más adecuados. Las técnicas propuestas de detección en este proyecto son el detector de trazo de línea por Gauss en combinación con Gradiente y el detector de línea por Gauss con Laplaciano. Cabe mencionar que el uso de la Binarización como filtro fue descartado para este proyecto, debido a que en las pruebas preliminares al determinar el umbral  $T$  existió la persistencia de ruido o pérdida de información en la detección del borde.

### 3.9.1 Determinación de bordes con imagen sintética

La función sintética se implementó en la calculadora de imágenes Caliman versión Beta 0.1 del Centro de Investigación en Matemáticas CIMAT del Departamento de Ciencias de la Computación. El tamaño de la imagen es de 640 x 480, los bordes de la función están determinados en el pixel 300.5, el cual es la transición del pixel 300 al 301 para el borde izquierdo y el pixel 340.5 el cual es la transición del pixel 340 al 341 para el borde derecho, el ancho del trazo de línea es de 40 pixeles. Se agregó una convolución Gaussiana como deformación de la función y ruido Gaussiano y uniforme en los niveles de 0.2 y 0.5 como se muestra de las figuras 22 hasta la 24.

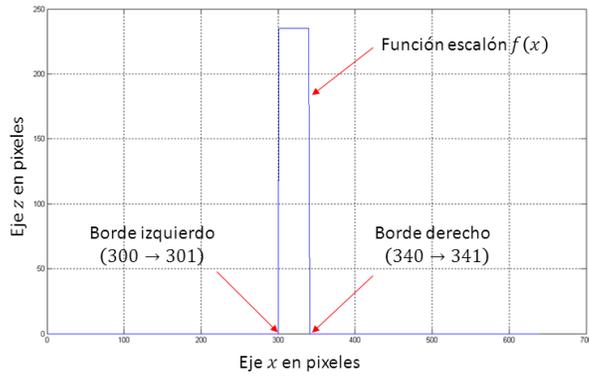


Figura 22. Imagen sintética de función escalón del renglón  $i$ .

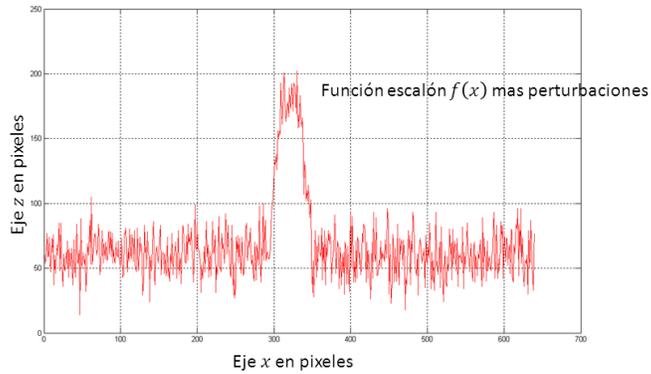


Figura 23. Función escalón convolución con Gaussiana y ruido Gaussiano.

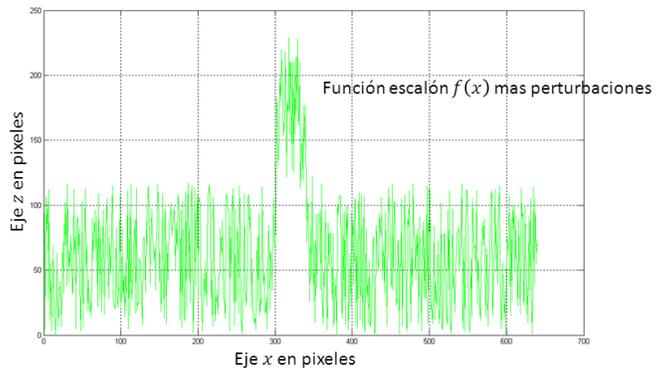
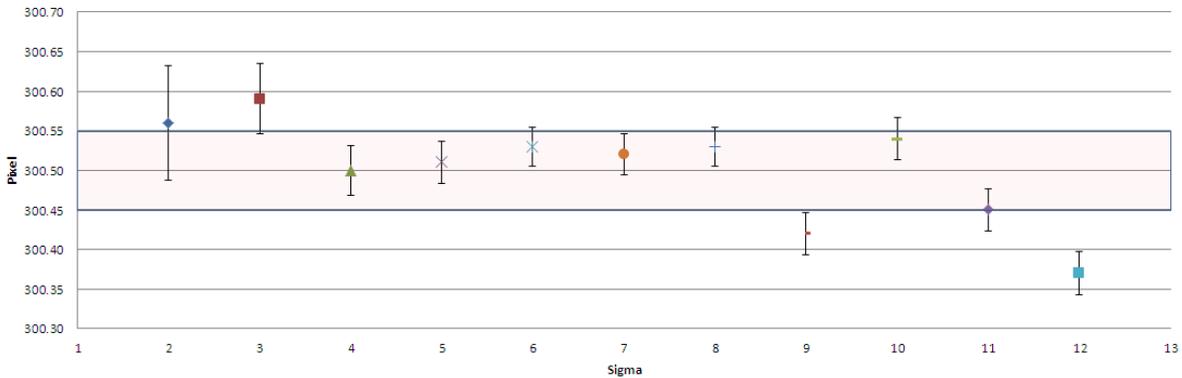


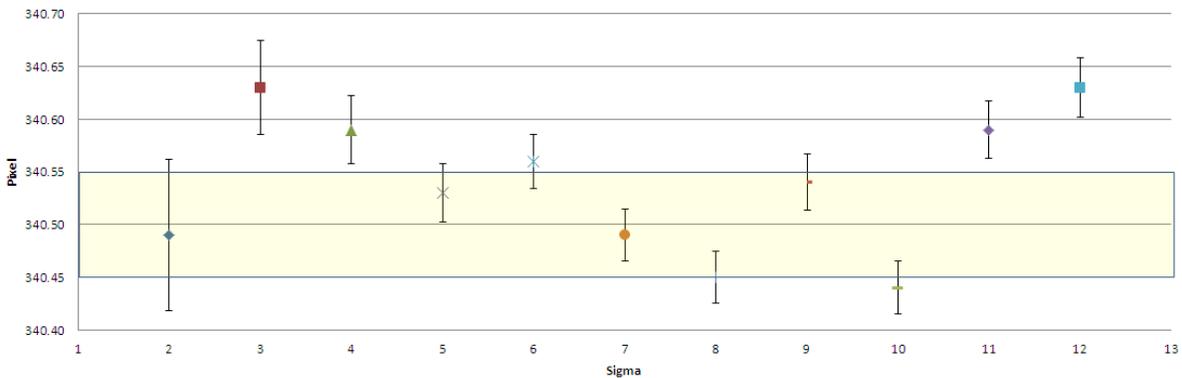
Figura 24. Función escalón convolución con Gaussiana y ruido uniforme.

### 3.9.2 Detección de bordes con máscaras en 1D y 2D Gauss y Gradiente

Como parte de la experimentación se utilizaron máscaras de filtro Gaussiano y derivación por Prewit, en una dimensión graficas 1 y 2 y dos dimensiones graficas 3 y 4. Como parámetro en común se hizo variar la sigma con la finalidad de encontrar un intervalo óptimo del ajuste de filtrado en la imagen en función con la exactitud de detección del borde. El valor de sigma se hizo variar de 2 hasta 13 y el ancho de la Gaussiana se determinó como 5 veces por el valor de sigma. El error de exactitud se representa por la desviación estándar poblacional del total del número de renglones de la imagen y el error de detección se determinó por un intervalo de control de  $\pm 0.05$  pixeles.

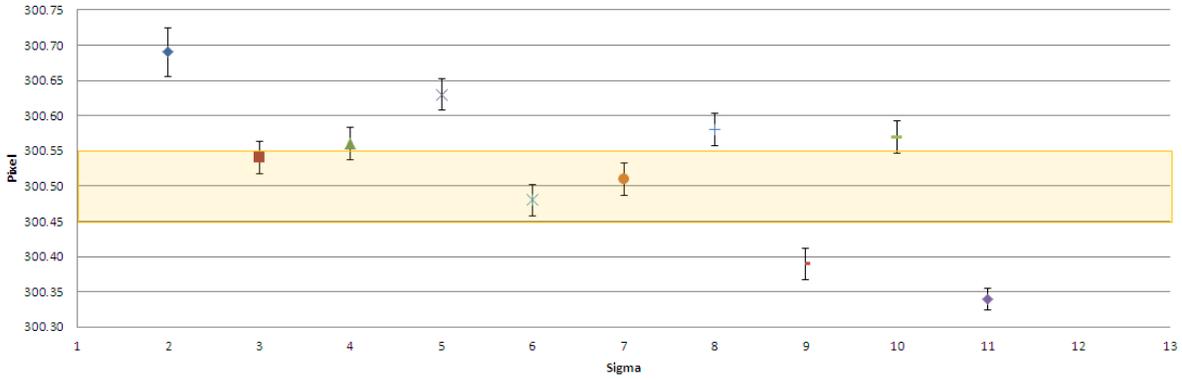


Gráfica 1. Detección de borde izquierdo en 340.5 p con kernel Gauss y Gradiente en 1D.

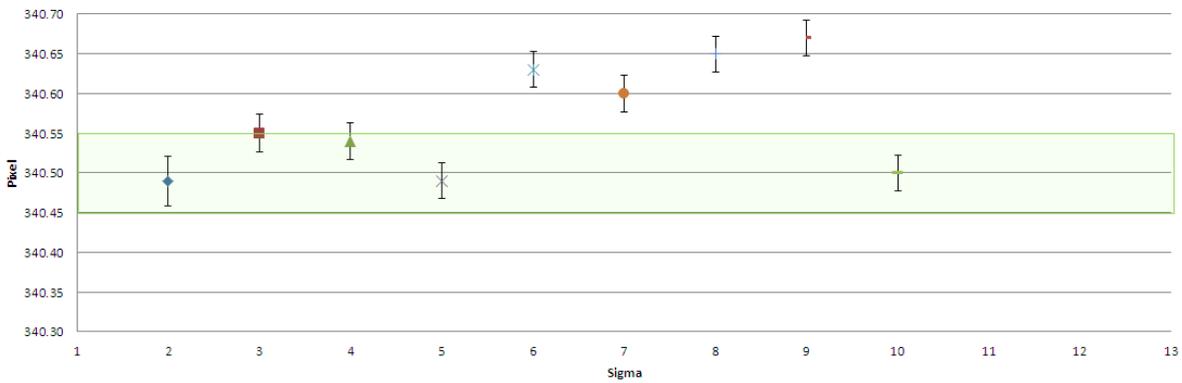


Gráfica 2. Detección de borde derecho en 340.5 p con kernel Gauss y Gradiente en 1D.

Las gráficas 3 y 4 muestran el análisis de detección de los bordes al utilizar una máscara de forma bidimensional, con parámetros de sigma, ancho de gaussiana y error de detección igual que el análisis anterior. En este caso el error de detección disminuye considerablemente, es decir la desviación estándar es menor respecto al análisis anterior, pero no se encuentra una relación clara entre el valor de sigma en función con la exactitud de detección del borde.



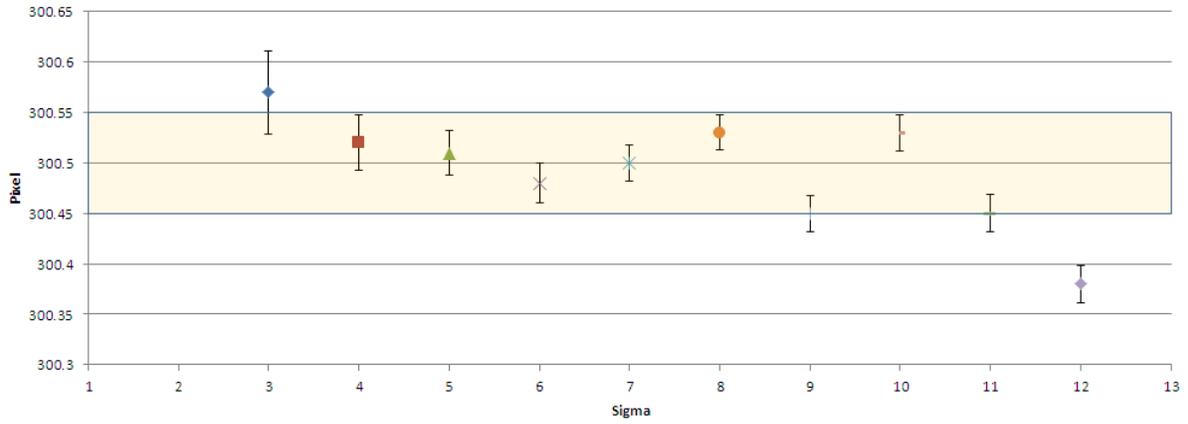
Gráfica 3. Detección de borde izquierdo en 300.5 p con kernel Gauss y Gradiente en 2D.



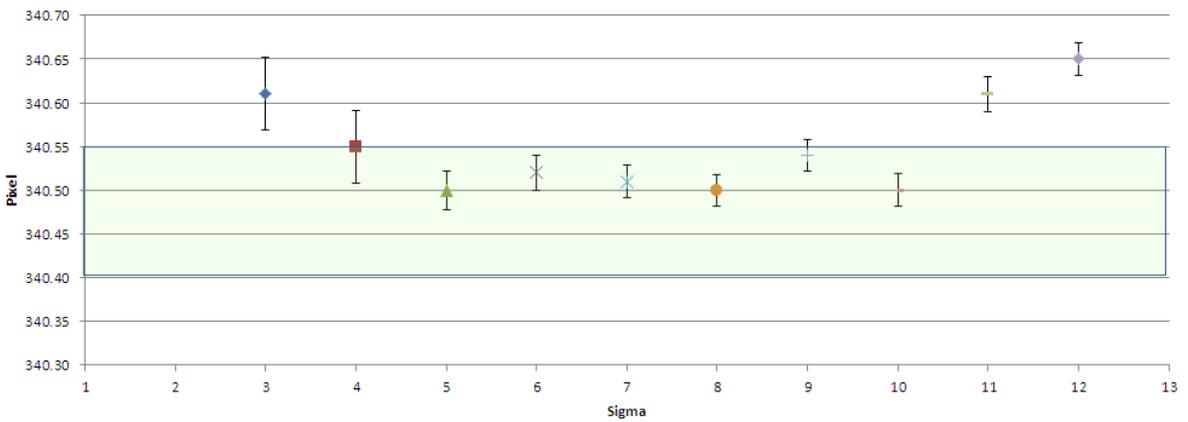
Gráfica 4. Detección de borde derecho en 340.5 p con kernel Gauss y Gradiente en 2D.

### 3.9.3 Detección de bordes con máscaras en 1D y 2D Gauss y Laplaciano

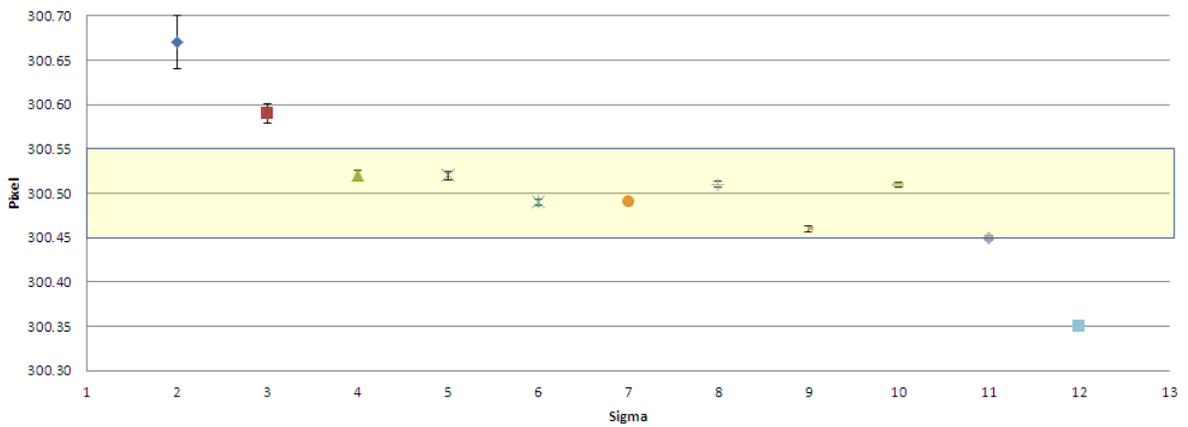
La segunda técnica a analizar es el uso de Laplaciano y la detección de borde al cruce por cero de con kernel de filtrado y derivación en 1D y 2D. Los parámetros de sigma y el ancho de la Gaussiana permanecen igual que el análisis anterior y los resultados se muestran en las gráficas 5 hasta 8.



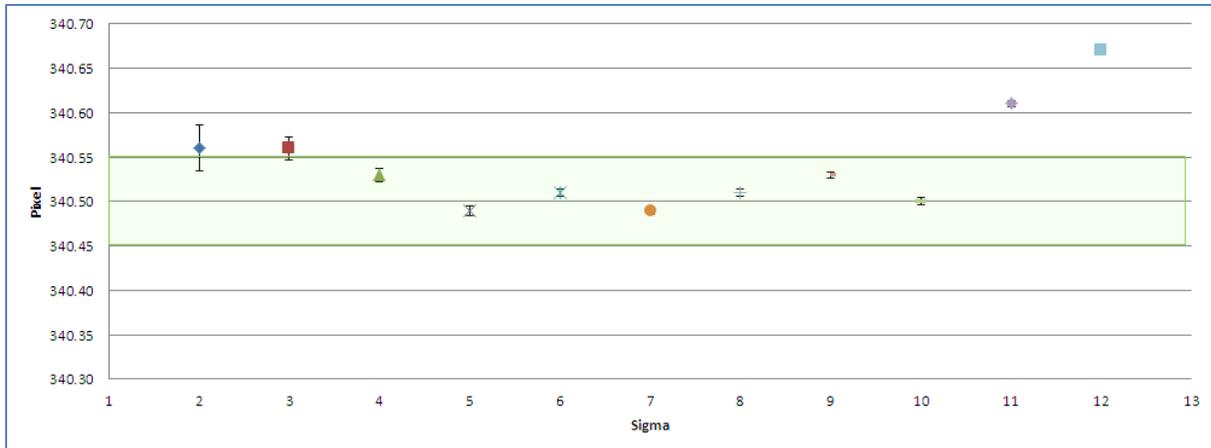
Gráfica 5. Detección de borde izquierdo en 300.5 p con kernel Gauss y Laplaciano en 1D.



Gráfica 6. Detección de borde derecho en 340.5 p con kernel Gauss y Laplaciano en 1D.



Gráfica 7. Detección de borde izquierdo en 300.5 p con kernel Gauss y Laplaciano en 2D.



Gráfica 8. Detección de borde derecho en 340.5 p con kernel Gauss y Laplaciano en 2D.

Como se puede observar al analizar las gráficas 7 y 8, el uso de máscaras en dos dimensiones muestran tener mayor exactitud en la detección del borde, en particular la técnica de Gauss y Laplaciano respecto a Gauss Gradiente. La ventaja principal en esta técnica es la detección del borde a nivel subpixel, a partir del cruce por cero de la función laplaciano y la solución a cero de la recta de interpolación de los píxeles adyacentes al encontrar el cambio de signo de la función, donde la exactitud de detección es por lo menos una centésima de pixel.

### 3.9.4 Detección de simetría de trazo de línea grabada en acero

Como se mencionó anteriormente el análisis por Laplaciano es susceptible a ruido en la imagen y en caso de procesar imágenes de baja calidad de impresión, por ejemplo el grabado sobre una superficie de metal, la detección de bordes por laplaciano es nula y la técnica del gradiente es la más adecuada. Como parte de la validación se realizó el análisis de seis imágenes de trazo de línea grabadas en acero, donde se determinó la geometría de simetría partir de la localización de sus bordes. Las imágenes muestran altos niveles de ruido debido a la superficie de grabado, además presentan irregularidad y discontinuidad en los bordes del trazo de línea, tal como se muestra en las imágenes 25 y 26.

Como valor de referencia de simetría entre bordes se determinó el centro de marca a través un algoritmo por filtro de cuadratura con Gabor y estadística robusta [3], mismo que es utilizado como técnica de detección de trazo de línea en el Laboratorio de la DMD de CENAM. Las imágenes se analizaron por la técnica de Gauss y Gradiente y la simetría se obtiene por MMC, en el caso del uso del Laplaciano se descartó debido al alto ruido en la imagen.

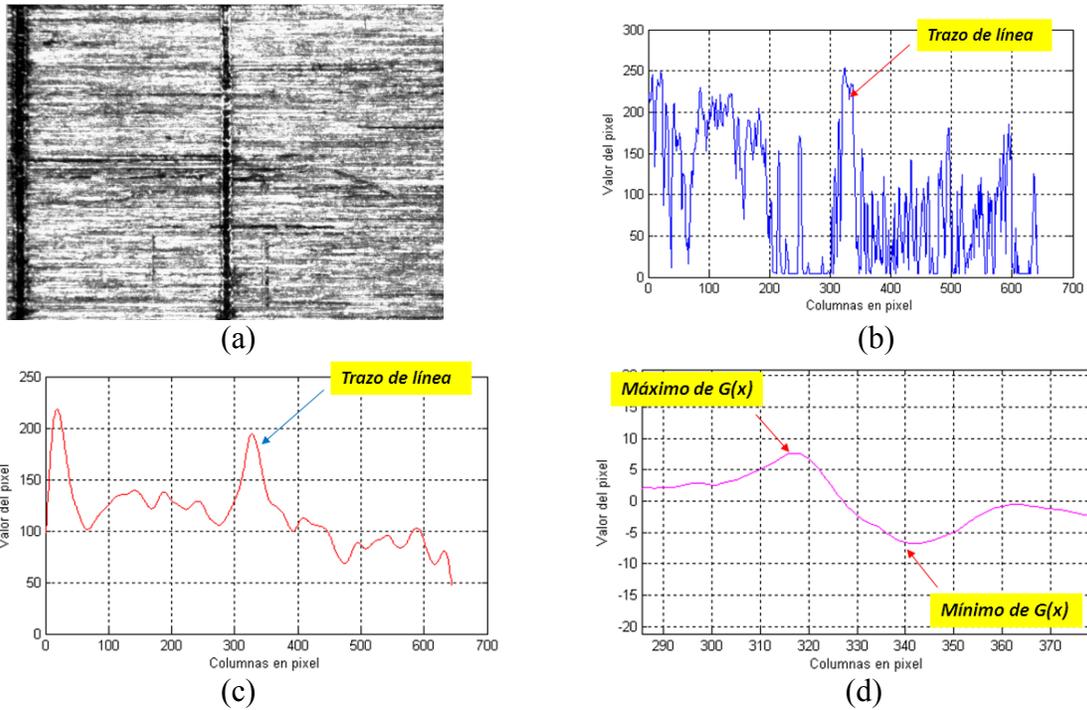


Figura 25. (a) Imagen “img0000” de trazo de línea grabado en metal, (b) Renglón de análisis de imagen, (c) Filtrado de renglón por Gauss con sigma igual a 7, (d) Función Gradiente de renglón.

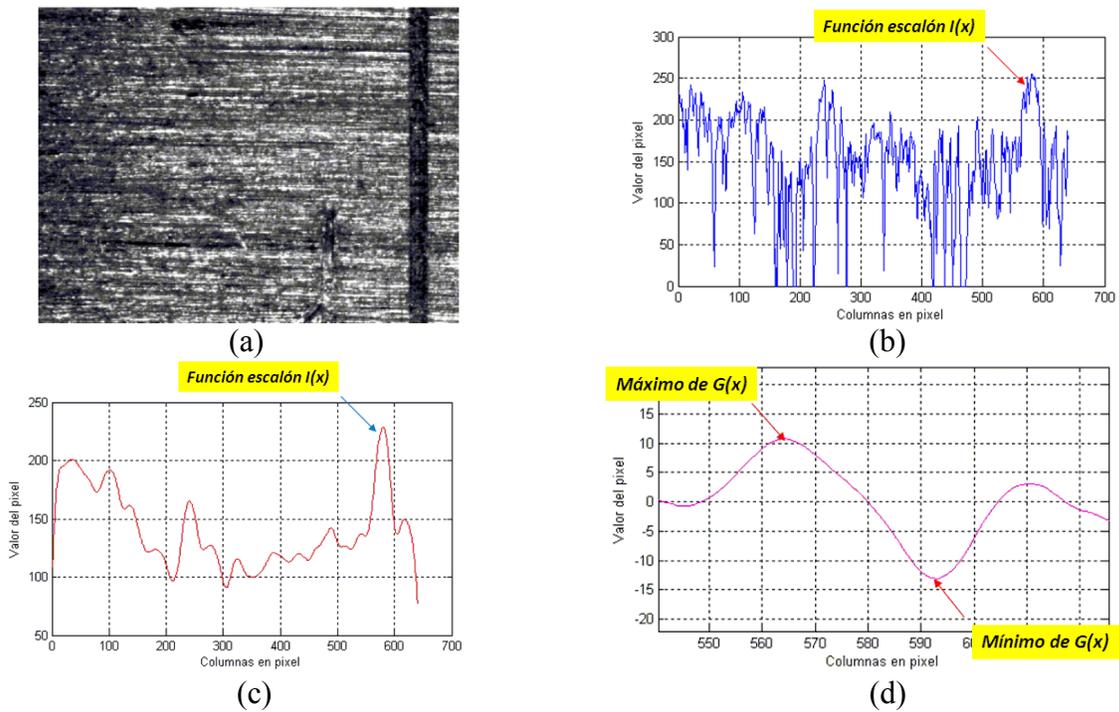


Figura 26. (a) Imagen “img00001” de trazo de línea grabado en metal, (b) Renglón de análisis de imagen, (c) Filtrado de renglón por Gauss con sigma igual a 7, (d) Función Gradiente de renglón.

En la tabla III se muestra los parámetros de detección de trazo de línea través de la simetría  $b$  y pendiente  $m$ . La comparación entre técnicas está determinada por el error de detección, que es la diferencia entre  $b_2$  menos  $b_1$ . La variabilidad de detección obedece principalmente a la irregularidad de los bordes que depende del grado de exactitud de la regla; por lo tanto la precisión de detección en imágenes con alto nivel de ruido queda determinada principalmente por el valor adecuado de sigma del filtro Gaussiano en correspondencia al nivel de ruido en la imagen.

Nombre de la imagen	Gabor y estadística robusta		Gauss Gradiente		Diferencia entre técnicas en pixel
	$m_1$	$b_1$	$m_2$	$b_2$	
Imag0000	0.0039	322.32	0.0028	323.23	0.9
Imag00001	0.0003	580.41	-0.0026	580.15	0.3
Imag0007	-0.0038	322.80	-0.0033	322.50	0.3
Imag0015	-0.0031	323.04	-0.0029	324.54	1.5
Imag0040	0.0022	321.74	-0.0027	324.10	2.4
Imag0069	0.0006	321.53	0.0006	322.57	1.0

Tabla III. Comparación de técnicas de detección con grabado de marca en metal.

La adecuada selección de la técnica de detección dependerá en gran medida de la calidad del grabado de la marca y del tipo de superficie. En el caso de reglas de vidrio de alta exactitud el grabado del trazo de línea muestra regularidad en sus bordes y la superficie permite una mejor iluminación de la ventana de análisis de la imagen. Por lo tanto para la detección de trazo de línea en este proyecto estará determinada por el filtro de Gauss con sigma igual a seis en combinación con el Laplaciano con curce por cero y el cálculo de simetría por MMC.

### 3.9.5 Tamaño de pixel

El tamaño de pixel  $\beta$  está determinado por la relación de longitud de la horizontal del campo de visión de la cámara medida en milímetros entre la misma longitud medida por el número pixeles del sensor. De tal manera que la detección de posición del trazo de línea medido en el mundo  $PR_i$  será igual al factor  $\beta$  por la posición del trazo de línea en pixeles  $PP_i$ , donde  $i$  representa la posición de la línea en el campo de visión (ecuación 23).

$$PR_i = \beta * PP_i \quad (23)$$

El proceso de calibración de  $\beta$  se obtiene de la misma manera que [3], donde se relaciona  $n$  posiciones del desplazamiento de trazo de la línea medido a lo largo de campo de visión de la cámara (ecuación 24). Cada posición del trazo de línea es medida por simetría entre bordes con unidades de pixeles y a su vez es medida por la posición de la platina medida por el IMD en unidades de longitud (mm), de esta manera se obtiene un sistema redundante de  $n$  ecuaciones al que se le da solución a  $\beta$  por cualquier método tal como se muestra en la ecuación 24.

$$\begin{aligned} PR_1 &= \beta * PP_{(1)} \\ &\vdots \\ PR_{n-1} &= \beta * PP_{(n-1)} \\ PR_n &= \beta * PP_{(n)} \end{aligned} \quad (24)$$

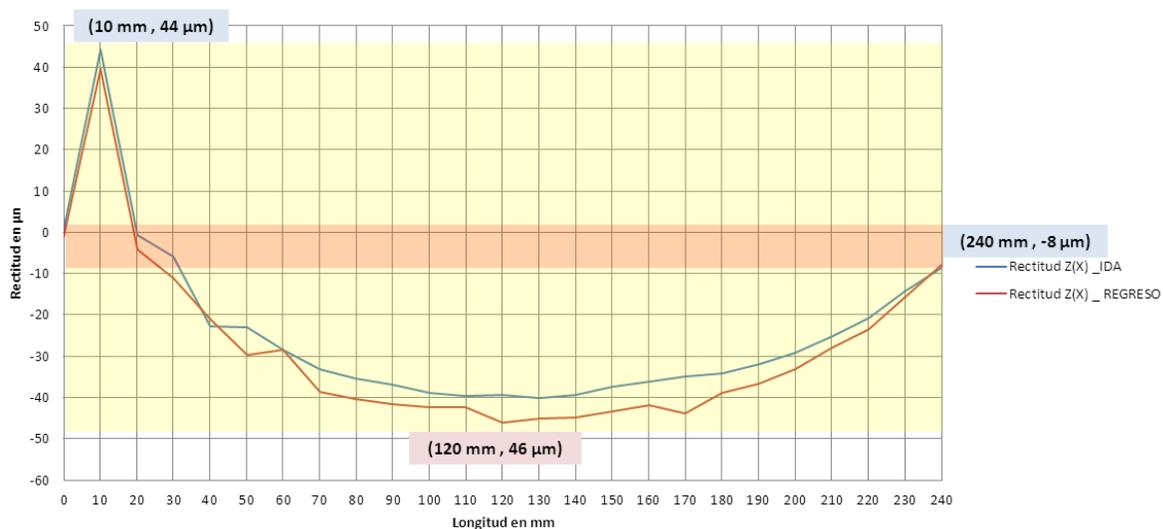
La tabla IV muestra el proceso de calibración para determinar  $\beta$  del sistema de visión. El procedimiento consiste en desplazar un trazo de línea en siete posiciones a lo largo del campo de visión de la cámara, donde la relación está dada por 255 nm entre pixel, los cuales dependen de la amplificación del sistema de 10X y una resolución del sensor CMOS en la horizontal de 2592 pixeles.

No. de línea	Posición de eje X de platina medida por IMD en mm	Detección de línea medido por simetría de bordes en pixel	Factor de tamaño de pixel mm/pixel	Posición de línea sobre el eje X medida en mm
1	0	0	---	---
2	0.127 28	499.748	0.000 255	0.640 1
3	0.210 31	825.616	0.000 255	0.640 1
4	0.341 02	1339.032	0.000 255	0.640 1
5	0.429 99	1688.358	0.000 255	0.640 1
6	0.515 83	2025.641	0.000 255	0.640 0
7	0.619 77	2433.844	0.000 255	0.640 0
---	---	Promedio	0.000 255	0.640 1
---	---	Desviación estándar	0.000 000 03	0.000 04

Tabla IV. Determinación del factor de tamaño de pixel

### 3.9.6 Error de alineación, error de rectitud y error de enfoque

En la gráfica 9 se muestra las curvas de ida y vuelta del movimiento en el eje Z en el recorrido de la platina de medición sobre el eje X, el IMD se alineó con un detector de cuatro cuadrantes. El error de alineación de IMD se marca en color rojo y se determina como la diferencia de la posición inicial menos la posición final, la cual se encuentra alrededor de los 8  $\mu\text{m}$ . Los valores de la curva muestran dos puntos de inflexión, un máximo en 10 mm con desplazamiento en Z de 44  $\mu\text{m}$  y un mínimo en la posición de 120 mm con un desplazamiento en Z de -46  $\mu\text{m}$ , los cuales se consideran como un error de Abbe, que a su vez se traducen como error de longitud en la medición de desplazamiento con el IMD.



Gráfica 9. Error en el eje Z respecto al recorrido de la platina en X.

La gráfica 10 muestra el error de detección de trazo de línea al variar el enfoque, asumiendo que la regla se encuentra estática y la única variable de influencia es la pérdida de foco en la captura de la imagen. El error de enfoque indica las limitantes de algoritmo al determinar la posición de la línea en la imagen, además determinar un intervalo de confianza donde la pérdida de enfoque tiene menor impacto como error de longitud. En este caso para un desenfoque de 0 hasta 16  $\mu\text{m}$  se espera un error en longitud de hasta 100 nm el cual se considerada como fuente de incertidumbre en la medición. Los errores de enfoque mayores a este intervalo no serán considerados para este análisis, debido a que las imágenes capturadas por el sistema de visión no presentan errores de tal magnitud.



Gráfica 10. Error de enfoque en la detección de la simetría del trazo de línea

# Incertidumbre de medición

---

## 4.1 Método GUM

El método de estimación de la incertidumbre de medida que se muestra en este trabajo sigue los lineamientos de la “Guide to the Expression of Uncertainties in Measurements” GUM [5], publicada por ISO, BIMP, OIML y otras instituciones internacionales. Esta Guía establece las reglas generales para la evaluación y expresión de incertidumbre de medida destinada a ser aplicables a un amplio espectro de mediciones.

El termino incertidumbre como lo menciona la GUM es *“una indicación cuantitativa de la calidad del resultado, de forma que quienes utilizan dicho resultado puedan evaluar su idoneidad para ser comparable contra valores de referencia a especificaciones y normas”*. El significado de incertidumbre de medida es *“una duda sobre la validez del resultado de una medición”*, es decir, no es posible conocer exactamente el resultado de medición, debido a la influencia de efectos sistemáticos y aleatorios relacionados con el desconocimiento del mensurando tales como:

- El efecto de las condiciones ambientales en la medición.
- Lecturas sesgadas en instrumentos analógicos.
- Resolución finita en instrumentos digitales.
- Valores erróneos en patrones o sistemas de referencia
- La implementación del método de medición.
- Variación en las observaciones de la medición con condiciones aparentemente idóneas.

De esta manera el término de incertidumbre de medida según el VIM [16] se define como *“El parámetro asociado al resultado de una medición, que caracteriza la dispersión de los valores que podrían ser razonablemente atribuidos al mensurando”*. Por lo tanto la incertidumbre de medida está relacionada con las variables de influencia en la medición que no necesariamente son independientes entre sí, y su procedimiento de evaluación parte de dos métodos estadísticos: incertidumbre tipo A e incertidumbre tipo B. El primero se basa en el análisis estadístico de una serie de mediciones y se obtiene mediante la dispersión de datos de mediciones repetidas. El segundo método se relaciona con la dispersión de datos, a partir de fuentes de información tales como certificados de calibración, manuales e instrumentos, mediciones anteriores, condiciones ambientales, etc. Los dos tipos de incertidumbre se manejan de forma estadística y se les asigna una distribución de probabilidad.

Los pasos a seguir para la estimación de incertidumbre de medición según [ ] son:

- i. Definir los modelos físicos y matemáticos del mensurando.
- ii. Definir y organizar las magnitudes de influencia en la medición.
- iii. Cuantificar magnitudes de influencia y su dispersión.

- iv. Obtener la mejor estimación del mensurando.
- v. Determinar el intervalo del valor del mensurando a partir de un intervalo de confianza.

La definición del mensurando se da a través del modelo matemático de medición, el cual establece la relación del mensurando con las magnitudes de entrada. En la mayoría de los casos el mensurando  $Y$  no se mide directamente y se determina a partir de otras magnitudes de entrada  $X_i$ , tal es el caso de medición de *Lines Scales* con el IMLS donde la longitud medida de trazo de marca  $L_{med}$  se define por cuatro fuentes principales:

1. Condiciones ambientales en la medición,
2. Errores de medición con el IMD.
3. Errores de sujeción de mensurando en el sistema
4. Errores en la detección del trazo de línea.

## 4.2 Coeficientes de sensibilidad

La forma para determinar el impacto de las variables de influencia  $X_i$  en la medición es a través del coeficiente de sensibilidad  $c_i$ , el cual describe la razón de cambio del mensurado  $L_{med}$  respecto a las variables de influencia  $X_i$  y se determina a partir de la derivada parcial correspondiente. El impacto de está será grande cuando una pequeña variación de  $X_i$  cause una variación grande en  $L_{med}$ , cabe resaltar que la contribución de cada componente depende de la incertidumbre estándar de la misma, tal como se muestra en la ecuación 25, por lo tanto, se recomienda no eliminar alguna incertidumbre antes de estar seguro que el producto no es significativo. La incertidumbre estándar  $u_{x_i}$  \* está dada por la suma de contribuciones de “duda” en la medición a través de su clase y tipo de distribución.

$$c_i \cdot u_{x_i} = \frac{\partial Y}{\partial X_i} \cdot u_{x_i} \quad (25)$$

La incertidumbre tipo A relaciona los errores de rectitud, errores de alineación y detección de trazo de línea en la medición y el resultado al cuantificar siempre será una incertidumbre estándar con distribución normal (N). En el caso de la incertidumbre tipo B el tipo de distribución depende de la información del parámetro, por ejemplo certificado de calibración de la fuente laser, certificado del puente termométrico, resolución, deriva, histéresis, manuales, tablas, graficas, etc, y su distribución según sea el caso estará relacionada a una tipo rectangular (R) ó triangular (T).

En la tabla V se muestra los parámetros de influencia en la medición de reglas de alta exactitud con el IMLS. Cada fuente de incertidumbre está compuesta por las distintas variables de influencia  $X_i$ , donde determina su coeficiente de sensibilidad y el tipo distribución.

Parámetro de influencia	Fuentes de incertidumbre $X_i$	Coeficiente de sensibilidad $c_i = \frac{\partial L_{med}}{\partial X_i}$		$u_{x_i}$ *	Tipo de incertidumbre - Distribución
Condición ambiental de temperatura en la medición	Diferencia de temperatura del mensurando respecto a 20°C	$\frac{\partial L_{med}}{\partial \Delta t_e}$	$L\alpha_e$	• Variación de temperatura de laboratorio $\Delta t_{lab}$	Tipo B/R
				• Resolución del termómetro $T_{res}$	Tipo B/R
				• Calibración de	Tipo B/N

				termómetro $u T$		
	Coefficiente de expansión térmica	$\frac{\partial L_{med}}{\partial \alpha_e}$	$L \Delta t_e$	• Incertidumbre del coeficiente de expansión térmica $u \alpha_e$	Tipo B/R	
Medición con sistema interferométrico IML	Longitud de onda	$\frac{\partial L_{med}}{\partial \lambda}$	$\frac{m \cos \theta}{n}$	• Incertidumbre por la longitud de onda $u \lambda$	Tipo B/N	
	Conteo de franjas de interferencia	$\frac{\partial L_{med}}{\partial m}$	$\frac{\lambda \cos \theta}{n}$	• Incertidumbre por conteo de franjas $u m$	Tipo B/R	
	Índice de refracción del aire en la medición	$\frac{\partial L_{med}}{\partial n}$	$\frac{-\cos \theta m \lambda + LCM}{n^2}$	• Incertidumbre debido a presión $u p$	• Incertidumbre por la longitud de onda en el vacío $u \lambda$	Tipo B/N
				• Incertidumbre debido a temperatura $u T$		
				• Incertidumbre debido a humedad $u H$		
				• Incertidumbre en el índice de refracción del aire usando la formula corregida de EDLEN $u IDRA$		
	Índice de refracción del aire al inicio de la medición	$\frac{\partial L_{med}}{\partial n_i}$	$\frac{LCM \cos \theta}{n_i^2}$	• Incertidumbre debido a presión $u p$	• Incertidumbre por la longitud de onda en el vacío $u \lambda$	Tipo B/N
• Incertidumbre debido a temperatura $u T$						
• Incertidumbre debido a humedad $u H$						
• Incertidumbre en el índice de refracción del aire usando la formula corregida de EDLEN $u IDRA$						
Longitud de camino muerto	$\frac{\partial L_{med}}{\partial LCM}$	$\cos \theta \frac{1}{n} - \frac{1}{n_i}$	• Incertidumbre de camino muerto $u LCM$	Tipo A		
Error de alineación de IMD	$\frac{\partial L_{med}}{\partial \theta}$	$LCM \frac{1}{n_i} - \frac{1}{n}$ $-\frac{m \lambda}{n} \operatorname{sen} \theta$	• Incertidumbre de cálculo de ángulo teta $u \theta$	Tipo B/N		
Errores de montaje del mensurando	Line Scale	$\frac{\partial L_{med}}{\partial L}$	$\alpha_e \Delta t_e$	• Grado de exactitud del mensurando	Tipo B/R	
	Error de Coseno de alineación del mensurando	$\delta e_{\cos(x)}$	1	---	Tipo A	
	Error de Abbe respecto al eje Y	$\delta e_{Abbe y(x)}$	1	---	Tipo A	
	Error de Abbe respecto al eje Z	$\delta e_{Abbe z(x)}$	1	---	Tipo A	
	Error de alineación del mensurando en relación con eje Z	$\delta e_{plano z(x)}$			---	Tipo A
	Error por deformación debido a la sujeción y apoyos	$\delta e_{sop}$	1		---	Tipo A
Detección de trazó de línea	Error de enfoque por rectitud de las guías	$\delta l_{foc}$	1	---	Tipo B	
	Error de resolución	$\delta l_{res}$	1	---	Tipo B/N	
	Error de repetibilidad	$\delta l_{rep}$	1	---	Tipo A	

Tabla V. Parámetros de influencia y fuentes de incertidumbre en la calibración de reglas de alta exactitud con IMLS.

La incertidumbre estándar combinada  $u_c$  se obtiene como la raíz de la suma cuadrática de las contribuciones de cada fuente (ver ecuación 26), donde las contribuciones más grandes dominan la ecuación. En caso de querer reducir la incertidumbre de medición por mejoras del procedimiento (instrumentación o por condiciones ambientales) únicamente la reducción de las contribuciones grandes dará resultados satisfactorios.

$$u_c = \sqrt{\sum_{i=1}^n c_i \cdot u_{x_i}^2} \quad (26)$$

La incertidumbre estándar combinada expresa un “nivel de confianza” y representa un intervalo que contiene el valor del mensurando con una probabilidad  $p$  de 68% aproximadamente. Para que la probabilidad en  $u_c$  sea mayor, el intervalo de incertidumbre se expande a través de un factor de cobertura  $k$  y este nuevo valor se le denomina incertidumbre expandida  $U$  (ecuación 27). El factor de cobertura más común es  $k = 2$  que representa un nivel de confianza de aproximadamente 95%, este valor es utilizado para la  $U$  reportada en los certificados de calibración emitidos por CENAM.

$$U = k \cdot u_c \quad (27)$$

En la tabla VI se describe y cuantifica las fuentes de influencia en la medición con IMLS para reglas de alta exactitud. Para la calibración se considera reglas de vidrio de grado 00 y 01, es decir, se prevén bordes de trazos de línea regulares y bien definidos. Las condiciones ambientales están determinadas inicialmente por la variación de temperatura en el laboratorio durante la calibración  $\Delta t_{lab}$  y la diferencia de temperatura del mensurando  $\Delta t_e$ , las cuales fueron medidas por un puente termométrico y resistencias de platino como sensor. La medición con el IMD estará dada por una cabeza laser marca HP modelo 5519A con longitud de onda  $\lambda$  alrededor de los 633 nm y óptica lineal. Las compensaciones por el IDRA se realizan de forma manual y su incertidumbre se determina a través de la ecuación corregida de Edlen, la tabla se complementa con diferentes errores que relaciona el modelo matemático de medición, como detección, alineación y rectitud.

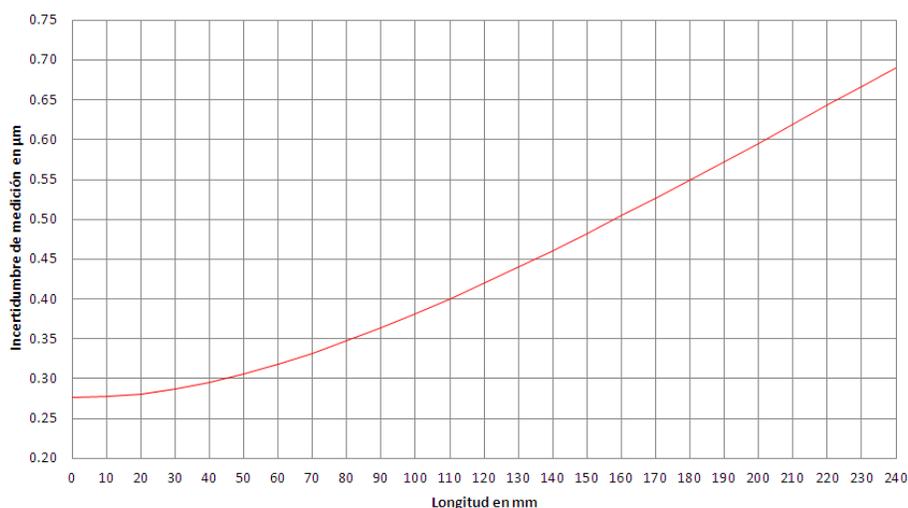
Fuentes de incertidumbre $X_i$ – incertidumbre $u_{x_i}$		Valor	Fuentes de incertidumbre $X_i$ – incertidumbre $u_{x_i}$		Valor
Grado "01" de exactitud de la escala según NORMA JISB7541 (*)	$G$	2.24E-03 mm	Índice de refracción del aire en la medición	$n$	1.000217051
Error en alineación vertical en mm	$L$	1.65E-02 mm	Incertidumbre del índice de refracción de la medición	$u_n$	9.03E-08
Ángulo de error de alineación de la escala en vertical	$e_{av}$	6.86E-05 rad	Longitud de camino muerto	$LCM$	3.98 mm
Incertidumbre de ángulo de error en vertical	$\phi_v$	4.44E-06 rad	Incertidumbre en el cálculo de camino muerto	$u(LCM)$	0.01 mm
Error en alineación en horizontal en mm	$u(\phi_v)$	5.07E-04 mm	Variación de temperatura en el laboratorio	$\Delta t_{lab}$	0.5 °C
Ángulo de error de alineación de la escala en horizontal	$e_{ah}$	2.11E-06 rad	Desviación de temperatura de la escala respecto a 20°	$\Delta t_e$	0.5 °C
Incertidumbre de ángulo de error en horizontal	$\phi_h$	1.00E-07 rad	Coefficiente de expansión térmica del material de la escala	$\alpha_e$	8.50E-06 1/°C
Error debido a los soportes de la escala	$u(\phi_h)$		Incertidumbre de coeficiente de expansión térmica	$u(\alpha_e)$	8.50E-07 1/°C
Error de alineación de laser	$e_{AL}$	1.00E-01 mm	Resolución del termómetro	$T_{res}$	0.01 °C

Ángulo de error de alineación del laser	$\theta$	4.17E-04 rad	Error de coseno de alineación del mensurado con el sistema de medición	$\delta e_{\cos(x)}$	2.35E-09 mm
Número de franjas (*)	$m$	3.79E+05	Error Abbe de alineación de IMD en eje Y, respecto al razo de los trazos de línea de "line scale"	$\delta e_{Abbe\ y(x)}$	3.33E-04 mm
Incertidumbre en el número de franjas	$u(m)$	0.02	Error Abbe de alineación de IMD en eje Z, respecto al razo de los trazos de línea de "line scale"	$\delta e_{Abbe\ y(x)}$	4.17E-05 mm
Longitud de onda	$\lambda$	6.33E-04 mm	Error de alineación de plano del apoyo de la line scale en la platina móvil respecto al eje Z	$\delta e_{plato\ z(x)}$	9.39E-12 mm
Resolución del laser	$L_{res}$	4.00E-05 mm	Error de deformación por soportes	$\delta e_{ds}$	
Incertidumbre del laser	$u(\lambda)$	5.4E-13 mm	Error de resolución en la detección de la línea	$\delta l_{res}$	2.55E-04 mm
Índice de refracción del aire inicial en la medición	$n_i$	1.000217415	Error de repetibilidad en la detección de la línea	$\delta l_{rep}$	4.00E-05 mm
Incertidumbre de índice de refracción inicial	$u(n)_i$	8.95E-08	Error de detección por pérdida de enfoque	$\delta l_{foc}$	1.00E-04 mm
Incertidumbre de calibración del termómetro	$u(T)$	3.00E-02 °C			

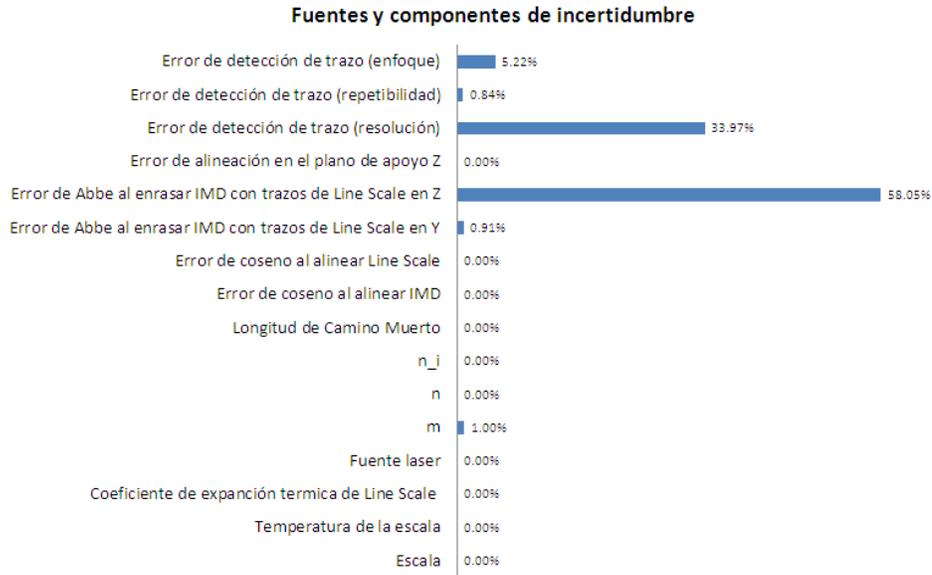
Tabla VI. Valores de parámetros de fuentes de incertidumbre en la calibración de reglas de alta exactitud con IMLS.

### 4.3 Estimación de incertidumbre del IMLS

En la gráfica 11 se muestra la curva de la incertidumbre expandida del sistema IMLS respecto a la longitud de la *line Scale*. Como se observa en la gráfica la curva de incertidumbre no es lineal e inicia a partir de un valor de 28 nm en la posición cero. Las fuentes de incertidumbre que están asociadas a este valor son principalmente el error de detección por el enfoque, el error de resolución en la detección (tamaño de pixel) y el error de Abbe en Z al enrasar los trazos línea al haz laser del IMD, tal como se muestra en al grafica 12.

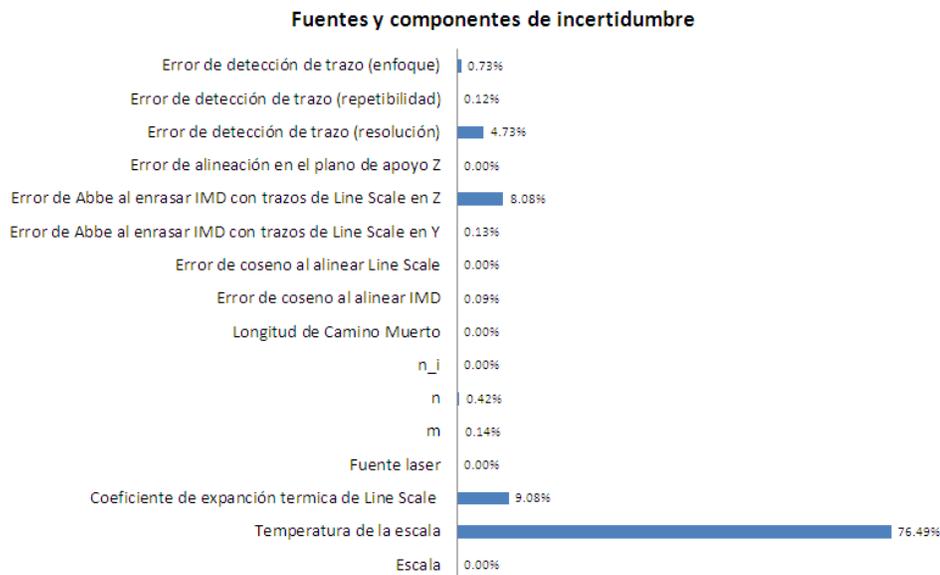


Gráfica 11. Incertidumbre de medición en el alcance del sistema IMLS.

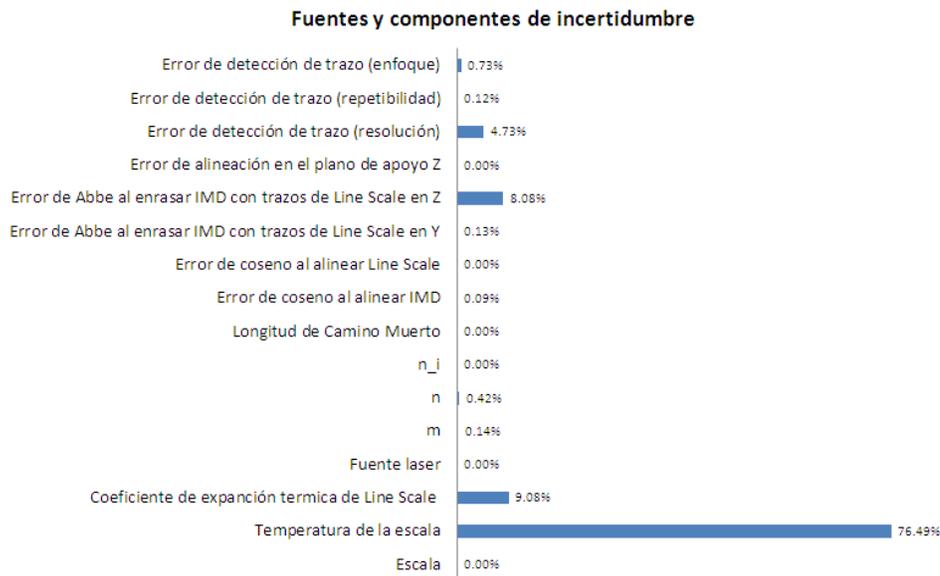


Gráfica 12. Variables de influencia en la medición en la posición cero en el sistema IMLS.

Una vez que se incrementa la longitud de medición del IMLS, la contribución de otras variables de influencia tienen mayor impacto en la medición. Por ejemplo para el caso de la longitud de 120 mm, la influencia de temperatura de la escala comienza ser crítica en la medición debido al coeficiente de expansión térmica del material de la regla, tal como se muestra en la gráfica 13. Para el caso de una medición de longitud de hasta 240 mm (gráfica 14), la influencia de temperatura llega a ser un 77% de la contribución total de la incertidumbre, por lo tanto y con base a esta la simulación se puede afirmar que la temperatura es la principal variable de influencia en la medición.



Gráfica 13. Variables de influencia en la medición en la posición 120 mm en el sistema IMLS.



Gráfica 14. Variables de influencia en la medición en la posición 240 mm en el sistema IMLS.

En la tabla VII se muestra en forma de resumen las capacidades de medición de nueve laboratorios con sistemas de medición de reglas similares al propuesto, a través de un sistema de visión y el uso de escalas interferométricas. La comparación se basa en la nueva capacidad de medición en la medición de reglas de alta exactitud propuesta con la actualización del sistema IMLS y la nueva estimación de incertidumbre en la medición. Para fines de esta comparación la incertidumbre se calculó hasta una longitud de 240 mm.

NMI	Técnica de medición	Alcance de medición	Incertidumbre de medida	Incertidumbre para longitud de 240 mm
BEV, AUSTRIA	1-D measuring machine and video microscope	0.01 - 3000 mm	Q[0.4, 0.0009L] L en mm, U en $\mu\text{m}$	U = 460 nm
MIKES, FINLAND	Video microscope and interferometer	0.01- 1165 mm	Q[6.2, 0.082L] L en mm, U en nm	U = 20 nm
NPLI, INDIA	UMM and laser interferometer	0.01 – 100 mm	Q[0.6, 2.5L] L en m, U en $\mu\text{m}$	U = 850 nm
INRIM, ITALY	1-D comparator with laser interferometer, CCD/optical microscope	0.1 - 280 mm	Q[80, 0.87L] L en mm, U en nm	U = 223 nm
VSL, NETHERLANDS	Laser interferometer and video microscope	0.01 - 100 mm	Q[60, 0.3L] L en mm, U en nm	U = 94 nm
GUM, POLONIA	1-D comparator and CCD microscope	1 - 500 mm	Q[198, 0.41L] L en mm, U en nm	U = 221 nm
CEM, SPAIN	Laser interferometer and video microscope	0.01 – 100 mm	Q[60, 0.3L] L en mm, U en nm	U = 93 nm
METAS, SWITZERLAND	2-D mask comparator and CCD microscope	0.01 – 600 mm	Q[20, 0.1L] L en mm, U en nm	U = 31 nm
NPL, UNITED KINGDOM	Interferometer	0.01 – 400 mm	(0.01 + 5E-04L) L en mm, U en $\mu\text{m}$	U = 130 nm
CENAM, MÉXICO	Laser interferometer and CCD microscope	0.01 – 240 mm	Q[8.802E-12, 7.913L] L en mm, U en nm	U = 630 nm

Tabla VII. CMC de longitud de NMI en la calibración de reglas de alta exactitud.

En esta comparación la incertidumbre de medición con el IMLS muestra una reducción considerable del 50% aproximadamente a la ofrecida actualmente ( $U = 1250 \text{ nm}$ ) ver tabla II. Además es indicador de mejora en el servicio de calibración de reglas de alta exactitud que ofrece CENAM actualmente.

Condiciones experimentales

5.1 Mensurando

La etapa de experimentación consiste en la validación del sistema de medición en condiciones de laboratorio, a través de la calibración de una regla patrón de alta exactitud, marca MITUYO, modelo HL250. El grado de la regla es 01 según la norma japonesa JISB7541 con error de exactitud de  $1.25 \mu\text{m}$  en un alcance de medición de 250 mm. Su clasificación es vidrio con bajo coeficiente de expansión térmica ( $8.5 \times 10^{-8} \frac{1}{^\circ\text{C}}$ ), perfil rectangular con dimensiones externas de 280 mm (largo) x 20 mm (ancho) x 10 mm (alto). Las líneas son grabadas en cromo con resolución de 1 mm y cuenta con marcas de alineación cada 5 mm. Los valores de calibración de la regla se reportan cada 10 mm y fueron realizados por los laboratorios primarios NIST y PTB en una y dos ocasiones respectivamente, ver figura 27

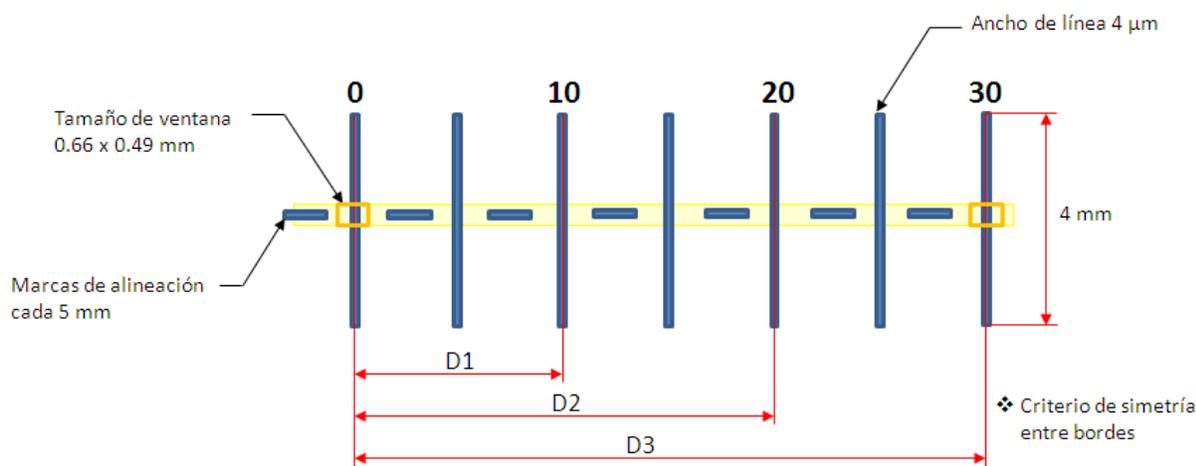


Figura 27. Características de la regla Mitutoyo HL250

En la tabla VIII se muestra en forma de resumen las características de los sistemas de medición con que se determinaron los errores de medición de la regla.

Laboratorio NMI	Sistema de referencia	Tipo de sensor	Criterio de detección de trazo de línea	Tamaño de ventana en $\mu\text{m}$	Medición de desplazamiento de eje	Temperatura de calibración $^\circ\text{C}$	Incertidumbre $U$ con factor de cobertura $k = 2$
NIST (2002)	NIST Line Scale Interferometer	Electro-optical detector	Simetría entre borde	160	Interferómetro aislado en cámara ambiental. Corrección por temperatura, presión y	$20 \pm 0.005$	$(30+0.1L)$ L en mm, U en nm

					humedad		
PTB (2010)	PTB Optical mask Comparator LMS 2020 Leica	Microscopio	Borde derecho	160	Interferómetro en cuarto limpio. Corrección por cambio de temperatura, presión y humedad	$20 \pm 0.07$	$50 \text{ nm}^2 + 30L^2 \text{ }^{1/2}$ <i>U</i> en nm y <i>L</i> en m
PTB (2016)	PTB Nanometer Comparator	Microscopio fotoelectrónico	Simetría entre bordes	100	Interferómetro al vacío	$20 \pm 0.01$	$30^2 + 30L^2 \text{ }^{1/2}$ <i>U</i> en nm y <i>L</i> en m

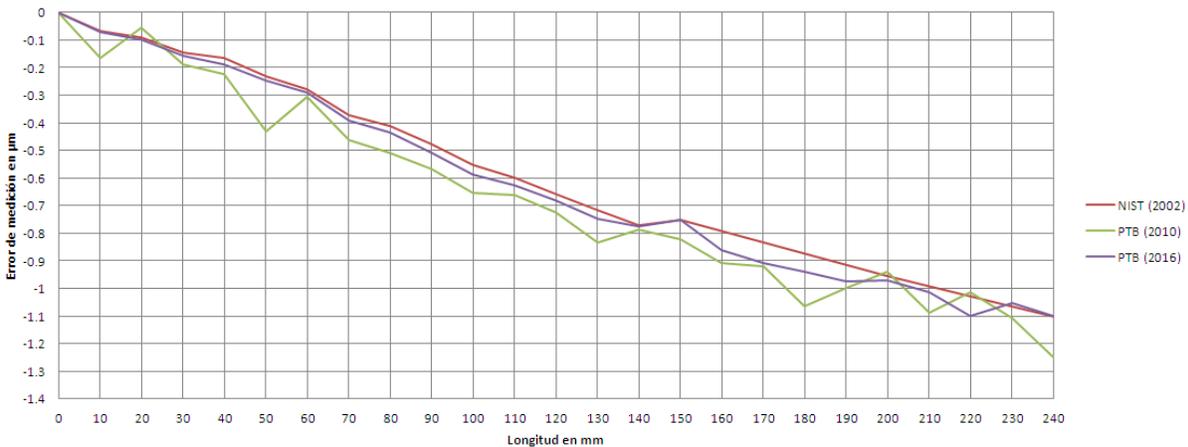
Tabla VIII. Características de sistemas de referencia de certificados de calibración.

Un punto en común entre los sistemas de medición es el estricto control de ambiental en la medición de desplazamiento con las escalas interferométricas. Para lograr el control se utiliza una cámara ambiental o un cuarto limpio y se realizan correcciones por temperatura, presión y humedad, o, la medición se realiza al vacío donde la influencia de estas variables disminuye. Respecto al intervalo de temperatura durante el tiempo de calibración los laboratorios reportan un error de control por debajo de los  $0.07 \text{ }^\circ\text{C}$ , el cual es indicador del control especial que se tiene sobre la variable  $\alpha_e$ , y su impacto como error de longitud. Caso contrario sucede con el sistema de medición propuesto, donde las condiciones ambientales y la corrección del IDRA están dadas por los gradientes de presión, temperatura y humedad que están presentes en el volumen del laboratorio durante la calibración y representan variables importantes de influencia en la medición.

En la tabla IX se muestra el error de medición de la regla determinado por los certificados de calibración de NIST en 2002, PTB en 2011 y PTB en 2016. La selección de valores de referencia para la validación estará dada por el criterio de simetría entre bordes, donde únicamente las calibraciones de NIST y PTB en 2010 cumplen este requisito. La importancia de utilizar un mismo criterio de detección se muestra en la gráfica 15, donde la curva del error de medición al utilizar el criterio del borde derecho (en color verde) presenta inconsistencias o picos respecto a las calibraciones realizadas por la técnica simetría entre bordes, y es lógico, debido a que la posición de trazo de línea únicamente se define por las inconsistencias de un solo borde y no por la influencias de ambos.

Valor nominal mm	Error de medición NIST $\mu\text{m}$	Error de medición PTB* $\mu\text{m}$	Error de medición PTB ** $\mu\text{m}$	Valor nominal mm	Error de medición NIST $\mu\text{m}$	Error de medición PTB* $\mu\text{m}$	Error de medición PTB ** $\mu\text{m}$
<b>0</b>	0	0	0	<b>130</b>	-0.718	-0.834	-0.747
<b>10</b>	-0.068	-0.166	-0.071	<b>140</b>	-0.772	-0.786	-0.776
<b>20</b>	-0.092	-0.054	-0.098	<b>150</b>	-0.750	-0.823	-0.753
<b>30</b>	-0.144	-0.190	-0.159	<b>160</b>	---	-0.907	-0.861
<b>40</b>	-0.166	-0.225	-0.189	<b>170</b>	---	-0.918	-0.907
<b>50</b>	-0.233	-0.431	-0.248	<b>180</b>	---	-1.065	-0.939
<b>60</b>	-0.280	-0.307	-0.292	<b>190</b>	---	-0.997	-0.975
<b>70</b>	-0.373	-0.464	-0.392	<b>200</b>	-0.954	-0.939	-0.970
<b>80</b>	-0.412	-0.509	-0.436	<b>210</b>	---	-1.087	-1.013
<b>90</b>	-0.477	-0.566	-0.509	<b>220</b>	---	-1.014	-1.099
<b>100</b>	-0.552	-0.654	-0.588	<b>230</b>	---	-1.106	-1.054
<b>110</b>	-0.601	-0.661	-0.626	<b>240</b>	---	-1.247	-1.101
<b>120</b>	-0.659	-0.726	-0.680	<b>250</b>	-1.139	-1.275	-1.162

Tabla IX. Valores de calibración de la regla Mitutoyo en los años 2002, 2010 y 2016..

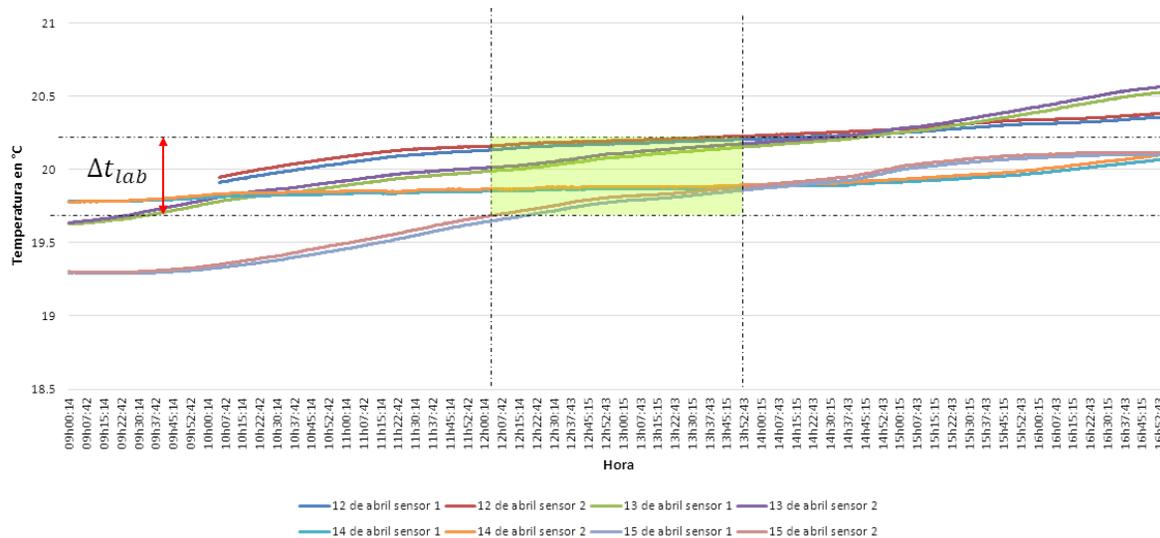


Gráfica 15. Error de medición de la regla Mitutoyo.

Otro punto importante para la selección de los valores de referencia es el número de trazos de línea calibradas de la regla, mismos que permitirán definir un comportamiento puntual del sistema en todo su alcance de medición. En este contexto la selección de valores de referencia para la validación estará dada por los puntos de calibración del PTB 2016 los cuales se reportan cada 10 mm en todo el alcance de medición. El caso de los valores que reporta NIST quedan fuera de esta comparación, debido a que en el intervalo de 150 hasta 200 mm y 200 hasta 250 mm es necesario hacer interpolación.

## 5.2 Parámetros de calibración

La regla Mitutoyo HL250 en particular tiene un bajo coeficiente de expansión térmica, lo cual hace que la temperatura  $\Delta t_e$  no sea factor crítico en la medición y permita un error de longitud por dilatación térmica  $\Delta t_e = 0.5 \text{ }^\circ\text{C}$  de 10 nm en una longitud de 240 mm, lo cual es suficiente para las condiciones actuales de temperatura del laboratorio las cuales oscilan dentro de este intervalo. En la gráfica 16 se marca en un recuadro de color verde la estabilidad térmica  $\Delta t_e$ , y a su vez se determina el horario del día “ideal” para realizar la calibración de la regla.



Gráfica 16. Gradiente de temperatura de laboratorio.

La detección de la característica de simetría de trazo de línea en la captura de la imagen estará dada por el uso de máscaras bidimensionales a través de un filtro Gaussiano con  $\sigma$  igual a seis. Los bordes se determina por el uso del laplaciano y el cruce por cero de la función y la característica de simetría se determina a través de la linealización por MMC de los puntos medios entre bordes.

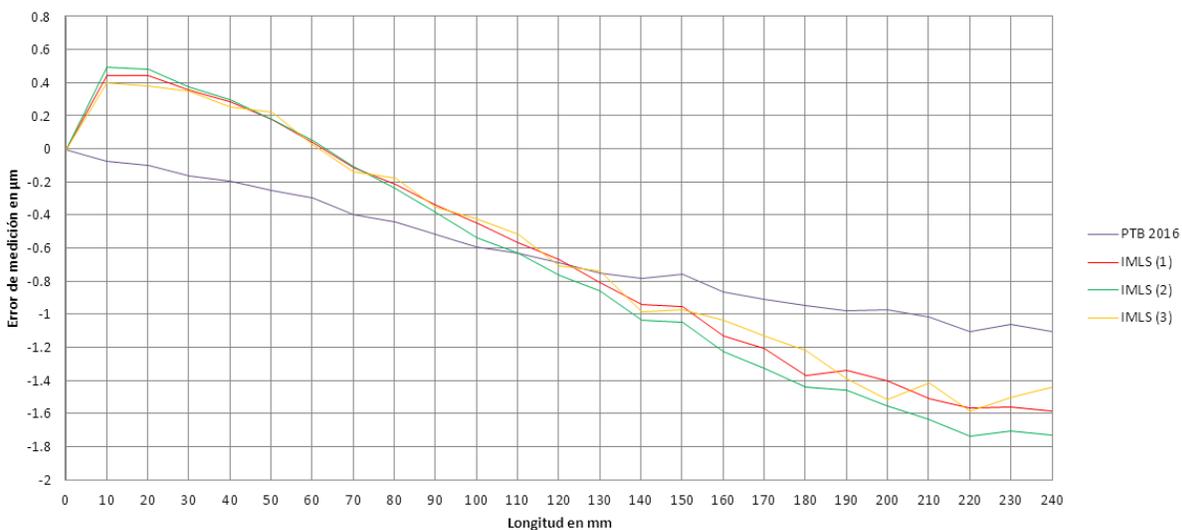
La etapa de experimentación consistió en realizar tres mediciones en días diferentes, en condiciones de operación normales del laboratorio. Las condiciones ambientales de calibración de la regla se muestran en la tabla X, en donde se especifica la temperatura del laboratorio  $T_{lab}$ , la cual en los tres casos fue de orden ascendente en un intervalo de  $20 \pm 0.5$  °C. También se detalla la temperatura de la regla, la cual fue medida por debajo de la temperatura de referencia, en el caso de la presión el valor rondo entre los 80791 y 81276 Pa y la humedad se mantuvo por arriba del 50%.

Número de medición.	Temperatura (°C)			Presión (Pa)		Humedad (%)		Índice de refracción del aire	
	$T_{aire(i)}$	$T_{aire(f)}$	$\Delta t_e - 20^\circ C$	$P_i$	$P_f$	$H_i$	$H_f$	$n_i$	$n$
1	20.17	20.33	-0.34	81126	81035	54	53	1.000217415	1.000217052
2	19.58	19.95	-0.54	81267	81209	62	61	1.000218229	1.000217803
3	19.48	19.51	-0.50	80873	80791	55	55	1.000217246	1.000217006

Tabla X. Condiciones ambientales durante la calibración de la regla Mitutoyo.

## Análisis de resultados

El resultado de calibración consta de tres repeticiones cada una con dos recorridos, uno de ida y uno de vuelta; con el objetivo de determinar si durante la medición algún elemento mecánico-óptico pudo haberse movido e influya en la repetibilidad del cálculo del error en la calibración de la regla. En la gráfica 17, en colores rojo, amarillo y verde se muestra las curvas del cálculo del error de medición de la regla calibrada por le IMLS, la cuales muestran un comportamiento muy similar entre ellas, aunque no así respecto a los valores de calibración del PTB (curva morada) donde el único punto de coincidencia es la posición de 120 mm.



Gráfica 17. Resultados de medición con IMLS respecto a resultados de medición del PTB.

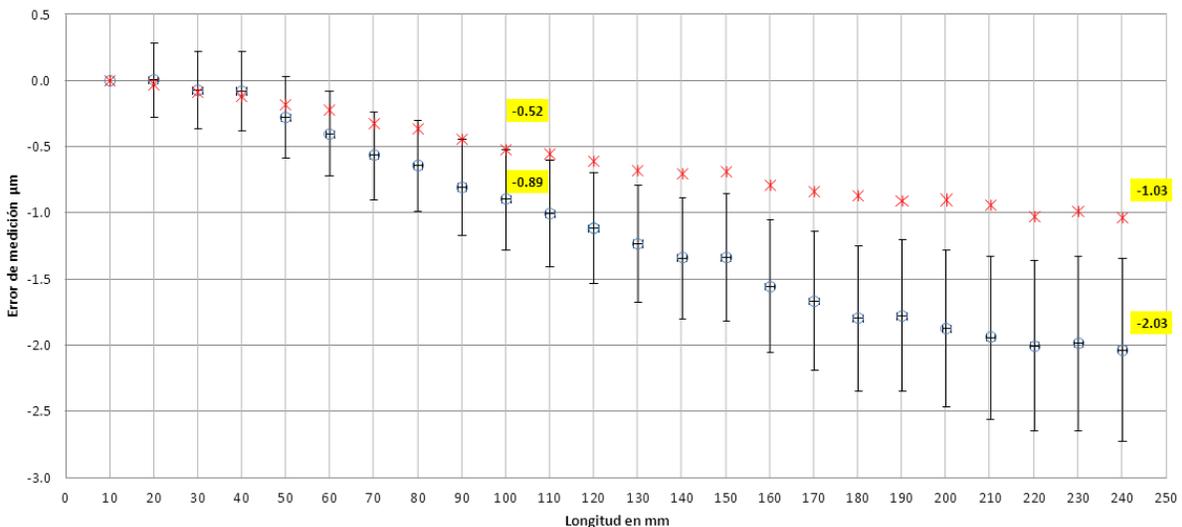
Al realizar un análisis minucioso de las curvas de calibración, se determinó que la pendiente de cada una está relacionada con un *offset* en la posición de 10 mm (de hasta 4 µm) y una intersección en la posición de 120 mm respecto a los valores de calibración del PTB. Esta tendencia en los valores de calibración se puede identificar bajo dos supuestos:

1. Un posible error que involucra la alineación de IMD con la platina de medición, la cámara y la regla, cabe mencionar que se intentó corregir en cada una de mediciones de la regla siempre encontrando el mismo comportamiento.
2. Un error de montaje de la óptica lineal que relaciona el error de Abbe, el cual percibe el cabeceo de la platina de medición sobre el recorrido del eje  $X$  y amplifica la posición que guarda el retroreflector y el interferómetro, el cual se traduce en un error en longitud.

Con el objetivo de obtener datos comparables en los errores de medición y tratando de explicar la pendiente de la curva de calibración antes descrita, se decidió analizar los datos de calibración bajo dos criterios. El primero consiste en cambiar la línea de referencia 0 a la posición de 10 mm y recalculamos los errores de medición, tanto del IMLS como del PTB tal como se muestra en tabla XI. Además, se agregó la incertidumbre de medición a cada punto para de calibración para verificar la equivalencia entre las calibraciones, tal como se muestra la gráfica 18.

Valor nominal mm	Error de medición PTB(2016) $\mu\text{m}$	Error de medición de CENAM $\mu\text{m}$			Valor nominal mm	Error de medición PTB(2016) $\mu\text{m}$	Error de medición de CENAM $\mu\text{m}$		
		1	2	3			1	2	3
0	---	---	---	--	130	-0.68	-1.25	-1.35	-1.13
10	0	0	0	0	140	-0.71	-1.39	-1.53	-1.38
20	-0.03	0.00	-0.01	-0.01	150	-0.68	-1.40	-1.54	-1.37
30	-0.09	-0.09	-0.12	-0.05	160	-0.79	-1.58	-1.72	-1.43
40	-0.12	-0.16	-0.20	-0.14	170	-0.84	-1.65	-1.82	-1.53
50	-0.18	-0.27	-0.32	-0.18	180	-0.87	-1.81	-1.93	-1.62
60	-0.22	-0.41	-0.44	-0.37	190	-0.90	-1.78	-1.95	-1.79
70	-0.32	-0.56	-0.60	-0.54	200	-0.90	-1.85	-2.05	-1.91
80	-0.37	-0.66	-0.73	-0.57	210	-0.94	-1.95	-2.13	-1.81
90	-0.44	-0.79	-0.88	-0.75	220	-1.03	-2.01	-2.23	-1.98
100	-0.52	-0.90	-1.03	-0.82	230	-0.98	-2.00	-2.20	-1.90
110	-0.56	-1.01	-1.13	-0.91	240	-1.03	-2.03	-2.22	-1.84
120	-0.61	-1.11	-1.26	-1.10	250	---	---	---	----

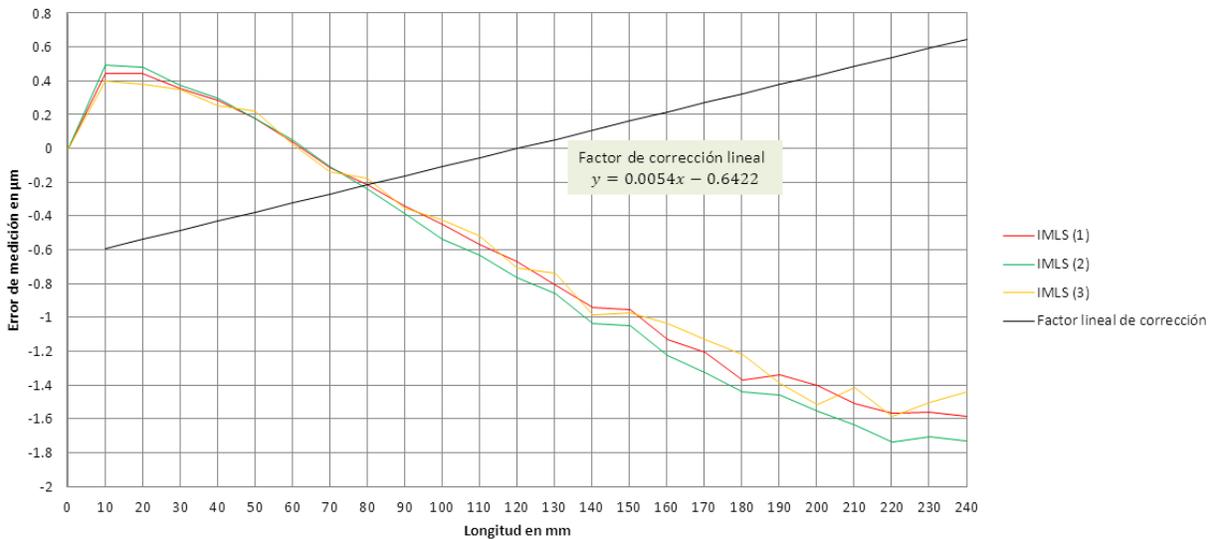
Tabla XI. Corrección de valores tomando como referencia “0” la posición de 10 mm de la regla Mitutoyo.



Gráfica 18. Resultados de medición cambiando la línea de referencia “0”.

Al utilizar este criterio los resultados del error de medición muestra una equivalencia en el intervalo de 0 hasta la posición de 100 mm, posteriormente la curva sigue una tendencia negativa la cual no es posible cubrir con la incertidumbre de medición.

El segundo criterio establece que la pendiente de la curva se debe a un error sistemático derivado de un posible error de alineación en el montaje de la óptica del IMD. Si se toma en cuenta que el error es repetible y reproducible en las mediciones se puede considerar un factor lineal de corrección y de esta manera determinar los nuevos valores de calibración que puedan ser comparables. En la gráfica 19 se muestra en color negro la curva de corrección lineal aplicable al error sistemático.



Gráfica 19. Factor lineal de corrección.

Como indicador de equivalencia entre las mediciones se calculó el Grado de Equivalencia (GE) con los errores reportados por el PTB, a través de la ecuación 28.

$$GE = \frac{|E_{LAB1} - E_{LAB2}|}{U_{LAB1}^2 + U_{LAB2}^2} \quad (28)$$

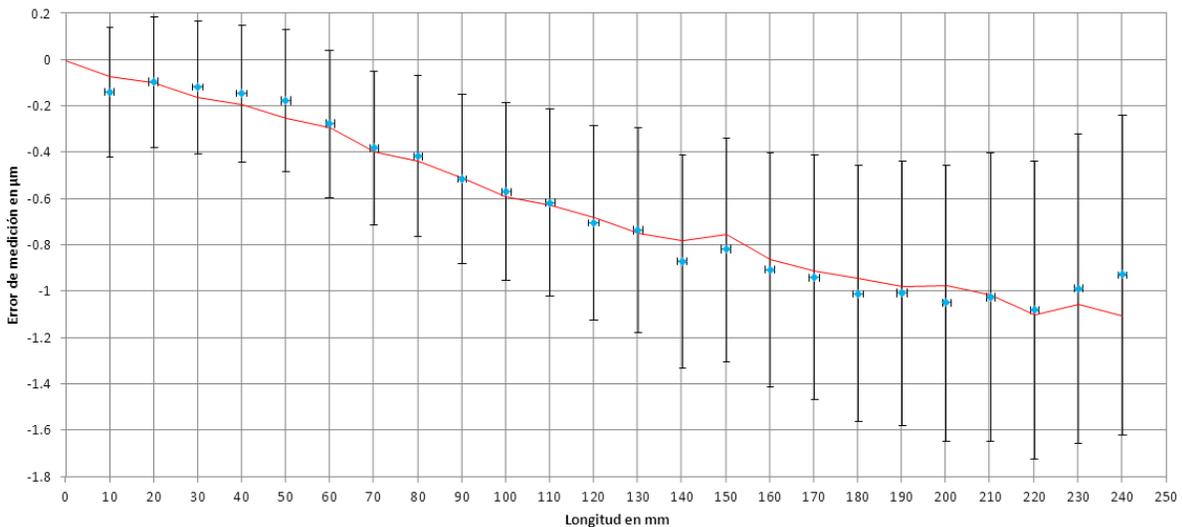
Dónde:

- $E_{LAB1}$  Error en el trazo determinado por el CENAM.
- $E_{LAB2}$  Error en el trazo determinado por el PTB.
- $U_{LAB1}$  Incertidumbre expandida laboratorio CENAM.
- $U_{LAB2}$  Incertidumbre expandida laboratorio PTB.

Un  $GE \leq 1$  es un valor aceptable, mientras que un  $GE > 1$  indica que no existe equivalencia entre los resultados de los laboratorios comparados

Valor nominal mm	Error de medición $\mu\text{m}$		Grado de Equivalencia	Valor nominal mm	Error de medición $\mu\text{m}$		Grado de Equivalencia
	PTB(2016)	CENAM			PTB(2016)	CENAM	
0	0.00	0.00	0.0	130	-0.75	-0.74	0.1
10	-0.07	-0.14	0.2	140	-0.78	-0.87	0.0
20	-0.10	-0.09	0.0	150	-0.75	-0.82	0.2
30	-0.16	-0.11	0.2	160	-0.86	-0.90	0.1
40	-0.19	-0.14	0.2	170	-0.91	-0.94	0.1
50	-0.25	-0.17	0.2	180	-0.94	-1.01	0.1
60	-0.29	-0.27	0.1	190	-0.98	-1.01	0.1
70	-0.39	-0.38	0.0	200	-0.97	-1.05	0.1
80	-0.44	-0.41	0.1	210	-1.01	-1.02	0.1
90	-0.51	-0.51	0.0	220	-1.10	-1.08	0.0
100	-0.59	-0.57	0.1	230	-1.05	-0.99	0.0
110	-0.63	-0.62	0.0	240	-1.10	-0.93	0.1
120	-0.68	-0.70	0.0	---	---	---	---

Tabla XII. Errores de calibración corregidos con factor lineal.



Gráfica 20. Corrección de la curva de calibración mediante factor lineal.

Tal como se muestra en la tabla XII y gráfica 20, el factor lineal corrige la pendiente de la curva de error y con la incertidumbre de medición estimada se obtienen equivalencia entre CENAM y PTB. El uso de un factor lineal para la corrección de la pendiente parece adecuado en el análisis de error de medida de la regla respecto a los valores de referencia del PTB, aunque la corrección es válida únicamente si el comportamiento de *offset* de la curva de calibración presenta la misma repetibilidad y reproducibilidad en sus mediciones en comparación con todos los mensurandos.

En la figura 28 se muestra sistema actualizado de medición IMLS en condiciones de laboratorio

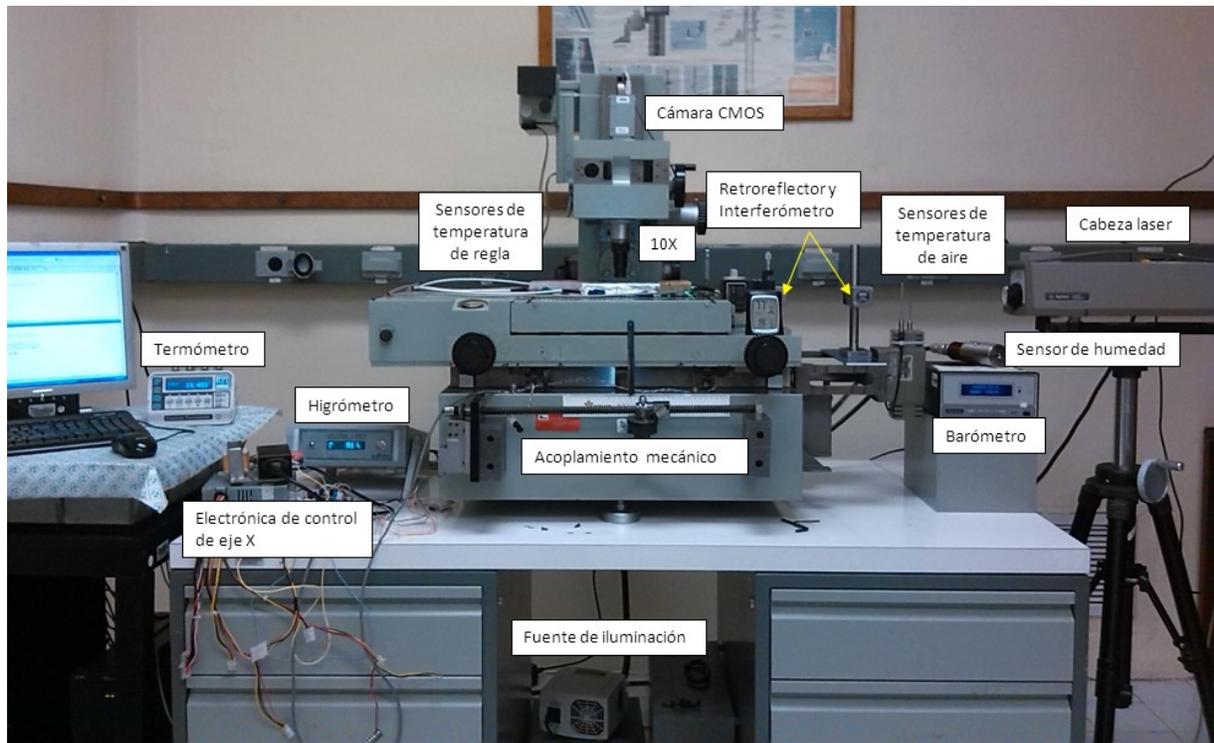


Figura 28. Interferómetro de medición de “line scale” IMLS actualizado.

---

## Conclusiones

---

- La técnicas de procesamiento de imágenes para la detección de trazo de línea utilizando filtro Gaussiano, Gradiente, Laplaciano y MMC mostraron ser efectivas en la localización de bordes según las validaciones propuestas.
- Se recomienda el uso de filtros Gaussiano en conjunto con Laplaciano para la determinación de bordes con precisión subpixel en reglas grado 00 y 01, las cuales presentan poco nivel de ruido, continuidad y bordes bien definidos
- Para la detección de bordes es necesario definir un criterio del valor sigma el cual este en función del ruido de la imagen.
- El algoritmo de detección de trazo de línea mostró ser invariante al desenfoque en el intervalo de 0 hasta 15  $\mu\text{m}$ , que para fines prácticos es suficiente para la calibración con él IMLS.
- Para obtener mayor resolución del sistema es necesario disminuir el tamaño de pixel por lo menos en el orden de 100 nm, lo cual se logra al aumentar la resolución de la cámara, o incrementar la óptica de amplificación de la imagen
- El arreglo interferométrico comercial para medir desplazamiento mostró ser eficiente en la medición, aunque estuvo limitado en lo general por la entrada manual de datos de compensación del IDRA y su configuración en la medición de desplazamiento
- El gradiente de temperatura no tuvo un gran impacto en la medición de la regla en la experimentación debido al bajo coeficiente de expansión térmica del material, pero sigue siendo una variable crítica en la calibración para reglas con coeficiente de expansión térmica del orden  $10^{-6}$  o menores.
- En la etapa de experimentación no se consideraron las variables de influencia por sujeción y apoyos de la regla, debido a que su influencia es pequeña en comparación con otras variables de influencia como las condiciones ambientales y la mecánica del sistema, las cuales contribuyen más del setenta por ciento de la incertidumbre de medición
- La selección del criterio de corrección lineal al error de medición derivado por la pendiente de la curva, parece ser adecuado. Aunque es necesario tener certeza que la pendiente de error es de debido a un error sistemático determinado por el error de alineación en el montaje del IMD, por lo que es necesario validar al sistema a través de la calibración de otras reglas con valores de referencia conocidos

---

## Recomendaciones para trabajos futuros

---

El trabajo de investigación mostró diferentes limitantes en distintas etapas de la prueba experimental, las cuales son recomendaciones para trabajos futuros y se resumen en las siguientes:

- La selección del parámetro sigma al implementar el filtro pasa bajas con Gauss no se puede considerar como una constante para diferentes imágenes, ya que depende de la calidad del grabado del trazo de la línea en la regla, el material y la regularidad de los bordes; por lo tanto es necesario implementar un algoritmo dinámico donde el valor de sigma esté en función del ruido en la imagen y no de un criterio visual.
- El tamaño de pixel es una fuente de incertidumbre importante en la repetibilidad del sistema de medición, por lo tanto es recomendable incorporar un lente de mayor amplificación y con esto reducir el factor  $\beta$  en por lo menos 100 nm lo que representaría más de la mitad del tamaño de pixel actual.
- Es necesario determinar de manera confiable la pendiente de error de medición del IMLS a través de la calibración de reglas de referencia con valores conocidos y de esta manera corroborar la pendiente de error y determinar el correcto uso de un factor lineal como curva de corrección.
- En el mismo contexto que el punto anterior, se pretende incorporar un nuevo montaje en la óptica de medición del IMD al incorporar un arreglo óptico de tres espejos que funcione como retroreflector, con objetivo de evitar la amplificación por cabeceo de la platina de medición sobre el eje de medición  $X$  y se traduce como un error de alineación en la medición.
- Se recomienda incorporar una tarjeta de medición de eje para la medición con IMD e incorporar los distintos periféricos para la medición automática de las condiciones ambientales de temperatura, presión y humedad y de esta manera realizar una corrección en línea de estos parámetros en la medición de desplazamiento de la platina.
- Como nuevo objetivo de actualización del IMLS está automatizar la medición de reglas; al incorporar un sistema de transmisión para el eje  $X$  de la platina de medición para tener un instrumento autónomo, además de la captura y procesamiento automático de los resultados de medición.

---

## Referencias

---

- [1] J. S. Beers, W. B. Penzes, “*The NIST Length Scale Interferometer*”, Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology, Volume 104, Number 3, May–June 1999.
- [2] R. Koops, Ancuta & J. Nieuwenkamp, “A new standard for line-scale calibrations in the Netherlands”, Mikroniek Nr 2010.
- [3] J. A. Muñoz, M. Rivera, “Medición robusta de líneas graduadas utilizando un sistema de visión”, CIMAT, 2001.
- [4] R. Biserca, S. Rdjan, “Measurement uncertainty in process of line scales calibrating”, Annals of DAAAM for 2011 & Proceedings of the 22nd International DAAAM Symposium, Volume 22, No. 1, ISSN 1726-9679, 2011
- [5] BIPM, IEC, IFCC, ISO, IUPAC, IUPAP, and OIML Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement (Geneva: ISO), 1995
- [6] Norma japonesa JISB7541
- [7] Laser and Optics user Manual, HP Part Number 05517-90033,
- [8] Vivek G. Badami and Peter J. de Groot, “Handbook of Optical Dimensional Metrology”, Chapter 4 Displacement Measuring Interferometric pp 178-198.
- [9] K. P. Birch, M. J. Downs, “An Updated Edlén Equation for the Refractive Index of Air”, Metrologia 1993, 30, pp 155-162.
- [10] Colín Castellanos, Carlos y Herrera Martínez Eduardo F., “740-AC-P.145 Procedimiento de calibración de reglas y retículas de longitud”, Noviembre 2012.
- [11] P. Bastos, W. Santos, R. Soares, “Development of a software for the line scales calibration system in INMETRO”, 19th International Congress of Mechanical Engineering, Noviembre 2007.
- [12] EUROMET Key Comparison, EUROMET.L-K7, “*Calibración of line scales final report*”, 2006
- [13] E. Trucco, A. Verri, “Introductory Techniques for 3-D computer vision, Prentice Hall, 1998.

- [14] G. Shrivakshan, C. Chandrasekar, “A Comparacion of various Edge Detection Techniques used in Image Processing”, International Journal of Computer Science, Vol 9, Issues 5, No 1, September 2012.
- [15] L. Bin, M. Samiei, “Comparison for image Edge detection algorithms” IOSR Journal of Computer Engineering (IOSRJCE), 2012.
- [16] J. Jakstas, S. Kausinis & J. Flugge, “Investigation of calibration facilities of precision line scales”, Mechanika, 2005.
- [17] H. Gonzalez, C. Galvan & A. J. Muñoz, “Image processing automatic interferometric calibration system for line scales”, 2001
- [19] R. Maini, H. Aggarwal, “Study and comparison of Various Image Edge Detection Techniques”, International Journal of image Processing (IJIP), Volume(3): Issue(1).
- [20] M. Druzovec, B. Acko, A. Godina & T. Welzer, “Simulacion of line scale contamination in calibration uncertainty model”, Int j simul model 7 pp 113.123, 2008
- [21] S. Kausinis, A. Jakstas “Dynamic Mode of Line Scale Calibration”, *Solid State Phenomena Vol. 113 (2006)* pp 447-452, junio 2006
- [22] R. Köning, P. Köcher & J. Flügge, “The new position control and data acquisition concept of the nanometer comparator”, Measurement 2015, Proceedings of the 10th International Conference, Smolenice, Slovakia.
- [23] P. Singh, H. Singh, “A Comparison Analysis of High Pass Saptial Filters using Measurement and Automation”, International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT), 2012.