



Universidad Autónoma de San Luis Potosí

Facultad de Ingeniería

Centro de Investigación y Estudios de Posgrado

**“Estimación de la incertidumbre para sistemas de
medición por visión (microscopios estereoscópicos)”**

T E S I S

Para obtener el grado de
Maestro en Ingeniería Mecánica

Presenta:

Javier Santillán Tovar

Asesor:

Dr. Orlando Guarneros García

San Luis Potosí, S.L.P., a 26 de Febrero de 2013



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA
DE SAN LUIS POTOSÍ

19 de julio de 2012

**AL ING. JAVIER SANTILLÁN TOVAR
P R E S E N T E. –**

En atención a su solicitud de Temario, presentada por el **Dr. Orlando Guarneros García** Asesor de la Tesis que desarrollará Usted, con el objeto de obtener el Grado de **Maestría en Ingeniería Mecánica**. Me es grato comunicarle que en la Sesión de Consejo Técnico Consultivo celebrada el día 19 de julio del presente año, fue aprobado el Temario propuesto:

TEMARIO:

**“ESTIMACIÓN DE LA INCERTIDUMBRE PARA SISTEMAS DE MEDICIÓN
POR VISIÓN (MICROSCOPIOS ESTEREOSCÓPICOS)”**

INTRODUCCIÓN.

- I. INCERDITUMBRE Y TRAZABILIDAD DIMENSIONAL.
- II. MICROSCOPIO ESTEREOSCÓPICO.
- III. ANÁLISIS Y PROCESAMIENTO DE IMÁGENES DIGITALES.
- IV. DESARROLLO DE LA TÉCNICA PROPUESTA.
- V. RESULTADOS EXPERIMENTALES.

CONCLUSIONES.

APÉNDICE.

BIBLIOGRAFÍA.

“MODOS ET CUNCTARUM RERUM MENSURAS AUDEBO”

ATENTAMENTE

**M. I. JORGE ALBERTO PÉREZ GONZÁLEZ
DIRECTOR**

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA
DE SAN LUIS POTOSÍ
FACULTAD DE INGENIERÍA
DIRECCION



**FACULTAD
DE INGENIERÍA**

Av. Manuel Nava 8
Zona Universitaria - CP 78290
San Luis Potosí, S.L.P.
tel. (444) 826 2330 al39
fax (444) 826 2336
www.uaslp.mx

**bcb



Universidad Autónoma de San Luis Potosí
Facultad de Ingeniería
Centro de Investigación y Estudios de Posgrado



Maestría en Ingeniería Mecánica
Opción Mecatrónica y Sistemas Mecánicos

**“Estimación de la incertidumbre para sistemas de medición por visión
(microscopios estereoscópicos)”**

Presenta:

Ing. Javier Santillán Tovar.

Sinodales:

Dr. Orlando Guarneros García (asesor).

Dr. Francisco Gerardo Pérez Gutiérrez.

Dr. Mauro Eduardo Maya Méndez.

Dr. Ciro Alberto Núñez Gutiérrez (suplente).

*A mi Padre,
un gran ejemplo.*

*A mi Madre,
sus mejores cuidados.*

Agradecimientos

Tres años atrás, comenzó en mí una nueva etapa, a partir de una decisión aparentemente poco prometedora, pero si, llena de esperanza.

Doy gracias a Dios por haberme permitido cumplir este logro. Por las bendiciones que ha puesto en mí para vivir esta experiencia muy especial. Por cruzar en mi camino las personas indicadas, que hicieron posible iniciar y terminar mi maestría.

En el desarrollo de este trabajo tengo varias personas a quien agradecer, algunos siguen pendientes desde el inicio, otros durante o al final. Sé que la convivencia y ayuda fomentaron ideas para engrandecer cada hoja y motivar mi vulnerable interés, con sus consejos y palabras rescatadas de muchas conversaciones encontré la dirección para realizar este trabajo.

Gracias a mi familia por su apoyo constante e incondicional, que son las bases de mi educación, por la libertad en que me han permitido crecer, el afecto y el amor que se comparte. Por aceptar mi ánimo opaco y mis ausencias temporales en conversaciones y convivencias de familia. A mis padres, Enrique y Nicasia, por su interés y preocupación diaria. A mis hermanos Enrique, Luz y Guadalupe, que por mucho tiempo me han ayudado. A mis hermanos Migue, Gil y sus familias por todos los favores que he recibido de ellos. A mis sobrinos que han llenado la casa de alegría.

Gracias a mis amigos que siempre estuvieron pendientes de mí, que a pesar de la distancia, supieron comprender, preguntaron y escucharon cuando lo necesité.

Gracias al Dr. Orlando Guarneros por sus asesorías, por el tiempo que dedico en mí, que me incitó a conocer y aprender. Por la confianza, amistad y ánimo para realizar la tesis. Las facilidades brindadas en el Laboratorio de Metrología fueron de amplio beneficio.

Agradezco a mis sinodales Dr. Mauro Maya, Dr. Francisco Pérez y Dr. Ciro Núñez por los comentarios y críticas constructivas de mi trabajo, que aportaron ideas al contenido y estructura de la tesis, Gracias también al Dr. Frederick De Lange.

A mis compañeros del laboratorio Pablo, José Luis, Guillermo, Carlos, Laura, Dulce, Abraham, Claudia, Neri, Miguel y Daniel, por el ambiente de amistad que crearon, llevo un grato recuerdo de cada uno de ellos, reconociendo sus conocimientos compartidos.

A Ana por recordarme el valor de la tesis, preguntando siempre de los avances. A Sandra y Brenda por el interés y sus comentarios.

Agradezco a la Universidad Autónoma de San Luis Potosí, UASLP, que nuevamente abrió sus puertas para *hospedarme* y continuar forjando mi preparación profesional, ahora por medio del Comité del Posgrado de Ingeniería Mecánica, que confió en mí. Gracias a sus maestros y toda su organización ha dejado en mí, un recuerdo permanente de conocimientos, actitud, ética y valores. Las experiencias aquí han sido únicas y agradables que le dan una nueva dirección a mi vida.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, CONACYT, por el apoyo en los recursos económicos y haberme dado la oportunidad de estar en sus listas, fue y seguirá siendo un orgullo.

Resumen

El presente trabajo está orientado al estudio de las mediciones mediante el uso de sistemas de visión, considerando los factores que intervienen en su incertidumbre.

Un sistema de medición está formado por varios elementos, cada elemento aporta su propia incertidumbre y merece su estudio por separado, para después unificarse en un solo valor. Aquí se presenta una metodología acerca del análisis y estudio de los factores que afectan la medición por visión usando el microscopio estereoscópico.

El estudio inicia con la aplicación del procedimiento de calibración de los microscopios de medida, un instrumento con características muy diferentes, la principal diferencia, es que el estereoscópico puede capturar imágenes digitales, por lo tanto a partir de las imágenes estimar la incertidumbre del sistema de medición, en cambio el procedimiento mencionado se basa a la calibración principalmente de los tornillos micrométricos del campo de medida del microscopio.

Con la explicación de los conceptos de incertidumbre, trazabilidad y estereoscopia en los primeros capítulos se entiende la importancia de la incertidumbre. Se utiliza el procesamiento de imágenes para identificar y medir el bloque patrón, un material de referencia certificado, requisito indispensable en la trazabilidad y en la incertidumbre.

Se explica el modo de estimación de la incertidumbre en el microscopio a partir de resultados experimentales. Se utiliza la aproximación subpixel y los conceptos relación de aspecto de pixel como términos importantes en la cuantificación de incertidumbre de medición por imágenes digitales.

Al final también se ofrece un modo para estimar la geometría de los pixeles, algo fundamental para la certeza de la medición por visión.

ÍNDICE GENERAL

Agradecimientos	VI
Resumen.....	VIII
ÍNDICE GENERAL	IX
ÍNDICE DE FIGURAS.....	XII
ÍNDICE DE TABLAS.....	XV
INTRODUCCIÓN.....	1
Objetivo general	3
Objetivos particulares	3
Planteamiento e importancia de la tesis.....	4
Antecedentes.....	6
Estructura de la tesis.....	7
CAPÍTULO I	
Incertidumbre y trazabilidad dimensional.....	9
1.1. El proceso de medición.....	9
1.1.1. Definiciones.....	10
1.2. La incertidumbre	11
1.2.1 Referencias e importancia de la incertidumbre	13
1.2.2 Pasos para la estimación de la incertidumbre	14
1.2.3 Cuantificación de las fuentes de incertidumbre	16
1.2.4 Incertidumbre expandida.....	17
1.3. La trazabilidad y sus elementos	17
1.3.1. Elementos esenciales de la trazabilidad	18
1.3.2. Certificado y niveles de calibración	19
1.3.3. Bloques patrón longitudinales	21
1.4. Importancia de la incertidumbre y trazabilidad en micro-metrología	22

1.4.1. Las mediciones micrométricas y su aplicación.....	22
1.4.2 Sistemas de micro-medición	23
1.4.3. Incertidumbre y trazabilidad en micro-medición.....	24

CAPÍTULO II

Microscopio estereoscópico	25
2.1. Microscopía.....	25
2.1.1 Formación de una imagen	26
2.1.2 Clasificación general de los microscopios	27
2.2. El microscopio estereoscópico.....	28
2.2.1. Visión estéreo.....	30
2.2.2. Partes principales del microscopio	30
2.2.3. Calibración.....	32
2.2.4. Medición	34
2.2.5. Precauciones y limpieza	35
2.3. Calibración con el procedimiento CEM	36
2.3.1. Calibración de los ejes de medida	36
2.3.2. Estimación de la incertidumbre.....	38
2.3.3. Resultados de la estimación de incertidumbre.....	38

CAPÍTULO III

Análisis y procesamiento de imágenes digitales	45
3.1. Representación de imágenes digitales.....	45
3.1.1. Imagen Digital.....	45
3.1.2. Relaciones entre píxeles	47
3.1.3. Principales espacios de color	47
3.1.4. Píxeles cuadrados y rectangulares	50
3.2. Procesamiento	51
3.2.1. Diagrama para el análisis y procesamiento de imágenes	52
3.2.2. Métodos de detección de bordes.....	53

3.2.3. Ruido en la imagen digital.....	59
3.2.4. Extracción de información	60
3.3. Sistemas de medición por visión.....	61
3.3.1. Foto-microscopía.....	61
3.3.2. Aproximación a nivel sub-píxel.....	62

CAPÍTULO IV

Desarrollo de la técnica propuesta	65
4.1. Características para la medición del Bloque.....	65
4.1.1. Ejes de medida y su orientación.....	66
4.1.2. Separación del campo de medida y campo de visión.....	67
4.1.3. División del campo de medida	68
4.2. Medición por procesamiento de imágenes	69
4.2.1. Algoritmo de localización y medición	70
4.2.2. Medición por renglón y por columna	70
4.3. Factores encontrados que contribuyen a la incertidumbre y su estimación	70
4.3.1 Incertidumbre por el bloque patrón.....	71
4.3.2 Incertidumbre por Repetibilidad.....	72
4.3.3. Incertidumbre por resolución o escala mínima	76
4.3.4. Incertidumbre por método de procesamiento	77
4.3.5. Incertidumbre originada por la iluminación	78
4.3.6. Incertidumbre por calidad de enfoque.....	79
4.3.7. Incertidumbre por variación de temperatura	82
4.4. Expresión para la estimación de la incertidumbre en microscopios estereoscópicos	83
4.4.1. Recomendaciones.....	83

CAPÍTULO V

Resultados experimentales	85
5.1. Definición del mensurando.....	86
5.2. Incertidumbre del bloque patrón.....	87

5.3. Incertidumbre por temperatura	87
5.4. Estimación de la incertidumbre para X8.....	88
5.4.1. Calibración en el eje Y, amplificación X8.....	89
5.4.2. Calibración en el eje X, amplificación X8	94
5.4.3. Unificación de resultados, amplificación X8	99
5.5. Estimación de la incertidumbre para X4.....	100
5.6. Análisis comparativo entre X8 y X4.....	102
Conclusiones	105
Contribución	106
Posible trabajo siguiente	107
Bibliografía	109
ANEXOS	
ANEXO 1. Certificado de bloques patrón.....	115
ANEXO 2. Resumen del procedimiento DI-006 para la calibración de microscopios de medida...	119
ANEXO 3. Código en Matlab	127
ANEXO 4. Práctica de laboratorio. Microscopio estereoscópico.....	131
ANEXO 5. Distribuciones de probabilidad	141
ANEXO 6. Proporciones de aspecto de pixeles habituales para formatos de imágenes.....	145

ÍNDICE DE FIGURAS

Capítulo I

Figura 1.1. Nivel de confianza a partir del valor de la desviación estándar	12
Figura 1.2. Disminución de la zona de conformidad por la incertidumbre.....	13
Figura 1.3. Diagrama para la estimación de la incertidumbre.	15
Figura 1.4. Elementos esenciales de la trazabilidad.	18

Figura 1.5. Pirámide de la trazabilidad.....	20
Figura 1.6. Bloques patrón.	21
Figura 1.7. Medición con microscopio.	23
Figura 1.8. Aplicaciones de la micro-medición (celdillas de un estator).	23

Capítulo II

Figura 2.1. Formación de la imagen.....	26
Figura 2.2. Imagen en lente bi-convexa.	27
Figura 2.3. Clasificación general de los microscopios.	28
Figura 2.4. Microscopio Estereoscópico.....	29
Figura 2.5. Partes del Microscopio Estereoscópico.	31
Figura 2.6. Pantalla principal (Image Solutions).	32
Figura 2.7. Convención para la medición en equipos de visión.....	33
Figura 2.8. Reglilla graduada micrométrica.....	34
Figura 2.9. Funciones para captura de Imagen.	35
Figura 2.10. Regiones de estudio.....	39
Figura 2.11. Bloque patrón en cada región.	39
Figura 2.12. Imagen procedente del microscopio.	40

Capítulo III

Figura 3.1. Representación de una imagen digital.....	46
Figura 3.2. Representación del espacio RGB.	48
Figura 3.3. Representación del espacio HSI.....	49
Figura 3.4. (a) Píxeles rectangulares orientados verticalmente. (b) Píxeles cuadrados.....	50
Figura 3.5. Relación de aspecto de fotografía 16:9. (a) Píxeles cuadrados. (b) Píxeles rectangulares.	50
Figura 3.6. Adquisición de Imágenes digitales.....	52
Figura 3.7. Diagrama para el procesamiento y análisis de imágenes digitales.	53
Figura 3.8. Concepto de la primera y segunda derivada para la detección de bordes.....	54
Figura 3.9. (a) Región de la imagen de dimensión 3x3. (b) Máscara para obtener Gx. (c) Máscara para obtener Gy.....	56

Figura 3.10. Operador Prewitt. (a) Máscara para obtener Gx. (b) Máscara para obtener Gy. 56

Figura 3.11. Operador Roberts (a) Máscara para obtener Gx. (b) Máscara para obtener Gy..... 57

Figura 3.12. Posible operador para el Laplaciana de la Gaussiana. 58

Figura 3.13. Representación de puntos a nivel sub-píxel..... 62

Figura 3.14. a) Fotografía del objeto. (b) Detalle amplificado del borde. (c) Valores numéricos de los píxeles. (d) Detección de bordes a nivel píxel. (e) Detección del borde a nivel sub-píxel. (f) Detalle de la detección sub-píxel..... 63

Figura 3.15. Aproximación a nivel sub-píxel..... 63

Capítulo IV

Figura 4.1. Orientación de los ejes de medida en el microscopio estereoscópico. 67

Figura 4.2. Orientación de los ejes de medida en el microscopio estereoscópico. 67

Figura 4.3. División del campo de medida. 68

Figura 4.4. Regresión lineal a partir de los puntos de medida. 73

Figura 4.5. Medición para la calibración en el eje X. 74

Figura 4.6. Medición para la calibración en el eje Y..... 76

Figura 4.7. (a) Falta de iluminación. (b) Iluminación adecuada. (c) Exceso de iluminación. 78

Figura 4.8. (a) Iluminación por reflexión y proyección. (b) Solo iluminación por reflexión. 79

Figura 4.9. (a) Enfoque alto. (b) Buen enfoque. (c) Enfoque bajo. 80

Figura 4.10. Cambio suave en el gradiente derivado del mal enfoque..... 80

Figura 4.11. Cambio en el gradiente cuando hay buen enfoque..... 81

Capítulo V

Figura 5.1. Evolución aplicando procesamiento de imágenes. (a) formato RGB. (b) Intensidades de la imagen. (c) aplicando detección de bordes. (d) Imagen obtenida para la medición. 86

Figura 5.2. Medición del bloque patrón..... 86

Figura 5.3. Posiciones para la medición X8. (a) horizontal abajo. (b) horizontal centro. (c) horizontal arriba. (d) vertical izquierdo. (e) vertical centro. (f) vertical derecho. 88

Figura 5.4. Ilustración de las estimaciones en la imagen. 89

Figura 5.5. Para la estimación de las regiones 7,8 y 9 en el eje Y..... 90

Figura 5.6. Para la estimación de las regiones 4,5 y 6 en el eje Y..... 92

Figura 5.7. Para la estimación de las regiones 1,2 y 3 en el eje Y.....	93
Figura 5.8. Para la estimación de las regiones 1,4 y 7 en el eje X.....	94
Figura 5.9. Para la estimación de las regiones 2,5 y 8 en el eje X.....	96
Figura 5.10. Para la estimación de las regiones 3,6 y 9 en el eje X.....	97
Figura 5.11. Incertidumbres en cada región de la imagen (μm). En posición horizontal las incertidumbres para la medición en X, en posición vertical la medición en el eje Y.	99
Figura 5.12. Incertidumbres en cada región de la imagen. En posición horizontal las incertidumbres para la medición en X, en posición vertical la medición en el eje.	99
Figura 5.13. Divisiones para la medición X4. Las dimensiones marcadas en las orillas son pixeles; y los números del centro es el número de cada región.....	100
Figura 5.14. Incertidumbres expandidas obtenidas para la medición con amplificación X4.	101
Figura 5.15. Promedios de equivalencia de 1 mm a pixeles, amplificación X4.	101
Figura 5.16. Equivalencia de 1 mm en pixeles para la amplificación X8.	102
Figura 5.17. Equivalencia de 1 mm en pixeles para la amplificación X4.	103
Figura 5.18. Menú para la calibración por ejes en Image Solutions®.	104

ÍNDICE DE TABLAS

Tablas

Tabla 2.1. Relación mm con pixeles.....	40
Tabla 2.2. Resultados obtenidos para el eje X.	42
Tabla 2.3. Resultados obtenidos para el eje Y.	43
Tabla 5.1. Registro de temperaturas durante la medición.	88

INTRODUCCIÓN

Siempre que se realiza una medición, independientemente del equipo utilizado, persona, técnica o método, habrá una confianza en la lectura tomada con respecto al valor convencionalmente verdadero, entonces en toda medición existe un conjunto de valores relativamente cercanos que contienen el valor verdadero, llamado incertidumbre de medición. En muchas mediciones su consideración es ampliamente importante; y el método para su estimación debe estar fundamentado de manera particular en cada sistema de medición [1].

La incertidumbre permite identificar el rango de variaciones en donde se encuentra el valor verdadero del mensurando, identificando así el estado de los productos que se fabrican con respecto a los requisitos de seguimiento y medición. Para organizaciones que buscan la certificación ante alguna norma internacional de calidad, por ejemplo ISO-9001:2008 la incertidumbre de medición ayuda a cumplir cláusulas para ésta certificación [2]; otro caso donde la estimación de la incertidumbre se vuelve indispensable es la norma ISO-17025:2005 referente a los laboratorios de ensayo y calibración [3].

Es muy común el uso de piezas micrométricas en el diseño y fabricación de nuevos productos. La necesidad de realizar productos compactos requiere de instrumentos y nuevas técnicas para garantizar la confiabilidad en sus dimensiones, a su vez ésta creciente demanda exige la utilización de sistemas de medición y verificación trazables desde un punto de vista metrológico, que permitan asegurar con un nivel de confianza razonable la conformidad de sus especificaciones y cumplir con el buen funcionamiento del producto final y en casos específicos el intercambio de sus componentes.

Las soluciones actuales han llevado a que instrumentos de observación, como lo serían los microscopios, hayan cambiado su rol y de poco en poco se hayan transformado en una herramienta de medición por visión necesaria en el avance de la micro-tecnología.

Existen diversos procedimientos para el cálculo de la incertidumbre de medición, cada uno ha sido estudiado mediante el análisis de todos los factores que influyen en la obtención del valor verdadero. De igual manera para el microscopio primero se tiene que verificar la medición en todo su círculo de visión e identificar las causas para después estimar la incertidumbre.

La incertidumbre se compone de contribuciones de diversas fuentes, descritas como magnitudes de entrada. Algunas contribuciones son inevitables por la definición del propio mensurando, mientras que otras pueden depender del método y procedimiento seleccionado para

la medición, un conocimiento insuficiente de ellos muy probablemente conducirá a una estimación equivocada.

Implementar los conceptos de trazabilidad e incertidumbre es una tarea que requiere del estudio de guías, normas, métodos estadísticos, un análisis racional y visual de los sistemas de medida, la comprensión de la habilidad para manejar los equipos y el control de las condiciones ambientales.

El apego a las normas es parte de la documentación que debe existir en procesos reconocidos, al ser la incertidumbre una tarea documentada, significa que debe existir siempre una guía universal capaz de discernir hasta los niveles más bajos. Conocer la guía de la estimación de la incertidumbre de medida es una herramienta fundamental en la estimación de incertidumbre de todo instrumento.

Objetivo general

Determinar los factores más influyentes en la estimación de la incertidumbre para sistemas de medición por visión.

Objetivos particulares

1. Identificar el estado actual de la trazabilidad para los sistemas de visión.
2. Utilizar el procedimiento de calibración para los microscopios de medida como referencia de comparación
3. Desarrollar la metodología más conveniente para el análisis y estimación de la incertidumbre.
4. Aplicar el procesamiento de imágenes para el reconocimiento y medición de los bloques patrón.
5. Identificar el campo de medida para una calidad en la medición deseada en relación con la amplificación.

Planteamiento e importancia de la tesis

Las mediciones que son tomadas a partir de algunos microscopios reciben el nombre de mediciones micrométricas. La principal importancia es contribuir a la trazabilidad y al cumplimiento de los requisitos para la normalización de la micro-medición dimensional. Hoy en día, la medición por visión es más frecuente gracias a los avances en materiales y obtención de superficies finas en los lentes para mejorar la calidad de la imagen.

Muchas veces se ha optado a el uso de microscopios por la facilidad y rapidez al dimensionar algún objeto, pero la confiabilidad es menor comparada con otros equipos, por ejemplo la mesa de medición por coordenadas (MMC), de ahí la importancia en conocer más acerca de estos equipos, estimando la exactitud que pueden alcanzar, tomando en cuenta las recomendaciones incluidas más adelante para no por ello limitar las características por las que son preferidos.

El estudio se sustenta en la Guía para la Estimación de Incertidumbre de Medida (*GUM-Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement*), que publica el Buró Internacional de Pesos y Medida (*BIMP-Bureau International des Poids et Mesures*); y el procedimiento de calibración de los microscopios de medida, publicado por el Centro Español de Metrología, éste último como una referencia del punto de partida de esta tesis.

Una consideración subjetiva pero que afecta considerablemente la medición es el enfoque, por lo tanto, el estudio inicial corresponde a esta parte, probando a diferentes enfoques para identificar el error derivado de esta causa, que es similar a la pérdida de contraste en el exterior del círculo de visión. Con el procesamiento de imagen se obtienen los argumentos para una decisión con fundamento numérico y comprobar la correcta aplicación de la técnica propuesta.

Para entender la posible variación de las lecturas en cada amplificación se realizan mediciones repetidas cubriendo el círculo de visión de la amplificación respectiva, el bloque patrón longitudinal en su inicio es el mismo para cada experimento. Para el cálculo de la incertidumbre se adapta un método ya existente de estimación de la incertidumbre en microscopios de medida. Nuevamente se realizan los mismos pasos midiendo en diferentes orientaciones y con otros bloques patrón para verificar la concurrencia de variación en cuanto a espacio en el círculo de visión.

Los resultados se muestran gráficamente relacionando la amplificación y la incertidumbre esperada. De manera más ilustrativa el conjunto de incertidumbres se dibuja como plantilla del mismo tamaño del campo de visión resaltando el campo de medida para incertidumbres

deseadas. Se explica el cambio en el valor de la incertidumbre en el círculo de visión del microscopio conforme se alejan las mediciones del centro.

Al final se propone el procesamiento de imagen como verificación común para separar las incertidumbres generadas en las ampliaciones usadas, dejando opción al uso de plantillas graduadas útiles para la comparación de la exactitud esperada en la medición por visión.

La técnica aquí presentada puede ser válida en todo equipo o software de medida similar a las características de funcionamiento del microscopio estereoscópico mencionado, con el requisito principal de que el sensor de captura de imágenes digitales debe estar en plano paralelo al plano donde se desea obtener la medición.

Antecedentes

El papel de la micro-tecnología como motor de la innovación tecnológica ha sido muy importante desde hace años. Las piezas de tamaño micrométrico permiten el avance en el diseño de productos de diversas áreas: sensores y micro-sensores, aplicaciones médicas y optoelectrónicas, etc.

La metrología juega un rol importante en la micro-tecnología. En contraste con lo que se podría denominar el “Macro mundo”, el humano está imposibilitado para sensibilizar el proceso de micro-producción con sus órganos sensoriales. Por lo tanto los equipos de medición son esenciales, debido a que son el único acceso que se tiene a las micro-dimensiones.

Un primer avance en este campo fue la construcción de microchips en 1958, donde los circuitos diseñados fueron dibujados en escala visible revertiendo el microscopio. El circuito estaba fabricado sobre una pastilla cuadrada de germanio, que medía seis milímetros por lado y contenía apenas un transistor, tres resistencias y un condensador. Para el año de 1978 la industria electrónica había desarrollado transistores de 3 micrómetros. En 1982 alcanzaron tecnología de 1,5 micrómetros. El tamaño actual es de 0,25 micras. Esta industria es un claro ejemplo de las micro y nano dimensiones alcanzadas en los últimos años.

Desde el siglo pasado los instrumentos de medición han evolucionado adaptándose a las nuevas necesidades de precisión. Hoy es posible medir con precisión dimensiones entre 0,10 micrómetros y 100 metros y para cada grupo de espacio tridimensional existen técnicas específicas [4].

Actualmente la documentación de las micro-dimensiones, sigue siendo tema de importancia, las mejoras en los equipos, requiere que las técnicas usadas en las mediciones normales, se adapten a estos equipos como garantía de uso, siendo muy escasos aún los procedimientos aplicados, el más cercano en la literatura al alcance, es el procedimiento de calibración de los microscopios de medida del CEM, y casi nulos los documentos basados en la medición por procesamiento de imágenes para la estimación de la incertidumbre.

Estructura de la tesis

El presente trabajo está orientado al estudio de las mediciones mediante el uso de sistemas de visión, considerando las fuentes que intervienen en su incertidumbre. Se propone una metodología para la estimación de la incertidumbre de la medición por visión, a partir de imágenes digitales capturadas por el microscopio estereoscópico.

En los primeros capítulos se habla brevemente de la historia de la microscopía y estereoscopía. En el capítulo I se explica la importancia de las mediciones micrométricas tanto en el campo de la investigación como en la industria. También se definen los conceptos fundamentales de incertidumbre y trazabilidad.

El capítulo II es dedicado al microscopio estereoscópico, mencionando los estudios iniciales más sobresalientes de la visión estéreo hasta la aplicación de éstos equipos en la medición dimensional. Se incluyen las características técnicas del equipo, el modo de medición, posibles errores de operación, cuidados generales y la aplicación del método de incertidumbre más cercano a este microscopio, usando el procedimiento de calibración del software de apoyo del microscopio.

En el capítulo III se habla de la captura y procesamiento de imágenes como herramienta para la medición por visión. Se explican los métodos de detección de bordes, importantes en la identificación de la silueta de los objetos, considerada como pixeles de transición.

El capítulo IV presenta el método aplicado, el estudio de las variables consideradas como fuentes de incertidumbre para la medición por visión y las pruebas realizadas en laboratorio. Los resultados de la tesis están en el capítulo V.

La parte experimental se basa en su totalidad en el microscopio estereoscópico Mantis Elite Cam con soporte universal de la compañía Visión Engineering; con el apoyo de un juego de bloques patrón longitudinal grado cero. El procesamiento de imágenes se realiza por medio del programa Matlab®.

Finalmente las conclusiones, bibliografía y anexos de interés están al final de la tesis. Lo propuesto puede ser aplicado en equipos de características similares en la captura de imágenes dependiendo de la certeza del conocimiento de las variables aquí mencionadas.

CAPÍTULO I

Incertidumbre y trazabilidad dimensional

Cuando se da a conocer el resultado de la medición de una cierta cantidad física, es indispensable dar una indicación de la confiabilidad del resultado. Sin esto, es imposible hacer comparaciones de los resultados obtenidos, ya sea entre ellos mismos, o con valores de referencia.

Elementos con trazabilidad como los bloque patrón son necesarios para la estimación de la incertidumbre, y con la incertidumbre se prolongan los niveles de trazabilidad. Por ello debe existir un procedimiento aceptado que lleve a una evaluación y expresión apropiada de la incertidumbre, que sea representativo del sistema de medición utilizado, por medio de un modelo matemático capaz de cuantificar la probabilidad subjetiva de un individuo y los sucesos repetibles en un equipo.

Un método de estimación de incertidumbre también ofrece la capacidad para calcular intervalos de confianza para aplicaciones comerciales e industriales, donde son necesarios para ciertas magnitudes mensurables, en los cuales se engloba una fracción grande de la distribución de valores obtenidos en un proceso de medición.

1.1. El proceso de medición

Una medición física, por simple que sea, tiene asociado un modelo matemático que sólo aproxima el proceso real. Éste modelo supone aproximaciones originadas por la representación imperfecta o limitada de las relaciones entre las variables involucradas.

Entonces, la medición puede considerarse como un proceso donde el objetivo es determinar el valor convencional verdadero de una magnitud particular. Una medición comienza con una especificación apropiada del mensurado, el método de medición y el procedimiento de medición.

El mensurando debe definirse con el suficiente detalle con respecto a la exactitud requerida para que, en todos los propósitos prácticos asociados con la medición, su valor sea único.

El proceso de medición forma parte de un sistema compuesto por el instrumento o dispositivo de medición, el operador u apreciación del observador y el mismo elemento que se está midiendo [5], juntos en dependencia de las condiciones ambientales, el procedimiento y el método de cálculo. En un sentido amplio se considera que las magnitudes de influencia no son sólo las ambientales, sino también las fluctuaciones breves de los instrumentos de medición o valores asociados con patrones. Cada característica tiene su aportación particular, y la suma de todas expresa de manera global y numérica el valor de la incertidumbre del sistema.

Desde el punto de vista más elemental, la medición determina el valor del mensurando, siguiendo una serie de operaciones bien definidas, las cuales deben estar documentadas. Este proceso incluye el acto de medir para la adquisición de los datos, el procesamiento de los mismos y la expresión del resultado final.

1.1.1. Definiciones

A fin de describir de manera universal los conceptos relacionados con las mediciones y la metrología se ha creado el Vocabulario Internacional de Metrología – VIM [6], (Internacional Vocabulary of Metrology), que contiene significados muy precisos por lo que se hace uso de los términos para los propósitos de éste trabajo.

Mensurando: Magnitud particular sujeta a medición.

Magnitud: Atributo de un fenómeno, cuerpo o sustancia que puede ser distinguido cualitativamente y determinado cuantitativamente.

Medición: es el proceso que consiste en obtener experimentalmente uno o varios valores que pueden atribuirse razonablemente a una magnitud.

Método de medición: es la secuencia lógica de operaciones, generalmente descritas, usada en la ejecución de las mediciones de acuerdo con un principio de medición determinado. El método de medición se fundamenta con el principio de medición.

Principio de medición: es la base científica de una medición, puede ser de naturaleza física, química o biológica.

Procedimiento de medición: es el conjunto de operaciones, descritas de forma específica, utilizadas en la ejecución de las mediciones particulares, de acuerdo a un método de medición. El procedimiento de medición se registra en un documento y contiene un nivel suficiente de detalle, que le permite a un operador realizar la medición sin información adicional.

Resultado de medida: conjunto de valores de una magnitud atribuidos a un mensurando, acompañados de cualquier otra información relevante disponible.

Valor: conjunto formado por un número y una referencia, que constituye la expresión cuantitativa de una magnitud.

Valor verdadero: valor de una magnitud compatible con la definición de la magnitud.

Valor medido: valor de una magnitud que representa un resultado de medida.

Error: diferencia entre un valor medido de una magnitud y un valor de referencia, que puede ser el valor verdadero de un mensurando o un valor convencional en cuyo caso es conocido.

Exactitud: proximidad entre un valor medido y un valor verdadero de un mensurando.

Precisión: proximidad entre las indicaciones o los valores medidos obtenidos en mediciones repetidas de un mismo objeto, o de objetos similares, bajo condiciones especificadas.

Material de referencia certificado: material de referencia acompañado por la documentación emitida por un organismo autorizado, que proporciona uno o varios valores de propiedades especificadas, con incertidumbres y trazabilidades asociadas, empleando procedimientos válidos.

Estimación: proceso que tiene por finalidad atribuir, a partir de observaciones en una muestra, valores numéricos a los parámetros de una distribución elegida como modelo estadístico de la población, de la cual la muestra fue tomada.

1.2. La incertidumbre

En una medición inevitablemente se cometen errores debido a muchas causas, algunas pueden ser controladas y otras son incontrolables o incluso desconocidas. Por lo tanto, para realizar mediciones con calidad y obtener resultados confiables es necesario que la persona que realiza la medición tenga el conocimiento, la técnica y la disciplina necesaria.

El conocimiento y la comprensión de la metrología como ciencia de las mediciones, ayuda en el dominio y buen uso de los instrumentos de medición empleados. La técnica adquirida con el hábito de medir lleva a la formación de la experiencia y al desarrollo de habilidades insustituibles siempre que se han de realizar buenas mediciones. La disciplina se consigue pensando antes de hacer, sobre la base procedimientos normalizados, y realizando las operaciones ordenadamente, registrando correctamente los resultados.

La incertidumbre es el valor que, cuando se resta o se suma al valor más probable, define un intervalo dentro del cual hay una probabilidad dada de encontrar al valor verdadero que es igual a un nivel de confianza establecido.

Normalmente, la distribución de probabilidad del resultado de una medición se modela utilizando una función conocida, tal como la distribución normal de probabilidad. La importancia de ésta radica en el hecho de que hay muchas variables asociadas a fenómenos naturales y a errores cometidos al medir ciertas magnitudes cuyo estudio se puede simplificar al ajustar su comportamiento a este tipo de distribución. La distribución normal presenta la ventaja adicional de que se define únicamente con la media y la desviación estándar. Una incertidumbre igual a la desviación estándar (1σ) tiene un nivel de confianza del 68% aproximadamente (figura 1.1), para una incertidumbre igual al doble de la desviación estándar (2σ), del 95% aproximadamente [7].

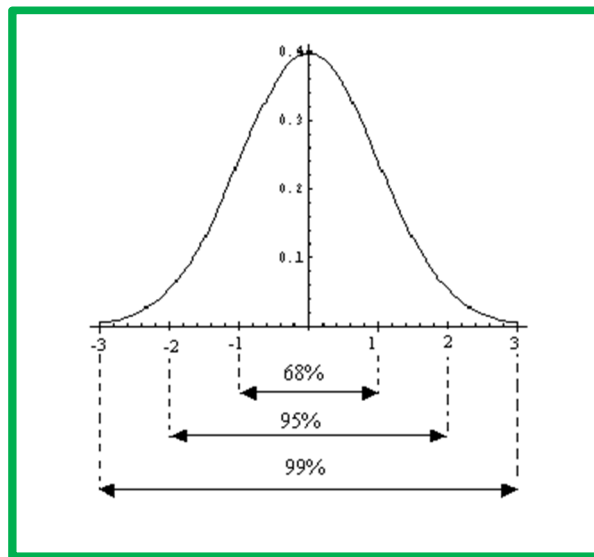


Figura 1.1. Nivel de confianza a partir del valor de la desviación estándar.

El método ideal para la estimación de las incertidumbres debe tener las siguientes propiedades [8]:

- Universal: se podrá aplicar a todo tipo de mediciones y todo tipo de datos usados en las mediciones.
- Consistente internamente: debe ser derivable directamente de las componentes que contribuyen a ella, y ser independiente de cómo se agrupan esas componentes.
- Transferible: la incertidumbre evaluada para un resultado debe poderse usar directamente en la evaluación de la incertidumbre de otra medición en que se utilice dicho resultado.

1.2.1 Referencias e importancia de la incertidumbre

La estimación de la incertidumbre de la medición proporciona información clave sobre la calidad de la medición, y sobre las variables que más influyen en el sistema de medición y en general. Para garantizar el cumplimiento de tolerancias y especificaciones, debe tenerse en cuenta el efecto de la incertidumbre de medida.

Cuando se expresa el resultado de la medición, además del valor estimado del mensurando, es necesario evaluar y expresar su incertidumbre. La incertidumbre de la medición es considerada como una figura de mérito, es decir, un índice de calidad de la medición que proporciona una base para la comparación de los resultados de las mediciones, dando una medida de confiabilidad en los resultados.

La Guía BIPM/ISO para la expresión de la incertidumbre en las mediciones es el documento de referencia obligado siempre que se desea abordar el tema de la incertidumbre, por abarcar de una forma teórica y profunda en el tema [9].

En la ISO 9001:2008, en su cláusula 7.6 señala: "...La organización debe establecer procesos para asegurarse de que el seguimiento y medición pueden realizarse y se realizan de una manera coherente con los requisitos de seguimiento y medición..." [10], esto significa que los equipos de medición sean capaces de medir lo que se requiere. Que dispongan de las "características metrológicas" adecuadas para proporcionar "valores confiables" sobre las mediciones realizadas. Dentro de estas características metrológicas, queda incluida la incertidumbre, por lo tanto es un término vigente.

En el ambiente industrial se toman decisiones en cuanto la conformidad de los productos. La evaluación de la conformidad es la actividad que permite determinar si un producto, proceso, sistema, persona u organismo, cumple con las normas y los requisitos que le son de aplicación.

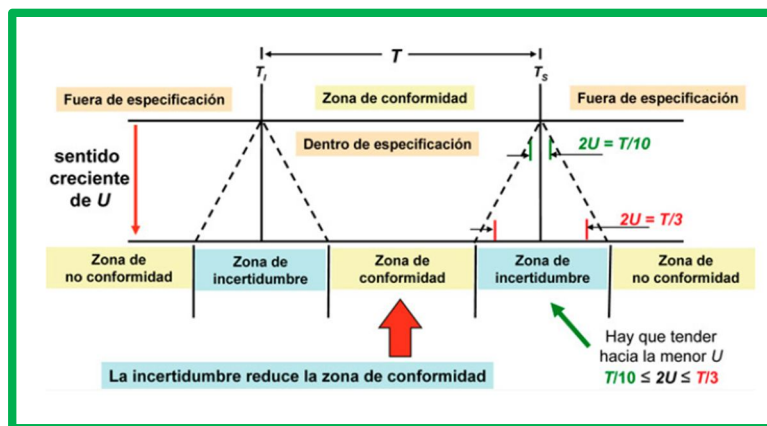


Figura 1.2. Disminución de la zona de conformidad por la incertidumbre.

En un En la figura 1.2 se observa que cuanto menor sea la incertidumbre de medida, mayor será la zona de conformidad. Solo si el sistema de medida fuera totalmente exacto y las magnitudes de influencia estuvieran estrictamente controladas, todas las decisiones de conformidad serían correctas y los riesgos serían nulos.

Cualquier incremento de la incertidumbre de medida incrementa a su vez la probabilidad de tomar una decisión incorrecta (declarar al producto conforme cuando no lo es o declararlo no conforme cuando realmente si lo es), siendo dicha probabilidad tanto mayor cuanto más cerca estén los valores medidos de los límites del intervalo de tolerancia [11].

1.2.2 Pasos para la estimación de la incertidumbre

La estimación de la incertidumbre de cualquier medición, de manera general y abreviada se presenta en el diagrama de la figura 1.3 y en los siguientes párrafos se define cada paso del diagrama.

La definición del mensurando es vital para obtener buenos resultados de la medición. En ocasiones se mide algo distinto al propósito original. Esto incluye la mejor estimación del valor del mensurando y una estimación de la incertidumbre sobre ese valor.

Por ejemplo, si se manifiesta al mensurando simplemente como el diámetro de una moneda de un peso, la incertidumbre requerida es mayor que cuando el mensurando se determina como el diámetro del círculo que circunscribe la moneda.

La incertidumbre se compone de contribuciones de diversas fuentes, que son llamadas magnitudes de entrada.

El método de medición y el procedimiento de medición son descripciones de la manera de cómo llevar a cabo la medición, la primera genérica, la segunda específica. Un conocimiento insuficiente de ellos muy probablemente conducirá a una estimación equivocada, o incompleta en el mejor de los casos, de la incertidumbre de medición.

Un modelo físico de la medición consiste en el conjunto de suposiciones sobre el propio mensurando y las variables físicas o químicas relevantes para la medición. Una medición física, por simple que sea, tiene asociado un modelo que solo aproxima el caso real. Se representa por un modelo descrito con lenguaje matemático, el modelo matemático supone aproximaciones originadas por la representación imperfecta o limitada de las relaciones entre variables involucradas [12].

La relación entre las magnitudes de entrada X_i y el mensurando Y como la función de salida se representa como la función:

$$Y = f(\{X_i\}) = f(X_1, X_2, \dots, X_N) \quad (1.1)$$

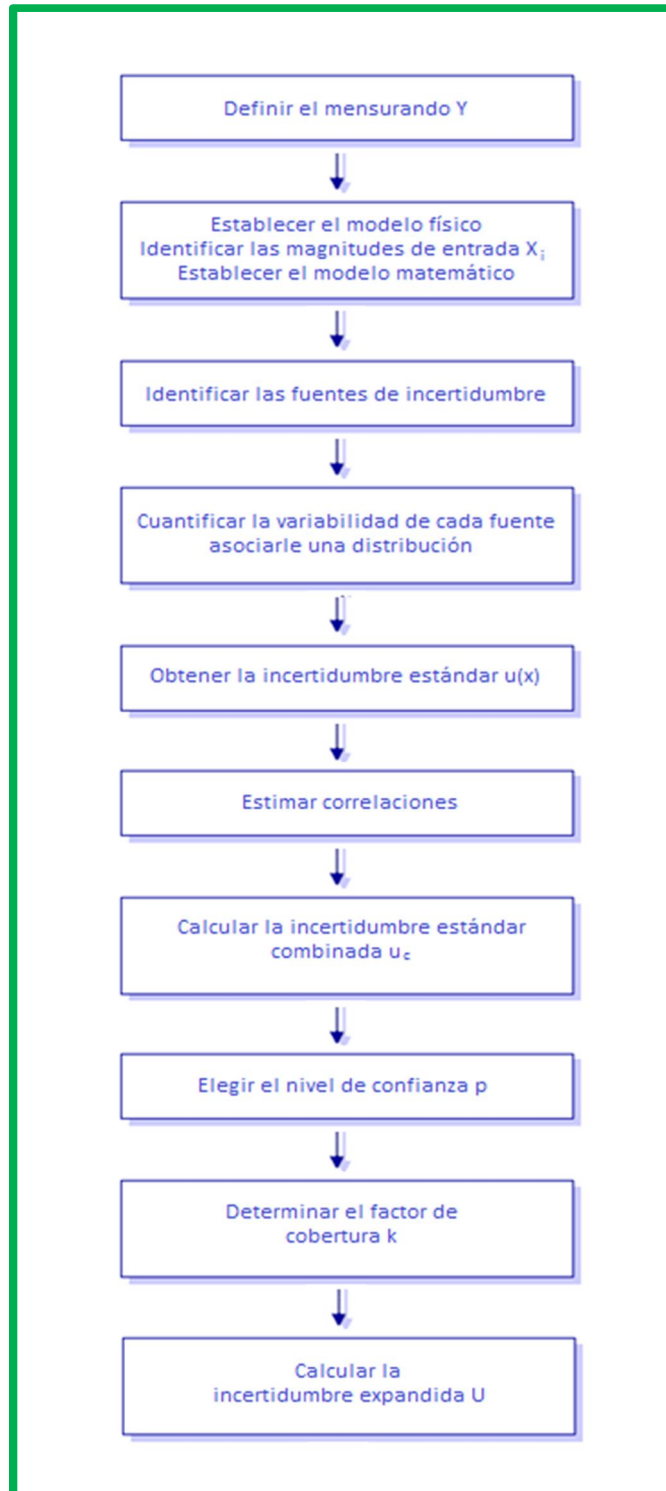


Figura 1.3. Diagrama para la estimación de la incertidumbre.

1.2.3 Cuantificación de las fuentes de incertidumbre

Las fuentes de incertidumbre pueden provenir de diversos factores involucrados en la medición:

- Los resultados de la calibración del instrumento.
- La incertidumbre del patrón del material de referencia.
- La repetibilidad de las lecturas.
- La reproducibilidad de las mediciones por cambio de observadores, instrumentos u otros elementos.
- Características del propio instrumento como resolución, histéresis, deriva, etc.
- Variaciones de las condiciones ambientales.
- La definición del propio mensurando.
- El modelo particular de la medición.
- Variaciones en las magnitudes de influencia.

No es recomendable desechar alguna de las fuentes de incertidumbre por la suposición de que es poco significativa sin una cuantificación previa de su contribución.

Se distinguen dos métodos principales para cuantificar las fuentes de incertidumbre: El método de evaluación tipo A, basado en el análisis estadístico de una serie de mediciones, mientras el método de evaluación tipo B comprende todas las demás maneras de estimar la incertidumbre.

La cuantificación de una fuente de incertidumbre incluye la asignación de un valor y la determinación de la distribución a la cual se refiere este valor. Las distribuciones más comunes se detallan en el anexo 5, que son:

- Distribución normal
- Distribución rectangular
- Distribución triangular

La reducción se realiza antes de comparar y combinar contribuciones de la incertidumbre que tienen distribuciones diferentes, es necesario representar los valores de las incertidumbres originales como incertidumbres estándar. Para ello se determina la desviación estándar de la distribución a cada fuente.

En las correlaciones se trata el caso en que todas las magnitudes de entrada son independientes. El caso en que existe una relación entre dos o más magnitudes de entrada; es decir, en que son dependientes entre sí o correlacionadas se analizan por la varianza y covarianza. Así se determina una incertidumbre típica o estándar combinada $U_c(y)$ del resultado de medida y .

1.2.4 Incertidumbre expandida

La incertidumbre estándar u_c representa un intervalo centrado en el mejor estimado del mensurando que contiene el valor verdadero con una probabilidad p de 68% aproximadamente, bajo la suposición de que los posibles valores del mensurando siguen una distribución normal.

Generalmente se desea una probabilidad mayor, lo que se obtiene expandiendo el intervalo por un factor k , llamado factor de cobertura. El resultado se llama incertidumbre expandida U .

$$U = k \cdot u_c \quad (1.2)$$

La incertidumbre expandida U indica entonces un intervalo que representa una función p de los valores que puede probablemente tomar el mensurando. El valor de p es llamado el nivel de confianza y puede ser elegido a conveniencia.

Anteriormente se mencionó que en una distribución normal, $k = 1$ corresponde a $p=68.27\%$, $k = 2$ a $p=95.45\%$. En una distribución rectangular es diferente, ahora $p=57.7\%$ para $k = 1$.

1.3. La trazabilidad y sus elementos

En las últimas dos décadas, con el crecimiento de global del mercado, de la ciencia y la tecnología, la trazabilidad de los resultados de las mediciones se ha convertido en un requisito cuyo cumplimiento garantiza que los resultados sean fácilmente comparables, válidos y reproducibles, independiente del lugar donde se hayan realizado las mediciones, sustentándose, en parte, en los esquemas de acreditación de laboratorios de ensayos y/o calibración.

La acreditación de laboratorios sobre la base de los requisitos de la norma ISO/IEC 17025:2005 contempla la obligación de alcanzar la trazabilidad de los resultados de las mediciones a las unidades de medida del SI.

La trazabilidad de las mediciones se alcanza a través de la calibración. Los patrones utilizados en las calibraciones obtienen su trazabilidad ya sea directamente a través de un Instituto Nacional de Metrología (INM) o de un laboratorio de calibración. Tanto en INM como el laboratorio de calibración tienen que cumplir con la capacidad de medición requerida para la calibración mencionada [13].

La trazabilidad es la garantía de que la serie de mediciones que se fueron ejecutando para determinar una magnitud, tiene un fundamento. El Vocabulario Internacional de Términos Básicos y Generales de Metrología (VIM) define la trazabilidad como: "propiedad del resultado de una medición o el valor de un patrón, por el cual puede ser relacionado con los patrones de referencia,

usualmente patrones nacionales o internacionales, a través de una cadena continua de comparaciones teniendo establecidas las incertidumbres” [6].

1.3.1. Elementos esenciales de la trazabilidad

La trazabilidad está caracterizada por seis elementos esenciales (figura 1.4):

a) Cadena ininterrumpida de comparaciones: la cadena comienza con los patrones de medición, nacionales o internacionales que en la mayoría de los casos son referidas a unidades del SI, posteriormente pasan por los patrones de medición de los laboratorios de calibración acreditados hasta llegar a un patrón de medición aceptable.

b) Incertidumbre de la medición: que para cada paso de la cadena de trazabilidad se deberá calcular o estimar siguiendo métodos aceptados (Guide Uncertainty Measurement, GUM). Se debe declarar la incertidumbre en cada paso de la cadena, de modo que se pueda calcular o estimar una incertidumbre total para la cadena completa. Esta incertidumbre debe estar respaldada matemáticamente y se representa como incertidumbre estándar combinada, empleando un nivel de confianza apropiado y un factor de cobertura correspondiente.

c) Documentación: cada paso de la cadena debe ser ejecutado de acuerdo con procedimientos documentados y generalmente reconocidos como adecuados; los resultados deben registrarse de modo que puedan ser verificados, en un documento llamado certificado de calibración.



Figura 1.4. Elementos esenciales de la trazabilidad.

d) Competencia: los laboratorios que ejecutan uno o más pasos de la cadena deben proporcionar evidencias de su competencia técnica mediante su credibilidad reconocida o acreditación vigente ante alguna norma como por ejemplo la ISO-17025.

e) Referencia a las unidades del Sistema Internacional (SI): la cadena de comparaciones debe terminar en los patrones primarios internacionales para la realización de las unidades del SI.

f) Intervalos de calibración: con el objeto de mantener la trazabilidad de las mediciones, las calibraciones deberán repetirse a intervalos apropiados; estos intervalos de tiempo son establecidos por el propio usuario y dependen del número de variables, la exactitud requerida, de la incertidumbre requerida, de la frecuencia y modo de uso, de la estabilidad del equipo, etc. [14].

1.3.2. Certificado y niveles de calibración

En la trazabilidad, se usa la llamada carta de trazabilidad o certificado, en la cual se muestran las unidades, los patrones, las referencias a las calibraciones, la incertidumbre de medición y la identificación del organismo responsable de cada calibración. Los criterios relativos a la trazabilidad de una medición incluyen los elementos siguientes:

- a. el resultado de medición cuya trazabilidad se desea mostrar.
- b. las referencias determinadas, preferentemente patrones nacionales o internacionales.
- c. cadena de comparaciones, es decir conjunto de calibraciones o, en su caso, la comparación con el material de referencia certificado, que conecta el resultado de la medición con las referencias determinadas.
- d. el valor de la incertidumbre de las mediciones, en cada eslabón preferentemente.
- e. la referencia al procedimiento de calibración, en cada eslabón preferentemente.
- f. la referencia al organismo responsable de la calibración en cada eslabón.

La jerarquía de la calibración es de vital interés a la hora de decidir a qué nivel debemos acceder para la calibrar el equipo que se utiliza (figura 1.5).

1er nivel. Nivel internacional. En el ámbito internacional, las decisiones acerca del SI y la realización de los patrones primarios es tomada por la Conferencia General de Pesas y Medidas (CGPM).

El Buró Internacional de Pesas y Medidas (BIPM) está a cargo de coordinar el desarrollo y la calibración de los patrones primarios y organizar intercomparaciones al más alto nivel.

2do. Nivel. Institutos Nacionales de Metrología (INM). Los INM son las autoridades más altas en metrología en casi todos los países. En la mayoría de los casos mantienen los patrones nacionales que son las fuentes de trazabilidad para las magnitudes físicas en el país.

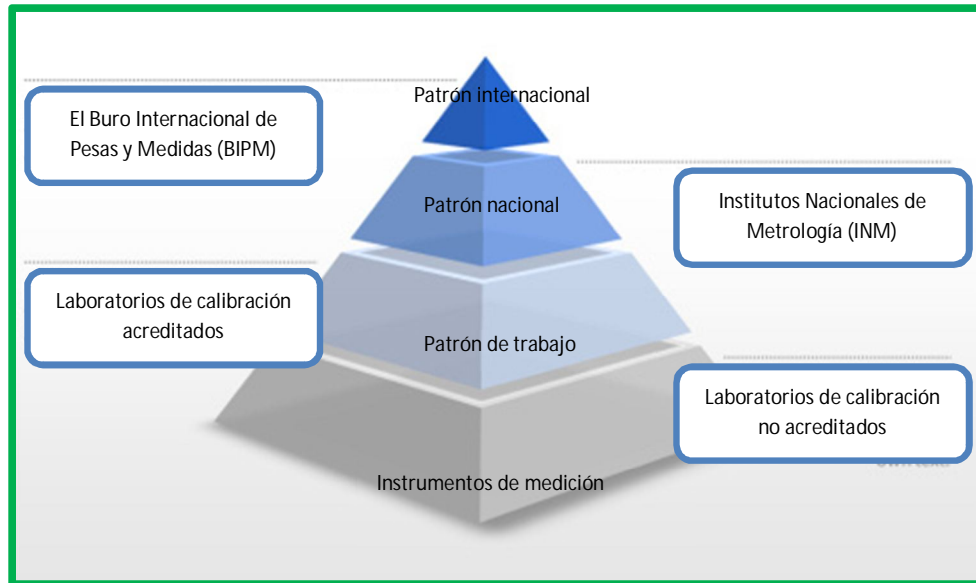


Figura 1.5. Pirámide de la trazabilidad.

Los INM son los responsables de diseminar las unidades de medida tanto en la metrología científica y legal en sus respectivos países. Los INM están en el nivel superior de la jerarquía de calibración de un país.

El INM debe participar periódicamente en las comparaciones internacionales entre laboratorios y obtener resultados satisfactorios. Las comparaciones son llevadas a cabo por el BIPM y por organismos regionales como el Sistema Interamericano de Metrología (SIM) o European Collaboration in Measurement Standards (EUROMET).

3er nivel. Laboratorios de calibración acreditados. Los organismos de acreditación de laboratorios acreditan los laboratorios de calibración de acuerdo a criterios bien establecidos en la norma ISO/IEC 17025:2005. La acreditación es generalmente dada para magnitudes y tipos de calibraciones específicas y para la incertidumbre más pequeña (mejor capacidad de medición) que puede lograrse con los equipos de medición disponibles en el respectivo laboratorio de calibración.

Muchos laboratorios acreditados llevan a cabo calibraciones para clientes externos; por ejemplo, organizaciones que no tienen facilidades de calibración con equipos apropiados, laboratorios de ensayo, etc. Si un laboratorio de calibración es contratado para una tarea de calibración determinada, el cliente tiene que estar seguro que la incertidumbre de la calibración es suficientemente pequeña en comparación con el uso previsto del equipo de medición a calibrar.

4to. Nivel Laboratorios de calibración no acreditados. Están ubicados en el nivel más bajo de la cadena de trazabilidad. La demostración de la trazabilidad de las mediciones en estos casos requiere de un riguroso análisis para evaluar que el laboratorio cumple con los seis elementos esenciales relativos a la trazabilidad mencionados anteriormente.

La trazabilidad debe concebirse como un sistema en el cual se transfieren las unidades del SI desde el punto de la definición hasta el usuario y es una componente de un sistema de medición consistente en donde se le presta la atención adecuada a los procedimientos de calibración, intervalos de medición, controles ambientales, registros, patrones de medición y muchos otros factores [15].

1.3.3. Bloques patrón longitudinales

Los patrones son objetos que materializan una unidad o una magnitud determinada, con el mayor grado de precisión posible y con la máxima inalterabilidad.



Figura 1.6. Bloques patrón.

Un bloque patrón longitudinal (BPL), es un prisma de acero y otro material similar de sección rectangular, con dos superficies pulidas y paralelas entre sí, las cuales forman las superficies de medición [16], figura 1.6. Según la norma UNEEN-ISO 3650 [17], la longitud del bloque patrón como: *la distancia perpendicular entre cualquier punto de la cara de medida y la superficie de una base auxiliar del mismo material y rugosidad sobre la cual la otra cara de medida ha sido adherida.*

Dependiendo del tipo de aplicación y de la calidad requerida se fabrican en diferentes grados de precisión, deben ser fabricados en acero, u otro material que reúna las siguientes características: resistencia a la abrasión, las superficies de medición deben ser pulidas con un acabado, calidad superficial que garantice la adherencia e indeformabilidad y dureza superior a 64 HRC.

Lo anterior es a fin de evitar el posible rayado y un desgaste prematuro. Algunos otros materiales son el carburo de tungsteno (menor coeficiente de dilatación, pero mayor dureza que el acero), o el dióxido de zirconio, un material cerámico que presenta la gran ventaja de no ser oxidable [1].

Prácticamente todas las normas nacionales aplicables a los bloque patrón se basan en la norma UNEEN-ISO 3650, la cual provee cuatro clases de precisión o grado llamados K, 0, 1, 2, fijando para cada una, las tolerancias permitidas respecto a la longitud nominal, planitud y variación de longitud.

Las misiones fundamentales los BPL son:

- Patrón de diseminación de la unidad de longitud.
- Patrón de calibración de una gran variedad de instrumentos de medida de otros patrón de nivel inferior, para asegurar la trazabilidad de los mismos.
- Patrón de medida en los métodos de medida diferencial o por comparación.
- Calibres de verificación para clasificación por atributos en la calidad de fabricación mecánica.
- Calibres auxiliares en muchos métodos de medida, para el posicionamiento de ciertos elementos de los mismos respecto a sus referencias geométricas, y en diferentes procesos de fabricación mecánica.

1.4. Importancia de la incertidumbre y trazabilidad en micro-metrología

En este capítulo se ha mencionado que la trazabilidad y la incertidumbre están estrechamente ligadas al proceso y equipo de medición, lo cual indica que si no se estima la incertidumbre de la medición no se puede evaluar al mensurando y por consiguiente la cadena de trazabilidad se rompe. La incertidumbre en la medición crece mientras más larga es la cadena de trazabilidad.

La estimación cuantitativa de la medición nano y micro en la actualidad tienen una demanda que va en aumento. Para cumplir con la demanda, las técnicas utilizadas en la microscopía avanzada, han permitido en recientes décadas un desarrollo que suple en principio ésta necesidad.

1.4.1. Las mediciones micrométricas y su aplicación

La investigación y la manufactura demandan mediciones de alta calidad. Esto requiere establecer la incertidumbre de la medición y su acceso a instrumentos debidamente calibrados. La trazabilidad por consiguiente no resulta tan evidente para todos los tipos de metrologías existentes, debido a la gran diversidad de magnitudes que pueden estar inmersas en su determinación, como la complejidad que representa coincidir en un material de referencia a

niveles nacional e internacional. Cierta parte de la industria elabora productos cuyo control de calidad se basa en la medición de parámetros complejos, atributos o inclusive aquellos que no se encuentran debidamente especificados (figura 1.7).

Adaptar los principales conceptos de la trazabilidad dimensional a un equipo, forma parte de las exigencias que deben cumplirse para una certificación y acreditación. La mejor estimación requiere de una extensa familiarización con el sistema de medida, desde su principio básico de medición hasta la realización de mediciones decisivas para una aplicación real.



Figura 1.7. Medición con microscopio.

1.4.2 Sistemas de micro-medición

En la ciencia y en la industria, los microscopios son ampliamente utilizados para propósitos de investigación e inspección, como en el caso de la figura 1.8 que corresponde a unas celdillas del estator de un alternador, la distancia entre puntas es importante para retener el embobinado. Los microscopios proveen de una sorprendente visión en el microcosmos, y contribuyen a la resolución de problemas científicos. En metrología destacan por su contribución como una herramienta de medición, y es a partir de ésta premisa que se vuelve indispensable su utilización a escala micrométrica.

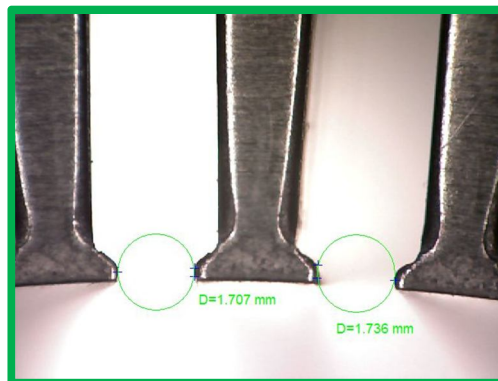


Figura 1.8. Aplicaciones de la micro-medición (celdillas de un estator).

Tan pronto como los microscopios se incorporan a los sistemas de control de calidad, las correcciones de calibración que se generan derivadas de la comparación con un material de referencia, convierten sus variaciones en un asunto de importancia. La industria manufacturera mientras tanto, ofrece equipos que solucionan estos aspectos y el usuario confía en las correcciones de la calibración y en sus subsecuentes mediciones. Aunque la experiencia ha demostrado que estas correcciones, no han sido satisfactorias. Especialmente la trazabilidad de las mediciones está siendo un factor importante para los sistemas de calidad, aun cuando de manera muy general no se encuentran suficientemente garantizados [18].

1.4.3. Incertidumbre y trazabilidad en micro-medición

Aunque en nuestros días la capacidad para obtener una incertidumbre en las micro-mediciones son todavía insuficientes. Una gran cantidad de microscopios sólo sirven como “Visores” en el entendido de que es capaz de proporcionar información cualitativa en gran cantidad y calidad (por ejemplo una cámara fotográfica), pero que o bien no puede proporcionar información cuantitativa o su información no proporciona la trazabilidad adecuada y que podría ser atribuible a dos razones.

Una primera razón es que carecen de un sensor eficaz en la determinación de mediciones dimensionales. En segunda, muchos microscopios no han sido debidamente calibrados, producto de la falta de exactitud en la nano y micro-dimensiones convencionales por ejemplo:

- Las pruebas técnicas realizadas en la mayoría de microscopios muestran la presencia de problemas en 3D que generalmente se presentan en forma de infravaloración de la incertidumbre de la medida.
- El campo de medida de la mayoría de los microscopios es limitado, y su “alta resolución” sólo la logran en rangos pequeños de medida, a causa del número limitado de píxeles.
- Existe un problema entre la nano y la metrología micro-dimensional para enlazar sus magnitudes, dado que es difícil encontrar patrones que a su vez puedan ser calibrados con instrumentos trazables (y por tanto “tradicionales”).

Actualmente existen equipos con operación manual, que ofrecen una resolución hasta de 0.5 μ m para la medición de componentes electrónicos, piezas de micro tecnología o piezas muy finas como las utilizadas en los campos de la mecánica fina, la biomedicina, la micro electrónica, la mecatrónica, en la industria de la comunicación, y en la industria de semiconductores entre otras, tienen ahora una solución de medición rápida, por lo que se necesita de técnicas que ayuden a medir su grado de exactitud y confiabilidad a esos niveles micro.

CAPÍTULO II

Microscopio estereoscópico

Durante más de un siglo, muchas personas han trabajado para llevar el aumento, la resolución y la reproducción de observaciones microscópicas hasta los límites de lo posible desde el punto de vista óptico. Al hacerlo, siempre se han visto vinculados con la relación alterna entre estos tres factores: cuanto mayor debe ser la resolución de un microscopio, mayor será el ángulo de convergencia entre la trayectoria izquierda y derecha de los rayos y menor la distancia de trabajo disponible. Si se incrementa la distancia de los ejes ópticos, se distorsiona la reproducción tridimensional que obtiene el observador [19].

2.1. Microscopía

Desde los inicios de la microscopía en 1590, por Zaccharias Janssen, luego impulsada por Anton Van Leeuwenhoek, los investigadores han desarrollado métodos cada vez más sensibles, eficaces y con mejor resolución. Al principio fueron los problemas de aberraciones ópticas, especialmente la esférica y la cromática.

Los microscopios contruidos a pesar de lograr buenas ampliaciones, daban una imagen muy defectuosa y borrosa (aberración), debido al pobre desarrollo de lentes, los cuales se mantuvieron hasta mediados del siglo XIX cuando aparecieron los lentes objetivo acromáticos que reducían la aberración cromática. Estos lentes consistían en dos lentes superpuestas, una convergente y otra divergente [20]. A pesar de estos avances, la aberración esférica, también producía una imagen desenfocada.

En 1872, Ernst Abbe formula su teoría sobre la formación de imágenes en microscopios, conocida como la teoría de ondas, y diseña un sistema de iluminación (condensador de Abbe) que proporciona imágenes con una mejor calidad y resolución. En 1886, junto con Carl Zeiss en Alemania fabricaron unas lentes apocromáticas que corrigieron ambas aberraciones. A finales del siglo XIX, los microscopios comenzaron a adquirir la forma que tienen actualmente, con los

aportes de Khöler, su propuesta, un método de ajuste capaz de extraer toda la capacidad resolutive de los objetivos y condensadores diseñados por Abbe [21].

Estos avances de 1893, sentaron las bases de la microfotografía moderna. En las últimas décadas se ha incrementado la aplicación de la microscopía óptica en los laboratorios de investigación de una amplia variedad de disciplinas.

Desde el año 1900, los microscopios se han modificado poco en sus principios fundamentales, pero mucho en sus detalles. Estos perfeccionamientos incluyen, la incorporación de varios objetivos, cada uno con aumento diferente, y roscados a un tambor giratorio o revolver. También se han desarrollado nuevas técnicas que hacen posible la observación de especímenes antes invisibles, como la técnica de contraste de fase en 1935, inventada por Fritz Zenique.

2.1.1 Formación de una imagen

La propiedad de aumento que tienen las lentes y en consecuencia el microscopio para observar objetos minúsculos, sucede por medio de lo denominado fenómeno de visión. El ojo humano está constituido de tal manera que sólo puede tener una visión clara cuando los rayos luminosos incidentes son paralelos o ligeramente divergentes, debido a que la retina requiere la participación del cristalino para enfocar los rayos en su superficie.

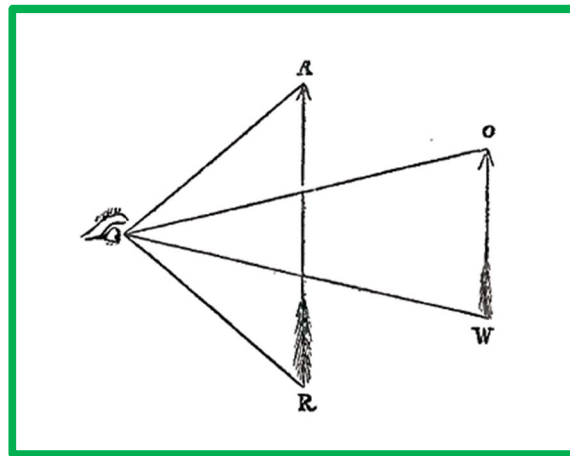


Figura 2.1. Formación de la imagen.

En la figura 2.1 las líneas dibujadas desde el ojo a A y R forman un ángulo, el cual es dos veces más grande que el ángulo de las líneas O-W. De igual manera, la distancia del ojo a la flecha OW es dos veces la distancia del ojo a la flecha AR. La flecha en AR aparece dos veces más grande que la flecha en OW. Las proporciones se mantienen al alejar o acercar la flecha.

El límite para visión cercana es la mínima distancia a la cual se puede observar claramente un objeto; varía de un individuo a otro y se estima entre 15 y 25 cm (6 y 10 pulgadas respectivamente), depende de la edad y otros factores. El valor considerado normal es de 25 cm.

El tamaño aparente de un objeto depende del ángulo formado por dos líneas proyectadas desde el centro del ojo a las extremidades del objeto (figura. 2.1).

Este ángulo así formado se conoce como ángulo de visión o ángulo visual [22]. La utilidad de una lente convexa interpuesta entre el ojo y un objeto cercano consiste en la reducción de la divergencia de los rayos luminosos emanados del objeto, de manera que puedan entrar al ojo en un estado de moderada divergencia, como si emanarán de un objeto situado más allá del límite de visión cercana y en consecuencia se forma la imagen en la retina (figura. 2.2).

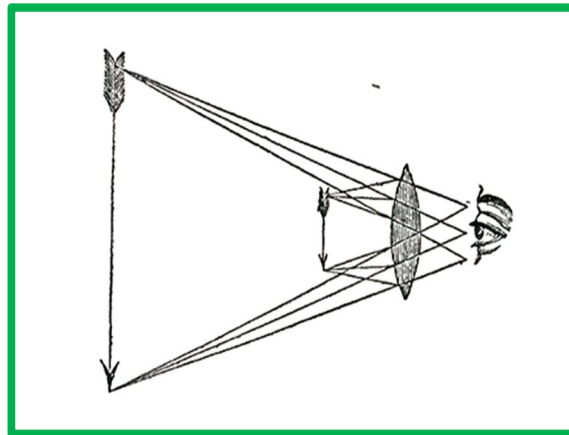


Figura 2.2. Imagen en lente bi-convexa.

La figura 2.2 representa una lente bi-convexa cercana al ojo y a una flecha pequeña (objeto en estudio) cuyos conos dibujados representan parte de los rayos de luz divergentes emanados de varios puntos.

La diferencia de tamaño entre la flecha real y la flecha imaginaria estará determinada por el poder de aumento de la lente. La imagen formada no es real, no puede ser proyectada en una pantalla o recogida en una placa fotográfica; es una imagen mental. Por esta razón la imagen se denomina virtual y la distancia desde la lente hasta la imagen formada se denomina distancia focal virtual.

2.1.2 Clasificación general de los microscopios

Existen numerosos tipos de microscopios, adaptados para diferentes usos. En la figura 2.3 se muestra la clasificación de los tipos de microscopios atendiendo a los últimos avances en el campo de la microscopía y tomando como referencia los criterios clásicos del funcionamiento como las fuentes de iluminación y la formación de imágenes. La clasificación permite identificar el microscopio de estudio entre los demás microscopios.

La diferencia principal entre microscopía electrónica y óptica es el uso de un haz de electrones en lugar de luz propia de los electrónicos ópticos para distinguir la muestra a observar [23].

Los microscopios simples utilizan un lente para amplificar la imagen, por lo tanto la amplificación total es la propia del lente, en el caso de los microscopios compuestos están formados por dos lentes, siendo la amplificación total la multiplicación de ambos.

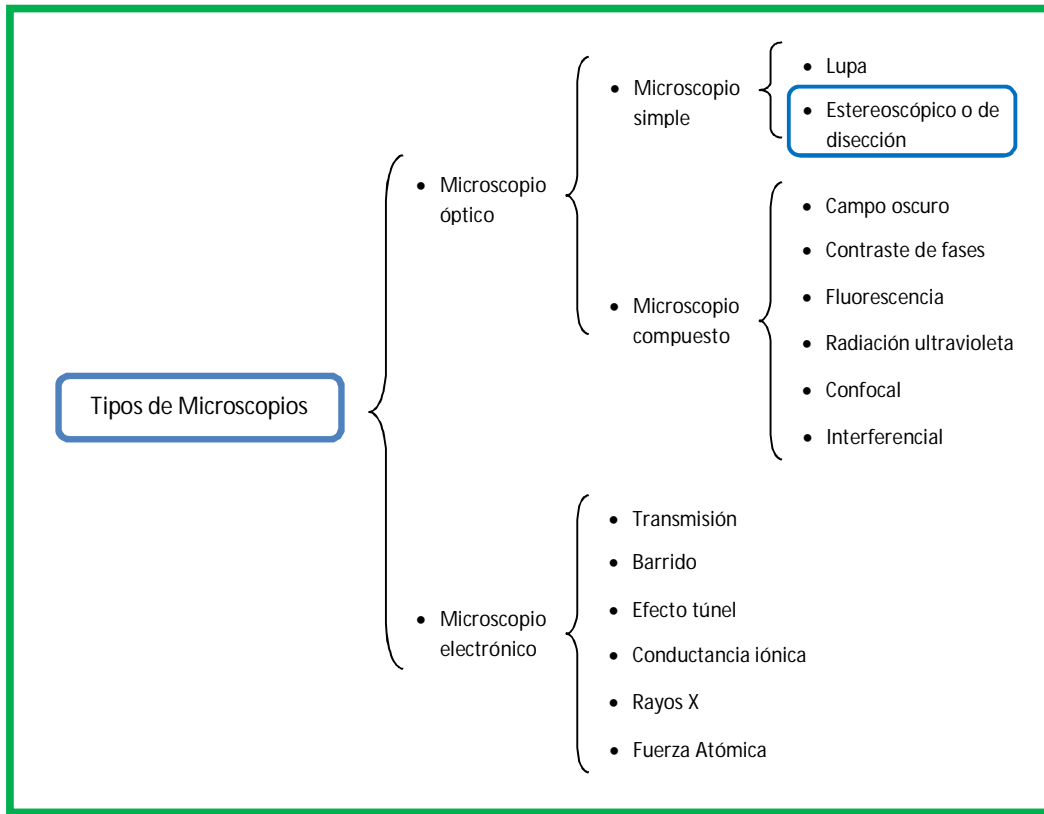


Figura 2.3. Clasificación general de los microscopios.

2.2. El microscopio estereoscópico

Aunque la microscopía inició alrededor de 1590. El fenómeno de la estereoscopia inicia en la Grecia clásica, el matemático griego Euclides (295 a. de C.), estudió en su tratado titulado *Óptica* la relación entre la visión estereoscópica y el hecho de que los seres humanos dispongan de dos ojos. Luego fue estudiada por Leonardo da Vinci, Kepler y Descartes. Pero para encontrar el primer dispositivo hay que remontar al año de 1838 cuando el físico escocés, Sir Charles Wheatstone construyó un aparato con el que se podía apreciar el fenómeno de la visión estereoscópica.

Así los inicios de la microscopia estereoscópica suceden hasta el año de 1896, cuando Ernst Abbe se encuentra con Horatio S. Greenough, un biólogo americano. Su discusión, enfocada en la construcción de un microscopio estereoscópico. El visitante americano dibuja un bosquejo prometedor sobre una hoja de papel, dentro de un año, el invento de Greenough toma forma, el primer microscopio estereoscópico [24].

El microscopio estereoscópico (figura 2.4) es un microscopio simple o lupa, considerado también como un instrumento de medida ya que son clasificados como instrumentos de metrología dimensional de precisión y adecuados a la medición de elementos no muy grandes, ni pesados [25].



Figura 2.4. Microscopio Estereoscópico.

El microscopio estereoscópico hace posible la visión tridimensional de los objetos. Consta de dos tubos oculares y no debe confundirse este aparato óptico con los microscopios binoculares, ya que en éstos la imagen formada en un único objetivo es desdoblada en dos imágenes idénticas por un prisma situado entre el objetivo y los dos oculares. El estereoscópico posee un par de oculares, cada uno de los cuales se enfoca independientemente del otro, con el fin de proveer una imagen nítida para ambos ojos.

Este microscopio ofrece ventajas para observaciones que requieren pequeños aumentos. El óptimo de visión estereoscópica se encuentra entre X2 y X40 o un aumento total del microscopio [26], es un instrumento de baja magnificación.

2.2.1. Visión estéreo

La visión podría decirse que es el sentido más importante del ser humano, por las grandes cantidades de información que percibe [27]. De manera natural, somos capaces de apreciar, las diferentes distancias y volúmenes en el entorno que nos rodea.

Nuestros ojos (dos cámaras), separados entre sí por una distancia interpupilar, de modo que el objeto tridimensional es visto desde dos puntos de vista diferentes, envolviendo así nuestra vista al objeto [28]. Como consecuencia, se obtienen dos imágenes con pequeñas diferencias entre ellas, al no ser idénticas, presentan cierta disparidad denominada paralaje [29]. El cerebro procesa las diferencias entre ambas imágenes y las interpreta de forma que percibimos la sensación de profundidad, lejanía o cercanía de los objetos que nos rodean. A este tipo de visión se le denomina visión estereoscópica o 3D y al proceso en sí mismo estereopsis. La distancia interpupilar más habitual es de 65 mm, pero puede variar desde los 45 a los 75 mm. Hay una distancia límite a partir de la cual a la que dejamos de percibir la sensación estereoscópica, puede variar desde unos 60 metros hasta cientos de metros, dependiendo de la personal.

A partir de Charles Wheatstone, aparecieron otros dispositivos, aun cuando el desarrollo de tecnologías 3D fue muy poco importante, debido a la mala calidad de las imágenes, tuvo un impacto negativo en toda esa época. Con la llegada de los filtros Polaroid, en la década de 1930, generaron un gran cambio, ayudaron a que el 3D se viera por fin en color. En los años 80 se consiguieron resultados más espectaculares, con sistemas de gran formato de película, como el IMAX, que conseguía imágenes de alta resolución en pantallas gigantescas.

Con los resultados de los años 80 el interés por la estereoscopia ha revivido, tal que en los años 90 se intentó simular la visión humana en robots y programado los algoritmos necesarios para analizar las imágenes y saber con exactitud la distancia a la que se puede encontrar de ciertos objetos. En el año 2003 la industria cinematográfica crea largometrajes editados en este formato [30].

Como se puede ver, la visión estéreo no es una tecnología de nueva aparición, lleva siglos, y además sigue en continua evolución. Gracias a la informática se ha desarrollado software que ha permitido presentar imágenes 3D en programas asistidos por computadora y en microscopios para la medición dimensional por visión. Esta técnica es una manera rápida y económica para medir, los resultados en este trabajo contribuyen al estudio y aplicación de los conceptos como incertidumbre que muchos otros equipos de medida existen.

2.2.2. Partes principales del microscopio

Los componentes principales del microscopio estereoscopio son la fuente de iluminación con leds bajo la mesa y otra fuente en el cabezal de visión, un sistema óptico de observación y una

amplificación formada por un juego de lentes, un soporte principal, un conjunto cabezal con protección contra deslumbramiento, y una mesa flotante con dos ejes de movimiento (figura. 2.5):

Cabezal de visión: es la parte superior del microscopio, donde están acoplados los oculares, los objetivos y el aparato de iluminación (espejo, diafragma, condensador y filtros). Estos elementos son los que permiten la iluminación, ampliación y la visión aumentada del objetivo.

Amplificación o magnificación: se define como el cociente del tamaño angular visto a través del instrumento y el tamaño angular observado a simple vista.

Alinear: proceso mediante el cual se mueve el mensurando, para que las líneas de perfil proyectadas queden paralelas a los ejes de medida, haciendo así despreciable el error del ángulo de medición.

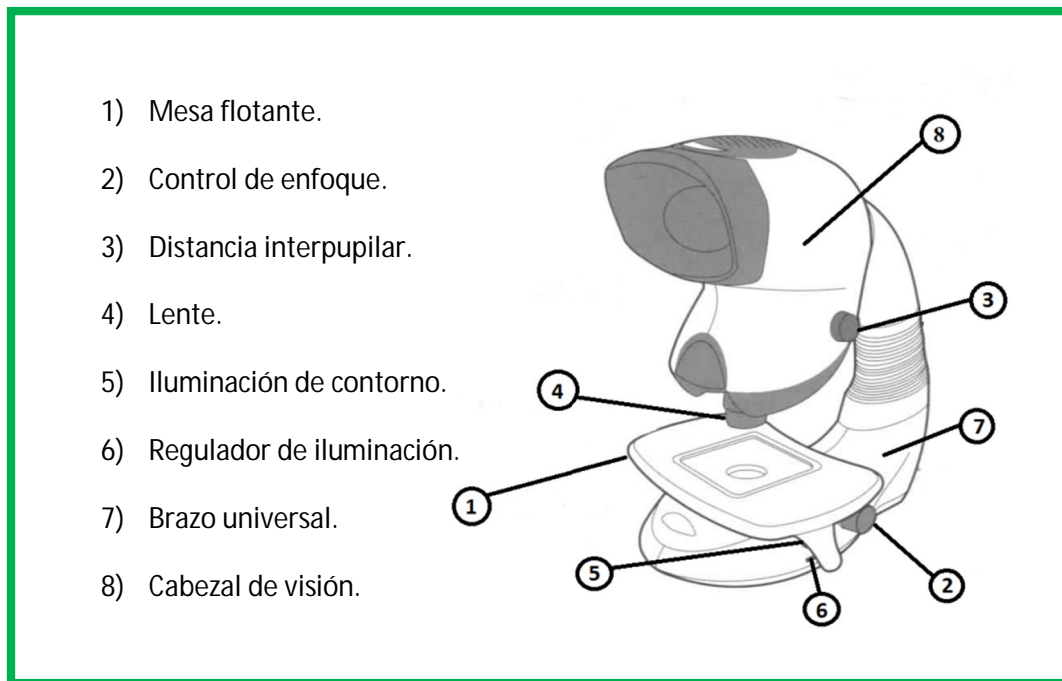


Figura 2.5. Partes del Microscopio Estereoscópico.

Enfoque: perilla 2 (una de cada lado) acción de mover el cabezal de visión hacia arriba o hacia abajo para lograr la mejor imagen posible.

Mesa flotante: es la plataforma donde se coloca el mensurando. Es de cristal con el fin de permitir el paso de la luz emitida por la fuente de iluminación inferior.

Ejes de medida: la mesa dispone de dos ejes de medida, normalmente identificados como el eje X, que es el eje horizontal transversal al operador y el eje Y, que es el eje horizontal hacia el operador. Y un eje Z correspondiente a la dirección del haz luminoso de proyección.

Fuentes de iluminación: cuenta con dos fuentes de iluminación, la primera colocada bajo el cabezal inferior formada por dos lámparas de leds. La otra fuente está bajo la mesa, también de leds, las cuales son independientes dependiendo de necesidad al momento de la medición.

Para la iluminación de contorno se enciende el interruptor 5, y con el botón 6 se usa para aumentar o disminuir el nivel de iluminación. La otra iluminación, el interruptor está del lado opuesto.

Distancia interpupilar: es la distancia entre ojos para lograr una visión estéreo confortable y es diferente para cada usuario, se regula con la perilla 3 localizada en el cabezal de visión [31].

2.2.3. Calibración

En un microscopio no es muy sencillo hacer una calibración debido a que es un equipo que no nos proporciona un dato numérico, entonces requiere de una comparación con un material o instrumento de referencia. La comparación se hace para cada magnificación con una retícula ocular para aproximar la medida correcta del objeto que se mide. Si el interés es solamente inspección, se coloca el objeto sobre la plataforma ajustando la iluminación deseada y el enfoque más conveniente.

A pesar de realizar solamente una inspección algunas veces se requiere conocer una medida en particular. En casos más importantes, la medición es el interés principal, por lo tanto el microscopio tiene que calibrarse antes de realizar estas tareas.

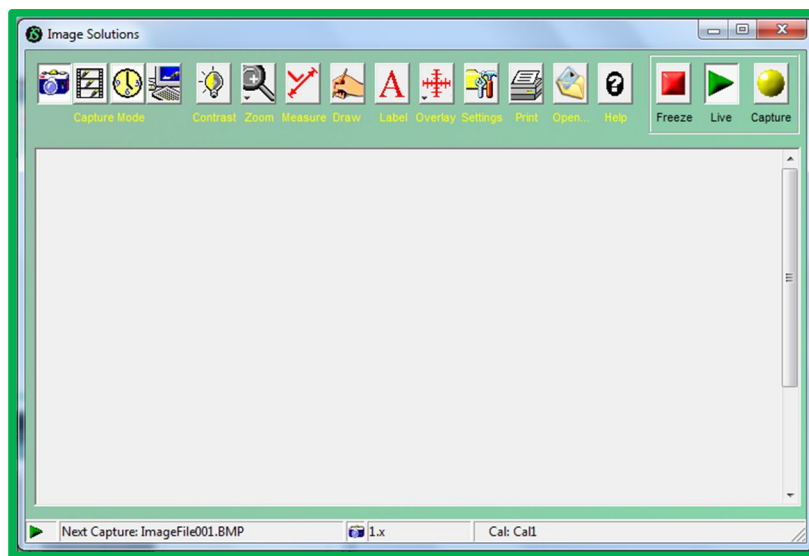


Figura 2.6. Pantalla principal (Image Solutions).

Las imágenes del microscopio estereoscopio mantis Elite-Cam pueden ser vistas en un equipo de cómputo al conectar el cable USB del microscopio, y una "llave" (unidad USB) para reconocimiento del programa Image Solutions® (figura 2.6) con el que trabaja este microscopio.

El programa ofrece las funciones básicas para medir, calibrar, amplificar, o captura de video o imágenes que se deseen, o bien exportar en tabla de Excel los datos de las mediciones. Al



abrir el programa previamente instalado que aparece en la figura 2.6, en la opción settings donde se puede modificar diversos formatos de video e imagen o si no se visualiza la imagen del microscopio.

La calibración se hace con bloques patrón eligiendo la longitud de acuerdo al campo de visión de cada aumento. Se coloca el bloque patrón en la plataforma para escribir la medida del perfil seleccionado o sombra del bloque. En el software se presentan dos modos de calibración, el primero es de manera rápida en un eje. Y el segundo es teniendo en cuenta las dimensiones en los ejes "x", y "y", en una orientación inclinada (I). Para esto es necesario orientar previamente el bloque patrón en las tres orientaciones para conocer el número de pixeles que relaciona la longitud en cada eje, esta opción se llama calibración. Los modos de calibración se seleccionan en



la lista del icono overlay. De acuerdo a la calidad deseada de la medición se elige el modo de calibración. Y con la ayuda de los diferentes cursores incluidos se selecciona el punto inicial y final de la distancia conocida.

A partir de ahí el software responde a esa referencia y cualquier par de puntos elegidos, el software dará la distancia, entonces el microscopio ha quedado ajustado.

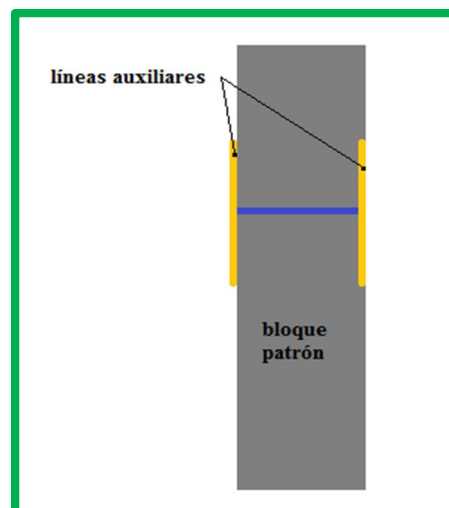



Figura 2.7. Convención para la medición en equipos de visión.

Es muy importante considerar la convención para seleccionar el inicio y fin de la distancia a medir. El inicio se considera colocando el cursor o línea auxiliar adjunto del lado izquierdo del primer punto a medir, y lo mismo para indicar el final, como se observa en la figura 2.7.

La convención es utilizada para seleccionar toda distancia, sea para ajustar o medir. Para visualizar mejor la imagen se puede utilizar la amplificación del programa .

También puede utilizarse la reglilla (figura 2.8), aunque hay que considerar que la incertidumbre será diferente por la trazabilidad propia de cada opción.

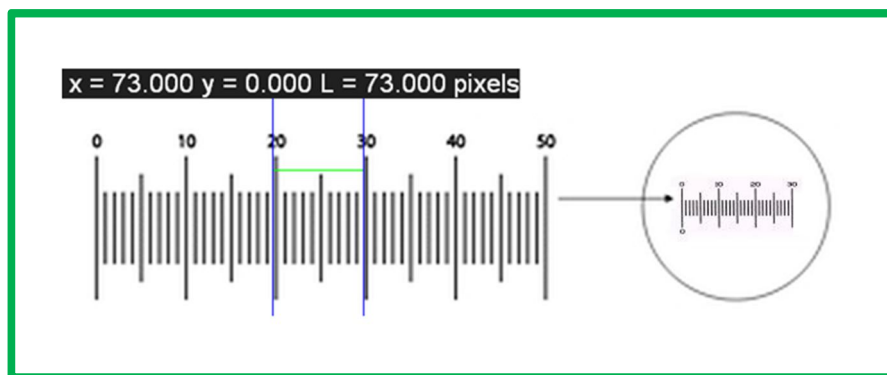


Figura 2.8. Reglilla graduada micrométrica.

Al medir en un microscopio las mediciones de un eje con respecto al otro no son las mismas, las diferencias puede ser por la iluminación que no es uniforme, las curvaturas de los lentes, posibles sombras o las llamadas aberraciones, que son defectos o distorsiones en la imagen provocando errores en la lectura.

2.2.4. Medición

La primera consideración es alcance del campo de medición del equipo, para lograr que todas las medidas del mensurando pueden ser leídas. Al tener una plataforma flotante, puede extenderse el rango de medición sin necesidad de tocar la pieza.

Una vez calibrado el microscopio, se retira el bloque patrón o reglilla y se coloca la pieza a medir. Nuevamente se realiza el proceso de enfoque hasta obtener la mejor vista.

Nota: la calibración se pierde cuando se cambia a otro nivel de magnificación, si sólo se mueve la perilla de enfoque, los errores son mínimos y se considera que el microscopio permanece ajustado.



Se selecciona el icono de medida en el software, después modo de medida. En esta opción se encuentran opciones como líneas auxiliares, de puntos, línea, o mediciones de círculos a partir de la selección de puntos. El software en la parte superior indica la lectura medida de forma automática, ahí mismo se pueden exportar las lecturas a Microsoft Excel.

Otras dos funciones importantes en el software son la captura de imágenes y la exportación de datos (figura 2.9). Para la captura se selecciona primero el modo de captura, si es fotografía o video.

Enseguida se pulsa el botón capturar, ahí se puede elegir la opción pausa (Freeze), y para volver a visualizar la imagen en tiempo real se pulsa sobre el icono live.

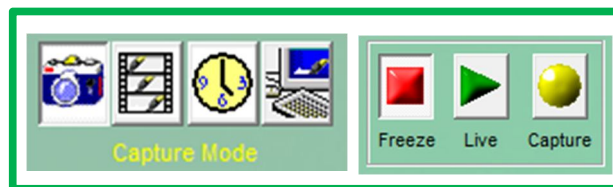


Figura 2.9. Funciones para captura de Imagen.

Para cambiar la lente objetivo, se sostiene y se gira el tornillo sujetador (a un lado del lente), y se coloca la lente objetivo deseada en el asiento y se bloquea con el tornillo.

2.2.5. Precauciones y limpieza

La limpieza del microscopio estereoscópico es una de las rutinas más importantes y debe considerarse un procedimiento frecuente. Para realizar la limpieza se requiere lo siguiente:

Materiales:

1. Una pieza de tela limpia, de textura similar a la de los pañuelos.
2. Una botella de líquido para limpieza de lentes. También puede utilizarse un trozo de seda suave.
3. Una cubierta plástica que se utiliza para proteger el microscopio del ambiente externo cuando no está en uso.

Las tareas para mantener el microscopio estereoscópico en condiciones adecuadas de operación, son:

- Comprobar el ajuste del mecanismo de enfoque (el enfoque que selecciona el usuario puede variar).

- Verificar que en todos los componentes mecánicos no exista polvo o suciedad.
- Lubricar el microscopio estereoscopio de acuerdo a las recomendaciones mencionadas anteriormente.
- Nunca tocar los lentes con los dedos (sólo si es necesario limpiar los lentes).
- Tener presente las distancias de trabajo establecidas
- No forzar los tornillos o ajustes todos ellos deben funcionar suavemente
- No abrir ningún lente y mantenerlos protegidos en su cubierta cuando no están en uso.
- Mantener preferentemente el microscopio en un ambiente con temperatura controlada y con baja iluminación.

2.3. Calibración con el procedimiento CEM

El Centro Español de Metrología (CEM) ha publicado un procedimiento de calibración para los microscopios de medida. El microscopio estereoscópico al ser un equipo con características que ayudan a realizar una medición sin contacto, de algún modo puede considerarse como un microscopio de medida y se debe tener cuidado al aplicar este procedimiento. La respuesta está en los alcances del documento, en donde menciona que no es aplicable en instrumentos de medición similares como lo son los proyectores de perfiles, o máquinas de medición por coordenadas con cualquier tipo de dispositivo óptico de captación de imágenes.

En el microscopio estereoscópico tiene un dispositivo de captación de imágenes digitales. Teniendo en cuenta lo del párrafo anterior se adapta el procedimiento mencionado, para usarlo en el microscopio estereoscópico con lo que se demuestra la falta de fuentes de incertidumbre que no consideradas.

En el anexo 2 se encuentra un resumen del procedimiento publicado por el CEM, que no incluye todas las generalidades y definiciones. Se describe aquí los dos puntos más importantes, la calibración y la estimación de incertidumbres.

2.3.1. Calibración de los ejes de medida

La calibración se realiza mediante bloques patrón longitudinales, de valores nominales tales que cubran, de forma aproximadamente equidistante, el campo total de medida de cada uno de las ejes. Los pasos son los siguientes:

λ_{ij} medida de orden j en el punto i de calibración. Es la diferencia entre dos lecturas.

λ_{pi} valor del patrón empleado para calibración en el punto i .

Se calcularán los parámetros siguientes:

1) Valor medio de calibración en la región i

$$\bar{\lambda}_I = \frac{1}{J} \sum_{j=1}^J \lambda_{ij} \quad (2.1)$$

2) Corrección de calibración en la región i

$$C_{ci} = \lambda_{pi} - \bar{\lambda}_I \quad (2.2)$$

3) Desviación típica de calibración en la región i

$$s_i^2 = \frac{1}{J-1} \sum_{j=1}^J (\lambda_{ij} - \bar{\lambda}_I)^2 \quad (2.3)$$

Las correcciones de calibración expresan fundamentalmente la discrepancia entre los valores de los patrones y las indicaciones del instrumento a medir.

Las incertidumbres producidas por cada fuente se nombran como incertidumbres típicas y se designa con la letra u , la suma de cada una de ellas representará la incertidumbre global que multiplicada por un factor es la incertidumbre expandida, designada con la letra U .

De acuerdo al certificado de inspección por el fabricante, la incertidumbre típica del patrón se deduce de la máxima desviación:

$$u_{pi} = (0.06 + 0.5 \frac{L}{1000})/2 \quad (2.4)$$

Donde L es la longitud nominal del bloque en mm.

La contribución por desviación estándar s de los valores obtenidos en la región i , están dados por:

$$s_i^2 / J \quad (2.5)$$

Se puede introducir la contribución debida a la expresión del resultado según un múltiplo de la división de escala, mediante una corrección de media nula C_E , cuya varianza se obtiene de la hipótesis de contribución uniforme en un intervalo $\pm E/2$ siendo E la resolución del microscopio de medida. La varianza de la contribución por división de escala es:

$$u^2_{(C_E)} = 2 \frac{(\frac{E}{2})^2}{3} = \frac{E^2}{6} \quad (2.6)$$

2.3.2. Estimación de la incertidumbre

Como los microscopios estereoscópicos son instrumentos de precisión media, se admite trabajar con los valores nominales de los patrones y deducir sus incertidumbres de las tolerancias de la desviación de los mismos, para esto se consulta el certificado de inspección de los bloques patrón entregado por el fabricante.

En el caso de tener que componer patrones por adherencia con bloques patrón de un mismo juego se aconseja obtener la incertidumbre mediante suma lineal de las incertidumbres de los bloques adheridos.

El valor resultante de las medidas con microscopio de medida debe expresarse en múltiplos de la división de escala del instrumento, así como la incertidumbre de aquel valor, es conveniente que las correcciones locales y sus incertidumbres se ofrezcan con una cifra decimal respecto al valor de la división de escala, de forma que el redondeo a la división de escala se produzca al final del proceso de elaboración del resultado.

No se permiten redondeos que disminuyan el valor de la incertidumbre más de un 5%. En todo el caso es conveniente aplicar el redondeo de la incertidumbre por exceso cuando se aprecie un desequilibrio importante en el valor de sus contribuciones.

La expresión de U^2 para la corrección de cada punto calibrado queda de la forma:

$$U_i^2 = k^2 \sum_{m=1}^3 u_m^2 (C_i) = k^2 \left[u_{pi}^2 + \frac{s_i^2}{J} + \frac{E^2}{6} \right] \quad (2.7)$$

Se recomienda el uso de una incertidumbre expandida que corresponda a una probabilidad del 95%, lo que puede conseguirse con un factor de cobertura $k = 2$ en la mayor parte de los casos.

2.3.3. Resultados de la estimación de incertidumbre

Siguiendo las definiciones básicas para la estimación de la incertidumbre de medida y con el apoyo del procedimiento de los microscopios de medida del CEM, se presenta el primer cálculo de la incertidumbre dividiendo el centro del campo de visión en nueve partes (figura 2.10) para identificar la incertidumbre en cada región, los píxeles entre el contorno de la imagen y las regiones quedan fuera de estudio. Esta misma división será la misma al aplicar la técnica propuesta.

Definición del mensurando: se midió un bloque patrón de 1 mm de acero, marca Mitutoyo de grado cero, a condiciones ambientales, con desviación máxima $+0.05 \mu\text{m}$.

El programa proporciona captura de imágenes de 640X480 píxeles, y el tamaño de cada región es de 160X120 píxeles, quedando de margen 60 píxeles en la parte superior e inferior y 80 en los lados.

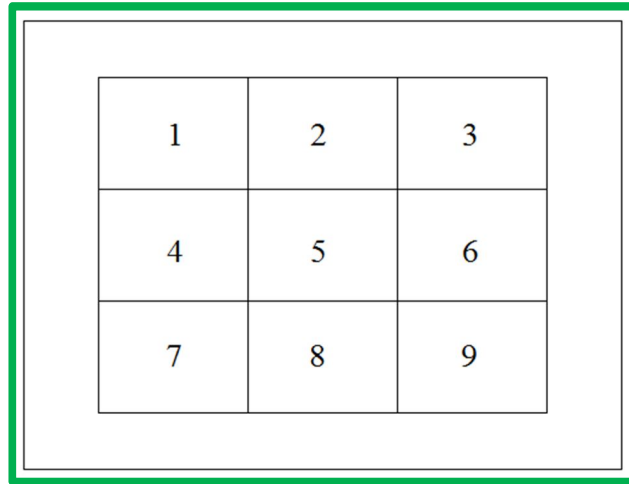


Figura 2.10. Regiones de estudio.

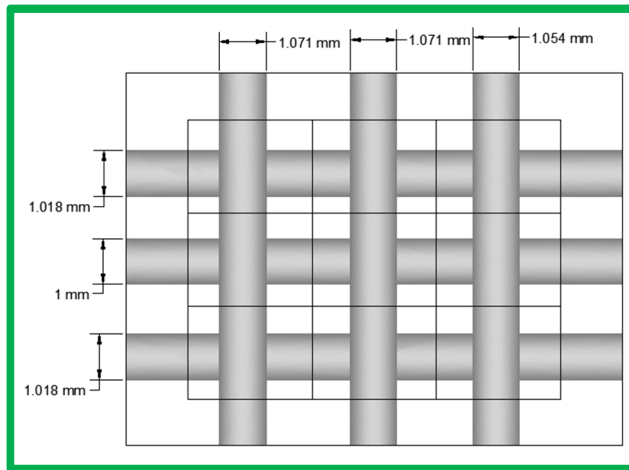


Figura 2.11. Bloque patrón en cada región.

Considerando las dimensiones de la imagen se coloca el bloque patrón de 1 mm en seis orientaciones de modo que pase aproximadamente por el centro las región (figura 2.11), usando el mismo lente de X8. El enfoque también permaneció constante para no alterar sombras u otros efectos derivados de esta causa. Las nueve orientaciones son sencillas de identificar en la figura 2.11 como: arriba, abajo, horizontal, izquierda, derecha y vertical. La justificación de la utilización del lente X8 es por presentar mejor iluminación y un campo aceptable para localizar las posibles incertidumbres con los bloques patrón disponibles.

Para calcular las variaciones a lo largo del campo de medida (las nueve regiones), la medición inicial parte de la posición horizontal, conservando esa calibración se realizaron las mediciones en las otras orientaciones, también se relacionan los pixeles con la longitud en mm correspondiente, donde se puede identificar también la resolución de la medición para el aumento utilizado, recuérdese que la resolución está en función del lente.

En la tabla 2.1 se presenta la relación de pixeles con milímetros para mantener la misma resolución que usaría el programa, siendo no constante en cada pixel.

mm	Pixeles
0.929	52
0.946	53
0.964	54
0.982	55
1.000	56
1.018	57
1.036	58
1.054	59
1.071	60
1.089	61
1.107	62
1.125	63
1.143	64

Tabla 2.1. Relación mm con pixeles.

Si la luz es suficiente y no existe ningún objeto en la plataforma se observa un cuadro blanco, si existe carencia de luz, en los extremos habrá tonos oscuros. Lo mismo sucede cuando se coloca un objeto, el objeto proyectará la sombra al interceptar los rayos de luz (figura. 2.12).

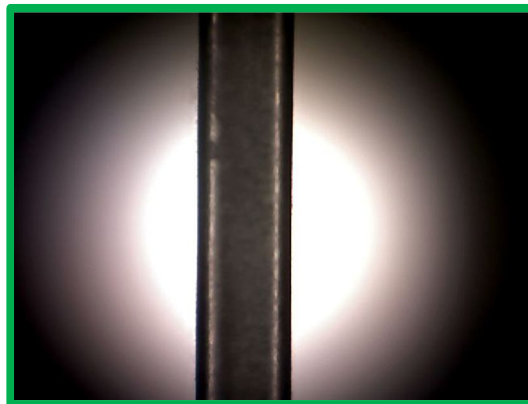


Figura 2.12. Imagen procedente del microscopio.

En toda imagen que presenta algún relieve o cambios de color, en la matriz habrá un notable cambio en la matriz.

Al analizar la imagen en la región central por medio de la matriz, se localizaron los valores numéricos del pixel (celdas) convirtiendo los valores máximos a 78 (umbral: 78) en 255; y los demás en cero. De esta manera se logró limpiar y simplificar la imagen, eliminando la subjetividad del aumento al elegir la distancia de medida.

Una vez obtenida la imagen más clara se mide la distancia en pixeles de acuerdo a la orientación del bloque patrón. Las mediciones fueron de 80 y 60 en cada región (grupos de mediciones) en X y Y respectivamente. Estimando en cada uno la incertidumbre a partir de la desviación estándar, como en el procedimiento existente para la calibración de microscopios de medida.

Los resultados se presentan en el eje X y eje Y de cada recuadro como se observa en la tabla 2.2 y tabla 2.3, donde lo más relevante es la corrección local y la incertidumbre se mantiene igual en todo el campo de medida.

La estimación de incertidumbre se hace de acuerdo al método descrito anteriormente, se consideran las tres contribuciones de incertidumbre: bloque patrón, de desviación estándar y de resolución.

Valor del Patrón	1 mm	División de escala	18	μm/pixel
Incertidumbre del patrón	0.0001025	0.0001025		0.0001025
Valor medio	1.025425	1.018		1.025875
Desviación típica	0.008888937	4.45484E-16		0.008957447
Corrección local	-0.025425	-0.018		-0.025875
Incertidumbre típica	0.0074	0.0073		0.0074
Incertidumbre Expandida	0.0148	0.0147		0.0148
Incertidumbre del patrón	0.0001025	0.0001025		0.0001025
Valor medio	1.0244125	1		1.0050625
Desviación típica	0.010163684	0		0.01090363
Corrección local	-0.0244125	0		-0.0050625
Incertidumbre típica	0.0074	0.0073		0.0074
Incertidumbre Expandida	0.0148	0.0147		0.0148
Incertidumbre del patrón	0.0001025	0.0001025		0.0001025
Valor medio	1.028125	1.02565		1.0169875
Desviación típica	0.008957447	0.008926112		0.008383863
Corrección local	-0.028125	-0.02565		-0.0169875
Incertidumbre típica	0.0074	0.0074		0.0074
Incertidumbre Expandida	0.0148	0.0148		0.0148

Tabla 2.2. Resultados obtenidos para el eje X.

Valor del Patrón	1 mm	División de escala	18	$\mu\text{m}/\text{pixel}$
Incertidumbre del patrón	0.0001025	0.0001025		0.0001025
Valor medio	1.09605	1.071		1.0881
Desviación típica	0.010768652	1.33785E-15		0.013169483
Corrección local	-0.09605	-0.071		-0.0881
Incertidumbre típica	0.0074	0.0073		0.0074
Incertidumbre Expandida	0.0148	0.0147		0.0149
Incertidumbre del patrón	0.0001025	0.0001025		0.0001025
Valor medio	1.0845	1.33785E-15		1.067458333
Desviación típica	0.007826909	-0.071		0.006932927
Corrección local	-0.0845	0.0073		-0.067458333
Incertidumbre típica	0.0074	0.0073		0.0074
Incertidumbre Expandida	0.0148	0.0147		0.0148
Incertidumbre del patrón	0.0001025	0.0001025		0.0001025
Valor medio	1.08465	1.071		1.069483333
Desviación típica	0.007737989	1.33785E-15		0.007081736
Corrección local	-0.08465	-0.071		-0.069483333
Incertidumbre típica	0.0074	0.0073		0.0074
Incertidumbre Expandida	0.0148	0.0147		0.0148

Tabla 2.3. Resultados obtenidos para el eje Y.

CAPÍTULO III

Análisis y procesamiento de imágenes digitales

Para distinguir entre análisis y procesamiento de imágenes digitales, el primer concepto lo debemos asociar al determinado tipo de información que nos representa una descripción o una decisión, para después realizar el procesamiento de imágenes, que consiste en la transformación de una imagen a otra, o bien, la obtención de una imagen modificada [32].

3.1. Representación de imágenes digitales

En términos informáticos, una imagen es un caso particular de señal, que describe una determinada distribución de intensidades lumínicas en toda su extensión [33].

Una imagen es sólo una figura de algo, que puede ser una persona, una escena al aire libre o la figura de algún componente electrónico pequeño, etc. [34]. Imágenes de este tipo se llaman analógicas, o algunas veces "naturales", y no son inmediatamente reconocidas para su modificación, por la cantidad infinita de puntos de información.

3.1.1. Imagen Digital

Una imagen digital proviene de una imagen natural, que ha sido convertida en valores discretos; y se define como una función en dos dimensiones, $f(x,y)$, donde "x" y "y" son las coordenadas de la amplitud de f en el punto (x,y) , esta amplitud es conocida como la intensidad de la imagen en ese punto. Tanto, los valores de las coordenadas x e y , como de la amplitud de la función f son valores finitos.

La imagen digital se representa como una matriz o arreglo bidimensional de números, cada número de este arreglo es un elemento de imagen. Por tanto una imagen está compuesta por una cantidad finita de elementos, conocidos como píxeles, palabra que se deriva de la abreviatura en inglés de *picture elements* [35].

La caracterización matemática de una imagen digital $f(x, y)$ es una matriz de $M \times N$:

$$f(x, y) = \begin{bmatrix} f(1,1) & f(1,2) & \dots & f(1,N) \\ f(2,1) & f(2,2) & \dots & f(2,N) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ f(M,1) & f(M,2) & \dots & f(M,N) \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

Normalmente el tamaño de la imagen digital se expresa ancho por alto, lo contrario a la convención matricial. El ancho corresponde al número de columnas (eje Y) y el alto a los renglones (eje X), como se muestra en la figura 3.1.

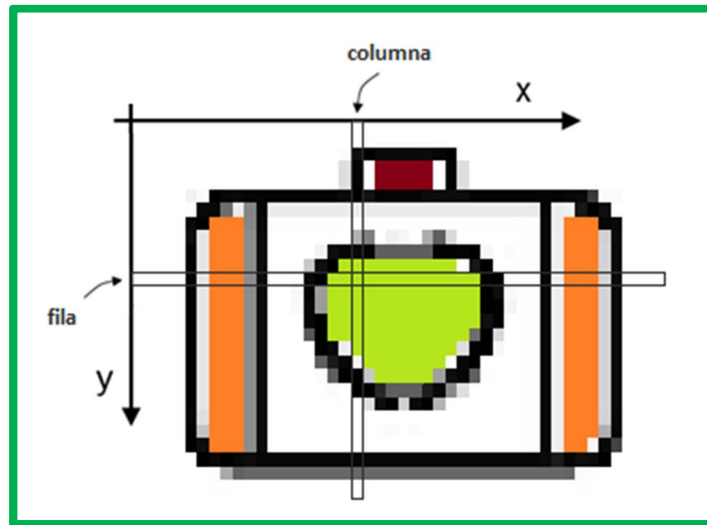


Figura 3.1. Representación de una imagen digital.

Entonces, el dominio de cada función es un conjunto discreto:

$$D = \{(i, j): i = 1, 2, \dots, M, j = 1, 2, \dots, N\} \quad (3.2)$$

Y cuyo rango es el conjunto:

$$R = \{0, 1, 2, \dots, L - 1\} \quad (3.3)$$

Para representar los L tonos de gris necesitamos B bits, siendo $L = 2^B$ [36]. Por ejemplo, para 256 tonos de gris necesitamos 8 bits de manera que el vector binario (0,0,0,0,0,0,0,0), representa al negro equivalente a cero en el sistema decimal y (1,1,1,1,1,1,1,1) al blanco equivalente a 255.

Cuando las imágenes son en nivel de gris solo se requiere de una función. En cambio una imagen a color necesita de tres funciones independientes f_1 , f_2 y f_3 , en las cuales se representa la intensidad del píxel para cada componente [37].

El término nivel de gris, se emplea para referirse a la intensidad en imágenes monocromáticas. Las imágenes a color, están formadas por una combinación de imágenes individuales, principalmente tres, cada una representa un color diferente.

3.1.2. Relaciones entre píxeles

En una imagen, los píxeles próximos tienen una relación más "cercana" entre sí que los lejanos. Se espera que los valores de dos píxeles próximos sean más o menos parecidos.

Cada píxel p de coordenada (x, y) tiene cuatro vecinos horizontales y verticales cuyas coordenadas son:

$$(x + 1, y), (x - 1, y), (x, y + 1), (x, y - 1) \quad (3.4)$$

Y cuatro vecinos diagonales con coordenadas

$$(x + 1, y + 1), (x + 1, y - 1), (x - 1, y + 1), (x - 1, y - 1) \quad (3.5)$$

Estos puntos, se llaman vecinos de p , pero es necesario tener en cuenta que una región es vecina de sí misma. Los puntos pueden formar regiones de acuerdo a la similitud en los niveles de gris o posición espacial que exista entre ellos. Ésta conectividad permite establecer las fronteras de objetos y las regiones componentes de una imagen [38].

Según el número mínimo de vecinos por posición que tiene una región se clasifican en tres categorías:

- Regiones con 9 vecinos: Son las regiones que se encuentran al centro de la imagen.
- Regiones con 6 vecinos: Son aquellas regiones localizadas en los laterales de la imagen.
- Regiones con 4 vecinos: Son aquellas regiones localizadas en las esquinas.

El punto central de la región es el centroide y sus coordenadas se obtienen de la siguiente forma:

$$C_x = \frac{Rx_{max} - Rx_{min}}{2} \quad (3.6)$$

$$C_y = \frac{Ry_{max} - Ry_{min}}{2} \quad (3.7)$$

3.1.3. Principales espacios de color

Un modelo o espacio de color define un sistema de coordenadas tridimensional y un subespacio de ese sistema en el que cada color queda representado por un único punto. El uso de un espacio de color permite medir cuantitativamente los colores de una forma normalizada. Los modelos más usados para la representación de imágenes a color son RGB, YIQ y HSI [39].

El espacio de color RGB debe su nombre a las iniciales en inglés de sus tres colores rojo (*Red*), verde (*Green*) y azul (*Blue*). Este modelo está basado en el sistema tridimensional de coordenadas cartesianas como se observa en la figura 3.2. El eje de referencia muestra que una combinación particular de intensidad las tres componentes dará como resultado un color en específico. Cada pixel se representa como un vector de tres componentes con información de tres canales diferentes uno con la información relacionada con el rojo, otro con el verde y otro con el azul. Por ejemplo el color cyan se obtiene con R=0, B=255 y G=255. Los extremos de este cubo serán los colores negro y blanco, cuyas intensidades serán (0,0,0) para el caso del negro y (255,255,255) para el blanco [37].

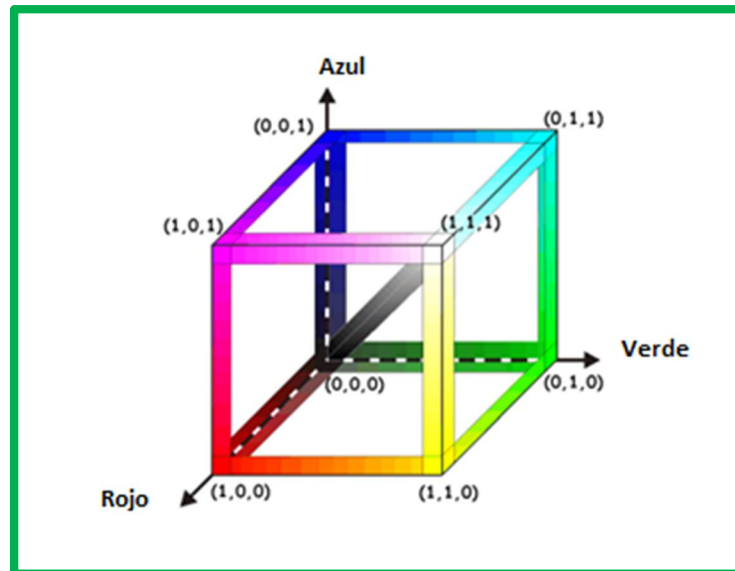


Figura 3.2. Representación del espacio RGB.

El significado del modelo YIQ, es luminancia (Y: luminance), en fase (I: in fase) y cuadratura (Q: quadrature). La componente Y, que proporciona toda la información monocromática, la información de color esta en las componente I y Q. Esta característica permite que se pueda procesar información de intensidad sin que se afecte a los colores relativos de la imagen.

El modelo YIQ fue diseñado para aprovechar la mayor sensibilidad del ojo humano a los cambios de iluminación frente a los cambios de tono y saturación. El espacio de color YIQ se obtiene a partir de una transformación lineal del modelo RGB:

$$\begin{bmatrix} Y \\ I \\ Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.299 & 0.587 & 0.114 \\ 0.596 & -0.275 & -0.321 \\ 0.212 & -0.523 & 0.311 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

El modelo HSI utiliza los atributos de tono de color (hue: H), saturación (saturation: S) e intensidad (intensity: I). La utilidad del modelo HSI se debe a dos hechos principales. Por una parte, la componente de intensidad se separa de la información de color y además las otras dos componentes están muy relacionadas con la forma en que el ser humano percibe el color. Estas características hacen este modelo muy apropiado para el desarrollo de algoritmos de procesamiento de imágenes basados en propiedades del sistema de visión humano [39]. En la figura 3.3 se representa el modelo HSI donde cada sección de 60° representa los colores rojo, amarillo, verde, cyan, azul y magenta.

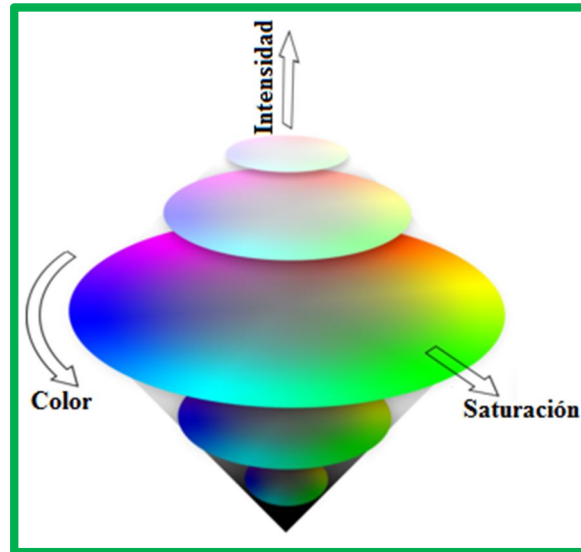


Figura 3.3. Representación del espacio HSI.

La conversión de RGB a HSI se calcula de la siguiente manera [40]:

$$H = \arctan\left(\frac{\beta}{\alpha}\right) \quad (3.9)$$

$$S = \sqrt{\alpha^2 + \beta^2} \quad (3.10)$$

donde $\alpha = R - \frac{1}{2}(G + B)$, $\beta = \frac{\sqrt{3}}{2}(G - B)$

$$I = \frac{R+G+B}{3} \quad (3.11)$$

Existen aún más espacios de color creados para tareas específicas como XYZ, lrg, YUV, HLS, HSV, CYM, etc. Todos deben cumplir la característica principal de ser visualmente uniformes, es decir las distancias numéricas entre colores han de estar relacionadas con la capacidad humana para percibir diferencias de colores. Con las definiciones anteriores se entiende la representación

de los modelos y su conversión a otro, principalmente el modelo RGB, el más común en imágenes digitales.

3.1.4. Píxeles cuadrados y rectangulares

El tamaño de los píxeles depende del sensor de captura, así que una vez capturada la imagen, ya no puede cambiar su resolución o tamaño de la imagen, a menos que se apliquen métodos de reducción o amplificación. Lo que sí puede cambiar es la proporción de la imagen al utilizar algún otro dispositivo de visualización con diferente geometría de píxeles, tal como se observa en la figura 3.4 que presenta un círculo en píxeles cuadrados y rectangulares.

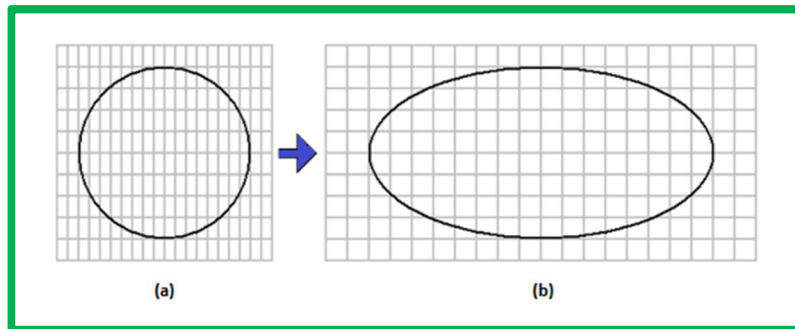


Figura 3.4. (a) Píxeles rectangulares orientados verticalmente. (b) Píxeles cuadrados.

Para definir la geometría de los píxeles se utiliza la relación de aspecto de píxel que es el ancho (x) del píxel en comparación con su alto (y). Un píxel cuadrado tiene una relación de 1:1, pero un píxel no cuadrado (rectangular) no tiene el mismo alto y ancho.

Es importante considerar que la relación de aspecto de la fotografía no determina necesariamente la relación de aspecto de píxel. Una imagen con una relación de aspecto de fotografía de 16:9 puede estar formada por píxeles cuadrados o no cuadrados (figura 3.5).

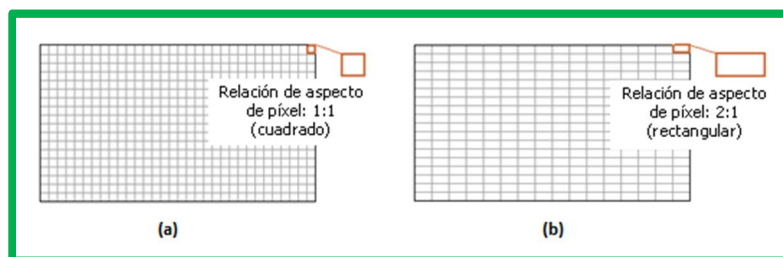


Figura 3.5. Relación de aspecto de fotografía 16:9. (a) Píxeles cuadrados. (b) Píxeles rectangulares.

Algunas cámaras de vídeo pueden grabar distintas proporciones de aspecto de fotogramas. Las cámaras se han estandarizado usando una relación 16:9 para el caso de pantalla panorámica, y en 4:3, esto puede entenderse como una fotografía con 640 píxeles de ancho y 480 píxeles de altura, lo que produce píxeles cuadrados.

Siempre es recomendable comprobar que el tamaño de los píxeles se está interpretando correctamente, aun cuando los píxeles no se pueden garantizar que sean exactamente cuadrados, en este trabajo se asume que la fotografía fue adquirida con píxeles cuadrados (relación de aspecto de píxel 1:1). El anexo 6 presenta los formatos más frecuentes, en donde de acuerdo a la relación de aspecto de fotografía de 4:3 que se usa en las imágenes de experimentación de la tesis la relación de aspecto de píxel puede variar desde 0.9 a 1.066, aunque en algunos casos se extiende hasta 1.09.

3.1.4.1 Sensor de captura CCD

El sensor de imagen más utilizado en las cámaras modernas, tanto en aplicaciones profesionales como cotidianas, es la célula CCD (Charge Coupled Device). Los CCD son elementos fotosensibles colocados en filas y columnas que reciben distintas cantidades de luz, y son capaces de almacenar un voltaje en proporción a la iluminación que recogen. Este valor se envía a un procesador que lo transforma en información digital, generando la fotografía.

Los fabricantes de microscopios, conscientes de la importancia de la microfotografía diseñan los microscopios utilizando los sensores CCD. Como se mencionó anteriormente, las tendencias han llevado a estandarizar desde los formatos utilizados para la captura hasta los adaptadores de sujeción a fin de poder intercambiar los modelos de cámaras más habituales.

La resolución del CCD se ha convertido en el principal elemento de las cámaras digitales. El tamaño físico del CCD puede ser un factor que influya en la calidad de la imagen, así los CCD de tamaño muy reducido tiene los elementos fotosensibles (transistores) situados muy próximos entre sí, con lo que pueden producirse interferencias entre ellos con mayor facilidad que en los CCD de mayor tamaño. El tamaño más habitual de los CCD en las cámaras de última generación mide 8.8 x 6.6 mm de lados y 11 mm de diagonal [41].

3.2. Procesamiento

Luego que se ha configurado el sistema y se han adquirido imágenes (figura 3.6), éstas pueden analizarse y procesarse para extraer la información de interés del objeto que está siendo inspeccionado. La foto microscopia es la técnica de adquisición de imágenes en el microscopio [42]. El microscopio estereoscópico cuenta con un sistema de captura patentado internamente en el cabezal.

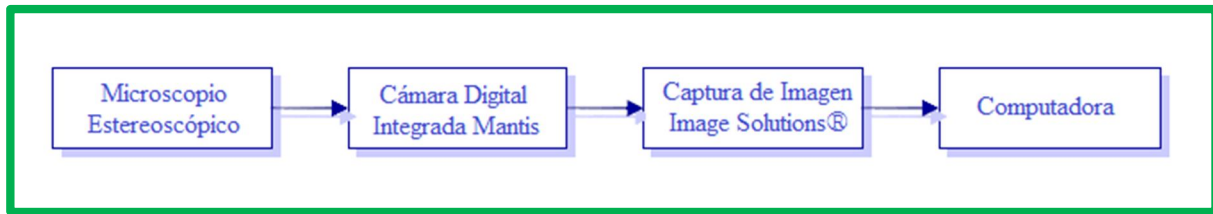


Figura 3.6. Adquisición de Imágenes digitales.

3.2.1. Diagrama para el análisis y procesamiento de imágenes

El término análisis de imágenes hace referencia a las técnicas destinadas a obtener datos relativos de un sistema de estudio. Combina técnicas estadísticas, de cálculo y de medición basándose principalmente en la intensidad de escala de grises de los píxeles de la imagen.

Las técnicas de análisis de imágenes mejoran la apariencia visual para el observador o procesador, preparando a conveniencia el contenido digital de la imagen. Los pasos para el proceso digital de imágenes de acuerdo a lo propuesto en el libro de González-Woods [35], se pueden resumir para este trabajo en:

- Adquisición de la imagen: es la primera etapa del proceso para esto es necesario un dispositivo (hardware) con la posibilidad de digitalizar imágenes del mundo real, como se mencionó anteriormente.
- Realce de la imagen: el objetivo en esta parte es llevar a detalle las características de interés, por ejemplo incrementando el contraste, la imagen en esta etapa es aún subjetiva.
- Restauración de la imagen: en este paso mejora la apariencia de la imagen de manera objetiva, para lograr esto, las técnicas utilizadas tienden a estar basadas en modelos matemáticos y probabilísticos. Los algoritmos aquí utilizados buscan reducir el ruido, mejorar el contraste u homogeneizar el color.
- Procesamiento y segmentación: se refiere a la labor de extraer y caracterizar los componentes de la imagen. A la salida de la segmentación habitualmente se tienen los datos de cada píxel que constituyen el contorno de una región o bien todos los puntos de una región determinada.
- Representación: se encarga de entender la imagen de acuerdo a la información acumulada, dejando la información fundamental requerida para diferenciarla del resto de otros objetos. Se logra la identificación de objetos y/o localización.
- Reconocimiento del objeto: finalmente se entregan los resultados para realizar las tareas como: estimación de características espaciales, a partir de la información proporcionada por la base de conocimientos, específicamente en nuestro caso la estimación de la incertidumbre, es decir se asigna el interés del procesamiento de imágenes.

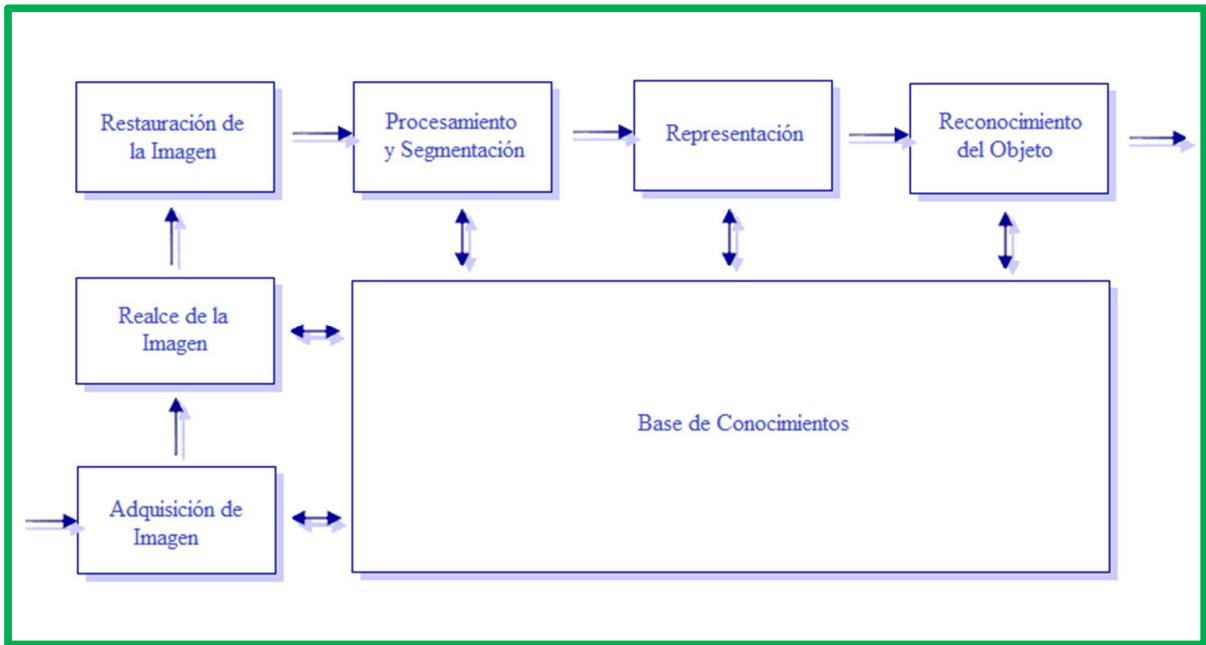


Figura 3.7. Diagrama para el procesamiento y análisis de imágenes digitales.

En la figura 3.7 se muestra la secuencia de los módulos del procesamiento, entendiendo que el procesamiento sucede desde la primera modificación que sufre la imagen hasta el reconocimiento del objeto buscado. Por lo tanto la base de conocimientos contiene toda la información de interés conocida, que hace posible la interacción entre un módulo y otro. La información es retroalimentada en cada proceso para el análisis de imagen en cada interactividad.

3.2.2. Métodos de detección de bordes

La detección de bordes hace posible la segmentación e identificación de un objeto dentro de una imagen, reduce significativamente la cantidad de información y filtra la información necesaria, preservando las características fundamentales de la imagen. De allí que los métodos para detectar bordes sean una herramienta muy utilizada en el procesamiento de imágenes.

En el caso de imágenes en escala de grises, un borde se define como la frontera entre dos regiones con nivel de gris relativamente diferente. Si consideramos una función de intensidad de la imagen, entonces los bordes son los cambios o discontinuidades de algún tipo en la función [43].

La idea básica detrás de cualquier detector de bordes es el cálculo de un operador local de derivación. Como se observa en la figura 3.8 la transición de oscuro a claro y viceversa, modelada como rampa debido a que los cambios en la imagen muchas veces son graduales. La primera derivada es cero en todas las regiones de intensidad constante y es positiva para cambio a nivel de

gris más claro, negativa en caso contrario. La segunda derivada, en cambio es cero en todos los puntos, excepto al comienzo y final de una transición de intensidad, presenta valor positivo en la zona oscura de cada borde, valor negativo en la zona clara de cada borde. El valor de la magnitud de la primera derivada nos sirve para detectar la presencia de bordes, mientras que el signo de la segunda derivada nos indica si el pixel pertenece a la zona clara o a la zona oscura [32].

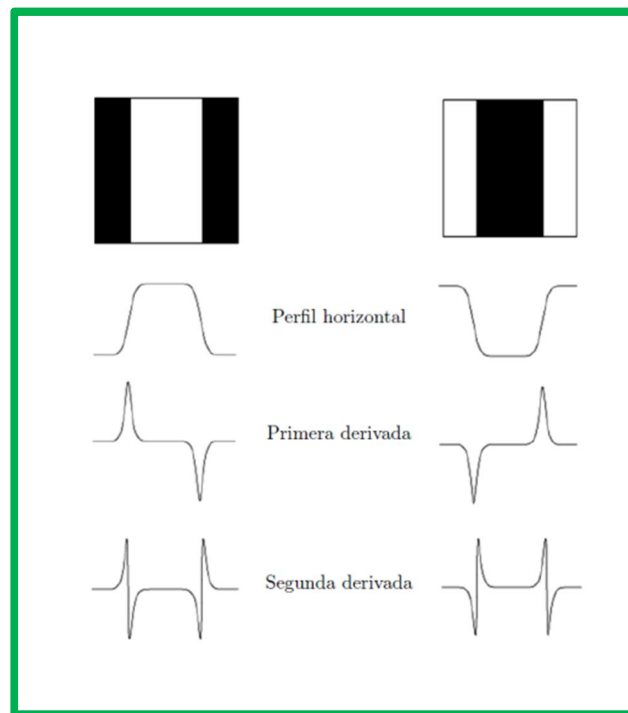


Figura 3.8. Concepto de la primera y segunda derivada para la detección de bordes.

Cuando se analiza una imagen, es importante saber que existen muchos tipos de bordes diferentes, algunos son debidos a sombras que se producen sobre los objetos, otros a la variación de la reflectancia de los objetos o incluso por la textura de los objetos. Definir bien los objetos a localizar es una de las primeras consideraciones para evaluar el método de detección de bordes más apropiado.

Al observar la figura 3.8, es evidente que para distinguir un borde se puede pensar en la primera o segunda derivada. Además del concepto del gradiente, que se basa en la primera derivada, se han originado diversos métodos para la aplicación en la extracción de bordes, por mencionar algunos como: los operadores Sobel, Prewitt, Roberts y el algoritmo de Canny, o las máscaras de Kirsch, Robinson y Frei-Chen. Los operadores basados en la segunda derivada son: el Laplaciana y el Laplaciana de la Gaussiana [32].

Es posible aplicar el vector gradiente a partir de $I(x, y)$ en la posición (x, y) , para aplicar la derivada de primer orden de la siguiente manera.

$$\vec{G}[f(x, y)] = \begin{bmatrix} G_x \\ G_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} f(x, y) \\ \frac{\partial}{\partial y} f(x, y) \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

El vector gradiente apunta en la dirección de la máxima variación de f en el punto (x, y) por unidad de distancia con magnitud y dirección:

$$|\vec{G}| = \sqrt{G_x^2 + G_y^2} \quad (3.13)$$

$$\phi(x, y) = \tan^{-1} \frac{G_y}{G_x} \quad (3.14)$$

El vector \vec{G} también puede aproximarse su magnitud por medio de los valores absolutos $|\vec{G}| = |G_x| + |G_y|$.

Siguiendo con el concepto de derivada definido en la ecuación 3.12, que emplea el truncamiento del desarrollo de Taylor hacia adelante y hacia atrás, se puede crear una imagen binaria utilizando la relación:

$$g(x, y) = \begin{cases} 1 & \text{si } G[f(x, y)] > T \\ 0 & \text{si } G[f(x, y)] \leq T \end{cases} \quad (3.15)$$

Donde T es un valor de umbral no negativo, así el procedimiento extrae sólo aquellos píxeles caracterizados por transiciones de intensidad significativas.

Matlab® tiene seis métodos diferentes de detección de bordes: Sobel, Prewitt, Roberts, Laplaciana de la Gaussiana, cruce por cero y el método de Canny [44]. Enseguida se definen las nociones principales de estos métodos por el uso de Matlab® como software de apoyo en la realización de este trabajo.

3.2.2.1. Operador Sobel

Es un operador de vecindad, por lo tanto tiene la propiedad añadida de suavizar la imagen, eliminando parte del ruido y por consiguiente, minimiza la aparición de falsos bordes debido al efecto magnificación del ruido por parte de los operadores de derivada.

El operador Sobel consiste de un par de máscaras de convolución o kernels de 3X3 (figura 3.9), donde un kernel es el otro rotado 90°.

$$\begin{array}{ccc}
 \begin{bmatrix} z_1 & z_2 & z_3 \\ z_4 & z_5 & z_6 \\ z_7 & z_8 & z_9 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} -1 & -2 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 2 & 1 \end{bmatrix} \\
 (a) & (b) & (c)
 \end{array}$$

Figura 3.9. (a) Región de la imagen de dimensión 3x3. (b) Máscara para obtener G_x. (c) Máscara para obtener G_y.

A partir de la figura 3.9 las derivadas se obtienen:

$$G_x = (z_3 + 2z_6 + z_9) - (z_1 + 2z_4 + z_7) \quad (3.16)$$

$$G_y = (z_7 + 2z_8 + z_9) - (z_1 + 2z_2 + z_3) \quad (3.17)$$

Los distintos valores de z corresponden a los distintos valores de gris empalmados por las máscaras. Con las ecuaciones anteriores se obtiene el vector gradiente \vec{G} (ecuación 3.13) en el punto definido por el pixel central y el ángulo con la ecuación 3.14. Para obtener el siguiente valor, las máscaras se mueven a la siguiente posición del nuevo pixel y se repite el proceso, después de haber barrido todas las posibles posiciones, el resultado es una nueva imagen gradiente [32].

3.2.2.2. Operador Prewitt

Es similar al operador de Sobel, solo es diferente en los coeficientes de las máscaras como se observa en la figura 3.10.

$$\begin{array}{ccc}
 \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} -1 & -1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \\
 (a) & (b)
 \end{array}$$

Figura 3.10. Operador Prewitt. (a) Máscara para obtener G_x. (b) Máscara para obtener G_y.

Las dos máscaras se convolucionan con la imagen original para calcular las derivadas [45]:

$$G_x = (z_3 + z_6 + z_9) - (z_1 + z_4 + z_7) \quad (3.18)$$

$$G_y = (z_7 + z_8 + z_9) - (z_1 + z_2 + z_3) \quad (3.19)$$

3.2.2.3. Operador Roberts

A diferencia de los dos anteriores, marca solamente los puntos de borde, sin información sobre la orientación de éstos. Es un operador simple que trabaja muy bien en imágenes binarias, es un operador que usa máscaras de 2x2 como se muestra en la figura 3.11.

$$\begin{matrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \\ (a) & (b) \end{matrix}$$

Figura 3.11. Operador Roberts (a) Máscara para obtener G_x . (b) Máscara para obtener G_y .

Opera según las dos diagonales y los valores de G_x y G_y se calculan como [46]:

$$G_x = \frac{\partial}{\partial x} f(x, y) = f(x, y) - f(x + 1, y + 1) \quad (3.20)$$

$$G_y = \frac{\partial}{\partial y} f(x, y) = f(x + 1, y) - f(x, y + 1) \quad (3.21)$$

3.2.2.4. Operador Laplaciana de la Guassiana

La detección consiste en la suavización mediante la convolución con un filtro gaussiano y la posterior detección mediante el cruce por cero del Laplaciana.

Los filtros gaussianos son máscaras de convolución que emplean la discretización de las funciones de densidad normal de media cero y varianza dada $N(0, \sigma^2)$:

$$h_\sigma(x, y) = e^{-\frac{(x^2+y^2)}{2\sigma^2}} \quad (3.22)$$

σ determina el grado de suavizado, el tamaño de la máscara aumenta con σ .

El Laplaciano de una función de dos variables se define como:

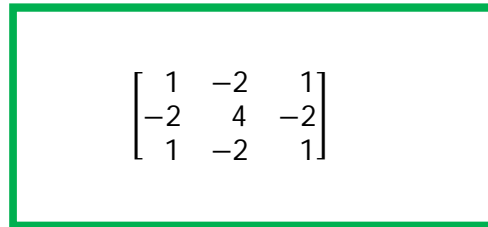
$$\nabla^2 f(x, y) = \frac{\partial^2 f(x, y)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 f(x, y)}{\partial y^2} \quad (3.23)$$

Desde el punto de vista formal al combinar el filtro con el Laplaciano [47], el operador queda definido como:

$$\nabla^2 (f(x, y) * h_\sigma(x, y)) = f(x, y) * \nabla^2 (h_\sigma(x, y)) \quad (3.24)$$

$$\nabla^2 h_\sigma(x, y) = \frac{\partial^2 h_\sigma(x, y)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h_\sigma(x, y)}{\partial y^2} = \frac{1}{\sigma^4} \left[\frac{x^2 + y^2}{\sigma^2} - 2 \right] e^{-\frac{(x^2 + y^2)}{2\sigma^2}} \quad (3.25)$$

Notándose de la ecuación que tiene simetría radial. Una posible y sencilla implementación de máscara se ilustra en la figura 3.12, que representa al operador Laplaciana de la Gaussiana.



$$\begin{bmatrix} 1 & -2 & 1 \\ -2 & 4 & -2 \\ 1 & -2 & 1 \end{bmatrix}$$

Figura 3.12. Posible operador para el Laplaciana de la Gaussiana.

3.2.2.5. Método de cruce por cero

Anteriormente se ha comentado que un cambio de intensidad se manifiesta como un cambio brusco en la primera derivada y presenta un paso por cero, también se produce un cambio de signo su valor, en la segunda derivada, al cambio de signo se le denomina cruce por cero (*zero-crossing*). Este método encuentra los bordes buscando pasos por cero después de haber filtrado la imagen por algún otro método.

El cruce por cero lleva la información sobre el extremo local de la primera derivada y se indica un punto de cambio rápido de la función de la intensidad. Sólo los picos antes y después de un cero que son significativamente mayores en la imagen como señal indican bordes válidos [48].

3.2.2.6. Método de Canny

Se fundamenta en la teoría de los operadores de primera derivada y resulta particularmente interesante porque extrae bordes y cierra contornos evitando posibles rupturas de los mismos durante su extracción, se desglosa en tres módulos [32]:

1. Obtención del gradiente (magnitud y orientación del vector gradiente en cada pixel). La imagen I se convoluciona con un filtro gaussiano para eliminar el ruido provocado por píxeles aislados, generando una imagen suavizada J . Para cada pixel (x, y) de la nueva imagen J se obtiene la magnitud y orientación por medio de las ecuaciones del gradiente (ecuación 3.12). Entonces se obtienen otras dos imágenes de salida: E_m de la magnitud del gradiente y E_o de la orientación.
2. Supresión no máxima al resultado del gradiente. En este paso se logra el adelgazamiento del ancho de los bordes, obtenidos con el gradiente, hasta lograr bordes de un pixel de ancho. Con E_m y E_o como entradas y una nueva imagen I_N como salida, obtenida de considerar cuatro orientaciones de 0° , 45° , 90° y 135° con respecto al eje horizontal. Para cada pixel se encuentra la dirección que mejor se aproxime a la dirección del ángulo del gradiente. Se asigna al pixel el valor de 0, si el valor de la magnitud del gradiente es más pequeño que al menos uno de sus dos vecinos. Caso contrario se asigna el valor de la magnitud del gradiente.
3. Histéresis de umbral a la supresión no máxima. La salida $I_N(i, j)$ suele contener máximos locales creados por el ruido. Se pueden eliminar los píxeles por debajo de un determinado umbral por medio del procedimiento histéresis de umbral, que es una función basada en dos umbrales t_1 y t_2 , el primero más pequeño que el segundo. Para cada punto de la imagen se debe localizar el siguiente punto de borde no explorado que sea mayor al segundo umbral. A partir de éste punto se siguen las cadenas de máximos locales conectados en ambas direcciones perpendiculares a la normal del borde, siempre que sean mayores al primer umbral. Es así como se reducen los contornos falsos.

Frecuentemente, es común se realice en el algoritmo de Canny un cuarto y último paso, cierre de contornos abiertos. Este paso consiste en cerrar los contornos que pudiesen haber quedado abiertos por problemas de ruido. El algoritmo busca los extremos abiertos y sigue la dirección del máximo gradiente hasta cerrarlos con el otro extremo abierto [49].

3.2.3. Ruido en la imagen digital

Se entiende por ruido en imágenes digitales a toda la información no deseada que contamina la imagen y se manifiesta generalmente en píxeles aislados que toman cualquier valor que no se corresponde exactamente con la realidad. El ruido no se puede predecir acertadamente debido a

su naturaleza aleatoria, y tampoco puede ser medido precisamente en una imagen con ruido, dado que la contribución del ruido a los niveles de gris no es indistinguible de los píxeles de dato.

El ruido puede ser caracterizado a veces por su efecto en la imagen, y es usualmente expresado como una distribución de probabilidad con una media y desviación estándar específica. En las imágenes típicas el ruido puede modelarse de tres maneras diferentes: como una distribución Gaussiana (normal), uniforme (frecuencial o multiplicativo) o impulsional [32].

El ruido Gaussiano Se caracteriza por tener un espectro de energía constante para todas las frecuencias, es decir, la intensidad de todos los píxeles se ve alterada. En el impulsional, el valor que toma el píxel no tiene relación con el valor ideal, sino que toma valores muy altos o muy bajos; de ahí el apelativo sal (valor máximo y pimienta (valor mínimo). En el ruido uniforme frecuencial la imagen obtenida es la real más una interferencia de señal periódica (senoidal, cosenoidal) y el ruido uniforme multiplicativo la señal obtenida es resultado de la multiplicación de dos señales [50].

En la mayoría de las veces el ruido se debe al equipo electrónico utilizado en la captación de las imágenes. También existe la posibilidad que se produzca durante la transmisión o procesamiento o la imagen puede contener un ruido intrínseco que es provocado por la textura de los objetos o por el entorno especial en el que se sitúa la escena por ejemplo: imágenes subacuáticas o con presencia de algún gas [39]. Aunque la tesis no separa el ruido como factor de aportación de incertidumbre es necesario tener conocimiento de las variantes que por el momento se consideran como parte del método de detección de bordes y no individualmente.

3.2.4. Extracción de información

Una vez que una imagen ha sido segmentada en regiones por cualquiera de los métodos anteriores, es necesario clasificar regiones de píxeles que representan el objeto de acuerdo a la información deseada y que ya ha sido reconocido por el sistema. Se representa como una función matemática: definida por coordenadas, densidad de color en cada punto, conjunto de regiones divididas por límites o relaciones entre objetos en la imagen.

Cuando el contorno o la región de un objeto han sido extraídos se clasifican en dos grupos atendiendo al tipo de puntos del objeto convenientes para su procesamiento posterior:

- En términos de sus características externas: sus bordes, contorno, etc.
- En términos de sus características internas: los píxeles abarcados en la región.

Es recomendable elegir una representación externa cuando el interés principal está basado en las características de forma. La representación interna es recomendable cuando el mayor interés está orientado hacia propiedades como color y textura [51].

3.3. Sistemas de medición por visión

Son sistemas desarrollados a partir del principio de que los puntos de medición de una cierta característica, después de ser ampliados por lentes y conjugados en una cámara de alta resolución (CCD), son claramente visibles en un monitor de computadora. La imagen del objeto es ampliada por los lentes y capturada al sistema. A través de un soporte electrónico, escalas de medición de alta resolución y de un algoritmo de medición basado en el número de píxeles, procesa y analiza la imagen de la forma de los objetos, los cuales de esta manera se pueden medir con exactitud y facilidad. Es importante recordar que el tamaño de un píxel es alrededor de $10 \times 10 \mu\text{m}$, que puede variar dependiendo el modelo y el fabricante.

De forma general, estos sistemas consisten de una unidad principal, la cual registra la información visual y de posición, una unidad de energía, que provee la luz para iluminar el campo de medida, una unidad de computación, la cual asiste a todo el sistema procesando los datos de medición y en algunos casos una unidad controladora, que puede dar movimiento al sistema.

El principio empleado por estos sistemas es el siguiente: Una cámara CCD integrada al sistema óptico de medición puede discernir entre 256 graduaciones (8 bits por píxel) de información de contraste [52].

3.3.1. Foto-microscopía

Se llama así a la técnica fotográfica empleada para la consecución de imágenes de especímenes de muy pequeño tamaño (de 1mm o menos), que se obtienen mediante el empleo de un microscopio o partes de éste.

Los principales factores que condicionan la calidad de fotomicrografía son: la calidad de la preparación (condicionada por el corte), la calidad del objetivo, el correcto calibrado del microscopio, el enfoque y la exactitud en la exposición, es decir en la cantidad de luz que recibe el material fotosensible.

El campo cubierto por el ocular no tiene por qué coincidir con el del fotograma. Suele haber un ocular específico para cada iluminación, que se seleccione de manera manual o en el programa utilizado para la captura, que delimitan el campo cubierto por el fotograma [53].

Aunque el concepto de la foto-microscopía no ha sido ampliamente divulgado es una técnica que se utiliza habitualmente en la verificación de mediciones micrométricas por la facilidad que ofrece para apreciar los objetos pequeños, defectos o sencillamente identificar una dimensión.

3.3.2. Aproximación a nivel sub-píxel

Con el análisis de sub-píxeles se pretende aprovechar toda la información contenida en los espacios para cada uno de los píxeles, logrando para cada píxel una clasificación con resolución más fina.

Cuando un píxel forma parte de un borde tiene una intensidad intermedia, que se encuentra entre la intensidad del objeto y la intensidad del fondo (figura 3.13). Por tanto, se afirma que la intensidad de un píxel borde es la suma de la contribución de cada color. Es este efecto parcial en el interior del píxel, el que permite al método localizar de forma precisa el contorno, sus características: posición sub-píxel, orientación, curvatura e intensidad a ambos lados [54]. El método propuesto por el profesor Agustín Trujillo Pino plantea algo diferente. En lugar de considerarse que se está ante una función continua y derivable, se plantea que un borde es una discontinuidad en los valores de intensidad de la función, delimitando la frontera entre dos objetos.

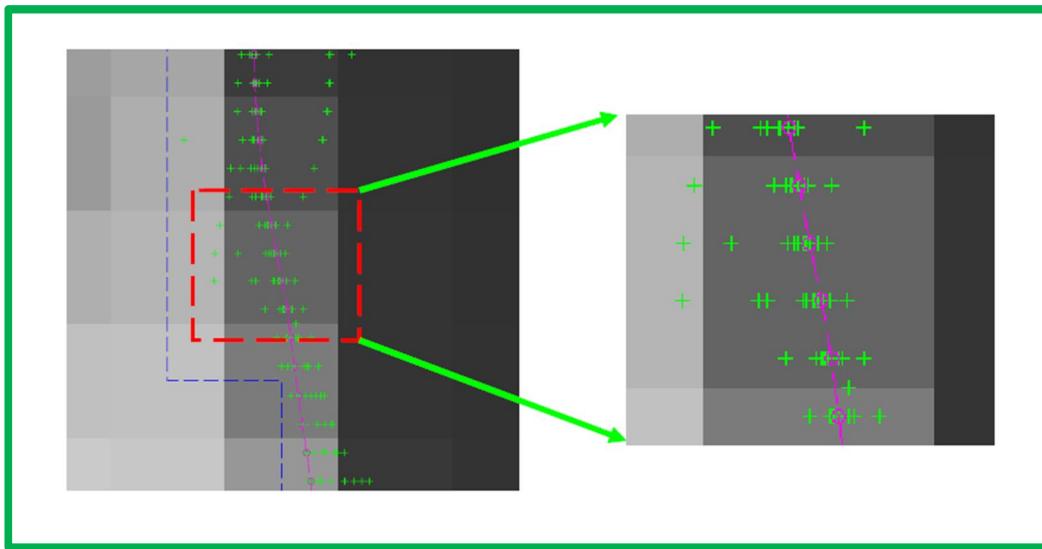


Figura 3.13. Representación de puntos a nivel sub-píxel.

En la figura 3.13 la línea azul corresponde a la posición de la línea de costa a nivel de píxel (figura lado izquierdo). En verde se presentan las distintas soluciones que para cada línea de perfil se han obtenido al desplazarse el vecindario sobre la imagen remuestreada. Los puntos rosa o línea se sitúan en la posición media respecto a la población de puntos verdes para cada línea de perfil y definen la posición de la orilla a nivel sub-píxel [55].

Los métodos de detección de borde trabajan a nivel píxel, para una detección a nivel sub-píxel se ha demostrado que tiene que aplicarse otro método, como un método lineal simple de primer orden como se ilustra en la figura 3.14. Para incrementar la resolución sub-píxel, se puede aplicar un algoritmo de interpolación, lo que permite obtener valores en una malla más fina. La

mayoría de los programas comerciales de procesamiento de imágenes y aplicaciones gráficas utilizan métodos de tipo lineal. Aunque su comportamiento es aceptable en zonas sin cambios, en las zonas próximas a discontinuidades pueden producir errores considerables.

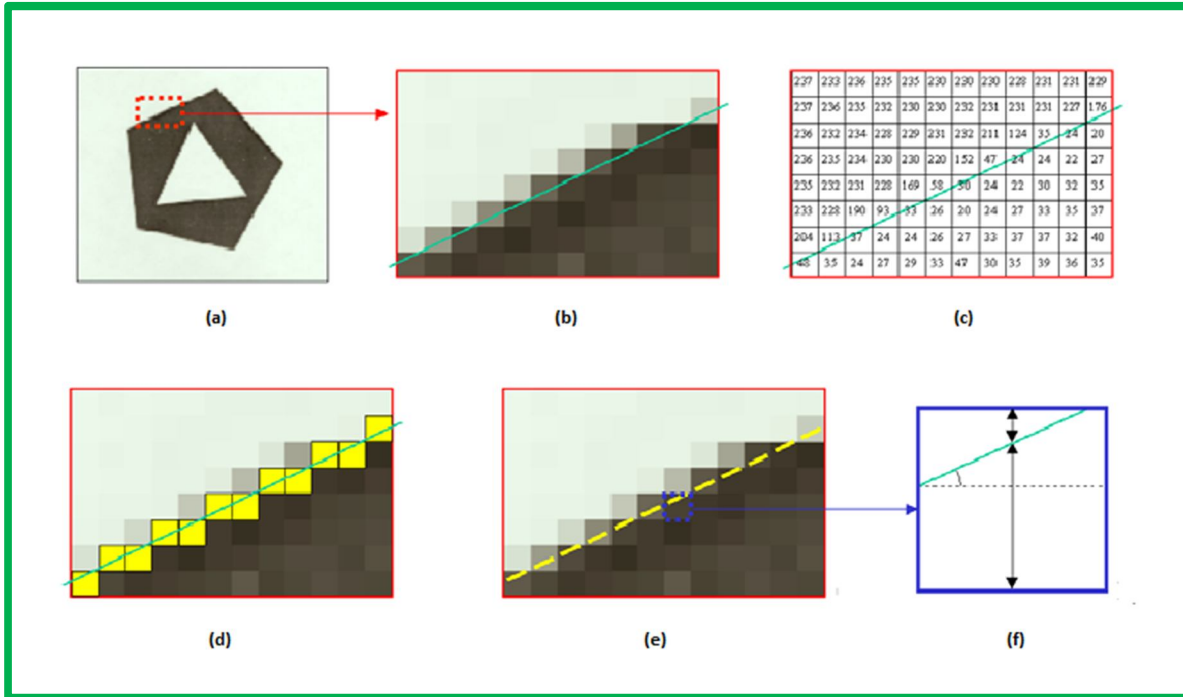


Figura 3.14. a) Fotografía del objeto. (b) Detalle amplificado del borde. (c) Valores numéricos de los píxeles. (d) Detección de bordes a nivel píxel. (e) Detección del borde a nivel sub-píxel. (f) Detalle de la detección sub-píxel.

Conforme al procesamiento de la imagen para incrementar la resolución de la detección de borde procesado a nivel sub-píxel, el borde ahora es detectado por una curva de interpolación compuesta por nuevos recuadros [56], como en la figura 3.14. Como resultado es posible la medición más allá de un píxel.

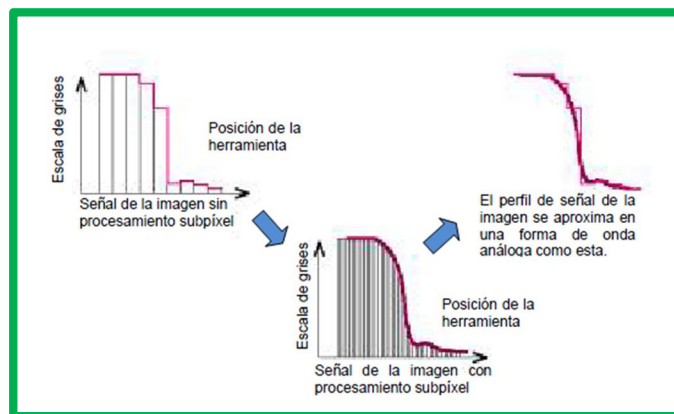


Figura 3.15. Aproximación a nivel sub-píxel.

CAPÍTULO IV

Desarrollo de la técnica propuesta

El procedimiento aquí propuesto se deriva del análisis de los factores observados que se considera que afectan al sistema de medición. En los primeros capítulos se mencionó de manera general el sistema de medición como el conjunto de tres elementos, el equipo, la persona y el mensurando, dependiendo de las condiciones ambientales al momento de cuantificar una magnitud.

Al analizar la definición de un sistema de medición aplicada en el sistema de estudio, el único cambio está en que la apreciación de la persona ha pasado a ser decisión de un computador por medio de las herramientas de procesamiento de imágenes y su confiabilidad es estructurada a partir de ocho factores considerados como posibles fuentes aportación de incertidumbre.

Los factores de aportación de incertidumbre son el resultado del análisis visual y estudios aplicados en otros instrumentos de medición que están muy relacionados con la técnica de calibración, como los microscopios de medida, los estudios de repetibilidad que se hacen en cualquier otro, la medición en la misma dirección de la escala. Realmente la idea de calibración y medición usada en estos equipos ha permanecido igual desde el principio, esto significa que se relaciona el número de píxeles con la resolución del píxel para después obtener la dimensión final. El estudio es centrado en los factores de incertidumbre que se plantean como independientes del modo de medición.

En este capítulo se trata de describir lo más completamente posible la técnica de medición y calibración como guía para estimar la aportación de incertidumbre de cada factor y la incertidumbre expandida. Posteriormente se complementa con recomendaciones encontradas en el desarrollo de este trabajo.

4.1. Características para la medición del Bloque

En este punto se describe el conjunto de acciones preliminares para la obtención de las imágenes en el microscopio estereoscópico.

Lo básico antes de realizar cualquier medición en el microscopio, es la calibración. La calibración de un instrumento de medición se realiza en cada eje de medida que puede medir (comúnmente identificados como x, y, z , para la Máquina de Medición por Coordenadas). La mayoría de los instrumentos por su necesidad y manejo miden en un eje o una dirección. En el caso del microscopio su medición es sobre un plano, es decir se puede medir en el eje x y y , o una dimensión obtenida de la resultante de las componentes en los ejes.

Cuando se requiere de mayor precisión es necesario minimizar la mayor cantidad de fuentes que contribuyen al error, un origen bien estudiado es la manipulación del mensurando o el equipo de medición. Para esto debe pensarse en técnicas donde la pieza este completamente inmóvil y un sistema de medición con un origen fijo, junto con un sistema capaz de detectar las variaciones de medición en todas direcciones.

La propuesta intenta cumplir con un sistema que logre estimar la incertidumbre de cada factor incontrolable en su totalidad, dependiente de cada operador, que ahora se presenta como resultado del estudio de los parámetros del propio sistema de medición.

4.1.1. Ejes de medida y su orientación

En la medición por medio de microscopios la medición es en dos direcciones, llamados eje X y Y , normalmente una medida no se da exactamente en un eje, a falta de coincidencia perfecta entre el mensurando y un solo eje. Por tanto el cálculo de la medición es resultado de la combinación de los dos ejes, de ahí la importancia de la calibración independiente de cada uno y en todo el campo de medida.

El microscopio estereoscópico dispone de una mesa móvil, que extiende el campo de medida, pero los ejes siguen conservando su orientación, más bien, es de mencionar que los ejes dependen también de la orientación de la cámara, si existiera un desplazamiento de la cámara, el resultado se va a reflejar cuando se vuelva a tomar una nueva microfotografía.

El planteamiento considera ejes fijos en la orientación, se continúa con la nomenclatura convencional de llamar al eje X , el eje perpendicular al operador, positivo el movimiento a la derecha; el eje Y se considera como el eje que está en la misma dirección del operador, siendo positivo el movimiento hacia el operador, o en la imagen capturada el movimiento hacia abajo (figura 4.1).



Figura 4.1. Orientación de los ejes de medida en el microscopio estereoscópico.

Son los mismos ejes en los que se realizan las mediciones para la calibración por medio del análisis y procesamiento de imágenes, que contabiliza ya sea por columna o renglón los píxeles que dibujan el bloque patrón.

4.1.2. Separación del campo de medida y campo de visión

Considerando los errores mínimos de unos cuantos píxeles en la orillas de la imagen, se deja intencionalmente un contorno para dejar fuera los errores de esta causa por las sombras generadas a falta de iluminación, como es más visible en los aumentos de X15 y X20, como se observa en la figura 4.2, donde se limitan las regiones de estudio, el campo de visión para X20 baja considerablemente.

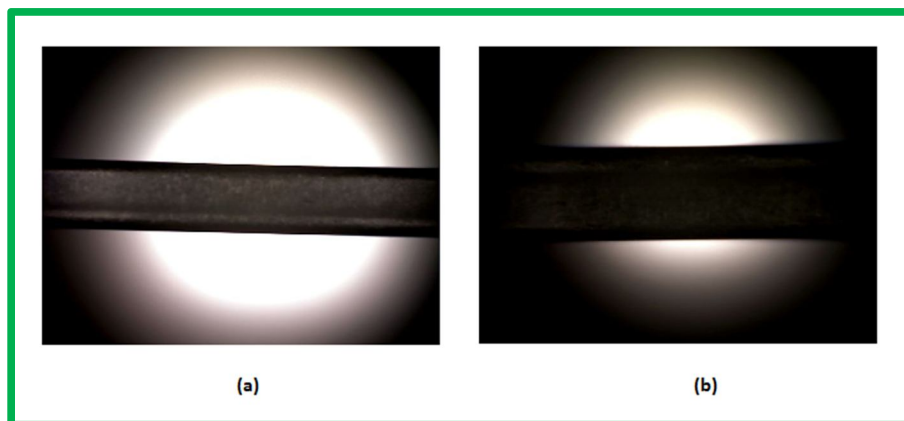


Figura 4.2. Orientación de los ejes de medida en el microscopio estereoscópico.

Esta división es consecuencia de la falta del control de iluminación en los microscopios, como resultado si la iluminación es baja, se formará la silueta oscura en el exterior, si la iluminación es muy alta, la silueta disminuye, pero a consecuencia la iluminación es excesiva en el centro, donde normalmente se colocan los objetos para su medición. Con mucha iluminación hay dificultad para distinguir los objetos principalmente al centro de la imagen.

Como desde el inicio de este trabajo, cuando se habla del campo de medida, se hace referencia a todo el campo observable, en cambio el campo de medida significa el campo disponible para realizar las mediciones en una región clara. El margen ha quedado predeterminado a 80 píxeles en cada lado y 60 píxeles para el margen superior e inferior.

Más adelante se hará notar que aun cuando el margen ha sido predeterminado, se verifica que se cumpla con la zona de buena iluminación, siendo en esos casos determinada por el programa de cálculo.

4.1.3. División del campo de medida

Una vez separado el campo de medida, se puede estimar la incertidumbre del equipo en toda esta región y expresar una sola incertidumbre es una manera rápida y sencilla. El equipo al igual que muchos casos, no se comporta así de fácil, al hacerlo se estaría obviando las aportaciones de los factores a detalle que se mencionan. Al ir estudiando las características de funcionamiento y operación del microscopio es lógico pensar que no en todo el campo de medida se trabaja con las mismas condiciones, razón suficiente para tener un campo fraccionado.

El diagrama muestra una cuadrícula de 3x3 celdas numeradas del 1 al 9. El texto 'Margen no considerado' aparece en la parte superior central y en la parte inferior derecha de la cuadrícula, indicando que estas zonas no se utilizan para mediciones.

	Margen no considerado			
	1	2	3	
	4	5	6	Margen no considerado
	7	8	9	

Figura 4.3. División del campo de medida.

La propuesta de la estimación de la incertidumbre en el microscopio estereoscópico involucra una división de la imagen en regiones uniformes, como se hizo en la aplicación del

procedimiento del CEM, y que se muestra nuevamente en la figura 4.3. Esto contribuye a estudiar por separado los factores que afectan de manera proporcional a la separación del centro de imagen total, aparentemente como gradientes. Esta división más que nada sirve para ponderar la región de trabajo y dar el peso adecuado del error que se puede obtener. Esta idea no es nueva, se retoma del círculo de magnificación de los lentes. Este concepto dice que la amplificación varía de manera radial a partir del centro, principalmente derivado de la construcción y geometría de los lentes.

La división del campo se plantea como una división regular y repetible, es decir que toda región es del mismo tamaño y forma, todas en conjunto cubren el campo de medida formando una red. Es de mencionar que en este estudio se utilizan regiones rectangulares seleccionadas a conveniencia por el tamaño de la imagen capturada. Puede quedar a opción el estudio de alguna otra forma como rombos hexágonos triángulos u otra figura regular, temas que no contempla el estudio presente.

Para realizar la división es necesario considerar el tamaño inicial de la imagen y el campo de medida. Como en muchos casos, el campo de visión se puede presentar como un círculo, del cual se tendrá que separar en regiones cuadradas disminuyendo así el tamaño de forma muy notable, o al usar más amplificación. El tamaño del campo observado es inversamente proporcional al aumento total del microscopio, por esta razón las lentes de pequeño aumento son útiles para rastrear la preparación. Si cambiamos de un objetivo a otro de mayor aumento, observaremos una imagen más aumentada pero que incluirá sólo una parte de lo que observábamos con el objetivo menor.

4.2. Medición por procesamiento de imágenes

Este tipo de medición forma parte de la medición dimensional sin contacto, es una técnica cada vez más utilizada, sobre todo en el ambiente industrial. Utiliza una cámara digital que captura imágenes que son convertidas en arreglos dimensionales para aplicar métodos de procesamiento para mejorar la calidad, resaltar los objetos y contabilizar los píxeles que describen al objeto. Actualmente existen equipos que consiguen precisiones de 2 micras y amplificaciones de 300X [56].

La imagen una vez adquirida pasa a ser un arreglo bidimensional, el cual es procesado para mejorar su calidad o adaptarlo a los requerimientos, se aplican las técnicas del procesamiento de imágenes.

Como se ha mencionado, una imagen consiste en píxeles. Si el número de píxeles de una sección es contado y luego es multiplicado por el tamaño de un píxel, entonces la sección puede ser convertida a un valor numérico de longitud.

4.2.1. Algoritmo de localización y medición

Se ha creado un programa en Matlab® con las herramientas que ofrece para el análisis de imágenes. Los comandos son muy amplios y de fácil manejo para el procesamiento de imágenes y la realización de operaciones estadísticas.

Siguiendo algunas de las ideas de varios documentos leídos se construye el código en Matlab®, como entrada lee la microfotografía previamente capturada por el dispositivo de adquisición incluido en el microscopio y la salida son los datos de las incertidumbres típicas hasta estimar su incertidumbre expandida.

4.2.2. Medición por renglón y por columna

En este algoritmo se analizan todos los píxeles de la imagen por columna primero y luego por renglón y se determina si pertenecen a cierto color al evaluarlo mediante un criterio de color, en este caso, los colores oscuros representan al bloque patrón. La imagen se analiza en el formato de intensidades.

El algoritmo se basa en la localización de todos los píxeles oscuros para después contabilizarlos y convertirlos en las unidades del bloque patrón utilizado.

Conforme se realiza la lectura, los píxeles se clasifican de acuerdo a las clases de color predefinidas y se van guardando en un arreglo diferente, así que se tiene un archivo diferente para cada eje de calibración. En otro arreglo se van guardando las coordenadas que corresponden a los bordes, esto para identificar el punto inicial y final de medición, además sirve para medir la calidad de enfoque al comparar el valor con sus vecinos en línea y para realizar el cálculo de la línea de regresión, una parte importante que compensa la inclinación de la medida.

Cuando se ha terminado de localizar los píxeles se hace la sumatoria de éstos, convirtiendo el valor en unidades de media y realizando la estimación de la incertidumbre que más adelante se detalla el método.

4.3. Factores encontrados que contribuyen a la incertidumbre y su estimación

A través de los experimentos y mediciones previas al desarrollo completo del trabajo, principalmente por observación, se ha concentrado el estudio en ocho factores intuidos en inicio como fuentes de incertidumbre. En éste capítulo se describen las razones del presentimiento de error de cada factor y en el siguiente capítulo los resultados de los análisis por la propuesta de estimación.

Los factores identificados que afectan en la incertidumbre son los siguientes:

- Del bloque patrón.
- Repetibilidad.
- Resolución de mínima escala.
- Método de procesamiento de imagen.
- Iluminación.
- Calidad de enfoque.
- Temperatura del bloque.

Los primeros tres han sido estudiados en algunos otros trabajos y son los de mayor influencia en cualquier instrumento de medición. En este trabajo se plantea una técnica para aproximación de otros cuatro factores que en los experimentos realizados se observó dependencia a posibles errores.

Similar a otros instrumentos se ha propuesto un desarrollo cumpliendo con la normatividad de la estimación de la incertidumbre, adaptando a la medición del microscopio estereoscópico los conceptos aplicados en otros equipos de medición, relacionando su cálculo a partir del procesamiento de imágenes.

La estimación de incertidumbre de cada factor se presenta en una incertidumbre típica, para después expresar todo el resultado como la incertidumbre expandida, utilizando un factor $k = 2$ como en la mayoría de los cálculos de incertidumbre.

4.3.1 Incertidumbre por el bloque patrón

La incertidumbre por el bloque, es un dato de referencia proporcionado por el fabricante, indispensable para la trazabilidad de medición de un instrumento. El cálculo se basa en la expresión del certificado de los bloques patrón utilizados (anexo 1), en este caso queda:

$$u_{pi} = \frac{1}{2} \left[0.06 + 0.5 \frac{L}{1000} \right] \quad (4.1)$$

Donde L es la longitud del bloque patrón utilizado, en milímetros. La expresión de u_{pi} se expresada en micrómetros.

Nótese que el $\frac{1}{2}$ de la expresión corresponde de convertir la incertidumbre expandida, la cual fue basada en un factor $k = 2$ a una incertidumbre típica.

4.3.2 Incertidumbre por Repetibilidad

El número de veces que se repite el experimento afecta directamente en la incertidumbre del mensurando, es una característica a la cual toda medición e instrumento está sujeta.

Lo anterior significa que si graficáramos los datos obtenidos en una medición (repetir el experimento un número de veces) es muy probable que la mayor parte de los datos los encontremos en una zona concentrada y que los restantes cada vez se vayan dispersando o sean más escasos en el resto del intervalo, probablemente los extremos, dependiendo del tipo de distribución de probabilidad del comportamiento del experimento. En otras palabras existe mayor probabilidad de que el valor buscado (mensurando) se localice en la zona donde se repite más veces ese valor.

Aunque existen más tipos de distribución de probabilidad como la binomial, exponencial, etc. La estimación de este punto se considera la distribución normal, por ser el tipo de distribución que comúnmente se asigna a los valores que se reportan en los certificados de calibración de los patrones de referencia, ya que generalmente también provienen de una serie de repeticiones que realizó el laboratorio que calibró el instrumento.

Para la repetibilidad de la medición por el procesamiento de imágenes se obtiene igual, a partir de la desviación estándar del conjunto de medidas por línea de píxeles que forman una región. Es importante aclarar que cada región tiene una incertidumbre diferente a otra por los factores antes mencionados que no son iguales en todas. Esta incertidumbre se representa por:

$$u_{rep} = \frac{\sigma}{\sqrt{J}} \quad (4.2)$$

Donde σ es la desviación estándar de las mediciones y J es el número de mediciones.

En la repetibilidad significa que ninguno de los siguientes factores en la medición puede cambiar:

- El mensurando.
- El observador o persona que mide.
- El instrumento de medición, utilizado bajo las mismas condiciones
- El lugar donde se realiza la medición
- La repetición de la medición sucede en un intervalo corto de tiempo.

La ecuación 4.2 considera que el bloque está perfectamente horizontal o vertical, de acuerdo a la técnica de medición aquí utilizada no se puede garantizar que realmente suceda así, esto hace necesario realizar un análisis que compense los posibles errores derivados de la alineación. Esto requiere que para medir, se debe calcular la posible inclinación.

4.3.2.1 Alineación del bloque

La alineación vertical u horizontal del bloque es un problema claramente discutible, sobre todo si el microscopio carece de guías capaces de garantizar una alineación. Así, es necesario pensar en una técnica capaz de identificar y medir la desalineación de los bloques. Aun cuando el microscopio tuviera guías perfectamente alineadas, se tendría que garantizar después la alineación de la cámara con esas guías o calcular la compensación de desalineación cámara-guías.

El caso real propio de este trabajo, es que la alineación queda a cargo de la vista del usuario, en consecuencia no se puede tener un error constante, sino que dependerá en gran medida de la habilidad de quien usa el equipo, motivos suficientes para considerar este punto como fuente de incertidumbre y buscar técnicas para su estimación.

En este caso es razonable decir que la correspondencia del punto de una pared con su opuesta debe estar a la misma "altura". En otras palabras si la imagen fuese doblada a la mitad los puntos de un lado coinciden con su opuesto, cada mitad de imagen un espejo de la otra si la alineación es perfecta. A partir de ahí se puede estimar un posible error por falta de alineación del mensurando.

El cálculo por falta de alineación comienza evaluando los puntos de borde del bloque patrón como un conjunto de datos de los que se obtendrá la regresión lineal. De cada lado se obtendrá un línea que representa cada conjunto de datos, las dos deben ser muy parecidas, idealmente con respecto a la horizontal formarían un ángulo de 90° cuando el bloque se mide en el eje X, y 0° para las mediciones en el eje Y. Al tener dos líneas que describen la alineación del bloque, se plantea una comparación, obteniendo un promedio de la inclinación.

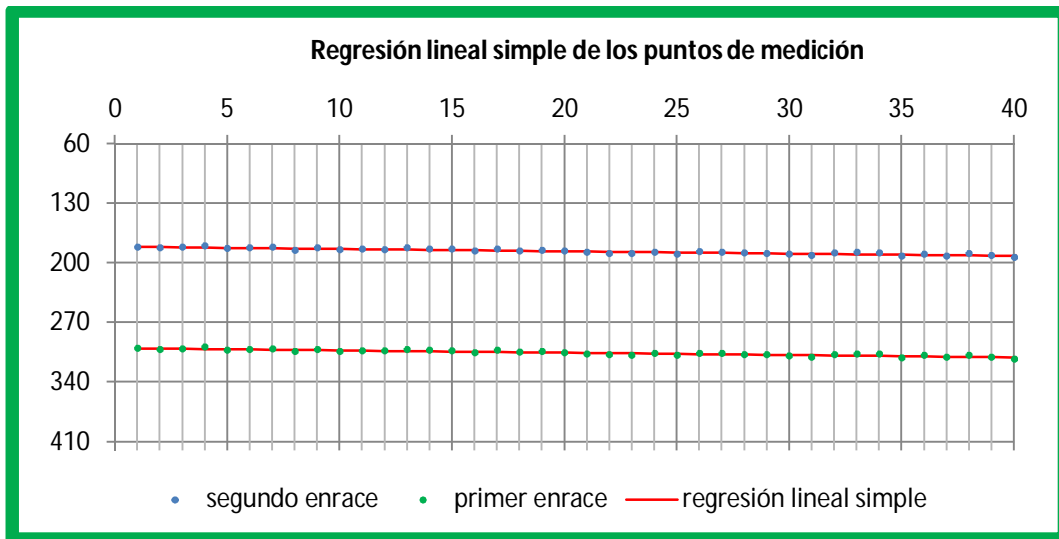


Figura 4.4. Regresión lineal a partir de los puntos de medida.

Por características del mensurando las líneas deben ser muy parecidas, considerar una u otra, o el promedio de ambas, teóricamente no afectaría las medidas por la propiedad de paralelismo entre caras de los bloques patrón (figura 4.4). En caso de ser significativamente diferentes, quiere decir que existen errores en el cálculo o hay otras fuentes que están originando las alteraciones.

La figura 4.5 corresponde a la medición para la calibración en el eje Y (posición horizontal), los puntos azules y verdes representan los engraces para la medición en esa columna, por ejemplo los puntos azules son del primer engrace, formando un conjunto de datos de los que se obtiene su regresión lineal para encontrar la posible inclinación. Como se observa existe una ligera inclinación con pendiente que puede ser calculada a partir de la regresión lineal (línea roja). La ecuación está dada a partir del siguiente modelo llamado recta de regresión estimada:

$$y = \hat{\alpha} + \hat{\beta}x \quad (4.2)$$

donde:

$\hat{\beta}$ es la pendiente estimada.

$\hat{\alpha}$ es la ordenada al origen cuando $x = 0$, término independiente.

Así podemos relacionar la inclinación con la incertidumbre de medición a partir del análisis que se muestra en la figura 4.5 y 4.6, mediciones para la calibración del eje X y Y respectivamente. Recuérdese que las mediciones se hacen únicamente de manera horizontal o vertical, con origen en la parte superior izquierda, entonces si el bloque está desalineado, el programa identificará una medición d (color rojo) como se ilustra en las figuras 4.5 y 4.6, siendo la medición verdadera la perpendicular a las aristas del bloque (color verde). Por tal motivo con el análisis de regresión lineal es posible identificar el ángulo de inclinación a partir de la pendiente $\hat{\beta}$.

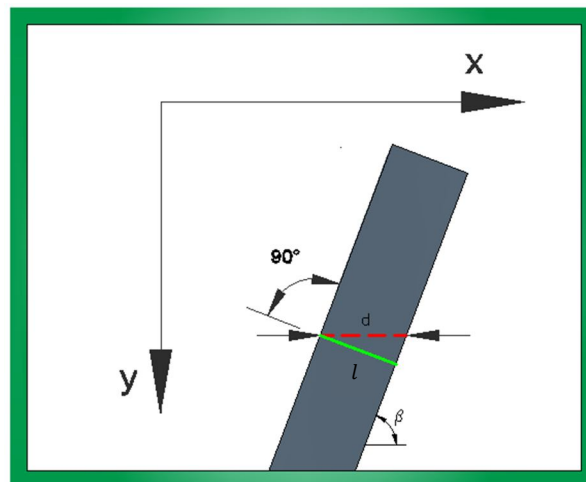


Figura 4.5. Medición para la calibración en el eje X.

Eje X. De la figura 4.5, para estimar la pendiente de acuerdo a la orientación de los ejes el ángulo β , para la calibración en el eje X, debe cumplir:

$$x = \hat{\alpha} + \hat{\beta}y \quad (4.3)$$

El valor importante de la ecuación anterior, para la estimación de incertidumbre por alineación es $\hat{\beta}$ calculada a partir de:

$$\hat{\beta} = \frac{S_{xy}}{S_{yy}} \quad (4.4)$$

$$S_{xy} = \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y}) \quad S_{yy} = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 \quad (4.5)$$

Y el ángulo de inclinación es:

$$\beta = \arctan \hat{\beta} \quad (4.6)$$

Y la corrección de medida de acuerdo a la figura 4.5 queda:

$$l_i = d_i \text{ sen } \beta \quad (4.7)$$

donde l_i es la longitud estimada del bloque patrón y L la longitud nominal del bloque. Y Por tanto la aportación a la incertidumbre por falta de alineación es:

$$u_{rep} = \frac{\sigma_{med}}{\sqrt{J}} \quad (4.8)$$

Eje Y. De la figura 4.6 la estimación de la inclinación para la calibración en el eje Y, la línea de regresión es:

$$y = \hat{\alpha} + \hat{\beta}x \quad (4.9)$$

Para este caso los ejes corresponden al cálculo convencional de la regresión:

$$\hat{\beta} = \frac{S_{xy}}{S_{xx}} \quad (4.10)$$

$$S_{xy} = \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y}) \quad S_{xx} = \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad (4.11)$$

Una vez calculada la pendiente, el ángulo de inclinación es:

$$\beta = \arctan \hat{\beta} \quad (4.12)$$

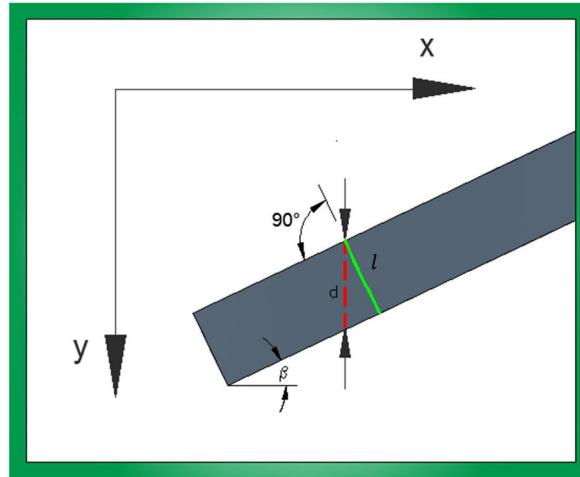


Figura 4.6. Medición para la calibración en el eje Y.

Y la corrección de medida de acuerdo a la figura 4.6 queda:

$$l_i = d_i \cos\beta \quad (4.13)$$

Donde l_i es la longitud estimada del bloque patrón y L la longitud nominal del bloque. Y Por tanto la aportación a la incertidumbre por falta de alineación es:

$$u_{med} = \frac{\sigma_{med}}{\sqrt{J}} \quad (4.14)$$

4.3.3. Incertidumbre por resolución o escala mínima

Tal vez el primer factor de incertidumbre a considerar y uno de los factores que mejor ayuda a entender el concepto de incertidumbre, sólo como punto de partida, porque como se ha hablado, la incertidumbre comprende mucho más. En condiciones normales y suponiendo que no existe ningún otro factor que determine la incertidumbre del instrumento, el valor mínimo de incertidumbre que se puede obtener del instrumento es:

$$I = \pm \frac{E}{2} \quad (4.15)$$

Éste es el límite inferior y superior de acuerdo al signo, pues por mucho que se busque no se puede discernir ningún valor que quede en medio de la división de la escala, y la medición es la medida del mensurando.

Al conocer los límites y la diferencia entre ellos, la estimación por resolución se comporta bajo una distribución uniforme o rectangular, lo que significa un comportamiento simétrico al ser la media y mediana iguales, ver anexo 5.

La incertidumbre se ha definido como una dispersión de valores donde se encuentra el valor del mensurando, definición con el mismo sentido a la desviación estándar, ambas representan un conjunto de valores dispersos. La desviación estándar se calcula a partir de la varianza, entonces la incertidumbre calculada a partir de la varianza es:

$$u_{\text{resolución}} = \frac{a}{\sqrt{3}} \quad (4.16)$$

Donde a es la mitad de la base del rectángulo formado por la distribución de probabilidad, que equivale a $E/2$ como se explicó anteriormente. Es importante considerar que la medición se hace por dos enraques, entonces sustituyendo a la incertidumbre por resolución queda:

$$u_{\text{resolución}} = 2 \left[\frac{(E/2)}{\sqrt{3}} \right] = \frac{E}{\sqrt{3}} \quad (4.17)$$

En algunos documentos como la norma NMX-CH-140-2002 IMNC [57], se aclara que cuando la incertidumbre debida a la repetibilidad se obtiene de datos experimentales, el efecto de la resolución se considera ya incluida, si la componente de incertidumbre de repetibilidad es mayor a la componente basada en la resolución. En otro caso si la componente de incertidumbre basada en la repetibilidad es inferior a la componente de incertidumbre basada en la resolución entonces debe considerarse esta última.

De lo anterior se concluye que deben determinarse las dos pero a la hora de combinarlas sólo se considera la mayor de las dos [58].

4.3.4. Incertidumbre por método de procesamiento

En el capítulo anterior se habló del procesamiento de imágenes, y los métodos para localizar el mensurando (bloque patrón) de calibración, como se mencionó el umbral es un límite el cual es susceptible a alteración por el llamado ruido de una imagen. El ruido es todo aquello que no tiene relación alguna con la vecindad de un pixel, derivado de alguna suciedad existente al momento de la captura de la imagen, y que se puede interpretar como un conjunto uniforme o muy similar en todos los pixeles, cuando existen valores altos o bajos o cambios de dirección no justificables es muy probable que sean distorsiones en la imagen. Esta aportación a la estimación de la incertidumbre se cuantifica por la densidad de puntos o valores no razonables en una región al momento de utilizar cierto método de segmentación.

Las variaciones por el método de procesamiento se proponen de complemento a la tesis como trabajo siguiente como gráficas, donde se relacionen las variaciones de cada método para las ampliaciones disponibles. La solución se plantea de modo gráfico, para obtener una aproximación de la incertidumbre de acuerdo a la experimentación en este trabajo.

4.3.5. Incertidumbre originada por la iluminación

La iluminación es la parte más crítica dentro de un sistema de visión. Las cámaras capturan la luz que llega a los sensores. Siguiendo la definición de una imagen digital como función bidimensional $f(x, y)$, donde el valor de f con las coordenadas (x, y) dan la iluminación de la imagen es ese punto. Las imágenes percibidas en la vida cotidiana provienen de la luz reflejada por los objetos, de tal forma que la función antes descrita está caracterizada por dos componentes, uno a la cantidad de luz incidente y otra a la cantidad de luz reflejada [37].

$$f(x, y) = i(x, y)r(x, y) \quad (4.18)$$

La intensidad que se obtiene finalmente como determinante de cada punto espacial es en realidad el punto de una componente de iluminación y una componente de reflectancia. La primera es consecuencia de las fuentes de iluminación existentes en la escena en el momento de la captura. La segunda está asociada a las propiedades intrínsecas del objeto. Desde el punto de vista de la teoría de señal la iluminación se corresponde a las frecuencias bajas de la imagen, mientras que la reflectancia con las altas frecuencias [32].

Entonces es válido suponer que la aportación a la incertidumbre por iluminación proviene de la irregularidad de la iluminación uniforme obtenida en la imagen, todos los pixeles deberían tener el mismo valor a excepción de los que representan el mensurando, por tanto un valor numérico puede ser obtenido con la diferencia entre el valor mayor y el valor menor de una región.

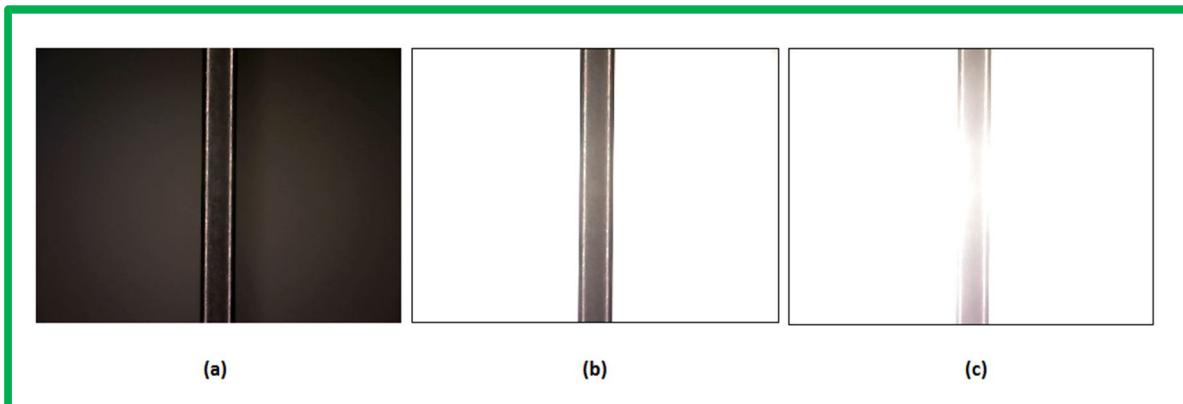


Figura 4.7. (a) Falta de iluminación. (b) Iluminación adecuada. (c) Exceso de iluminación.

La figura 4.7, muestra el efecto de la variación de la iluminación. En el caso del microscopio cuenta con dos tipos de iluminación, la de proyección en la parte inferior, la cual cuenta con un sistema variable de intensidad, la otra es por reflexión. En los experimentos, la iluminación clave para distinguir el mensurando, es la iluminación de proyección, la otra es muy

útil para apreciar el efecto de la visión estéreo (figura 4.8). En este trabajo se utilizan los dos tipos de iluminación.

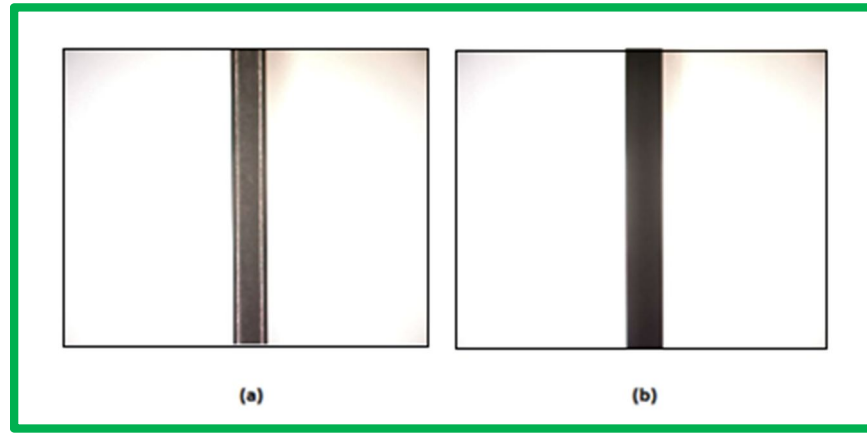


Figura 4.8. (a) Iluminación por reflexión y proyección. (b) Solo iluminación por reflexión.

El tema de iluminación es un concepto amplio que el efecto aparentemente puede confundirse con el mal enfoque, a pesar que son dos tipos principales de iluminación, se ha mencionado que es el conjunto de dos componentes, esto puede eliminarse al apagar la iluminación por reflexión, aunque también se han desarrollado técnicas para separar cada componente, que no se incluye en este trabajo.

Los experimentos dificultaron desarrollar una expresión que representara tal efecto, se interpreta como parte del efecto al enfocar el mensurando. Se considera que se necesita un estudio adicional para interpretar de forma coherente la aportación de incertidumbre, como por ejemplo un característica de este factor fue la posición de la cámara, la cual no está centrada con la lámpara, una más se distingue en la iluminación por reflexión la cual está formada por dos lámparas colocadas en los lados, haciendo la iluminación no uniforme a pesar de que el microscopio cuenta con lámparas de leds.

4.3.6. Incertidumbre por calidad de enfoque

La calidad de enfoque es el cambio de dirección al llegar al borde o límite del mensurando, entre mayor sea el cambio de gradiente menor es la aportación a la incertidumbre por esta causa, en la práctica se puede comprobar que un buen enfoque es cuando la persona intenta localizar un cambio bien definido de una superficie a otra, el cambio de intensidad en el color es de un pixel a otro. En los valores numéricos se puede verificar que exista el menor número de pixeles que pertenezcan al filo o borde del mensurando.

El mal enfoque produce una distorsión en los bordes, lo cual produce un cambio muy suave en los gradientes de los píxeles de borde. La figura 4.9 muestra una imagen muy similar cuando se acerca o se aleja demasiado el lente, en la misma figura inciso b muestra la imagen con un enfoque aceptable. La variación en el borde se puede ver mejor en la figura 4.10, lo que sucede al haber un mal enfoque, la cual también compara la parte numérica de los píxeles.

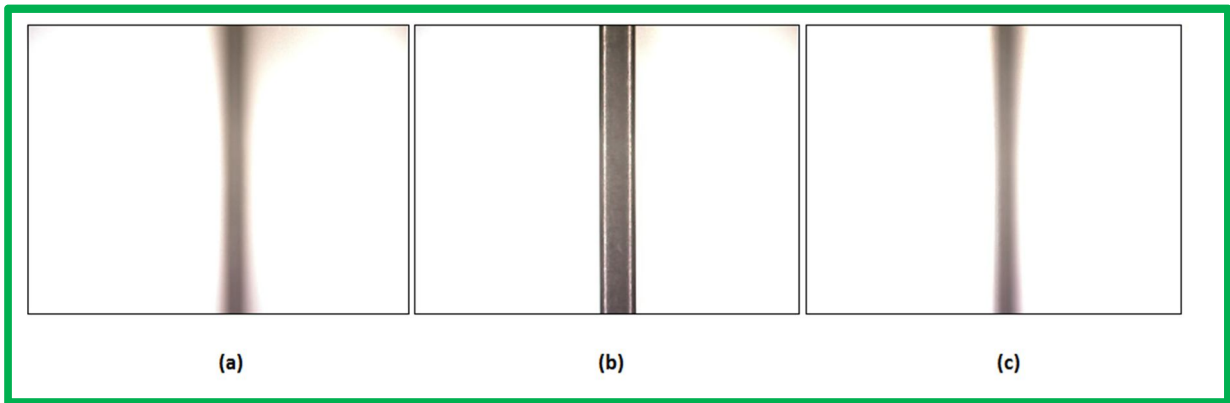


Figura 4.9. (a) Enfoque alto. (b) Buen enfoque. (c) Enfoque bajo.

Los cambios generales en el gradiente debido al enfoque son muy similares a los de iluminación, la distorsión evita observar con claridad la imagen. Estos factores se deben contabilizar de algún modo. La figura 4.10 presenta un fallo exagerado en el enfoque, pero es útil porque permite apreciar mejor el cambio, la parte superior son los valores numéricos que corresponde a la intensidad de tono de la parte inferior. La figura 4.10 es un segmento del borde de la figura 4.9a.

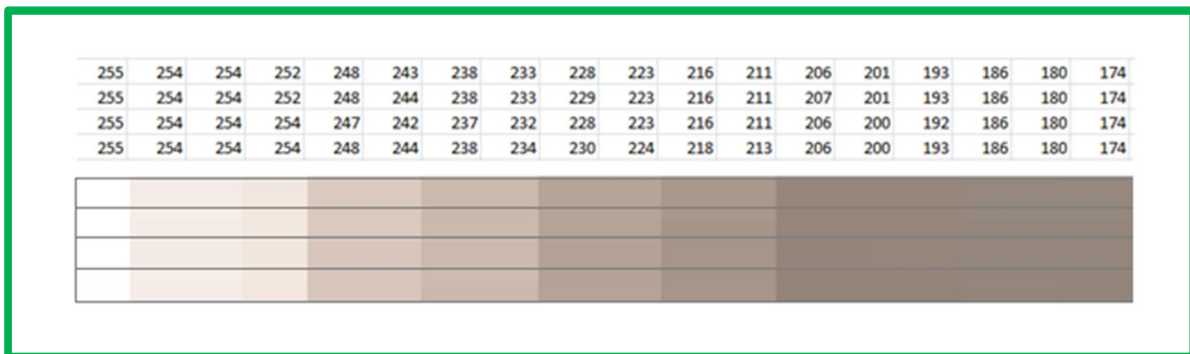


Figura 4.10. Cambio suave en el gradiente derivado del mal enfoque.

Los experimentos demostraron que la disparidad en la forma del bloque patrón es la misma siendo muy cercano o lejano el enfoque. En la práctica el cambio de gradiente sucede en

menor número de píxeles, por el enfoque, como se demuestra en la figura 4.11, que representa una sección de la pared del bloque con un enfoque aceptable, un segmento del borde de la figura 4.9b.

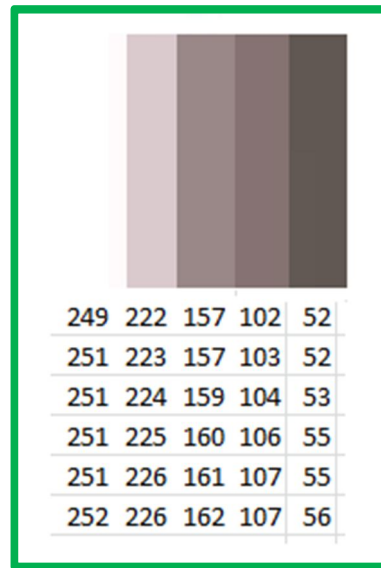


Figura 4.11. Cambio en el gradiente cuando hay buen enfoque.

Lo ideal en el enfoque es observar siempre el cambio directo de negro a blanco, lo cual casi nunca sucede, de la figura 4.11 se puede decir que el pixel clave es el de en medio, pero por la aproximación sub-píxel, esto puede considerarse como un píxel de transición, por lo tanto es posible que exista más de un píxel con valores muy cercanos entre ellos. A partir de ahí se deduce que cada píxel con comportamiento así, puede aportar una incertidumbre por esta fuente. Para identificar los píxeles se propone analizarlos por desviación estándar, la cual tiene que ser muy grande analizando cinco datos, entre ellos el borde. La desviación estándar tiene que ser un valor grande, en caso de ser pequeña, el significado es un cambio suave en el perfil, lo que significa un enfoque deficiente.

Entonces se puede suponer que la incertidumbre por esta fuente está dada por la siguiente expresión:

$$u_{enfoque} = \frac{N_p r_{pixel}}{\sqrt{12}} \quad (4.19)$$

Donde N_p significa el número de píxeles de transición y r_{pixel} es la resolución del píxel de acuerdo al aumento que se está manejando, siendo una distribución rectangular la que rige esta incertidumbre, porque se conocen los límites. La ecuación 4.19 para un cálculo más estricto debe considerar la inclinación del bloque, por lo tanto debe ser multiplicada por el factor de inclinación: $\cos \beta$ para el caso de la medición en Y .

$$u_{enfoque} = \frac{N_p r_{pixel}}{\sqrt{12}} \cos \beta \quad (4.20)$$

4.3.7. Incertidumbre por variación de temperatura

La temperatura es un factor fácil de comprender, que altera directamente las dimensiones de un mensurando, a partir de la contracción o expansión térmica del material, en estudios anteriores se han formulado ecuaciones relacionadas con esta fuente. En este trabajo se continúa con la misma propuesta ya formulada en anteriores publicaciones como la Guía para Estimar la Incertidumbre de Medida del CENAM [59].

Según la guía anterior especifica que los dos contribuyentes importantes para la incertidumbre por dilatación térmica son:

- Por diferencia de la temperatura T (actual) con la temperatura de referencia T_0 (registro).
- Por la diferencia de temperatura entre el patrón y el mensurando.

Para este trabajo se considera la incertidumbre por temperatura del bloque patrón a partir del cambio de longitud descrita como:

$$l(T) = l_0 + \Delta l(T) = l_0 + \alpha l_0(T - T_0) \quad (4.21)$$

Donde $l(T)$ es la longitud del bloque patrón a la temperatura actual T , l_0 su longitud a la temperatura de referencia T_0 y α su coeficiente de dilatación térmica. La longitud del bloque patrón será la longitud inicial más un incremento en función de la temperatura. Cuando se intente calibrar el microscopio utilizando una referencia intermedia como es frecuente en estos equipos utilizar reglillas de vidrio graduadas, el coeficiente de dilatación térmica será considerado como la diferencia entre ambos coeficientes, tal como se indica en la Guía Técnica sobre Trazabilidad e Incertidumbre en Metrología Dimensional publicada por el CENAM en el año 2008.

De acuerdo a la definición de incertidumbre, es una dispersión de valores donde existe el mensurando, entonces es válido considerar que:

$$u_{\Delta T} = l(T) - l_0 = l_0 + \alpha l_0(T - T_0) - l_0 \quad (4.22)$$

$$u_{\Delta T} = \alpha l_0(T - T_0) \quad (4.23)$$

Al considerar que la calibración se hace en un laboratorio que cumple la máxima diferencia permisible de temperatura. Entonces, las operaciones están dentro de los límites establecidos, ajustándose a una distribución del tipo rectangular (anexo 5), lo que hace que la ecuación 4.23 se exprese en una aproximación simplificada a:

$$u_{\Delta T} = \frac{\alpha l_0(T - T_0)}{\sqrt{3}} \quad (4.24)$$

La ecuación 4.24 es obtenida por la misma justificación aplicada en la incertidumbre por resolución, siguiendo los conceptos estadísticos de la varianza.

4.4. Expresión para la estimación de la incertidumbre en microscopios estereoscópicos

El resultado de las contribuciones de todas las fuentes $u_i(y)$ es la incertidumbre estándar u_c , la cual contiene toda la información esencial sobre la incertidumbre del mensurando Y .

$$u_{Me} = \sqrt{u_{pi}^2 + u_{rep}^2 + u_{resolución}^2 + u_{enfoque}^2 + u_{\Delta T}^2} \quad (4.25)$$

$$u_{Me} = \sqrt{\left(\frac{1}{2} \left[0.06 + 0.5 \frac{L}{1000}\right]\right)^2 + \left(\frac{\sigma}{\sqrt{J}}\right)^2 + \left(\frac{E}{\sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{N_{p\text{pixel}}}{\sqrt{12}}\right)^2 + \left(\frac{\alpha l_0 (T - T_0)}{\sqrt{3}}\right)^2}$$

Como se comentó en el punto 4.3.5 la iluminación no está siendo aún considerada, por lo cual se debe tener cuidado de tener en correcto funcionamiento las fuentes de iluminación para disminuir en lo posible esta aportación de incertidumbre.

4.4.1. Recomendaciones

4.4.1.1. Condiciones ambientales

El microscopio y bloques que han de intervenir en una calibración tienen que permanecer al menos ocho horas en el mismo lugar, con el fin de que no existan errores debidos a los efectos de temperatura. Es deseable que la temperatura local del lugar donde esté situado el microscopio estereoscopio se mantenga en el intervalo de 20 ± 2 °C. Debiendo anotar la temperatura al inicio y al final de la práctica, aunque se sugiere que se anote 10 veces en el tiempo transcurrido.

4.4.1.2. Patrones a utilizar

Se prepararán adecuadamente los patrones a emplear en la calibración del microscopio estereoscopio, desengrasándolos y limpiándolos con papel y paños suaves o con un desengrasante adecuado. Todos los patrones y utensilios que intervengan en la calibración de un equipo deberán estar debidamente calibrados y etiquetados. Se localizarán los valores e incertidumbre de uso fundamentalmente.

4.4.1.3. Verificación de estado

Antes del comienzo de la calibración se realiza una limpieza del equipo, junto como una inspección visual del mismo. En esta inspección se debe verificar el buen estado del equipo, para ello se comprueba el buen funcionamiento mecánico del equipo, iluminación, temperatura etc.

En caso de existir algún tipo de no-conformidad con los requisitos antes citados, debe comunicarse para que se tomen medidas oportunas, anotando éstas en el informe de calibración.

4.4.1.4. Alcance de la medición

Está definido por la iluminación en el campo de visión. La iluminación debe ser mayor de la mitad de la intensidad para definir un campo de medida. Puede aplicarse en instrumentos similares siempre y cuando el plano de medición sea paralelo al plano de la cámara.

4.4.1.5. Calibración

Es necesario la calibración en ambos ejes de medida para una mejor calibración, las variaciones de la medición pueden ser alrededor del 10%. Si solo se hace una calibración, es recomendable que sea de manera inclinada sobre la base de medición.

4.4.1.6. Iluminación

Es importante que se cuente con una iluminación adecuada. La iluminación de proyección debe verificarse que no distorsione la calibración de los bloques.

CAPÍTULO V

Resultados experimentales

La aplicación del procedimiento del CEM (Centro Español de Metrología) en el microscopio estereoscópico ayudó a identificar la importancia de la calibración en todo el campo de medida, a pesar de que existe una gran diferencia entre ambos microscopios, como por ejemplo: la técnica de medición o la tecnología que utilizan. Al mismo tiempo los conceptos de metrología dimensional, también deben actualizarse e ir avanzando en cuanto a precisión, pero sobre todo en confiabilidad y documentación de las mediciones, extendiendo en lo posible su trazabilidad como sistemas de medida apegados a una normatividad estándar y por lo tanto garantizable.

Los resultados son obtenidos de la experimentación siguiendo la Guía de la Estimación de la Incertidumbre de Medida. Para cuantificar las fuentes de incertidumbre se analizaron varias ensayos, de los cuales se identificó los rasgos sobresalientes.

Al inicio se aplicó solo el método de umbralización, obteniendo el umbral a partir de la mínima intensidad percibida en la imagen, la cual sucede en las esquinas de la imagen. Se utilizan comandos para rellenar la imagen y resaltar el bloque patrón.

En el otro código se utilizan los métodos de detección de bordes con los que cuenta Matlab®, estos métodos se describen en el capítulo III. A partir de la identificación de bordes se localizan los píxeles del bloque patrón y las mediciones.

Los resultados se presentan primero de manera individual en la sección de la imagen, luego en conjunto por la amplificación utilizada. Los resultados se muestran para una amplificación de X4 y X8, estas por permitir una iluminación adecuada. Los resultados de X15 se muestran solo para comparar los resultados. Otra factor que determino el uso de sólo dos amplificaciones fue la dimensión del bloque patrón, aproximadamente para el lente de X15 el campo de medida es alrededor de 2 mm de diámetro, lo que no produce mediciones convenientes con el uso del bloque patrón de 1 mm.

Las imágenes de la figura 5.1 representan la evolución de las imágenes al pasar por el procesamiento de imágenes en Matlab®. En el inciso (b) es la conversión a intensidad del formato

RGB. Se utilizan los valores de intensidad porque la intensidad ofrece más detalles que cualquier otra componente, como se explica en el capítulo 3.

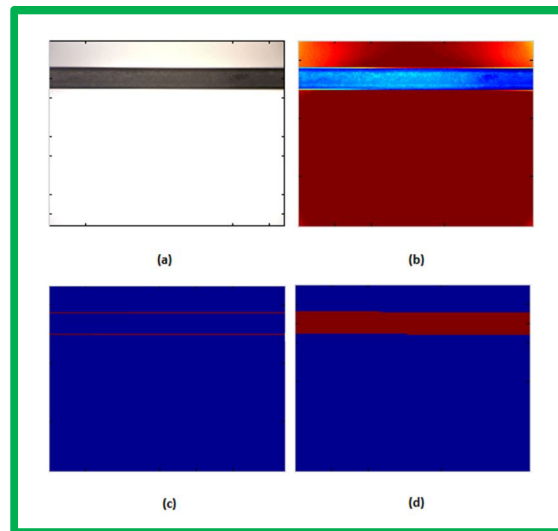


Figura 5.1. Evolución aplicando procesamiento de imágenes. (a) formato RGB. (b) Intensidades de la imagen. (c) aplicando detección de bordes. (d) Imagen obtenida para la medición.



Figura 5.2. Medición del bloque patrón.

5.1. Definición del mensurando

Siguiendo los pasos de procedimiento propuesto, se define primero el mensurando.

Definición del mensurando: se midió un bloque patrón de acero de 1 mm, marca Mitutoyo de grado cero, con desviación máxima $+0.05 \mu\text{m}$, en una atmosfera con temperatura controlada

de acuerdo a la norma ISO 1:2002 (temperatura normalizada de referencia para la especificación geométrica y especificación de productos).

La prueba que se reporta como válida consistió en la medición del bloque patrón anteriormente descrito, utilizando un aumento de X4 y X8. Se midió en diferentes posiciones intentando respetar las dos orientaciones principales: horizontal y vertical, figura 5.2.

5.2. Incertidumbre del bloque patrón

De acuerdo al certificado de calibración que se incluye en el anexo 1, la incertidumbre está dada por la ecuación 4.1.

$$u_{pi} = \frac{1}{2} \left[0.06 + 0.5 \frac{L}{1000} \right]$$

Por lo tanto para el bloque de 1 mm, la aportación por esta fuente es:

$$u_{pi} = \frac{1}{2} \left[0.06 + 0.5 \frac{1}{1000} \right] = 0.030 \mu m$$

5.3. Incertidumbre por temperatura

La duración de la prueba fue de 90 min. La temperatura se midió desde el inicio y luego cada cinco minutos. Los valores se muestran en la tabla 5.1, no hubo una variación significativa, manteniéndose dentro de la variación especificada 20 ± 1 °C, que también es la misma del certificado e calibración del bloque.

Aunque las variaciones fueron dentro del intervalo permitido, se redondea a 1 °C la variación por temperatura, aplicando la ecuación 4.24.

$$u_{\Delta T} = \frac{\alpha l_0 (T - T_0)}{\sqrt{3}}$$

Donde de acuerdo al certificado de calibración $\alpha = 10.8 \pm 0.5 \times 10^{-6} \text{K}^{-1}$, $l_0 = 1 \text{ mm}$, y $\Delta T = 1 \text{ K}$.

Por lo tanto se sustituyen los valores en la ecuación 4.24, se obtiene:

$$u_{\Delta T} = \frac{10.8 \pm 0.5 \times 10^{-6} \text{K}^{-1} \cdot 1 \text{ mm} \cdot 1 \text{ K}}{\sqrt{3}} = 6.23 \times 10^{-6} \text{ mm}$$

O bien $u_{\Delta T} = 0.00623 \mu m$

Tiempo (min)	Temperatura (°C)	Tiempo (min)	Temperatura (°C)
0	19.3	50	19.5
5	19.2	55	19.6
10	19.2	60	19.6
15	19.3	65	19.6
20	19.4	70	19.6
25	19.4	75	19.6
30	19.4	80	19.6
35	19.5	85	19.6
40	19.5	90	19.6
45	19.5		

Tabla 5.1. Registro de temperaturas durante la medición.

La incertidumbre por bloque patrón y por temperatura son las mismas para las mediciones que se realizaron en esta prueba, las otras tres fuentes de incertidumbre están en función de la amplificación que se estén usando y de la habilidad con que se realizan.

5.4. Estimación de la incertidumbre para X8

Para estimar la incertidumbre se necesita capturar varias imágenes, como la intención es cubrir todo el campo de medida, se debe guardar varias imágenes para después analizar las por separado. Se puede decir que una vez que se conecta el microscopio a la computadora y es reconocido el software se captura un conjunto de seis imágenes, tres horizontales y tres verticales, cada una en diferente posición como se muestra en la figura 5.3.

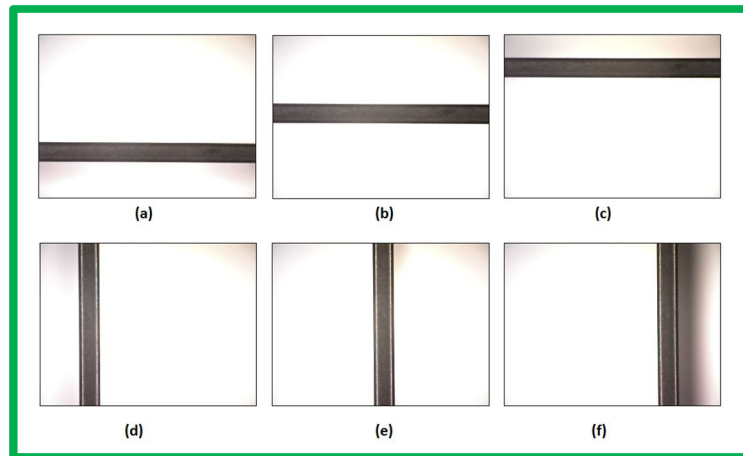


Figura 5.3. Posiciones para la medición X8. (a) horizontal abajo. (b) horizontal centro. (c) horizontal arriba. (d) vertical izquierdo. (e) vertical centro. (f) vertical derecho.

Los resultados se analizan utilizando el método de detección de bordes de Sobel. El bloque fue sostenido con un imán, en el cual se verificó la planitud de apoyo sobre un plano de referencia para evitar la inclinación de apoyo asegurando el bloque. El valor de la media sólo considera las regiones donde se calcula la incertidumbre (figura 5.4), y se designa por la letra griega μ , ya que se consideran datos poblacionales. La incertidumbre se estima para cada región, por lo tanto habrá un total de 18 incertidumbres en toda la imagen, es decir, si son nueve regiones, son dos por cada región, una en eje X y otra en el eje Y.

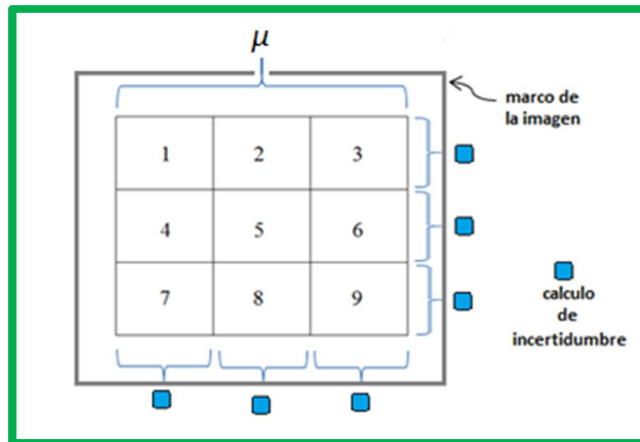


Figura 5.4. Ilustración de las estimaciones en la imagen.

Las seis imágenes de la figura 5.3 son las utilizadas para estimar la incertidumbre del campo de medida para la amplificación X8. Se utiliza el programa del anexo 3 para obtener las mediciones, las figuras 5.5 a 5.10 son las imágenes del bloque patrón medido, al lado de cada figura se muestran los resultados de los valores de incertidumbre calculados también por medio de Matlab®.

5.4.1. Calibración en el eje Y, amplificación X8

Las seis figuras siguientes fueron procesadas en Matlab® de acuerdo al código del anexo 3. La cuadrícula en las figuras representa la división de las regiones. Por ejemplo en la figura 5.5 sirve para calibrar la región 7, 8 y 9 en el eje Y. Los resultados son los siguientes:

El valor de μ corresponde a el número de pixeles que representa el bloque patrón de 1 mm (figura 5.5).

$$\mu = 57.530 \text{ pixeles} \Leftrightarrow 1 \text{ mm}$$

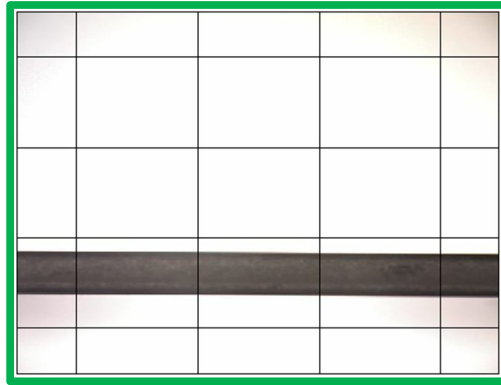


Figura 5.5. Para la estimación de las regiones 7,8 y 9 en el eje Y.

Región 7:

Desviación estándar $\sigma = 8.037 \mu m$.

Resolución $E = 17.382 \mu m$.

Píxeles de transición $N_p = 14$

incertidumbre por repetibilidad = $0.635 \mu m$

incertidumbre por resolución = $10.035 \mu m$

incertidumbre por enfoque = $5.017 \mu m$

Con una incertidumbre combinada de:

$$u_{Me} = \sqrt{u_{pi}^2 + u_{rep}^2 + u_{resolución}^2 + u_{enfoque}^2 + u_{\Delta T}^2}$$

$$u_{Me} = 11.237 \mu m$$

Entonces la incertidumbre expandida, con una confiabilidad del 95 % ($k = 2$) es:

$$U = 22.474 \mu m$$

Región 8:

Desviación estándar $\sigma = 7.671 \mu m$.

Resolución $E = 17.382 \mu m$.

Píxeles de transición $N_p = 1$

incertidumbre por repetibilidad = $0.606 \mu m$

incertidumbre por resolución = 10.035 μm

incertidumbre por enfoque = 5.017 μm

$$u_{Me} = 11.235 \mu\text{m}$$

$$U = 22.471 \mu\text{m}$$

Región 9:

Desviación estándar $\sigma = 8.382 \mu\text{m}$.

Resolución $E = 17.382 \mu\text{m}$.

Píxeles de transición $N_p = 1$

incertidumbre por repetibilidad = 0.662 μm

incertidumbre por resolución = 10.035 μm

incertidumbre por enfoque = 5.017 μm

$$u_{Me} = 11.238 \mu\text{m}$$

$$U = 22.477 \mu\text{m}$$

El valor de μ corresponde a el número de píxeles que representa el bloque patrón de 1 mm (figura 5.6).

$$\mu = 56.784 \text{ píxeles} \Rightarrow 1 \text{ mm}$$

Región 4:

Desviación estándar $\sigma = 6.414 \mu\text{m}$.

Resolución $E = 17.610 \mu\text{m}$.

Píxeles de transición $N_p = 1$

incertidumbre por repetibilidad = 0.507 μm

incertidumbre por resolución = 10.167 μm

incertidumbre por enfoque = 5.083 μm

$$u_{Me} = 11.378 \mu\text{m}$$

$$U = 22.756 \mu\text{m}$$

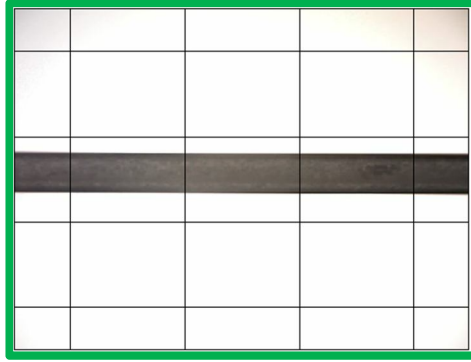


Figura 5.6. Para la estimación de las regiones 4,5 y 6 en el eje Y.

Región 5:

Desviación estándar $\sigma = 8.788 \mu m$.

Resolución $E = 17.610 \mu m$.

Píxeles de transición $N_p = 1$

incertidumbre por repetibilidad = $0.694 \mu m$

incertidumbre por resolución = $10.167 \mu m$

incertidumbre por enfoque = $5.083 \mu m$

$$u_{Me} = 11.388 \mu m$$

$$U = 22.776 \mu m$$

Región 6:

Desviación estándar $\sigma = 4.276 \mu m$.

Resolución $E = 17.610 \mu m$.

Píxeles de transición $N_p = 1$

incertidumbre por repetibilidad = $0.338 \mu m$

incertidumbre por resolución = $10.167 \mu m$

incertidumbre por enfoque = $5.083 \mu m$

$$u_{Me} = 11.371 \mu m$$

$$U = 22.743 \mu m$$

El valor de μ corresponde a el número de pixeles que representa el bloque patrón de 1 mm (figura 5.7).

$$\mu = 56.764 \text{ pixeles} \Rightarrow 1 \text{ mm}$$

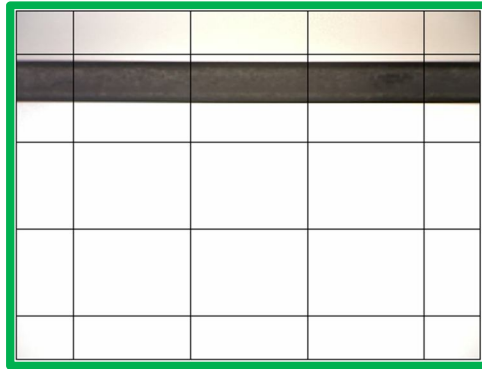


Figura 5.7. Para la estimación de las regiones 1,2 y 3 en el eje Y.

Región 1:

Desviación estándar $\sigma = 7.958 \mu m$.

Resolución $E = 17.311 \mu m$.

Pixeles de transición $N_p = 1$

incertidumbre por repetibilidad = $0.629 \mu m$

incertidumbre por resolución = $9.994 \mu m$

incertidumbre por enfoque = $4.997 \mu m$

$$u_{Me} = 11.191 \mu m$$

$$U = 22.382 \mu m$$

Región 2:

Desviación estándar $\sigma = 8.529 \mu m$.

Resolución $E = 17.311 \mu m$.

Pixeles de transición $N_p = 1$

incertidumbre por repetibilidad = 0.674 μm

incertidumbre por resolución = 9.994 μm

incertidumbre por enfoque = 4.997 μm

$$u_{Me} = 11.193 \mu m$$

$$U = 22.387 \mu m$$

Región 3:

Desviación estándar $\sigma = 0.0 \mu m$.

Resolución $E = 17.311 \mu m$.

Píxeles de transición $N_p = 1$

incertidumbre por repetibilidad = 0.0 μm

incertidumbre por resolución = 9.994 μm

incertidumbre por enfoque = 4.997 μm

$$u_{Me} = 11.173 \mu m$$

$$U = 22.347 \mu m$$

5.4.2. Calibración en el eje X, amplificación X8

De las siguientes tres figuras se obtiene la calibración para el eje X. Se utiliza el mismo código de Matlab® a excepción de que se transpone la imagen como se menciona al final del anexo 3.

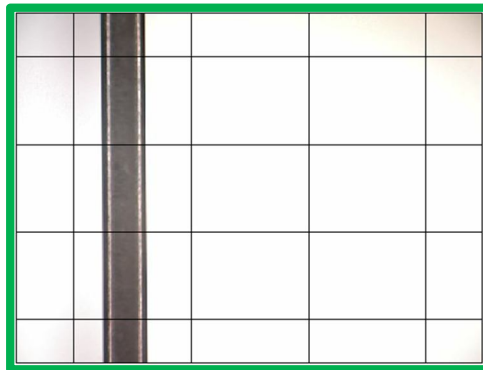


Figura 5.8. Para la estimación de las regiones 1,4 y 7 en el eje X.

El valor de μ corresponde a el número de pixeles que representa el bloque patrón de 1 mm (figura 5.8).

$$\mu = 61.348 \text{ pixeles} \Rightarrow 1 \text{ mm}$$

Región 1:

Desviación estándar $\sigma = 8.155 \mu m$.

Resolución $E = 16.305 \mu m$.

Pixeles de transición $N_p = 1$

incertidumbre por repetibilidad = $0.744 \mu m$

incertidumbre por resolución = $9.413 \mu m$

incertidumbre por enfoque = $4.706 \mu m$

$$u_{Me} = 10.550 \mu m$$

$$U = 21.100 \mu m$$

Región 4:

Desviación estándar $\sigma = 6.922 \mu m$.

Resolución $E = 16.305 \mu m$.

Pixeles de transición $N_p = 1$

incertidumbre por repetibilidad = $0.631 \mu m$

incertidumbre por resolución = $9.413 \mu m$

incertidumbre por enfoque = $4.706 \mu m$

$$u_{Me} = 10.542 \mu m$$

$$U = 21.085 \mu m$$

Región 7:

Desviación estándar $\sigma = 7.308 \mu m$.

Resolución $E = 16.305 \mu m$.

Pixeles de transición $N_p = 1$

incertidumbre por repetibilidad = $0.667 \mu m$

incertidumbre por resolución = $9.413 \mu m$

$$\text{incertidumbre por enfoque} = 4.706 \mu\text{m}$$

$$u_{Me} = 10.544 \mu\text{m}$$

$$U = 21.089 \mu\text{m}$$

El valor de μ corresponde a el número de pixeles que representa el bloque patrón de 1 mm (figura 5.9).

$$\mu = 61.075 \text{ pixeles} \Rightarrow 1 \text{ mm}$$

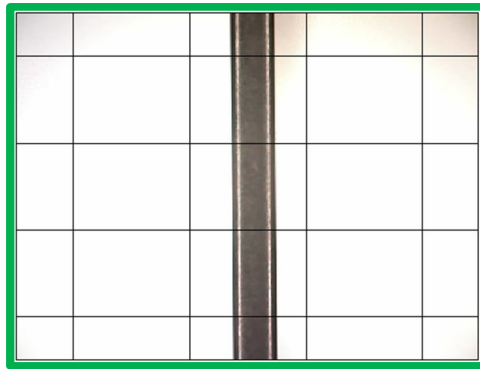


Figura 5.9. Para la estimación de las regiones 2,5 y 8 en el eje X.

Región 2:

Desviación estándar $\sigma = 7.270 \mu\text{m}$.

Resolución $E = 16.373 \mu\text{m}$.

Pixeles de transición $N_p = 1$

incertidumbre por repetibilidad = $0.663 \mu\text{m}$

incertidumbre por resolución = $9.452 \mu\text{m}$

incertidumbre por enfoque = $4.726 \mu\text{m}$

$$u_{Me} = 10.588 \mu\text{m}$$

$$U = 21.176 \mu\text{m}$$

Región 5:

Desviación estándar $\sigma = 5.437 \mu\text{m}$.

Resolución $E = 16.373 \mu\text{m}$.

Píxeles de transición $N_p = 1$

incertidumbre por repetibilidad = $0.496 \mu m$

incertidumbre por resolución = $9.452 \mu m$

incertidumbre por enfoque = $4.726 \mu m$

$$u_{Me} = 10.579 \mu m$$

$$U = 21.158 \mu m$$

Región 8:

Desviación estándar $\sigma = 4.744 \mu m$.

Resolución $E = 16.373 \mu m$.

Píxeles de transición $N_p = 1$

incertidumbre por repetibilidad = $0.433 \mu m$

incertidumbre por resolución = $9.452 \mu m$

incertidumbre por enfoque = $4.726 \mu m$

$$u_{Me} = 10.576 \mu m$$

$$U = 21.153 \mu m$$

El valor de μ corresponde a el número de píxeles que representa el bloque patrón de 1 mm (figura 5.10).

$$\mu = 61.419 \text{ píxeles} \Rightarrow 1 \text{ mm}$$

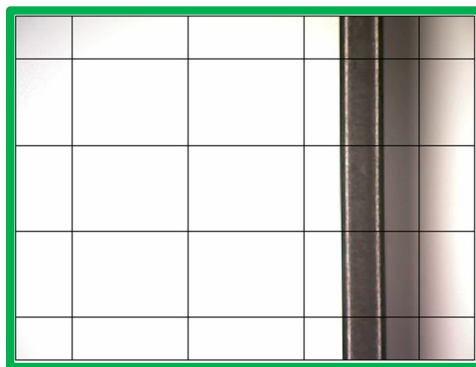


Figura 5.10. Para la estimación de las regiones 3,6 y 9 en el eje X.

Región 3:

Desviación estándar $\sigma = 6.079 \mu m$.

Resolución $E = 16.281 \mu m$.

Píxeles de transición $N_p = 1$

incertidumbre por repetibilidad = $0.554 \mu m$

incertidumbre por resolución = $9.399 \mu m$

incertidumbre por enfoque = $4.699 \mu m$

$$u_{Me} = 10.522 \mu m$$

$$U = 21.045 \mu m$$

Región 6:

Desviación estándar $\sigma = 8.035 \mu m$.

Resolución $E = 16.281 \mu m$.

Píxeles de transición $N_p = 1$

incertidumbre por repetibilidad = $0.733 \mu m$

incertidumbre por resolución = $9.399 \mu m$

incertidumbre por enfoque = $4.699 \mu m$

$$u_{Me} = 10.533 \mu m$$

$$U = 21.067 \mu m$$

Región 6:

Desviación estándar $\sigma = 8.156 \mu m$.

Resolución $E = 16.281 \mu m$.

Píxeles de transición $N_p = 1$

incertidumbre por repetibilidad = $0.744 \mu m$

incertidumbre por resolución = $9.399 \mu m$

incertidumbre por enfoque = $4.699 \mu m$

$$u_{Me} = 10.534 \mu m$$

$$U = 21.069 \mu m$$

5.4.3. Unificación de resultados, amplificación X8

Hasta ahora los resultados se han estimado de manera individual, la figura 5.11 resume en la misma imagen los valores para cada división de la imagen.

	22.382	22.387	22.347	
	1	2	3	
	21.100	21.176	21.045	
	22.756	22.776	22.743	
	4	5	6	
	21.085	21.158	21.067	
	22.474	22.471	22.477	
	7	8	9	
	21.089	21.153	21.069	

Figura 5.11. Incertidumbres en cada región de la imagen (μm). En posición horizontal las incertidumbres para la medición en X, en posición vertical la medición en el eje Y.

La figura 5.11 demuestra que la variación de incertidumbre no es significativa, teniendo en cuenta la resolución del equipo. En la figura 5.12 se muestran los promedios, los cuales sí son significativos.

	7.956	5.529	0	
	$\sigma=8.155$	$\sigma=7.270$	$\sigma=6.079$	
	6.414	8.788	9.274	
	$\sigma=8.922$	$\sigma=5.437$	$\sigma=8.035$	
	media=61.348	media=61.075	media=61.419	
	8.037	1.977	78.8	
	$\sigma=7.308$	$\sigma=4.744$	$\sigma=8.156$	

Figura 5.12. Incertidumbres en cada región de la imagen. En posición horizontal las incertidumbres para la medición en X, en posición vertical la medición en el eje.

Los resultados contenidos en la figura 5.12 hacen ver que los promedios o las medias son diferentes en cada eje, y esto es de aproximadamente cinco píxeles lo que los hace altamente

representativo este cambio, por otra parte contiene las desviaciones estándar de las mediciones dentro de la sección delimitada, de manera regular en todas las secciones lo que comprueba los valores obtenidos de las incertidumbres en la figura 5.11.

5.5. Estimación de la incertidumbre para X4

Al igual que con X8 se realiza el mismo procedimiento de dividir el campo de medida. Recordando que X4 ofrece un campo dos veces más grande que X8. Esto permite realizar una malla más fina en toda la imagen. Para ilustrar y aproximar mejor el efecto, se dividió el campo de medida en 35 regiones, figura 5.13.

En la figura 5.13 la división no es uniforme, porque se intentó formar regiones aleatorias en la imagen, de acuerdo a las imágenes capturadas se obtuvo el mallado. Se continúa dejando un margen que no es considerado para la medición y la geometría resultante de la división es derivado de la captura de las imágenes.

En ocasiones se puede dificultar capturar imágenes que pasen exactamente en la división marcada. Por esto primero se capturo la imagen y luego se hizo la división con el apoyo de algún software de diseño.

Los resultados obtenidos de la estimación de la incertidumbre se presentan en las figuras 5.14, 5.15. Las condiciones y el procedimiento de cálculos es el mismo que se siguió para X8.

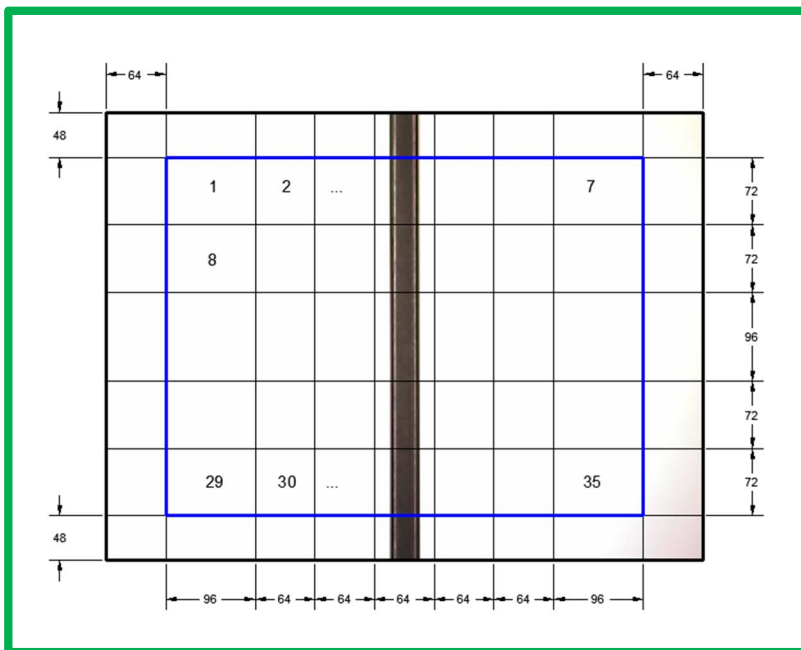


Figura 5.13. Divisiones para la medición X4. Las dimensiones marcadas en las orillas son píxeles; y los números del centro es el número de cada región.

Los resultados para X4 se muestran en las figuras 5.14 y 5.15, nuevamente es notable la variación de los promedios en cuanto a pixeles. Las incertidumbres casi permanecen iguales. El procedimiento de la estimación fue aplicando el mismo código, a excepción que hubo más divisiones.

	43.748	43.748	43.748	43.748	43.748	43.748	43.748	43.748
	40.638	41.264	41.171	41.233	41.018	40.357	39.953	
	44.243	44.243	44.243	44.243	44.243	44.243	44.243	
	40.638	41.264	41.171	41.233	41.018	40.357	39.953	
	44.157	44.157	44.157	44.157	44.157	44.157	44.157	
	40.638	41.264	41.171	41.233	41.018	40.357	39.953	
	43.824	43.824	43.824	43.824	43.824	43.824	43.824	
	40.638	41.264	41.171	41.233	41.018	40.357	39.953	
	43.418	43.418	43.418	43.418	43.418	43.418	43.418	
	40.638	41.264	41.171	41.233	41.018	40.357	39.953	

Figura 5.14. Incertidumbres expandidas obtenidas para la medición con amplificación X4.

	29.51	29.51	29.51	29.51	29.51	29.51	29.51	29.51
	31.77	31.29	31.36	31.31	31.47	31.99	32.31	
	29.18	29.18	29.18	29.18	29.18	29.18	29.18	
	31.77	31.29	31.36	31.31	31.47	31.99	32.31	
	29.24	29.24	29.24	29.24	29.24	29.24	29.24	
	31.77	31.29	31.36	31.31	31.47	31.99	32.31	
	29.46	29.46	29.46	29.46	29.46	29.46	29.46	
	31.77	31.29	31.36	31.31	31.47	31.99	32.31	
	29.73	29.73	29.73	29.73	29.73	29.73	29.73	
	31.77	31.29	31.36	31.31	31.47	31.99	32.31	

Figura 5.15. Promedios de equivalencia de 1 mm a pixeles, amplificación X4.

Al analizar la figura 5.14 es notable que la incertidumbre es mayor en las regiones del centro. La equivalencia de la magnitud de 1 mm en pixeles se muestra en la figura 5.15. El promedio permite comparar el tamaño de los pixeles importante para una calibración correcta. No se incluye la desviación estándar porque su valor es muy bajo, como se puede apreciar en los promedios que son muy parecidos. En las figuras 5.14 y 5.15 los valores en horizontal corresponde a la medición en el eje X, y los escritos en posición vertical corresponde al resultado obtenido de la medición en Y, es decir al bloque patrón colocado horizontalmente.

5.6. Análisis comparativo entre X8 y X4

De acuerdo a los dos resultados, no se puede valorar alguno como bueno. Los dos presentan información muy relevante de las posibles variaciones al calibrar el microscopio estereoscópico. Es importante pensar que no se pueden esperar resultados iguales, sino encontrar tendencias de los valores obtenidos.

El procedimiento seguido ofrece una manera de encontrar las calibraciones para el eje X y el eje Y, es normal que en instrumentos de este tipo sea diferente. Encontrando los valores adecuados a partir de lo mostrado aquí, entonces se puede usar el modo de calibración que ofrece el software Image Solutions® con el que trabaja el microscopio estereoscópico usado en este trabajo. Pero antes se puede comparar los resultados obtenidos por la relación aspecto de pixel.

Es claro encontrar, en los dos casos (X8 y X4) que las diferencias en cuanto a la orientación del bloque varían. Los promedios indican el número de pixeles que representa el valor nominal de 1 mm (valor del bloque patrón), tal vez se esperaría tener un valor entero, pero por el método de ajuste a nivel sub-pixel se puede trabajar con decimales.

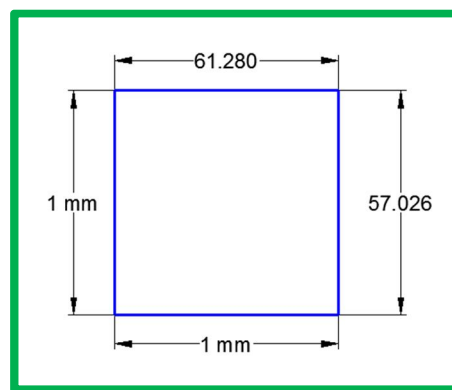


Figura 5.16. Equivalencia de 1 mm en pixeles para la amplificación X8.

Entonces utilizando el promedio de los promedios para dimensionar el bloque patrón (figura 5.16), el cual representa una sección "cuadrada" de 1 mm. Lo cual no se convierte

exactamente, en la figura 5.16 si los pixeles fuesen cuadrados las equivalencias a pixeles deberían ser iguales, entonces se tiene el siguiente análisis para encontrar una relación de aspecto de pixel.

La relación de aspecto de pixel está dada dividiendo la distancia horizontal entre la vertical.

$$Rel. \text{ aspecto de pixel}_{X8} = \frac{61.280}{57.026} = 1.074$$

Para el caso de X4 las dimensiones se pueden resumir en la figura 5.17.

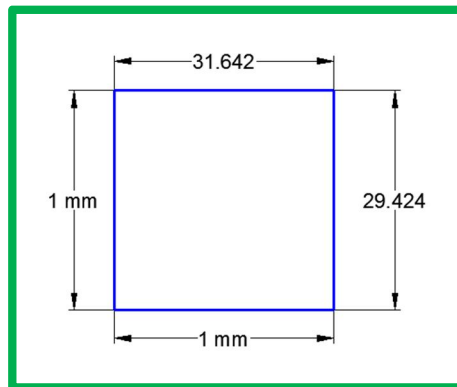


Figura 5.17. Equivalencia de 1 mm en pixeles para la amplificación X4.

Ahora el la relación de aspecto de pixel para X4 queda:

$$Rel. \text{ aspecto de pixel}_{X4} = \frac{31.642}{29.424} = 1.075$$

Recordando la relación de aspecto de pixel es un indicativo de la geometría de los pixeles. Una relación igual a uno, indica pixeles cuadrados.

Con la relación aspecto de pixel puede calibrarse el equipo. Es decir si la calibración se hace midiendo sobre el eje X, para calibrar el eje Y debe dividirse la longitud nominal del bloque entre el factor 1.0745 para compensar el error por tamaño de pixel. En caso que se disponga de la calibración sobre el eje Y, entonces el valor nominal debe multiplicarse por 1.0745.

En el software image Solutions® se propone utilizar la opción calibrar (figura 5.18), utilizando el modo calibración por eje X y eje Y.

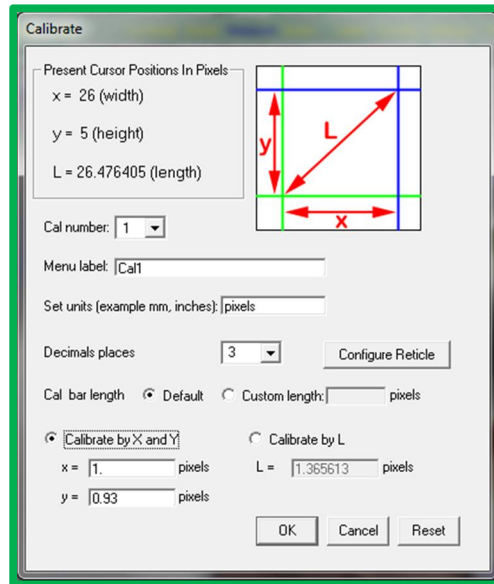


Figura 5.18. Menú para la calibración por ejes en Image Solutions®.

Al utilizar una medida uniforme de calibración en todo el campo de medida, los resultados de la incertidumbre se espera que varíen, el alcance de este trabajo fue centrado en estimar la incertidumbre por medición de píxeles.

Conclusiones

Se entiende que para cada equipo existen fuentes específicas que afectan directamente su calidad de medición, muchas veces están escondidas o simplemente su estimación puede llegar a ser más compleja, como en el caso de la iluminación, que no se cuantifica por sí sola en este trabajo. Con una adecuada distribución de probabilidad, se puede contribuir de manera precisa a su estimación.

También se comprueba que como en muchos otros sistemas, existen valores que pueden llegar a representar el 80% del total de la incertidumbre, cumpliendo con la condición de Pareto. A pesar de eso se entiende que siempre es recomendable incluir toda fuente con grado de desconfianza, ya que las condiciones del mensurando y el ambiente son cambiantes y su influencia puede ser diferente.

Se demostró que un campo de medida en un microscopio debe ser calibrado en su totalidad, cubriendo su superficie con bloques patrón u otros patrones que se pueden ofertar comercialmente. La estimación de la incertidumbre en una sección del campo a otra puede variar por la amplificación o iluminación así que debe estar consciente de seguir las mismas técnicas de medición para disminuir efectos adicionales.

El procesamiento de imágenes es una herramienta muy eficaz para la medición por visión, pero también es un conocimiento muy amplio que no está limitado a lo incluido en esta tesis. Existen muchos métodos que aún debe validarse su comportamiento con el fin de incrementar la confiabilidad y uso más frecuente en la metrología dimensional, porque ofrece un modo de medición fácil y cómodo para el usuario, e inclusive con la posibilidad de tener aplicación a distancia.

La exactitud al aplicar procesamiento de imágenes depende del dispositivo de captura, para mejorar la precisión es necesario tener la seguridad que el sensor cuenta con rejillas cuadradas, lo que muchas veces no hay garantía, y su estudio requiere de otras consideraciones.

Los resultados demostraron que el sensor con el que cuenta el microscopio para la captura de imágenes no es completamente cuadrado, algo posiblemente esperado desde el inicio, por la documentación que se mencionó en el capítulo III. Los experimentos comprueban que es necesario calibrar de forma separada los ejes de medida porque a pesar de tener una incertidumbre muy similar, el promedio de las mediciones en cada eje es muy diferente, lo que puede representar errores si se considera una rápida calibración en un sólo eje, como una de las que ofrece el software del estereoscopio.

El desarrollo de equipos de medición requiere de técnicas de evaluación de su confiabilidad, y no hay parámetro mejor que la incertidumbre. Si no hay modo de estimar esa incertidumbre, no se pueden garantizar las mediciones del equipo, limitando su aplicación a mediciones regulares.

Contribución

Este trabajo ofrece una alternativa para evaluar la incertidumbre de medición utilizando microscopios estereoscópicos. Una alternativa que demostró credibilidad con fundamentos prácticos y como guía un método universal.

Con el estudio se confirma que la calibración es diferente en cada eje de medida, debido al dispositivo de captura. El tamaño de los píxeles del sensor determina en gran parte la resolución de los píxeles de la imagen, se explica esta diferencia con los experimentos realizados y se justifica con información recopilada de otras investigaciones. Para esto una opción es considerar a la media como una corrección de calibración de los resultados.

Se propone el tipo de calibración que debe hacerse para compensar posibles irregularidades en la geometría de los píxeles, basado en la medición de aspecto de pixel.

La metodología aquí desarrollada ayuda a la documentación de un procedimiento de medición, indispensable para la certificación de equipos. Lo que contribuye a decir con más certeza la calidad de las mediciones y una forma de extender la cadena de trazabilidad en este rubro.

Se presenta un informe de las condiciones actuales de la calidad esperada en las mediciones en el microscopio estereoscópico, separando el campo de medida para apreciar la variación en todo el campo.

Se documenta el desarrollo de práctica de laboratorio, uso y manejo del microscopio estereoscópico, para alumnos de licenciatura de la materia metrología (anexo 4). Se explican los dos modos de calibración para que el alumno identifique las diferencias.

Posible trabajo siguiente

Las observaciones durante los experimentos mostraron que es conveniente analizar la iluminación por separado, merece un estudio más amplio de como cuantificar su aportación, desde el estudio del tipo de iluminación, posiciones hasta el cálculo de las unidades de iluminación que sean las adecuadas.

A pesar de que se trabajó con intensidades de las imágenes, a fin de incluir la iluminación, se reveló que los efectos derivados de esta fuente pueden causar distorsiones muy significativas como sucede en el enfoque. Puede considerarse el uso de luz monocromática para evitar los efectos de las diferentes frecuencias.

Como se mencionó, los resultados aquí presentados derivan de la aplicación de los métodos de detección de bordes, un estudio comparativo con algún otro método de procesamiento de imágenes, que posiblemente pueden dar resultados que validen y enriquezcan este estudio.

También se puede extender el estudio utilizando los enfoques X15 y X20, y buscar una relación con la amplificación, lo que hace necesario utilizar bloques patrón más pequeños, los cuales no se contaban al momento de realizar el presente trabajo.

Se debe aplicar el método a otros equipos con el mismo principio de medición como las máquinas de medición por visión, o un comparador óptico con cámara, a fin de evaluar también la arquitectura del equipo, algo que no se considera en este trabajo.

Implementar la calibración utilizando el factor de relación de aspecto de pixel de 1.0745 y estimar su incertidumbre.

Bibliografía

- [1] Ramón Zeleny Vázquez – Carlos González González. Metrología Dimensional. Ed. McGrawHill. México DF, Julio 1999. ISBN 970-10-2387-0.
- [2] Organización Internacional para la Estandarización. Norma ISO 9001:2008. Sistemas de administración de la calidad. Ginebra, Suiza. Año 2008
- [3] Organización Internacional para la Estandarización. Norma ISO/IEC 17025:2005. Requisitos generales para la competencia de laboratorios de ensayo y calibración. Ginebra, Suiza. Año 2005
- [4] Proyecto colaborativo MeDiAs. La metrología dimensional en Asturias. Centro Tecnológico para el Diseño y la Producción Industrial de Asturias. Asturias, España. Periodo 2007-2013.
- [5] Mónica I. Grasso. Cómo medir la incertidumbre de medir. Universidad del Centro Educativo Latinoamericano. Rosario, Argentina. Invenio, volumen 5, número 008. Junio 2002. Pp. 113-122.
- [6] Vocabulario Internacional de Metrología. Conceptos, fundamentales y términos asociados. VIM, Tercera edición. Comité Conjunto para las Guías en Metrología. Buró Internacional de Pesos y Medidas. Edición en español 2008.
- [7] Pablo Vera Alfaro y Joaquín Salas Rodríguez, Cálculo de la Incertidumbre en la Medición Visual de los Parámetros de un Péndulo de Foucault. CICATA-IPN, Unidad Querétaro. Computación y Sistemas Vol. 11 No. 4, 2008, pp 357-369 ISSN 1405-5546
- [8] Evaluación de datos de medición-Guía para la expresión de la incertidumbre de medida. Edición digital en español (traducción de JCGM 100:2008) Centro Español de Metrología. Madrid, España 2009.
- [9] Silfredo J. Sáez Ruiz, Luis Font Ávila. Incertidumbre de la Medición: Teoría y Práctica. L&S Consultores C.A. Maracay-Estado Aragua- Venezuela. Febrero 2001.
- [10] Organización Internacional para la Estandarización. Norma ISO 9001:2008. Sistemas de administración de la calidad. Ginebra, Suiza. Año 2008.
- [11] Ángel Sánchez, Jesús de Vicente, Emilio Prieto. Errores, incertidumbre y evaluación de la conformidad. Centro Español de Metrología. Madrid, España 2012.
- [12] Wolfgang A. Schmid y Rubén J. Lazos Martínez. GUM Guía para Estimar la Incertidumbre de la medición. CENAM, QRO., México. Mayo 2000.
- [13] Nota Técnica NT 002/03, Trazabilidad de las mediciones, L&S Consultores C.A. Maracay-Estado Aragua- Venezuela. Versión año 2000.
- [14] Estela Contreras Patricia Aguilar. Comité Técnico 2010-08-31. Criterios para la trazabilidad de las mediciones. Servicio Nacional de Acreditación. Lima Perú, año 2010.

-
- [15] M. Talavera, F. Pezet. Trazabilidad en las mediciones de masa. Centro Nacional de Metrología. El Marqués, Qro., México
- [16] Norma Mexicana NMX-CH-86-1994-SCF. Instrumentos de medición-bloques patrón longitudinales. Secretaría de comercio y fomento industrial. México
- [17] ISO 3650:1998. Geometrical Product Specifications (GPS) – Length standards - Gauge blocks.
- [18] R. Breil, T. Fries, J. Garnaes, J. Haycocks, D. Hüser, J. Joergensen, W. Kautek, L. Koenders, N. Kofod, K.R. Koops, R. Korntner, B. Lindner, W. Mirandé, A. Neubauer, J. Peltonen, G. B. Picotto, M. Pisani, H. Rothe, M. Sahre, M. Stedman and G. Wilkening. Intercomparison of scanning probe microscopes. Precision Engineering 26 (2002) 296-305.
- [19] La Microscopía Estereoscópica entra en una nueva dimensión. Daniel Göggel / Meinrad Berchtel. Leica Microsystems, Noviembre 2008.
- [20] Manual de Microscopía, Cátedra de Biología, Facultad de Agronomía y Agroindustrias, Instituto Tecnológico Superior de Calkiní en el Estado de Campeche, México 2010.
- [21] Arbor CLXXVII, Técnicas de microscopía óptica. F. Javier Díez Guerra, Consejo Superior de Investigaciones Científicas. España, Febrero 2004.
- [24] Hogg, J. The Microscope: Its History, Construction and Applications. Being a familiar Introduction to the use of the instrument and the study of microscopical science. (2ªed.). London: Hebert Ingram and Co.
- [23] N. Arraiza, J. Navarro. Manual de microscopía – Historia, descripción y uso del microscopio óptico. Museo de las Ciencias de Castilla. La Mancha, España
- [24] Carl Zeiss de México. [en línea]. Microscopía-Historia-La luz. < <http://www.zeiss.com.mx/>>. [consulta: Abril 2012].
- [25] Luis Ángel Marqués Calvo, 2004, La técnica estereoscópica [en línea]. año 2004, < www.estereoscopica.com >. [consulta: Abril 2012].
- [26] Emerson Corredor, Universidad Nacional de Colombia. Unidad de Laboratorios. Manual A-MO-10.001.002. Septiembre 2010.
- [27] Unai Mujika Torrontegi. Reconstrucción densa de modelos tridimensionales utilizando Visión Artificial, Universidad del País Vasco. Donostia, Septiembre de 2010
- [28] Alejandro López Polo, Enric Martí. Visualización Estéreo, Universidad Autónoma de Barcelona, 13 de febrero del 2009.
- [29] Rosas García, Vargas Escobar, Cerón Correa, Domínguez Cajeli, Cárdenas Quiroga. Toward the solution of the vertical exaggeration enigma in stereo vision. Ciencia e Ingeniería Neogranadina, Vol. 17-2, pp. 83-93. Bogotá, Diciembre de 2007. ISSN 0124-8170.

- [30] Jacob Cañadas Rodríguez. Diseño de un servicio de vídeo 3D/2D bajo demanda. Universidad Politécnica de Cataluña. España, 27 de Junio de 2007.
- [31] Vision Engineering, Mantis User Guide Compact & Elite with bench stand, England 2011. La GUM (Guide Uncertainty Measurement).
- [32] Gonzalo Pajares, Jesús M. de la Cruz. Visión por Computador: imágenes digitales y aplicaciones. Segunda edición. Grupo Alfaomega. México DF, Junio 2008. ISBN 978-970-15-1356-9.
- [33] Gabriel Felipe Jaramillo González, Redes Neuronales Aplicadas Al Análisis De Imágenes Para El Desarrollo De Un Prototipo De Un Sistema De Seguridad. Universidad Tecnológica De Pereira. Pereira, Colombia. Septiembre 2009.
- [34] Alasdair McAndrew. An Introduction to Digital Image Processing with Matlab, Notes for SCM2511 Image Processing 1. School of Computer Science and Mathematics Victoria University of Technology. Melbourne Australia.
- [35] Rafael C. Gonzalez, Richard E. Woods. Digital Image Processing. Second Edition. Prentice Hall. United States of America 2002. ISBN 0-201-18075-8.
- [36] José Muñoz Pérez. Procesamiento de Imágenes. Universidad de Málaga, campus Teatinos. Málaga, España 2009.
- [37] Lucía Barrera Tovar. Desarrollo e implementación de algoritmos para el sistema de percepción y localización de los robots bogobots. ITESM, Atizapán de Zaragoza, México. Abril 2010.
- [38] Julián Sanz Cuenca. Reconocimiento de objetos por descriptores de forma. Universidad de Barcelona. Barcelona, España. Junio 2008.
- [39] Nicolás Luis Fernández García. Contribución al reconocimiento de objetos 2D mediante detección de bordes en imágenes en color. Universidad Politécnica de Madrid. Córdoba, España. Mayo 2002.
- [40] Philippe Colantoni and Al. Color Space Transformations. Rochester, USA. Año 2004.
- [41] Luis Alfaro, Ma. José Roca, Enrique Poblet, Cámaras digitales y transferencia de imágenes al ordenador. Revista Española de Patología, Vol 36, n.º 2: pag.119-130. Año 2003.
- [42] Enrique A. López-Poveda. Las técnicas de análisis de imagen tienen aplicaciones en astronomía, teledetección, y también en neurociencias. Universidad de Salamanca. España 2003.
- [43] Marcos Martín-Fernández. Classical techniques of segmentation. Laboratory of Mathematics in Imaging. Boston Massachusetts. USA, May 2004.

[44] MathWorks® Image Processing Toolbox. [en línea]. Functions-Image Analysis and Statistics-Image Analysis. R2012a Documentation. <<http://www.mathworks.com/help>>. [consulta: Julio 2012].

[45] T. Guttormsen, A. Andersen, J. Holst, M. Keilow and E. Kjæhr. Edge Detection and its implementation in C++. Aalborg University. Esbjerg, Denmark. 2008.

[46] George Bebis. Edge Detection Notes. Department of Computer Science & Engineering. University of Nevada, Reno, NV. United States of America, February 2003.

[47] Carlos Platero. Técnicas de preprocesado, Visión Artificial. Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática. Universidad Miguel Hernández de Elche. Elche, España. Curso académico 2011.

[48] Bernd Jähne. Digital Image Processing. 6th revised and extended edition. Springer. ISBN 3-540-24035-7. University of Heidelberg. Germany 2005.

[49] Jonathan González Diéguez. Herramientas para la indexación de video: Extracción de imágenes relevantes y análisis de imágenes de agencia. Universidad Politécnica de Cataluña. Barcelona, España. Año 2011.

[50] Yolanda González Cid. Material del curso – Visión Industrial. Departamento de Matemáticas e Informática. Universidad de las Islas Baleares. Palma, España.

[51] Denise Mendieta Domínguez. Reconocimiento de Objetos Bidimensionales en Imágenes mediante la Transformada de Distancia utilizando Matlab. Universidad de las Américas Puebla. Cholula, Puebla, México, Diciembre de 2003.

[52] Mundo Mitutoyo. Revista técnica científica. No. 151. Alberto Rosas Tapia. Medición sin contacto con cámara CCD y Procesamiento de Imagen por Software. Página 28. Diciembre 2004

[53] Luis Monje Arenas. Fotografía científica, el arte de captar lo invisible. Universidad de Alcalá. Madrid, España. Marzo 2008.

[54] Daniel Elías Santana Cedrés, Agustín Trujillo Pino, Karl Krissian. Implementacion de un método de detección de contornos con precisión sub-pixel en un entorno gráfico y estudio comparativo de aplicaciones en imágenes 2D y 3D. Centro de tecnologías de la imagen CTIM. Universidad de las palmas de gran canaria. España, Septiembre 2011.

[55] Pardo Pascual, J.E., Ruiz Fernández, L.A., Almonacid, J. y Calaf, X. Detección automática de cambios en la línea de costa a partir de imágenes de satélite de resolución media. Grupo de Investigación Cartografía Geoambiental y Teledetección, Departamento de Ingeniería Cartográfica, Geodesia y Fotogrametría, Universidad Politécnica de Valencia. Valencia 2008.

[56] José Ramón Zeleny Vázquez, Héctor Ceballos Contreras, Hugo Labastida Jiménez. Máquinas de medición por visión. Boletín Técnico no. 1. Mitutoyo de México. Octubre 2009.

[57] NMX-CH-140-IMNC-2002 Guía para la Expresión de la Incertidumbre de las Mediciones equivalente a Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement, BIPM, IEC, IFCC, ISO, IUPAP, IUPAC, OIML (1995).

[58] José R. Zeleny V. Documentos de referencia para la determinación de incertidumbre en metrología dimensional. Instituto de Metrología Mitutoyo. Simposio de Metrología 2004. México.

[59] W. Schmid y R. Lazos, *Guía para Estimar la Incertidumbre de la Medición*, Centro Nacional de Metrología. <[http:// www.cenam.mx](http://www.cenam.mx)> México.

[60] Introducción a la Estadística, Sheldon M. Ross, segunda edición, Editorial Reverte, S.A., 2007 ISBN: 978-84-291-5039-1.

ANEXO 1

Certificado de bloques patrón

LM-JBP-01-CI

Mitutoyo Certificate number S11G00573
page 1 of 3

CERTIFICATE OF INSPECTION

APPLICANT: Name _____
Address _____

INSTRUMENT: (1 set of 46) Gauge Block Material: Steel
Code No. : 516-995-10 Manufacturer: Mitutoyo
Type: BMI-46-0/PD Basis of Test: ISO3650/DIN861/JIS B7506
Serial No. : 1105629
Grade: 0 (JIS)

DATE OF INSPECTION: 13th Jul. 2011

INSPECTION METHOD: The length of gauge block is determined by comparing it, using a gauge block comparator, with a reference gauge block of the same nominal length. Both gauge blocks were placed in a vertical position on the comparator with their left or unmarked measuring face down. For determining the deviation / variation of length, d_c / d_{max} / d_{min} / v is measured at the center point and the four corner points about 1.5 mm from the face edges.

ENVIRONMENT: Air temperature (20 ± 1.0) °C

RESULTS: The results apply to the reference temperature of 20°C (ITS-90). For correction of the thermal expansion, an expansion coefficient of the gauge block of $(6.0 \pm 0.3) \times 10^{-6}/F$ [$(10.8 \pm 0.5) \times 10^{-6}/K$] is used. The result of the calibration are presented on the next page.


Expanded Uncertainty: $(0.06 + 0.5L / 1000) \mu m$ (L = Nominal length) L:mm
(For Central Deviation)
(k=2)

The uncertainty presented above is based on a standard uncertainty multiplied by a coverage factor of k=2, which provides a confidence level of approximately 95%. The standard uncertainty has been determined in accordance with EAL-R2.

TRACEABILITY: Traceable to NIST No. 821/276375-08
(NIST=National Institute of Standard and Technology)

Traceable to PTB via No.4937 PTB 06
(PTB=Physikalisch-Technische Bundesanstalt)

Date 13th Jul. 2011

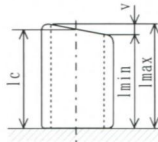

A. Matsuura

F-687 (8) MITUTOYO Co. HEADQUARTERS:
Postal code: 213-0012
20-1 Sakado 1-chome, Takatsu-ku, Kawasaki-shi, Japan
Tel: 044(813)8201 Fax: 044(813)8210



Certificate number S11G00573
page 2 of 3

Result: The following table states for each gauge block the measured deviation from the nominal length at the center point and the measured deviation / variation of length.



Nominal Length l_n Maximum Deviation $d_{max}=l_{max}-l_n$
 Central Length l_c Minimum Length l_{min}
 Central Deviation $d_c=l_c-l_n$ Minimum Deviation $d_{min}=l_{min}-l_n$
 Maximum Length l_{max} Variation $v=l_{max}-l_{min}$

Unit: μm

Nominal Length l_n mm	Ident. No.	Central Dev. d_c	Max. Dev. d_{max}	Min. Dev. d_{min}	Var. v
1	110096	+0.04	+0.05	+0.01	0.04
1.001	110522	-0.03	0.00	-0.05	0.05
1.002	110390	+0.03	+0.05	+0.02	0.03
1.003	110040	+0.03	+0.03	0.00	0.03
1.004	110656	-0.01	0.00	-0.05	0.05
1.005	110110	+0.02	+0.03	-0.01	0.04
1.006	110996	+0.03	+0.05	-0.03	0.08
1.007	110443	+0.02	+0.04	-0.01	0.05
1.008	110601	+0.04	+0.05	+0.01	0.04
1.009	110946	-0.02	-0.01	-0.04	0.03
1.01	110949	0.00	+0.01	-0.02	0.03
1.02	110790	+0.01	+0.02	-0.01	0.03
1.03	110905	-0.01	+0.01	-0.02	0.03
1.04	110164	+0.03	+0.03	-0.01	0.04
1.05	110395	0.00	+0.01	-0.04	0.05
1.06	110091	+0.02	+0.04	-0.01	0.05
1.07	110036	-0.01	+0.02	-0.04	0.06
1.08	110148	+0.01	+0.04	-0.03	0.07
1.09	110787	-0.01	+0.01	-0.05	0.06
1.1	110970	-0.04	+0.01	-0.06	0.07
1.2	110070	-0.02	-0.01	-0.03	0.02
1.3	110716	-0.01	+0.02	-0.04	0.06
1.4	110158	-0.02	+0.01	-0.05	0.06
1.5	110077	+0.02	+0.02	-0.02	0.04
1.6	110343	+0.01	+0.02	-0.01	0.03
1.7	110430	+0.03	+0.06	0.00	0.06
1.8	110242	+0.03	+0.06	+0.01	0.05
1.9	110012	+0.01	+0.04	-0.03	0.07
2	110189	+0.01	+0.03	-0.02	0.05
3	110800	+0.03	+0.03	+0.01	0.02
4	110199	+0.02	+0.04	-0.01	0.05
5	110412	+0.02	+0.04	-0.02	0.06
6	112069	+0.01	+0.04	-0.02	0.06
7	111320	-0.02	-0.01	-0.03	0.02
8	111956	0.00	+0.02	-0.02	0.04
9	111824	0.00	+0.03	-0.01	0.04
10	113639	+0.02	+0.06	0.00	0.06
20	113256	+0.07	+0.07	-0.01	0.08
30	111536	+0.05	+0.08	+0.03	0.05

F-687(8)

ANEXO 2



Resumen del procedimiento DI-006 para la calibración de microscopios de medida.

1. OBJETO

El siguiente es un método de calibración para los MICROSCOPIOS DE MEDIDA, codificados como D-10.02 según la clasificación de instrumentos de Metrología Dimensional. Este procedimiento se realiza de acuerdo con el PROCEDIMIENTO PARA LA ELABORACIÓN DE PROCEDIMIENTOS DE CALIBRACIÓN.

2. ALCANCE

El siguiente procedimiento es de aplicación a microscopios de medida tanto con escalas longitudinales como con escala angular, con cualquier valor de amplificación óptica. No se establece ningún límite para sus campos de medida, lineales y angulares, pero si para los valores de división de escala, siendo el siguiente procedimiento aplicable solo a los siguientes valores:

Escalas lineales: $E \geq 0,001\text{mm}$

Escala angular: $E \geq 1'$

Queda fuera de alcance del presente procedimiento, otros instrumentos de medición como proyectores de perfiles y las máquinas de medidoras de dos o tres coordenadas o cualquier equipo de captación de imagen.

3. DEFINICIONES

3.1. Microscopio de medida

Instrumento que permite efectuar mediciones en un sistema de dos dimensiones por una combinación de amplificación mecánico-óptica. Los componentes principales que lo conforman

son los siguientes: fuente de iluminación, sistema óptico de observación y amplificación, una mesa de soporte de los mensurados con dos ejes de movimiento o escalas de medida perpendiculares.

3.2. Iluminación por proyección (episcópica)

El haz luminoso, adecuadamente colimado, pasa a través del mensurado, proyecta dicho perfil como “sombra” o contorno sobre el dispositivo de observación.

3.3. Iluminación por reflexión (diascópica)

El haz luminoso ahora incide sobre la superficie del mensurado y se refleja sobre ella para proporcionar su imagen en el dispositivo de observación.

3.4. Mesa de soporte y ejes de medición

mesa en el que se deposita el mensurado, dispone de dos movimientos longitudinales, el eje X y el eje Y, en este caso el eje Z, no es de medición si no de enfoque del perfil. Los dos ejes de medida X y Y disponen de un sistema de amplificación propio.

3.5. Enrasar

Acción cuyo efecto es lograr la mejor coincidencia posible entre una zona del perfil proyectado o una marca del perfil reflejado con alguna de las líneas del retículo de observación.

3.6. Alinear

Proceso mediante el cual se mueve el mensurado sobre o con la mesa soporte, para que las zonas del perfil proyectado o marcas del perfil reflejado queden paralelas.

4. GENERALIDADES

Los microscopios de medida son instrumentos de precisiones medias y adecuados a la medición a la medición elementos no muy grandes ni pesados. En estos el operador se sitúa frente a la mesa, efectuando observaciones sobre un sistema óptico. Para realizar una medición, se sitúa el mensurando sobre la mesa del microscopio y se comienza efectuando la alineación y enrase sobre el retículo, para las ampliificaciones y sistemas de iluminación seleccionados.

Una vez efectuado el enrase sobre un perfil o marca, basta desplazar el mensurado a lo largo de uno de los ejes de medida hasta lograr el enrase sobre otro perfil o marca, el resultado se obtiene como diferencia de lecturas entre ambos posicionamientos.

Es recomendable, situar el microscopio en una zona de bajo nivel de iluminación, para facilitar el contraste de la imagen. En el siguiente procedimiento de calibración se han empleado las siguientes abreviaturas:

BPA: Bloque patrón angular.

BPL: Bloque patrón longitudinal.

PAT: Patrón angular de trazos.

PP: Patrón de planitud.

RPT: Regla patrón de trazos.

5. DESCRIPCIÓN

5.1. Equipos y materiales

Para la calibración de un microscopio de medida se utilizan bloques patrón longitudinales para el sistema de iluminación de iluminación por proyección y reglas patrón de trazos para el sistema de iluminación por reflexión. Para la calibración de la escala angular, en aquellos microscopios que dispongan de ella, se utilizarán bloques patrón angulares junto con polígonos patrón para el sistema de iluminación de iluminación por proyección y patrones angulares de trazos para el sistema de iluminación por reflexión.

Respecto a los BPL, pueden utilizarse de cualquiera de las calidades normalizadas. Respecto los otros patrones, RPT, BPA, PP y PAT, de tener incertidumbres adecuadas a los valores de las divisiones de escala del instrumento concreto para que se apliquen.

Es deseable disponer también de sensores de condiciones ambientales, fundamentalmente de temperatura, debidamente calibrados, a título meramente orientativo, sería aconsejable poder apreciar valores de temperatura con $E=0,1^{\circ}\text{C}$, en un campo de $C=15^{\circ}\text{C}$ a 25°C como mínimo.

5.2. Operaciones previas

5.2.1 Para poder emitir un certificado de calibración, este debe encontrarse identificado, de forma permanente, con los siguientes datos como mínimo:

MARCA

NÚMERO DE SERIE O DE IDENTIFICACIÓN

Además es recomendable identificar el MODELO.

Los datos pueden encontrarse grabados sobre la carcasa del microscopio o en una chapa metálica unida a la misma, pero ha de ponerse especial atención en no confundirlos con los de otros componentes y accesorios del instrumento como la mesa soporte, lectores de escala, ocular, etc. que pueden llevar también sus propios datos de identificación. En el certificado de calibración deberá reseñarse la identificación del microscopio y la de los elementos que contribuyan a la precisión de la cadena de medida.

5.2.2 Es deseable que la temperatura ambiente del lugar donde se calibre el microscopio de medida, se mantenga durante la operación en un intervalo de $T = (20 \pm 2) \text{ }^\circ\text{C}$.

La temperatura habrá de anotarse, al comienzo y al final de la calibración aunque es recomendable realizar la anotación cada hora. Si se van a efectuar correcciones de temperatura, es importante disponer de sondas tanto para el mensurado como para el microscopio, así como información, como el modelo de dilatación/contracción aplicable al equipo y el intervalo térmico de validez del mismo.

5.2.3 Se verificará que todos los elementos que sean necesarios para su calibración, se encuentren disponibles.

5.2.4 Se prepararán adecuadamente los patrones a emplear en la calibración del microscopio de medida, desengrasándolos y limpiándolos con papel y paños suaves, así como un desengrase adecuado, como por ejemplo una mezcla alcohol y éter al 50%.

5.2.5 Los patrones se sitúan próximos al microscopio a calibrar, preferiblemente sobre una base metálica, dejándolos estabilizar térmicamente durante una hora. El apoyo de los patrones sobre la mesa metálica se hará siempre por las caras laterales.

5.2.6 Antes de la calibración y con ayuda de un PP de $4 \times 90^\circ$, de un patrón angular de 90° o de una pequeña escuadra de perpendicularidad de las líneas del retículo de observación.

5.2.7 Se efectuara el ajuste de paralelismo entre el retículo del ocular y el movimiento de los ejes longitudinales. Para ello se procederá a enrasar sobre una de las líneas del retículo alguna pequeña marca de la superficie de la mesa de apoyo, desplazándola a lo largo de dicha de dicha línea mediante el eje de movimiento longitudinal correspondiente y efectuando el ajuste de giro hasta que en todo el recorrido la marca permanezca tangente a la línea del retículo, sin separarse de ella, ni atravesarla. La anterior operación con el otro eje de desplazamiento y línea del retículo y también se efectúa su ajuste, si el microscopio lo permite.

5.3 Proceso de calibración

Por tratarse de instrumentos de precisión media, se admite trabajar con los valores nominales de los patrones y deducir sus incertidumbres de las tolerancias de desviación de mismos. En el caso de tener que componer patrones por adherencia con bloques patrón de un mismo juego, se recomienda obtener la incertidumbre a través de la suma lineal de las incertidumbres.

5.3.1 Iluminación por proyección (episcópica)

5.3.1.1 Calibración de los ejes de medida longitudinales:

El proceso que se desarrolla deberá reiterarse para cada uno de los ejes de medida X y Y. La calibración se realizara mediante BPL, de valores nominales tales que cubran, de forma aproximadamente equidistante, el campo total de medida de uno de los ejes. Se situaran siempre los BPL de forma que su primera indicación quede siempre cerca del cero de la escala de medida.

Los BPL se irán situando sucesivamente sobre la mesa soporte procediéndose a su alineamiento y engrase; se efectuarán 10 medidas de cada BPL en un total de 5 a 10 puntos de calibración. Se realizara al menos un punto de calibración para cada una de las ampliaciones disponibles, concentrándose el resto de los puntos en una habitual.

5.3.1.2 Calibración de la escala de medida angular

La calibración se realizara mediante BPA y PP, pudiendo materializarse aquellos valores nominales para los que no se disponga del patrón adecuado mediante unión por adherencia de bloques y polígonos de los valores apropiados. Basta con estudiar la repetitividad en un punto en un punto de calibración en el que se efectuarán 10 medidas, tomando una sola medida en los puntos restantes.

Los patrones angulares se situaran sucesivamente sobre la mesa, procediéndose al engrase de forma que su primera indicación queda siempre cerca del cero de la escala de medida, se efectuarán medidas, al menos, en 11 puntos de calibración, aproximadamente equidistantes dentro de la escala.

5.3.2 Iluminación por reflexión (diascópica)

5.3.2.1 Calibración de los ejes de medida longitudinales:

Al igual que en caso de iluminación por proyección, el proceso se repetirá para los dos ejes X y Y. Como patrones se emplearán en este caso de RPT, de incertidumbre adecuada; la calibración se realizara en un total de 5 a 10 puntos de calibración, reiterando 10 medidas en cada punto.

5.3.2.2 Calibración de la escala de medida angular:

Se utilizarán PAT de precisión suficiente y se seguirá un proceso análogo al descrito 5.3.2.2

5.4 Tratamientos de datos

A fin de identificar sistemáticamente los datos y los resultados, se empleará la tecnología que se indica en los apartados siguientes.

5.4.1 Calibración de los ejes de medida longitudinales

La calibración se realiza mediante bloques patrón longitudinales, de valores nominales tales que cubran, de forma aproximadamente equidistante, el campo total de medida de cada uno de los ejes.

Los pasos a seguir en el cálculo de los ejes de medida de la calibración en cada uno de los puntos de medición o calibración se realiza como a continuación:

Se denominarán:

λ_{ij} medida de orden j en el punto i de calibración. Es la diferencia entre dos lecturas.

λ_{pi} valor del patrón empleado para calibración en el punto i .

Se calcularán los parámetros siguientes:

- 1) Valor medio de calibración en la región i

$$\bar{\lambda}_i = \frac{1}{J} \sum_{j=1}^J \lambda_{ij}$$

- 2) Corrección de calibración en la región i

$$C_{ci} = \lambda_{pi} - \bar{\lambda}_i$$

- 3) Desviación típica de calibración en la región i

$$s_i^2 = \frac{1}{J-1} \sum_{j=1}^J (\lambda_{ij} - \bar{\lambda}_i)^2$$

Las correcciones de calibración expresan fundamentalmente la discrepancia entre los valores de los patrones y las indicaciones del instrumento a medir.

Las incertidumbres producidas por cada fuente se nombran como incertidumbres típicas y se designa con la letra u , la suma de cada una de ellas representara la incertidumbre global que multiplicada por un factor es la incertidumbre expandida, designada con la letra U .

De acuerdo al certificado de inspección por el fabricante, la incertidumbre típica del patrón se deduce de la máxima desviación:

$$u_{pi} = (0.06 + 0.5 \frac{L}{1000})/2$$

Donde L es la longitud nominal del bloque en mm.

La contribución por desviación estándar s de los valores obtenidos en la región i , están dados por:

$$s_i^2/J$$

Se puede introducir la contribución debida a la expresión del resultado según un múltiplo de la división de escala, mediante una corrección de media nula C_E , cuya varianza se obtiene de la hipótesis de contribución uniforme en un intervalo $\pm E/2$ siendo E la resolución del microscopio de medida. La varianza de la contribución por división de escala es:

$$u^2_{(C_E)} = 2 \frac{\left(\frac{E}{2}\right)^2}{3} = \frac{E^2}{6}$$

6. RESULTADOS

Los resultados se refieren a 20°C y a la misma temperatura se encuentran referidos los certificados de los patrones utilizados.

6.1 Estimación de la incertidumbre

Como los microscopios estereoscópicos son instrumentos de precisión media, se admite trabajar con los valores nominales de los patrones y deducir sus incertidumbres de las tolerancias de la desviación de los mismos, para esto se consulta el certificado de inspección de los bloques patrón entregado por el fabricante.

En el caso de tener que componer patrones por adherencia con bloques patrón de un mismo juego se aconseja obtener la incertidumbre mediante suma lineal de las incertidumbres de los bloques adheridos.

El valor resultante de las medidas con microscopio de medida debe expresarse en múltiplos de la división de escala del instrumento, así como la incertidumbre de aquel valor, es conveniente que las correcciones locales y sus incertidumbres se ofrezcan con una cifra decimal respecto al valor de la división de escala, de forma que el redondeo a la división de escala se produzca al final del proceso de elaboración del resultado.

No se permiten redondeos que disminuyan el valor de la incertidumbre más de un 5%. En todo el caso es conveniente aplicar el redondeo de la incertidumbre por exceso cuando se aprecie un desequilibrio importante en el valor de sus contribuciones.

Magnitud X_m	Estimación x_m	Incertidumbre típica $u(x_m)$	Distribución de probabilidad	Coficiente de sensibilidad C_m	Contribución a la incertidumbre $u_m(C_i)$
L_{pi}	λ_{pi}	u_{pi}	Normal	1	u_{pi}
\bar{L}_i	$\bar{\lambda}_i$	$\frac{s_i}{\sqrt{J}}$	Normal	-1	$-\frac{s_i}{\sqrt{J}}$
C_E	0	$\frac{E}{\sqrt{6}}$	Triangular	1	$\frac{E}{\sqrt{6}}$

C_i	$c_i = \sum_m x_m$	Incertidumbre combinada (u)	$u = \sqrt{\sum_m u_m^2(c_i)}$
		Incertidumbre expandida (U)	$U=k \cdot u$

Tabla 1. Contribuciones a la incertidumbre combinada de las correcciones locales (escalas longitudinales)

La expresión de U^2 para la corrección de cada punto calibrado queda de la forma:

$$U_i^2 = k^2 \sum_{m=1}^3 u_m^2 (C_i) = k^2 \left[u_{pi}^2 + \frac{s_i^2}{J} + \frac{E^2}{6} \right]$$

Se recomienda el uso de una incertidumbre expandida que corresponda a una probabilidad del 95%, lo que puede conseguirse con un factor de cobertura $k = 2$ en la mayor parte de los casos.

Los estimadores de las variables y sus incertidumbres típicas se muestran en la tabla 1.

6. Periodo de calibración

Con carácter orientativo, puede establecerse un intervalo de recalibración de 36 meses para microscopios de medida que se utilicen en laboratorios y un intervalo de 24 meses para microscopios que se usen en peores condiciones.

ANEXO 3

Código en Matlab

Para facilitar la interpretación se desarrolló un código de medición solo para la posición horizontal, y la medición vertical se realiza aplicando previamente la transpuesta de la matriz de intensidades.

El código construido es el siguiente:

```
% programa para resaltar y medir el bloque patrón utilizando métodos de
% detección de borde
% Posición horizontal.

clear all
clc
rgb=(imread('C:\Users\Javier Santillan\Desktop\sabado\X4\New
folder\ImageFile064.JPG'));

I=rgb2gray(rgb);           % se utiliza la intensidad de la imagen
                           % por medio del comando rgb2gray

[Ren,Col]=size(I);
anc=Ren;   %ancho de la fotografia   dist vertical
lar=Col;   %largo de la fotografia   dist horizontal

BO=edge(I,'sobel');      % se aplica el metodo de deteccion de bordes.
                           % sobel,prewitt,roberts,canny,log,zerocross

% ciclo para ubicar el perfil del bloque
% la matriz limites contiene la ubicacion del contorno
for j=1:1:lar
    x(j,1)=1;
    x(j,2)=j;           %guarda los valores de x para la regresion
    for i=1:1:anc
        if BO(i,j)==true;   %true=1 BO arreglo logico
            limites(2,j)=i; %en el segundo renglon un borde
        end

        if BO(anc+1-i,j)==true
            limites(1,j)=anc+1-i; %en el primer renglon el otro borde
```

```
end
end
end

% compensacion en orillas para los metodos canny, log y zerocross
if min(limites(:))==0
    limites(1,1)=limites(1,2);
    limites(2,1)=limites(2,2);
    limites(1,lar)=limites(1,lar-1);
    limites(2,lar)=limites(2,lar-1);
end

% ciclo para rellenar el bloque
BOR=BO;
for j=1:1:lar
    for i=limites(1,j):1:limites(2,j)
        BOR(i,j)=1;
    end
end

sep=BOR;
% ciclo para la medicion del bloque
% di contine la medicion del bloque en pixeles
for j=1:1:lar
    a=1;
    for i=1:1:anc
        if sep(i,j)==true; %true=1 arreglo logico
            Bloq(a,j)=1;
            a=a+1;
        end
    end
    aux=Bloq(:,j);
    di(1,j)= sum(aux);
end

y1=(limites(1,:))'; %valores de y para la primera regresion
y2=(limites(2,:))'; %valores de y para la segunda regresion
x; %valores de x, segunda columna

% aplicacion del comando de regresion lineal, en stats1(coeficiente de
% correlacion R2.
[b1,bin1,e1,ein1,stats1]=regress(y1,x); %en b1(2) es el valor de la
pendiente
[b2,bin2,e2,ein2,stats2]=regress(y2,x); %en b2(2) es el valor de la
pendiente

% medicion con la correccion de alineacion.
ang=atan(-b1(2));
X=di.*cos(ang);
Xmedia=mean(X((0.1*lar+1):0.9*lar)); % valor promedio de la medicion

Xmm=X./Xmedia; %medicion en milimetros
E=1000/Xmedia; %Resolucion de la amplificacion en micrómetros
ureso=E/sqrt(3)
uenfo=E/sqrt(12) % verificar que menf sea igual a cero
```

```
Xmediamm=mean(Xmm((0.1*lar+1):0.9*lar)); % valor promedio de lamedicion
mm

% Separacion de las regiones
Ext1=X(1:0.1*lar);
Ext2=X((0.9*lar+1):lar);
Pri=X(65:160);
Seg=X(161:224);
Ter=X(225:288);
Cua=X(289:352);
Qui=X(353:416);
Sex=X(417:480);
Set=X(481:576);

Ext1mm=Xmm(1:0.1*lar);
Ext2mm=Xmm((0.9*lar+1):lar);
Primmm=Xmm(65:160);
Segmm=Xmm(161:224);
Termmm=Xmm(225:288);
Cuamm=Xmm(289:352);
Quimmm=Xmm(353:416);
Sexmm=Xmm(417:480);
Setmm=Xmm(481:576);

% se obtiene la media de las regiones
MePri=mean(Pri);
MeSeg=mean(Seg);
MeTer=mean(Ter);
MeCua=mean(Cua);
MeQui=mean(Qui);
MeSex=mean(Sex);
MeSet=mean(Set);

% se obtiene la desviacion estandar de las regiones

DEPrimmm=std(Primmm);
DESegmm=std(Segmm);
DETermmm=std(Termmm);
DECuamm=std(Cuamm);
DEQuimmm=std(Quimmm);
DESexmm=std(Sexmm);
DESetmm=std(Setmm);

%para obtener la incertidumbre por repetibilidad.
urep1=std(Primmm)/sqrt(length(Primmm));
urep2=std(Segmm)/sqrt(length(Segmm));
urep3=std(Termmm)/sqrt(length(Termmm));
urep4=std(Cuamm)/sqrt(length(Cuamm));
urep5=std(Quimmm)/sqrt(length(Quimmm));
urep6=std(Sexmm)/sqrt(length(Sexmm)); %
urep7=std(Setmm)/sqrt(length(Setmm)); %

% pixeles de transicion
```

```
% calcula la desviacion estandar del conjunto de pixeles de transicion
por
% columna, y para las dos enrrases.

enfoAr=zeros(5,lar);
enfoAb=zeros(5,lar);
for j=1:1:lar
    for i=-2:1:2
        enfoAr(i+3,j)= I(y1(j)+i,j);
        enfoAb(i+3,j)= I(y2(j)+i,j);
    end
    DEenfoAr(j)=std(enfoAr(:,j));
    DEenfoAb(j)=std(enfoAb(:,j));
end

% ciclo para alertar de un enfoque bajo utilizando el comando disp

menf=0;
for j=1:1:lar
    if DEenfoAr(j)<15
        menf=menf+1;
    end
end

if menf >(0.05*lar)
    disp ('el enfoque es de baja calidad');
end
```

Para la medición vertical solo al inicio se realizan las siguientes operaciones. Se utiliza la transpuesta de I para utilizar el mismo código.

```
% programa para resaltar y medir el bloque patron utilizando metodos de
% deteccion de borde
% Posicion VERTICAL.

clear all
clc
rgb=(imread('C:\Users\Javier Santillan\Desktop\sabado\X4\New
folder\ImageFile076.JPG'));

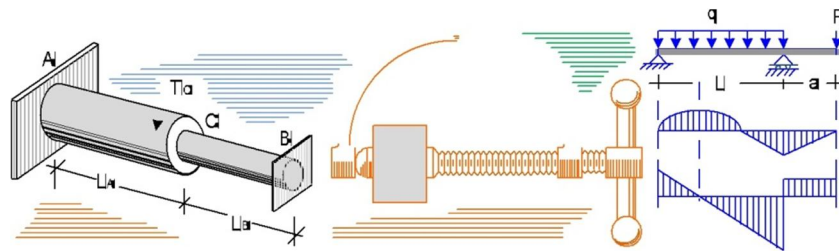
I=rgb2gray(rgb);           % se utiliza la intensidad de la imagen
                           % por medio del comando rgb2gray

I=I';                     %solo para la medicion de bloques verticales

[Ren,Col]=size(I);
```

ANEXO 4

Práctica de laboratorio. Microscopio estereoscópico



MICROSCOPIO ESTEREOSCÓPICO

PRÁCTICA No 14

Procedimiento	1	2	3	4	5	6
Participación	0	1	2			
Comprensión	0	1				
Conclusiones	0	1				
Calificación	0	1				

de la práctica

(Tipo de práctica RCT)

_____ / _____ / _____

Duración: 30 min.

OBJETIVO

Que el alumno aprenda a manejar un equipo de micro-mediciones, e identifique los alcances y la utilidad de los microscopios estereoscópicos en el campo de la micro-metrología.

MATERIAL

- 1) Microscopio estereoscópico.
- 2) Reglilla de graduación o bloques patrón longitudinales.
- 3) Computadora y USB (microscopio).

- 4) Un palpador de rubí.

Generalidades

Los microscopios estereoscópicos (fig. 14.19) son microscopios simples o lupas, considerados también como instrumentos de medida. Son clasificados como instrumentos de metrología dimensional de precisiones medias y adecuados a la medición de elementos no muy grandes, ni pesados.

Los componentes principales del microscopio estereoscópico son la fuente de iluminación de leds bajo la mesa y otra fuente del cabezal de visión, un sistema óptico de observación y amplificación formado por un juego de lentes, un soporte principal, un conjunto cabezal con protección contra deslumbramiento, y una mesa flotante con dos ejes de movimiento.



Fig. 14.19. Microscopio estereoscópico

El microscopio estereoscópico hace posible la visión tridimensional de los objetos. Consta de dos tubos oculares y dos objetivos pares para cada aumento.

Este microscopio ofrece ventajas para observaciones que requieren pequeños aumentos. El óptimo de visión estereoscópica se encuentra entre 2X y 40X o aumento total del microscopio [2].

Conceptos de apoyo

Esterescopía: es cualquier técnica capaz de recoger información visual tridimensional y/o crear la ilusión de profundidad en una imagen.

Medición por visión: son equipos de innovación tecnológica, que mediante la manipulación de las imágenes permite distinguir los diferentes colores y asignarle una numeración que va discretizando secciones de las imágenes que son transformadas en dimensiones o características geométricas deseadas, como lo serían círculos, líneas, arcos, etc.

Regilla o reglilla: esta consiste en un disco de vidrio transparente en el cual se encuentra graduada una reglilla de 20 (mm) de longitud, dividida en 200 partes. Este disco graduado va inserto en el ocular del microscopio.

Mensurando: objeto de medición o magnitud específica sometida a medición [3].

PARTES DEL MICROSCOPIO ESTEREOSCOPICO (fig. 14.20)

- 1) Mesa flotante.
- 2) Control de enfoque.
- 3) Distancia interpupilar.
- 4) Lente.
- 5) Iluminación de contorno.
- 6) Regulador de iluminación.
- 7) Brazo universal.
- 8) Cabezal de visión.

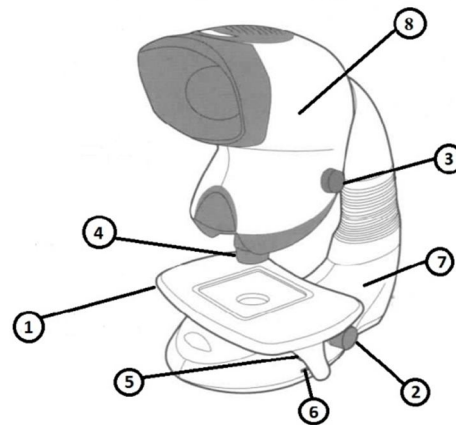


Fig. 14.20. Partes del Microscopio

Cabezal de visión: es la parte superior del microscopio, donde están acoplados los oculares, los objetivos y el aparato de iluminación (espejo, diafragma, condensador y filtros). Estos elementos son los que permiten la iluminación, ampliación y la visión aumentada del objetivo.

Amplificación o magnificación: se define como el cociente del tamaño angular visto a través del instrumento y el tamaño angular observado a simple vista [4]

Alinear: proceso mediante el cual se mueve el mensurando, para que las líneas de perfil proyectadas queden paralelas a los ejes de medida, haciendo así despreciable el error del ángulo de medición.

Enfoque: acción de mover el cabezal de visión hacia arriba o hacia abajo para lograr la mejor imagen posible.

Mesa flotante: es la plataforma donde se coloca el mensurando. Es de cristal con el fin de permitir el paso de la luz emitida por la fuente de iluminación inferior.

Ejes de medida: la mesa dispone de dos ejes de medida, normalmente identificados como el eje X, que es el eje horizontal transversal al operador y el eje Y, que es el eje horizontal hacia el operador. Y un eje Z correspondiente a la dirección del haz luminoso de proyección. Para efectuar la medición se sitúa en objeto sobre la mesa del microscopio y se comienza con las operaciones de alineación y enfoque.

Fuentes de iluminación: cuenta con dos fuentes de iluminación, la primera colocada bajo el cabezal inferior formada por dos lámparas de leds. La otra fuente está bajo la mesa, también de leds, las cuales son independientes dependiendo de necesidad al momento de la medición.

Distancia interpupilar: es la distancia entre ojos para lograr una visión estereo confortable y es diferente para cada usuario, se regula con la perilla localizada en el cabezal de visión.

Breve historia de la microscopía estereo

Los primeros estudios de la estereoscopia fueron iniciados por Euclides y Leonardo da Vinci. Pero para encontrar el primer dispositivo hay que remontarse a 1838 cuando el físico escocés, Sir Charles Wheatstone construyó un aparato con el que se podía apreciar el fenómeno de la visión estereoscópica.

En el año de 1896, Ernst Abbe se encuentra con Horatio S. Greenough, un biólogo americano. Su discusión, enfocada en la construcción de un microscopio estereoscópico. El visitante americano dibuja un bosquejo prometedor sobre una hoja de papel, dentro de un año, el invento de Greenough toma forma, el primer microscopio estereoscópico [5].

Calibración de los microscopios estereoscópicos

En un microscopio no es muy sencillo hacer una calibración debido a que es un equipo que no nos proporciona un dato numérico, entonces requiere de una comparación con un material o instrumento de referencia. La comparación se hace para cada magnificación con una retícula ocular para aproximar la medida correcta del objeto que se mide. Si el interés es solamente inspección, se coloca el objeto sobre la plataforma ajustando la iluminación deseada y el enfoque más conveniente.

A pesar de realizar solamente una inspección algunas veces se requiere conocer una medida en particular. En casos más importantes, la medición es el interés principal, por lo tanto el microscopio tiene que calibrarse antes de realizar estas tareas.

Las imágenes del microscopio estereoscópico mantis Elite-Cam pueden ser vistas en un equipo computo al conectar el cable USB del microscopio, y una "llave" (unidad USB) para reconocimiento del programa Image Solutions (fig. 14.21) con el que trabaja este microscopio.

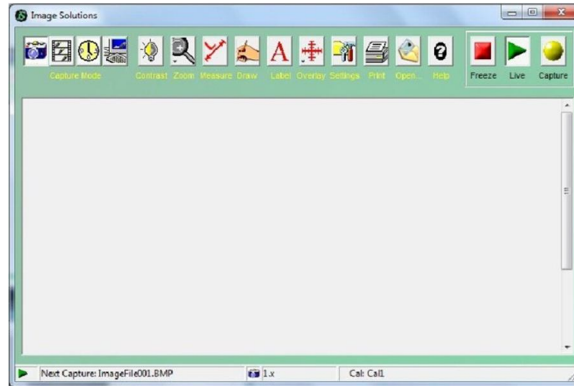


Fig. 14.21 Pantalla principal (Image Solutions)

El programa ofrece las funciones básicas para medir, calibrar, amplificar, o captura de video o imágenes que se deseen, o bien exportar en tabla de Excel los datos de las mediciones. Al abrir el programa previamente instalado aparece como la Fig. 14.21, en la opción settings



se puede modificar diversos formatos de video e imagen si se requiere o si no se visualiza la imagen del microscopio.

La calibración se hace con bloques patrón eligiendo la longitud de acuerdo al campo de visión de cada aumento. Se coloca el bloque patrón en la plataforma para escribir la medida del perfil seleccionado o sombra del bloque. En el software se presentan dos modos de calibración, el primero es de manera rápida en un solo eje. Y el segundo es teniendo en cuenta las dimensiones en los ejes "x", "y" y en una orientación inclinada (l). Para esto es necesario orientar previamente el bloque patrón en las tres orientaciones para conocer el número de pixeles que relaciona la longitud en cada eje, esta opción se llama calibración.



Los modos de calibración se seleccionan en la lista del icono overlay. De acuerdo a la calidad deseada de la medición se elige el modo de calibración.

Es muy importante considerar la convención para seleccionar el inicio y fin de la distancia a medir. El inicio se considera colocando el cursor o línea auxiliar adjunto del lado izquierdo del primer punto a medir, y lo mismo para indicar el final, como se observa en la figura 14.22.

La convención es utilizada para seleccionar toda distancia, sea para calibrar o medir. Para visualizar mejor la imagen se puede utilizar la amplificación del programa.



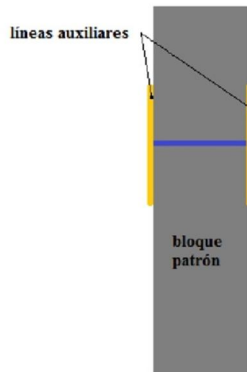


Fig. 14.22 Convención para la medición.

También puede utilizarse la reglilla, aunque hay que considerar que la incertidumbre será diferente por la trazabilidad propia de cada opción.

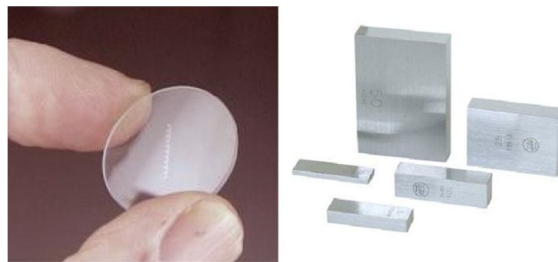


Fig. 14.23 Reglilla y Bloques Patrón.


Al medir en un microscopio las mediciones de un eje con respecto al otro no son las mismas, las diferencias puede ser por la iluminación que no es uniforme, las curvaturas de los lentes, posibles sombras o las llamadas aberraciones, que son defectos o distorsiones en la imagen provocando errores en la lectura.

Medición en el microscopio

Una vez calibrado el microscopio, se retira el bloque patrón o reglilla y se coloca la pieza a medir. Nuevamente se realiza el proceso de enfoque hasta obtener la mejor vista.

Nota: la calibración se pierde cuando se cambia a otro nivel de magnificación, si solo se mueve la perilla de enfoque, los errores son mínimos y se considera que el microscopio permanece calibrado.



Se selecciona el icono de medida en el software , después modo de medida. En esta opción se encuentran opciones como líneas auxiliares, de puntos, línea, o mediciones de círculos a partir de la selección de puntos. El software en la parte superior indica la lectura medida de forma automática, ahí mismo se pueden exportar las lecturas a Microsoft Excel

Otras dos funciones importantes en el software son la captura de imágenes y la exportación de datos (fig. 14.24). Para la captura se selecciona primero el modo, si es fotografía o video.

Enseguida se da clic en capturar, ahí se puede elegir la opción pausa (Freeze), y para volver a visualizar la imagen en tiempo real da clic en el icono live.



Fig. 14.24 Funciones para captura de Imagen.

Para cambiar la lente objetivo, se sostiene y se gira el tornillo 4, y se coloca la lente objetivo deseada en el asiento y se bloquea con el tornillo.

Precauciones y limpieza del microscopio

La limpieza del microscopio estereoscopio es una de las rutinas más importantes y debe considerarse un procedimiento frecuente. Para realizar la limpieza se requiere lo siguiente:
Materiales:

1. Una pieza de tela limpia, de textura similar a la de los pañuelos.
2. Una botella de líquido para limpieza de lentes. Se consigue en las ópticas. También puede utilizarse un trozo de seda suave.
3. Una cubierta plástica. Se utiliza para proteger el microscopio del ambiente externo cuando no está en uso.

Entre las tareas más importantes para mantener el microscopio estereoscopio en condiciones adecuadas de operación, son:

- Comprobar el ajuste del mecanismo de enfoque. El enfoque que selecciona el usuario puede variar.
- Verificar que en todos los componentes mecánicos no exista polvo o suciedad.
- Lubricar el microscopio estereoscopio de acuerdo a las recomendaciones mencionadas anteriormente.
- Nunca toque los lentes con los dedos
- Solo si es necesario limpiar los lentes.
- Tenga presente las distancias de trabajo establecidas

- No forzar los tornillos o ajustes todos ellos deben funcionar suavemente
- No abrir ningún lente y mantenerlos protegidos en su cubierta cuando no están en uso.
- Mantener preferentemente el microscopio en un ambiente con temperatura controlada y con baja iluminación.

Desarrollo de la práctica

1. Determinar las medidas del palpador indicado por el instructor.
2. Utilizar ambos modos de calibración: quick calibrate, y en calibrate usar el factor 1.07 utilizando la opción calibración por ejes.
3. Comparar los resultados del con los obtenidos en el comparador óptico.
4. Explicar la diferencia de las mediciones, y las ventajas de los dos equipos.

Aplicaciones de la estereoscopia

Los microscopios estereoscopios son usados más comúnmente en los departamentos de "aseguración de calidad" y ambientes de investigación industrial.

Es una poderosa herramienta para diseño y visualización de prototipos, por ejemplo en la industria automovilística. Chrysler, Ford, Opel, Renault, Volvo y otros fabricantes ya usan estas técnicas de microscopia estereoscópica, con un importante ahorro en tiempo y dinero durante el desarrollo. Los más importantes paquetes y estaciones de diseño por ordenador, como IBM, HP, DEC, Sun o Silicon Graphics, soportan actualmente la visualización estereoscópica mediante gafas LCS, como las de Stereographics o VRex.

En medicina es uno de los campos en los que la estereoscopia proporciona más ayuda para la enseñanza, la interpretación de imágenes para el diagnóstico o como ayuda en las intervenciones.

No es una novedad que lupas y microscopios de precisión cuentan con visión estéreo desde hace tiempo.

Firmas como Zeiss u Olympus disponen de diversos modelos según las aplicaciones. Si a un microscopio estéreo se le conectan dos cámaras de vídeo, se puede ofrecer una presentación 3D en un monitor o pantalla grande de vídeo, así como grabar las imágenes 3D.

COMPRENSIÓN

1. ¿Cuál es la característica principal que ofrece el microscopio estereoscópico?

2. ¿Cuál es la máxima resolución y el campo de medida que puede alcanzarse con esta resolución?

3. ¿Puede utilizarse otro programa de cómputo como Autocad para realizar mediciones sobre las imágenes capturadas en Image Solutions?

4. Menciona algunos ejemplos donde las micro mediciones son de gran importancia.

CONCLUSIONES:

REFERENCIAS

- [1] Luis Ángel Marqués Calvo, 2004, La técnica estereoscópica, www.estereoscopica.com
- [2] Emerson Corredor, Universidad Nacional de Colombia. Unidad de Laboratorios. Manual A-MO-10.001.002. Septiembre 2010.
- [3] Vocabulario Internacional de Metrología. Conceptos, fundamentales y términos asociados. VIM (3ra edición 2008).
- [4] Vision Engineering, Mantis User Guide Compact & Elite with bench stand, England 2011.
- [5] Técnicas de Microscopía, Zeiss, México. [En línea] consulta: Abril 2012. <http://www.zeiss.com.mx/>

ANEXO 5

Distribuciones de probabilidad

Las medidas de dispersión son útiles porque nos proporcionan información adicional que nos permite juzgar la confiabilidad de nuestra medida de tendencia central. Si los datos están muy dispersos la posición central es menos representativa de los datos, como un todo, que cuando estos se agrupan más estrechamente alrededor de la media.

La varianza y desviación estándar son dos medidas que nos dan una distancia promedio con respecto a la media de la distribución. Estas medidas numéricas describen la dispersión o variabilidad de la variable aleatoria mediante el "promedio" o "valor esperado" de las desviaciones cuadráticas de los valores de x a partir de su media poblacional μ .

En estadística la media o media poblacional, también es llamada esperanza matemática, representada por $E[X]$. Sea x una variable aleatoria continua con distribución de probabilidad $f(x)$, entonces X es un conjunto definido como $X=x_1, x_2, \dots, x_n$. La esperanza se calcula por la integral:

$$E[X] = \int_{-\infty}^{\infty} x f(x) dx$$

Y la varianza de x como:

$$Var(X) = E[(x - E[X])^2]$$

La desviación estándar es:

$$\sigma = \sqrt{Var(X)}$$

La varianza se puede definir como un momento de segundo grado con respecto a la media $\mu = E[X]$.

$$\begin{aligned} Var(X) &= \sigma_x^2 = E[(x - \mu)^2] = \sum_{i=1}^n (x_i - \mu)^2 f(x_i) \\ Var(X) &= \int_{-\infty}^{\infty} (x_i - \mu)^2 f(x) dx \\ Var(X) &= \int_{-\infty}^{\infty} x^2 f(x) dx - 2 \int_{-\infty}^{\infty} x \mu f(x) dx + \int_{-\infty}^{\infty} \mu^2 f(x) dx \end{aligned}$$

Pero:

$$\int_{-\infty}^{\infty} x^2 f(x) dx = E(x^2)$$

$$-2 \int_{-\infty}^{\infty} x \mu f(x) dx = -2 \mu \int_{-\infty}^{\infty} x f(x) dx = -2 \mu E(X) = -2 \mu \mu = -2 \mu^2$$

$$Var(X) = E(x^2) - 2 \mu^2 + \mu^2$$

$$Var(X) = E(x^2) - \mu^2$$

La cuantificación de una fuente de incertidumbre incluye la asignación de un valor y la determinación de la distribución a la cual se refiere este valor. Las distribuciones que aparecen más frecuentemente son:

a) Distribución normal

Los resultados de una medición repetida afectada por una o más magnitudes de influencia que varían aleatoriamente, generalmente siguen en buena aproximación una distribución normal. También la incertidumbre indicada en certificados de calibración se refiere generalmente a una distribución normal.

$$\bar{X} = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n}$$

La esperanza matemática de \bar{X} . Si llamamos $E(X)=\mu$.

$$E[\bar{X}] = E\left(\frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n}\right) = \left(\frac{E(x_1) + E(x_2) + \dots + E(x_n)}{n}\right) = \frac{n\mu}{n} = \mu$$

La varianza de X para la dispersión de los distintos valores de medias muestrales, alrededor de μ :

$$Var(\bar{X}) = Var\left(\frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n}\right)$$

$$Var(\bar{X}) = \left(\frac{Var(x_1) + Var(x_2) + \dots + Var(x_n)}{n^2}\right) = \frac{n\sigma^2}{n^2} = \frac{\sigma^2}{n}$$

b) Distribución rectangular

En una distribución rectangular cada valor en un intervalo dado tiene la misma probabilidad, o sea la función de densidad de probabilidad es constante en este intervalo.

Ejemplos típicos son la resolución de un instrumento digital o la información técnica sobre tolerancias de un instrumento. En general, cuando exclusivamente hay conocimiento de los límites

superior e inferior del intervalo de variabilidad de la magnitud de entrada, lo más conservador es suponer una distribución rectangular.

La variable aleatoria X se distribuye uniformemente en (a,b) si:

$$f_x(x) = K \quad \text{para todo } X \in (a,b)$$

$$f_x(x) = 0 \quad \text{para todo } X \notin (a,b)$$

$$\int_a^b f(x) dx = 1 \Leftrightarrow \int_a^b K dx = 1$$

$$K(b-a) = 1 \quad K = \frac{1}{(b-a)}$$

$$f(x) = \frac{1}{(b-a)} \quad \text{para } a < x < b$$

La esperanza:

$$E[X] = \int_{-\infty}^{\infty} x f(x) dx = E[X] = \int_{-\infty}^a 0 dx + \int_a^b x \left(\frac{1}{b-a}\right) dx + \int_b^{\infty} 0 dx = \left(\frac{1}{b-a}\right) \int_a^b x dx$$

$$E[X] = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{b-a}\right) x^2 \Big|_a^b = \frac{b^2 - a^2}{2(b-a)}$$

$$E[X] = \frac{(b-a)(b+a)}{2(b-a)}$$

$$E[X] = \frac{(b+a)}{2}$$

La varianza:

$$Var(X) = E(x^2) - [E(X)]^2$$

$$E[x^2] = \int_{-\infty}^{\infty} x^2 f(x) dx = E[X] = \int_{-\infty}^a x^2 0 dx + \int_a^b x^2 \left(\frac{1}{b-a}\right) dx + \int_b^{\infty} x^2 0 dx$$

$$E[x^2] = \left(\frac{1}{b-a}\right) \int_a^b x^2 dx = \frac{1}{3} \left(\frac{1}{b-a}\right) x^3 \Big|_a^b = \frac{b^3 - a^3}{3(b-a)}$$

$$E[x^2] = \frac{(b-a)(b^2 + ab + a^2)}{3(b-a)} = \frac{(b^2 + ab + a^2)}{3}$$

$$\text{Var}(X) = \frac{(b^2 + ab + a^2)}{3} - \frac{(b + a)^2}{4}$$

$$\text{Var}(X) = \frac{4b^2 + 4ab + 4a^2 - 3b^2 - 6ab - 3a^2}{12}$$

$$\text{Var}(X) = \frac{a^2 - 2ab + b^2}{12} = \frac{(b - a)^2}{12}$$

c) Distribución triangular:

Si además del conocimiento de los límites, superior e inferior hay evidencia de que la probabilidad es más alta para valores en el centro del intervalo y se reduce hacia los límites, puede ser más adecuado basar la estimación de la incertidumbre en una distribución triangular.

Por ejemplo, en un baño termostático, que se utiliza para medir la densidad de un líquido, la temperatura puede tener una ligera deriva. Si se mide la temperatura antes y después de la medición de la densidad (resultando en T1 y T2), se puede suponer para el momento de la medición de la densidad una temperatura de (T1+T2)/2 con una distribución triangular entre T1 y T2.

d) Otras distribuciones

Pueden encontrarse también distribuciones como la U, en la cual los extremos del intervalo presentan los valores con probabilidad máxima, típicamente cuando hay comportamientos oscilatorios subyacentes. También se encuentran distribuciones triangulares con el valor máximo en un extremo como en las asociadas a "errores de coseno".

ANEXO 6

Proporciones de aspecto de píxeles habituales para formatos de imágenes

Recurso	Proporción de aspecto de píxeles	Cuando se debe utilizar
Píxeles cuadrados	1.0	Su material de archivo tiene un tamaño de fotograma de 640 x 480 ó 648 x 486, es 1920 x HD (no HDV o DVCPRO HD), es 1280 x 720 HD o HDV, o se ha exportado de una aplicación que no es compatible con píxeles no cuadrados. Este ajuste también puede ser apropiado para material de archivo que se haya transferido desde películas o para proyectos personalizados.
D1/DV NTSC	0.9	El material de archivo tiene un tamaño de fotograma de 720 x 486 ó 720 x 480 y desea que el resultado tenga una proporción de aspecto de fotogramas de 4:3. Este ajuste también puede ser apropiado para material de archivo exportado desde una aplicación que utilice píxeles no cuadrados, como las aplicaciones de animación 3D.
D1/DV NTSC Pantalla ancha	1.2	El material de archivo tiene un tamaño de fotograma de 720 x 486 ó 720 x 480 y desea que el resultado tenga una proporción de aspecto de fotogramas de 16:9.
D1/DV PAL	1.0666	El material de archivo tiene un tamaño de fotograma de 720 x 576 y desea que el resultado tenga una proporción de aspecto de fotogramas de 4:3
D1/DV PAL Pantalla ancha	1.422	El material de archivo tiene un tamaño de fotograma de 720 x 576 y desea que el resultado tenga una proporción de aspecto de fotogramas de 16:9.
Anamórfico 2:1	2.0	El material de archivo se tomó con lentes de película anamórfica desde un fotograma de película con una proporción de aspecto de 2:1.

HDV1080/DVCPR O HD720 (After Effects), HD Anamorphic 1080 (Adobe premiere)	1.33	El material de archivo tiene un tamaño de fotograma de 1440 x 1080 ó 960 x 720 y desea que el resultado tenga una proporción de aspecto de fotogramas de 16:9.
DVCPRO HD 1080 (solo en After Effects)	1.5	El material de archivo tiene un tamaño de fotograma de 1280 x 1080 y desea que el resultado tenga una proporción de aspecto de fotogramas de 16:9.