

Diseño y evaluación de un sistema de control para validación métrica bidimensional de tornillos
metálicos utilizados en osteosíntesis

Iván Rodrigo Castillo Cañas y Damar Nicolás Rojas Chacón

Trabajo de Grado para optar al título de Ingeniero de Sistemas e Informática

Director

Andrés Leonardo González Gómez, MSc

Magíster en Ingeniería de Sistemas e Informática

Codirector

Jaime Enrique Meneses Fonseca, PhD

Doctor en Ciencias de la Ingeniería

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas

Escuela de Ingeniería de Sistemas e Informática

Bucaramanga

2021

Dedicatoria

A Dios, por ser mi fortaleza para trabajar incansablemente por mi sueños, por darme la sabiduría necesaria para tomar decisiones y especialmente por enseñarme tanto a lo largo de mi vida, es el mejor docente. A mi madre, por enseñarme lo que es el verdadero amor, por estar conmigo desde la distancia, por velar trabajando para cuidarme y hacerme el hombre que soy, te amo Jackeline Chacón. A mi padre, por enseñarme que rendirme no es una opción, por enseñarme lo que es tener fuerza cual roble en el bosque, por sus sabios consejos y sobre todo por su amor, te amo Alfredo Rojas. A mis hermanos, por ser mis compañeros de vida y estar conmigo desde que tengo memoria, gracias por darme recuerdos que me acompañaran hasta el día en que deje la tierra, Camilo Rojas y Alejandra Rojas. A mis amigos, por su compañía y su tiempo, especialmente a mi amigo y hermano Felipe Guerrero, por tantos años de amistad incondicional.

*“No te rindas, aún estás a tiempo, de alcanzar y comenzar de nuevo, aceptar tus sombras,
enterrar tus miedos, liberar el lastre, retomar el vuelo...”*

Fragmento del poema “No te rindas”, Mario Benedetti.

Damar Nicolás Rojas Chacón

Dedicatoria

A mis padres por su amor incondicional y apoyo constante en mis decisiones, ya que siempre han encontrado una luz de esperanza en mí.

A mi abuela Elena y abuelo Eliseo por criarme cuando mis padres estaban ocupados trabajando arduamente para que nunca me faltara nada.

A mi tía Eliana por ser una segunda mamá para mí.

A mis amigos y compañeros que siempre confiaron en mí y estuvieron presentes en los buenos y malos momentos.

Finalmente, a todas las personas que dedican su vida por un mundo con más justicia social.

“Aguanta, si el amor es la esperanza que no dejas de sostener...Aguanta”.

Fragmento de la canción “Touch”, Daft Punk.

Iván Rodrigo Castillo Cañas

Agradecimientos

A nuestras familias por estar con nosotros en todo momento. A nuestros amigos por hacer el camino de la vida más grato. A los profesores Andrés González y Jaime Meneses, por compartir tiempo y sabiduría con nosotros para el desarrollo de este proyecto.

El presente trabajo de investigación se realizó en el marco de ejecución del proyecto titulado: INTEGRACIÓN DE TÉCNICAS ÓPTICAS DE DIGITALIZACIÓN 3D PARA EL MONITOREO Y CONTROL DE CALIDAD DE PLACAS DE COMPRESIÓN DE BLOQUEO PARA LA FIJACIÓN INTERNA DE ESTRUCTURAS ÓSEAS DE LA EMPRESA JAIMES RUEDA COMPAÑÍA – PRECIMEC S.A.S con código: 1102-808-64296, número de contrato: RC No. 80740-588-2019 y financiado del FONDO NACIONAL DE FINANCIAMIENTO PARA LA CIENCIA, LA TECNOLOGÍA Y LA INNOVACIÓN FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS.

Tabla de Contenido

Introducción	17
1. Sobre este trabajo de investigación	19
1.1. Planteamiento del problema	19
1.2. Justificación	22
1.3. Objetivos	24
1.4. Estructura del documento	25
2. Marco de referencia	26
2.1. Calidad	26
2.1.1. Tipos de tornillos en osteosíntesis	26
2.2. Metrología óptica	33
2.3. Cámaras digitales	34
2.3.1. Parámetros ópticos	34
2.3.2. Sensores de imagen	39
2.4. Imágenes	40
2.4.1. Resolución	42
2.4.2. Procesamiento de imágenes	42
2.4.3. Segmentación de imágenes	44

2.4.4. Región	46
2.4.5. Análisis geométrico en imágenes	48
2.5. Estado del arte	54
3. Metodología	62
3.1. Microscopio digital	62
3.2. Condiciones experimentales	65
3.2.1. Iluminación	65
3.2.2. Distancia de referencia (Z)	66
3.2.3. Rango de distancia de los tornillos	69
3.2.4. Rango de magnificación	71
3.3. Calibración automática	71
3.3.1. Algoritmo de calibración automática	75
3.4. Adquisición de muestras	82
3.5. Algoritmo de medición automática del tornillo	84
3.5.1. Detección del tornillo	84
3.5.2. Medición del tornillo	87
3.6. Interfaz	94
3.6.1. Calibración automática en Osteocontrol	97
3.6.2. Medición automática en Osteocontrol	98
4. Resultados	100

4.1. Análisis de exactitud	103
4.1.1. Tornillo tipo A	103
4.1.2. Tornillo tipo B	104
4.2. Análisis de precisión	105
5. Conclusiones	108
6. Recomendaciones	109
Referencias Bibliográficas	109

Lista de Figuras

Figura 1.	Encuesta sobre la causa más frecuente de falla de implantes. Adaptado de Rodríguez et al. (2011).	20
Figura 2.	Vista radiográfica de la fractura de: (a) dos tornillos, (b) tres tornillos. Tomado de Gil and Larez (2013).	21
Figura 3.	Tipos de tornillos de osteosíntesis. Adaptado de Cognet et al. (2009).	28
Figura 4.	Diseño de cabeza y punta para tornillos HA. Tomado de ISO Central Secretary (1991).	29
Figura 5.	Diseño de rosca para tornillos HA. Tomado de ISO Central Secretary (1991).	29
Figura 6.	Diseño de cabeza y punta para tornillos HB. Tomado de ISO Central Secretary (1991).	31
Figura 7.	Diseño de rosca para tornillos HB. Tomado de ISO Central Secretary (1991).	32
Figura 8.	Tubería de detección de imágenes con las diversas fuentes de ruido y pasos de postprocesamiento digital. Adaptado de Szeliski (2010).	35
Figura 9.	Distancia focal f .	36
Figura 10.	Relación entre el número f y la apertura de diafragma d .	37

- Figura 11. Profundidad de campo y su relación con la apertura del diafragma. Adaptado de Diligent (2021). 38
- Figura 12. Campo de observación horizontal y vertical de una óptica con la distancia de trabajo. 39
- Figura 13. Representación de una imagen. Adaptado de Burger and Burge (2016). 41
- Figura 14. Etapas en el desarrollo de una aplicación basada en visión por computador. Tomado de De la Escalera (2001). 43
- Figura 15. (a) Región de una imagen binaria con (b) contorno interior y exterior. Adaptado de Gonzalez and Woods (2018). 47
- Figura 16. Ruta digital a lo largo de un contorno obtenida partir de punto inicial dado X_s . Además, un solo píxel aislado puede tener un contorno (abajo a la derecha). Tomado de Burger and Burge (2016). 47
- Figura 17. Representación geométrica del cuadro delimitador en una región. Adaptado de Burger and Burge (2016). 50
- Figura 18. Representación geométrica del cuadro delimitador alineado al eje mayor de una región con sus lados Rt_{max} y Rt_{min} . Adaptado de Burger and Burge (2016). 54
- Figura 19. Etapas generalizadas del análisis métrico bidimensional. 55
- Figura 20. Imágenes capturadas a partir de varios brillos de iluminación y fuentes de luz: (a) luz ambiental, (b) luz de microscopio digital (c) tira de LED de alto brillo y (d) tira de LED de bajo brillo. Tomado de Ramzi and Bakar (2018). 55

- Figura 21. Montaje del sistema de inspección para analizar: (a) el desgaste de una broca y (b) la germinación de una raíz. Adaptado de Ramzi and Bakar (2018); LeeHoonsoo et al. (2017). 56
- Figura 22. Dos muestras inspeccionadas: (a) imagen del riel y (b) imagen de la hoja de kiwi. Adaptado de Guerrieri et al. (2018); Zhang (2020). 58
- Figura 23. (a) Identificación del umbral a partir del histograma del canal B de la imagen binarizada y (b) método de procesamiento. Adaptado de Zhang (2020). 59
- Figura 24. (a) Contorno del riel en Guerrieri et al. (2018) y (b) patrón esqueletonizado para la confirmación de la superficie total. Adaptado de LeeHoonsoo et al. (2017). 61
- Figura 25. Posición de las medidas de largo y ancho para hojas de kiwis. Adaptado de Zhang (2020). 61
- Figura 26. Diagrama de la metodología utilizada. 63
- Figura 27. Microscopio Digital USB y sus partes. Adaptado de Dino-Lite (2021). 64
- Figura 28. Base LED de luz fría dimerizable. 65
- Figura 29. (a) Panel de la Base LED a 150 lúmenes e (b) imagen binarizada del patrón de luz generado por la base LED. 66
- Figura 30. (a) Botón de liberación rápida y (b) perilla de enfoque fino del soporte vertical RK-10. Tomado de Dino-Lite (2021). 67
- Figura 31. Definición de Z con punto de referencia en el espacio de trabajo. 68

- Figura 32. (a) Tornillo tipo A y (b) tornillo tipo B. 70
- Figura 33. Diseño del patrón de calibración. 72
- Figura 34. Desfase entre el tornillo y la hoja del patrón de calibración ΔZ_{base} . 73
- Figura 35. Imagen del patrón de calibración adquirida con el microscopio digital a una distancia $Z_{calib} = 11,83 \text{ cm}$. 74
- Figura 36. Obtención experimental del radio r_T del tornillo. 75
- Figura 37. Patrón de calibración IP , capturado a una distancia de calibración $Z_{calib} = 11,83 \text{ cm}$, en escala de grises con $D_{um} = 10 \text{ mm}$. 76
- Figura 38. Segmentación de la imagen con grupo de píxeles: (a) g_1 y (b) g_2 . 76
- Figura 39. Diagrama de flujo del algoritmo ISODATA. 78
- Figura 40. Imagen binaria del patrón de calibración IP_{bin} . 79
- Figura 41. (a) Recorrido de la región y (b) obtención del contorno IPC_R a partir del recorrido de la región. 79
- Figura 42. (a) Longitud IPF_{min} en rojo e IPF_{max} en azul y (b) equivalencia de IPF_{min} en escala píxeles D_{px} . 81
- Figura 43. (a) Muestra errónea y (b) muestra correcta, con sus respectivas imágenes binarizadas (c) y (d). 83
- Figura 44. (a) Región R_α segmentada con centroide \bar{X}_α y (b) región R_α contenida en la región binaria R . 85
- Figura 45. (a) Contorno del tornillo C_R delimitado en rojo e (b) imagen segmentada I_{seg} con el contorno C_R . 86

- Figura 46. Adyacencia de píxeles. Píxeles adyacentes en blanco y píxeles no adyacentes en azul. 87
- Figura 47. (a) Diámetros de Feret y (b) cuadro delimitador alineado al eje mayor obtenidos experimentalmente. 91
- Figura 48. (a) Ajuste del cuadro delimitador con puntos coordenados máximos y mínimos e (b) imagen recortada del tornillo I_{rec} . 92
- Figura 49. Diagrama de actividades para medición automática de tornillos. 95
- Figura 50. Interfaz gráfica de usuario desarrollada. 96
- Figura 51. Grilla implementada para una mejor adquisición de muestras con el microscopio. 97
- Figura 52. Calibrar sistema: (a) selección de opción de calibración, (b) ingreso de valores experimentales y (c) calibración del sistema con los valores de la tabla o perfil de calibración. 98
- Figura 53. Medición del tornillo utilizando Osteocontrol. 99
- Figura 54. Montaje del sistema de control propuesto. 100
- Figura 55. Perfiles binarizados del (a) tornillo tipo A y (b) tipo B con sus respectivos largo y ancho en color rojo. 101
- Figura 56. Toma de medida del (a) tornillo A y (b) tornillo B con calibrador pie de rey. 102
- Figura 57. Muestras de tornillos (a) tipo A y (b) tipo B en las cuatro posiciones establecidas a una distancia $Z = 1 \text{ cm}$. 103

Figura 58. Muestras de tornillo *A* en diferentes posiciones a una distancia $Z = 12 \text{ cm}$. 105

Figura 59. Precisión de medidas experimentales para F_{max} . 107

Figura 60. Precisión de medidas experimentales para F_{min} . 107

Lista de Tablas

Tabla 1.	Dimensiones de cabeza y punta para tornillos HA. Adaptado de ISO Central Secretary (1991).	30
Tabla 2.	Dimensiones de rosca para tornillos HA. Adaptado de (ISO Central Secretary, 1991).	30
Tabla 3.	Dimensiones de cabeza y punta para tornillos HB. Adaptado de ISO Central Secretary (1991).	31
Tabla 4.	Dimensiones de rosca para tornillos HB. Adaptado de ISO Central Secretary (1991).	32
Tabla 5.	Especificaciones ópticas del microscopio digital. Adaptado de Dino-Lite (2021).	64
Tabla 6.	Medidas experimentales del largo y ancho del tornillo a una distancia $Z = 12$ cm.	91
Tabla 7.	Funcionalidades de Osteocontrol. Íconos diseñados por PixelPerfect (2021).	96
Tabla 8.	Medidas teóricas tomadas con el calibrador pie de rey de los tornillos tipo A y tipo B.	102
Tabla 9.	Medidas obtenidas para el tornillo A variando la distancia de referencia Z.	104
Tabla 10.	Medidas obtenidas para el tornillo B variando la distancia de referencia Z.	104
Tabla 11.	Tabla de medidas del tornillo tipo A a una distancia $Z = 12$ cm.	106

Resumen

Título: Diseño y evaluación de un sistema de control para validación métrica bidimensional de tornillos metálicos utilizados en osteosíntesis *

Autores: Damar Nicolás Rojas Chacón - Iván Rodrigo Castillo Cañas **

Palabras Clave: Visión por computador, metrología óptica, sistema de control, osteosíntesis, descriptores de forma.

Descripción: La osteosíntesis es un tratamiento de intervención quirúrgica basado en la reducción y fijación de una fractura mediante implantes metálicos como tornillos y placas. Una deformación mínima en la superficie metálica de estos dispositivos puede provocar fatiga y rotura del metal en el sitio de la fractura. Por lo tanto, si el material instalado no aporta una calidad óptima en términos métricos, se pueden generar fallos en la implantación de la placa. Por tal razón, la inspección y el control de calidad en el proceso de fabricación son cruciales para reducir costos y fallas de implantación producidas por tornillos defectuosos. La visión por computador tiene como objetivo extraer características de una imagen para su posterior descripción e interpretación. En este trabajo de investigación se propone un sistema de control basado en técnicas ópticas y de visión por computador, cuyo objetivo es validar metrológicamente la calidad de las dimensiones de los tornillos. La metodología aplicada consta de las siguientes etapas: definición de las condiciones experimentales, montaje del sistema óptico-digital compuesto por microscopio digital USB y una base de iluminación LED, desarrollo de la GUI en ImageJ (open-source), y reporte de los resultados en una escala métrica. En los resultados, se comparó el largo y el ancho del tornillo obtenido con la interfaz y un calibrador como procedimiento de validación metrológica.

* Trabajo de grado

** Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería de Sistemas e Informática. Director: Andrés Leonardo González Gómez, MSc en Ingeniería de Sistemas e Informática. Codirector: Jaime Enrique Meneses Fonseca, PhD en Ciencias de la Ingeniería.

Abstract

Title: Design and evaluation of a control system for two-dimensional metric validation of metal screws used in osteosynthesis *

Author: Damar Nicolás Rojas Chacón - Iván Rodrigo Castillo Cañas **

Keywords: Computer vision, optical metrology, control system, osteosynthesis, shape descriptors.

Description: Osteosynthesis is a treatment of surgical intervention based on the reduction of a fracture and its fixation via metallic implants as screws and plates. A minimal deformation in the metallic surface of these gadgets can lead to metal fatigue and breakage at the fracture site. Hence, if the installed material does not provide an optimum quality in metrical terms, failures in the implantation of the plate can be generated. For that reason, inspection and quality control in manufacturing process are crucial to reduce costs and implantation failures produced by defective screws. Computer vision aims to extract characteristics of an image for later description and interpretation. In this research work a control system based on optical and computer vision techniques is proposed, which aims to validate metrologically the screws dimensions quality. The methodology applied consists of the following stages: definition of the experimental conditions, the assembly of the optical-digital system comprised of a USB digital microscope and a LED lighting base, development of the GUI in ImageJ (open-source), and report of the results in a metric scale. In the results, the length and width of the screw obtained with the interface and a caliper were compared as a metrological validation procedure.

* Bachelor Thesis

** Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería de Sistemas e Informática. Director: Andrés Leonardo González Gómez, MSc en Ingeniería de Sistemas e Informática. Codirector: Jaime Enrique Meneses Fonseca, PhD en Ciencias de la Ingeniería.

Introducción

La osteosíntesis es un tratamiento de intervención quirúrgica que se basa en la reducción de una fractura y su fijación mediante implantes metálicos como tornillos y placas (Ramos-Maza et al., 2016). En este tratamiento, los materiales utilizados son un posible factor incidente en casos de complicaciones debido a deformaciones en la superficie de la placa. Los tornillos se usan como medio de tracción para asegurar una mejor fijación y compresión entre dos fragmentos óseos. Una mínima deformación en la superficie metálica en estos dispositivos, podrían implicar que en el sitio de fractura, el metal se fatigue y se rompa; por lo tanto, si el material instalado no proporciona una calidad óptima del acabado superficial en términos métricos, se pueden generar fallos en la implantación de la placa (Gil and Larez, 2013; Rodríguez et al., 2011; Guerrero, 2009; Cognet et al., 2009).

En un proceso de producción, los productos defectuosos son un factor que incrementa costos (Render and Heizer, 2007). Por ende, es indispensable la inspección de la manufactura en relación con especificaciones establecidas en el momento de diseño, verificando el cumplimiento de estándares de calidad. Sin embargo, la incidencia humana en la actividad de inspección puede provocar errores que repercuten negativamente en la productividad de la empresa (Jiménez, 2016).

La metrología óptica es la rama de la óptica que permite tomar medidas de alta precisión mediante ondas de luz. En la metrología óptica, se aplican sistemas y métodos de no contacto mediante pruebas no destructivas (Malacara, 2007). Por otro lado, la visión por computador tiene como objetivo extraer características de una imagen para su posterior descripción e interpretación

por parte de un computador. Para la adquisición de la imagen se requiere de un dispositivo físico que sea sensible a una determinada banda del espectro electromagnético (Szeliski, 2010). El dispositivo de captura se puede complementar con otros elementos computacionales para diseñar un sistema de visión. Existen sistemas de visión que poseen facultades de control no invasivo en la inspección de calidad de procesos de producción que permiten disminuir los errores en la elaboración del producto, reducir los gastos en costos por fallas de fabricación y optimizar los tiempos del control (Ramzi and Bakar, 2018; Xiao and Gao, 2017; Samae et al., 2020).

Por tal razón, se plantea un sistema de control basado en técnicas de óptica y visión por computador con el objetivo de optimizar la inspección de calidad métrica de tornillos utilizados en osteosíntesis. De esta manera, se pretende minimizar los errores en la elaboración del producto, reducir los gastos en costos por fallas de fabricación, optimizar los tiempos del control y disminuir la incertidumbre de una implantación frustrada en el tratamiento de osteosíntesis.

La metodología aplicada consta de las siguientes etapas: definición de condiciones experimentales, montaje de sistema de inspección óptico-digital, diseño y desarrollo de la GUI en ImageJ (open-source) y reporte de resultados en escala métrica. A partir de experimentaciones basadas en el proceso metodológico propuesto, se concluye que el sistema de control posee una alta precisión y exactitud respecto a otros sistemas de medida como el calibrador pie de rey.

1. Sobre este trabajo de investigación

1.1. Planteamiento del problema

El objetivo principal de la osteosíntesis es lograr funcionalidad de las extremidades, utilizando varios tipos de implantes para la reconstrucción del sistema óseo humano. Este proceso consta de las etapas de exposición de la lesión, reducción y acoplamiento temporal, y fijación definitiva de la fractura. Una técnica destacada por los cirujanos desde hace décadas es la osteosíntesis con implantes de placas y tornillos (Ramos-Maza et al., 2016).

Los tornillos son la herramienta básica para la fijación de fragmentos óseos. Estos elementos, en conjunto con las placas, son de tipo de fijación interna empleados para dar estabilidad en la fractura mientras las fisuras en los huesos sanan. Los implantes tienen tres características importantes que son rigidez, elasticidad y plasticidad. La rigidez permite que los implantes resistan una carga sin sufrir una deformación, la elasticidad es la capacidad del implante de sufrir una deformación y regresar a su estado inicial. Estas dos características dependen del diseño y el material con el cual se fabrican los implantes; por ejemplo, un implante de acero es más rígido y menos elástico que los de titanio. Por otro lado, la plasticidad es la capacidad que posee un implante para deformarse permanentemente sin romperse (Cognet et al., 2009).

Los tornillos utilizados en osteosíntesis son clasificados a partir de tipos de cabezas y roscas o por la forma de uso, diseño, dimensiones de su diámetro, área de aplicación, características, función o mecanismo (Rodríguez et al., 2011). Las dimensiones de diseño sugeridas por estándares de calidad, se requieren sean de alta precisión métrica, ya que las medidas de las partes pueden

rondar entre 2 mm y 10 mm dependiendo del tipo de tornillo (ISO Central Secretary, 1991, 1989).

En un estudio elaborado por Rodríguez et al. (2011), se llevó a cabo una encuesta sobre las causas más frecuentes de fallas de implantes realizada a 60 médicos de los servicios de Ortopedia y Traumatología en diferentes hospitales de Venezuela, el 30% (ver fig. 1) respondieron que estas se deben a defectos propios del material.

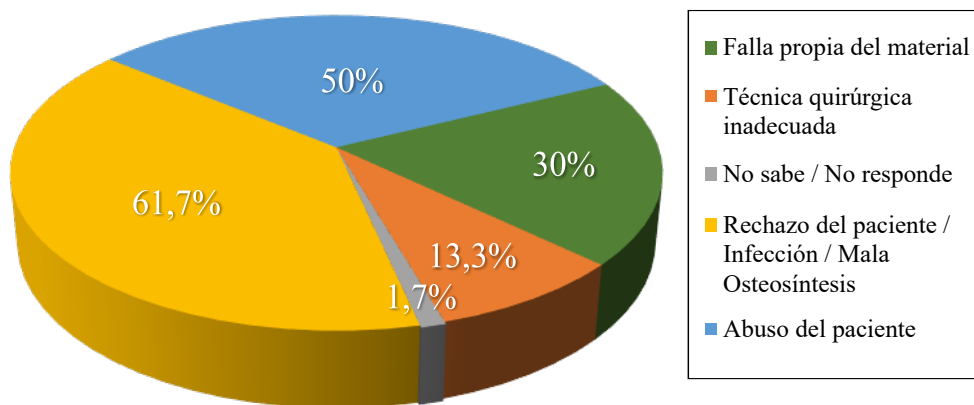


Figura 1. Encuesta sobre la causa más frecuente de falla de implantes. Adaptado de Rodríguez et al. (2011).

Los casos de fallas en implantaciones de placas, en los cuales están involucrados directamente los tornillos, se pueden asociar a un error técnico al momento de reducir la fractura durante la intervención quirúrgica. Además, las fuerzas ejercidas por los huesos sobre la superficie de estos (ver fig. 2), provocan deformaciones permanentes y posibles fracturas en el material (Rodríguez et al., 2011; Barrena and Ampuero, 2019).

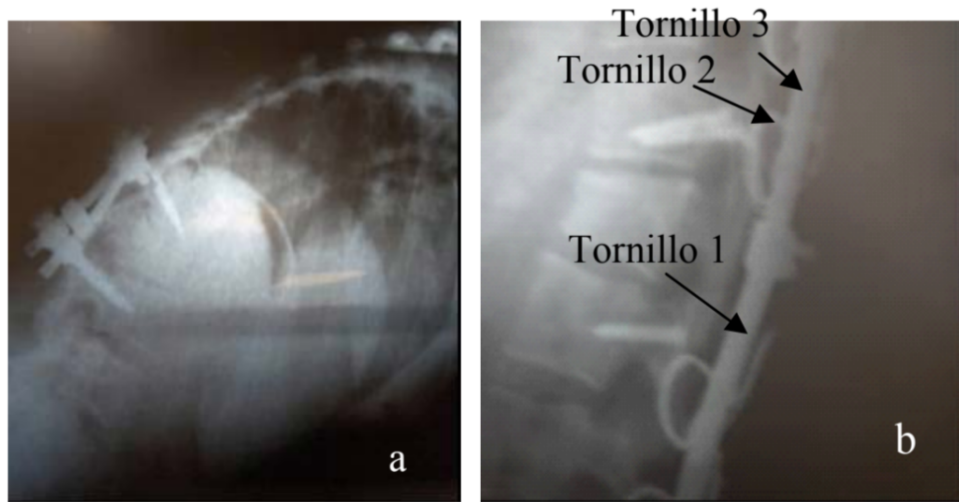


Figura 2. Vista radiográfica de la fractura de: (a) dos tornillos, (b) tres tornillos. Tomado de Gil and Larez (2013).

En un proceso de producción existen dos tipos de costos: los costos de calidad y los costos por mala calidad. Los errores presentados en los requerimientos de fabricación de un producto o servicio pueden ser traducidos como costos de calidad. Los costos por mala calidad son todos aquellos errores que nacen como consecuencia de intentar satisfacer de manera errónea al cliente (Jiménez, 2016). El costo de la mala calidad puede representar en las industrias una estimación mayor al 20% de las ventas netas (Gryna et al., 2007).

Por tal razón, la fabricación de tornillos requieren un estricto cumplimiento de estándares de calidad desarrollados por fabricantes y técnicos expertos en el campo de dispositivos médicos metálicos, ya que estos se pueden producir con defectos dimensionales en términos métricos. La inspección de calidad, al ser uno de los factores incidentes en las buenas prácticas de manufactura, garantiza que los tornillos se ajusten a los requisitos de la industria, el médico y el paciente, y que los costos de mala calidad en el proceso se reduzcan (Render and Heizer, 2007; Kashi and Saha,

2020).

Actualmente, PRECIMEC S.A.S, una empresa local que fabrica implantes para osteosíntesis, realiza inspecciones visuales en un software privativo con imágenes adquiridas por un microscopio calibrado en milímetros. El proceso de medición se basa en trazar segmentos de manera manual sobre la región del objeto en la imagen, utilizando una herramienta gráfica de MATLAB. Este proceso conlleva a mayores costos económicos debido a la licencia del software, mayor tiempo en el proceso de control de calidad y una menor precisión en las medidas métricas. Por lo tanto, se requiere optimizar el proceso de inspección visual con el objetivo de cumplir con las necesidades de la empresa respecto a las problemáticas existentes en el proceso de medición de tornillos utilizados en osteosíntesis.

1.2. Justificación

Las inspecciones visuales en un sistema de producción detectan defectos superficiales del producto, asegurando que este se produzca con el nivel de calidad esperado. Desde la visión por computador, el control de calidad puede ser más eficiente en costos de calidad mediante técnicas automatizadas de procesamiento de imágenes bidimensionales, ya que el proceso no depende en su totalidad de la capacidad sensorial humana (Herrera J.C. and Gualdrón, 2016; Herrera-Baquero and Prieto-Ortiz, 2018).

Teniendo en cuenta que, los tornillos metálicos son el resultado de un proceso de manufactura, y que la detección temprana de fallas milimétricas en el acabado del material es crucial debido al problema expuesto, se formula la siguiente pregunta de investigación: ¿cómo optimizar el proceso de control de calidad de los tornillos usados en osteosíntesis, en términos de precisión

métrica?

Hipótesis: es posible optimizar los procesos de inspección de calidad con el uso de técnicas automatizadas de visión por computador y óptica, diseñando un sistema de control, compuesto por un microscopio digital USB y una interfaz gráfica de usuario GUI en ImageJ (Open Source), que garantice la similitud entre el diseño inicial y el producto fabricado, y el cumplimiento de estándares de calidad en términos métricos.

De esta manera, se busca reducir la incertidumbre de fallas técnicas por parte del cirujano y posteriores fracturas del material implantado debido al desgaste superficial del tornillo provocado por errores de dimensiones métricas en la etapa de fabricación. Además, es posible disminuir el sesgo en mediciones manuales ejecutadas por operarios durante el proceso de inspección, evitando costos por mala calidad. Por otro lado, la transición de software privativo a software Open Source reduce costos de licencias de uso.

Finalmente, con el desarrollo de este trabajo de grado se aporta al campo de visión por computador aplicado en el control de calidad de procesos industriales, similares al de la empresa PRECIMEC S.A.S, cuya solución planteada se basa en una perspectiva conceptual e interdisciplinaria entre las ciencias de la computación y la óptica.

1.3. Objetivos

Objetivo general

Diseñar y evaluar un sistema de control que permita obtener información métrica de tornillos metálicos a partir de imágenes bidimensionales implementando técnicas ópticas y de visión por computador.

Objetivos específicos

- Determinar el campo de observación y la resolución requerida para obtener las dimensiones métricas de los tornillos utilizados en osteosíntesis.
- Dentro de las opciones comerciales, seleccionar el hardware apropiado para su adquisición y reconocimiento.
- Programar una interfaz de usuario, utilizando herramientas “open source”, que incorpore los algoritmos computacionales necesarios para obtener información métrica de los tornillos metálicos terminados, y su posterior comparación con las dimensiones del diseño.
- Validación metrológica de los resultados obtenidos, comparándolos con los que se pueden obtener usando otros sistemas de medida.

1.4. Estructura del documento

A partir del planteamiento y justificación del problema, se plantean los objetivos (capítulo 1.3). Luego, en el marco de referencia (capítulo 2) se presentan algunos conceptos necesarios para el desarrollo del proyecto, los cuales están relacionados a los campos de metrología óptica y visión por computador.

Las condiciones experimentales necesarias para el diseño del sistema del control se plantean en metodología (capítulo 3). A partir de esta sección, se define el apartado de resultados (capítulo 4) con dos tipos de análisis que permite validar métricamente el sistema de control con muestras de tornillos utilizados en osteosíntesis.

Por último, se encuentran las conclusiones (capítulo 5) y recomendaciones (capítulo 6) en base a la experimentación realizada en el trabajo de investigación.

2. Marco de referencia

2.1. Calidad

La calidad, según la norma ISO 9000:2015, se define como el grado con el que un conjunto de características inherentes cumple los requisitos mediante conceptos y principios fundamentales en la gestión de calidad en organizaciones (ISO Central Secretary, 2015). Por otro lado, Render et al. (2006) afirma que: “La calidad de un producto o servicio es el grado en el cual el producto o servicio cumple las especificaciones”.

Respecto al control de calidad, este aplica técnicas y actividades para lograr, mantener y mejorar la calidad de un producto o servicio (Besterfield, 2009):

1. Especificaciones.
2. Diseño del producto o servicio para cumplir las especificaciones.
3. Producción o instalación.
4. Inspección para verificar las especificaciones.
5. Un exámen para la obtención de información que permita modificar las especificaciones si es necesario.

2.1.1. Tipos de tornillos en osteosíntesis. Los tornillos empleados son clasificados a partir de tipos de cabezas y roscas o por la forma de uso, diseño, dimensiones de su diámetro, área

de aplicación, características, función o mecanismo. En general, algunos tipos de tornillos son (ver fig. 3) (Cognet et al., 2009):

- Tornillos de cortical.
- Tornillo de esponjosa.
- Tornillos canulados o perforados.
- Tornillos que permiten su colocación infraarticular.
 - Tornillo de doble rosca tipo Herbert.
 - Tornillos cónicos.
 - Tornillos de compresión sin cabeza.
- Tornillos de cabeza bloqueada u otros tipos de tornillos bloqueados.
- Rosca corta o rosca larga.

En cuanto a los tipos de cabezas en los tornillos, lo más usados son:

- Cruciforme.
- Hexagonal.
- En estrella o strardrive.

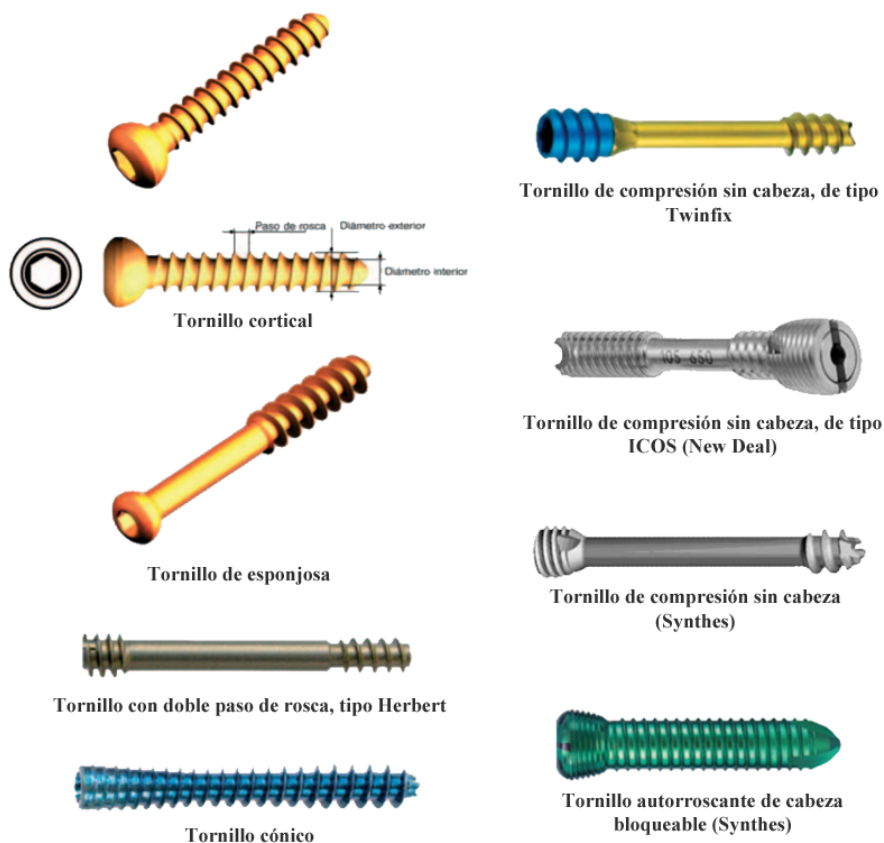


Figura 3. Tipos de tornillos de osteosíntesis. Adaptado de Cognet et al. (2009).

Los estándares ISO proporcionan guías de aceptación universal. La ISO 5835 contienen normas técnicas para el diseño de cabeza, punta y rosca de tornillos metálicos utilizados en la osteosíntesis (Render and Heizer, 2007; ISO Central Secretary, 1991). En esta norma se mencionan dos tipos de tornillos codificados como HA y HB donde todas las dimensiones y tolerancias se dan en milímetros. Los HA son tornillos corticales con un diseño basado en rosca poco profunda a partir de un diseño con dimensiones para la cabeza, punta (ver fig. 4 y tabla 1) y rosca (ver fig. 5 y tabla 2). Los HB son tornillos esponjosos con diseño de rosca profunda a partir de medidas para la cabeza, punta (ver fig. 6 y tabla 3) y rosca (ver fig. 7 y tabla 4). Las características de estos tornillos

son las siguientes (ISO Central Secretary, 1991):

■ **Tornillos corticales (HA)**

- Diámetro del cabezal entre 3 mm y 8 mm.
- Diámetro de la punta entre 1,5 mm y 5 mm.
- Distancia de profundidad de rosca entre 0,5 mm y 1,75 mm.

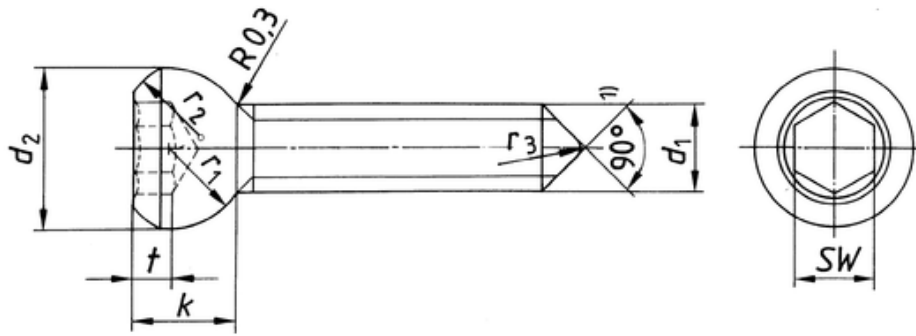


Figura 4. Diseño de cabeza y punta para tornillos HA. Tomado de ISO Central Secretary (1991).

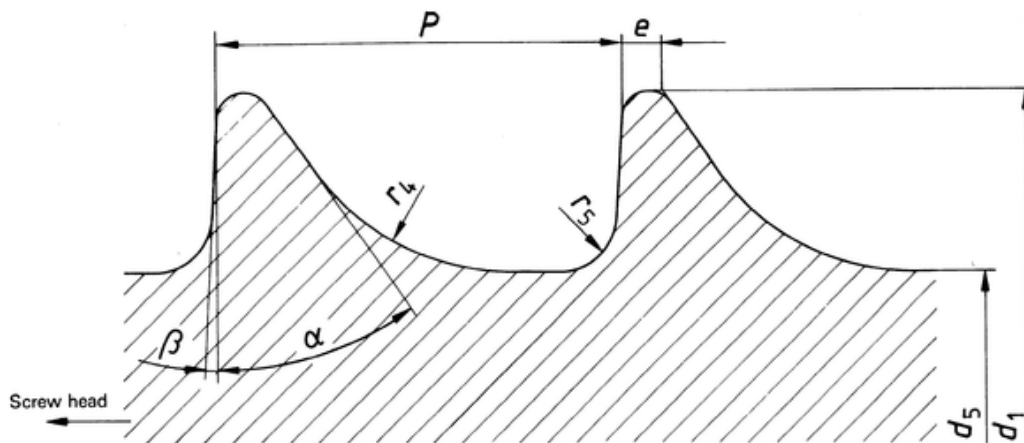


Figura 5. Diseño de rosca para tornillos HA. Tomado de ISO Central Secretary (1991).

Tabla 1

Dimensiones de cabeza y punta para tornillos HA. Adaptado de ISO Central Secretary (1991).

Código y diámetro de la rosca	Diámetro nominal		d_2	k	r_1	r_2	r_3	SW	t
	d_1		tol.	\simeq	$+0,25$ 0	\simeq	\simeq	$F10^{1)}$	min.
HA 1,5	1,5	3	0	1,6	1,5	1,5	0,3	1,5	0,8
HA 2,0	2	4	-0,10	1,9	2	2	0,4	1,5	1,0
HA 2,7	2,7	5	$\frac{0}{-0,15}$	2,3	2,5	2,5	0,4	2,5	1,2
HA 3,5	3,5	6		2,6	3	2,5	1	2,5	1,5
HA 4	4	6		2,4	3	2,5	1	2,5	1,5
HA 4,5	4,5	8		4,6	4	2,5	1	3,5	2,8
HA 5	5	8		4,6	4	2,5	1	3,5	2,8

$$1)F10 = \begin{cases} +0,047 \\ +0,007 \end{cases} \text{ for } SW \leq 3 \text{ mm}$$

$$F10 = \begin{cases} +0,058 \\ +0,010 \end{cases} \text{ for } SW > 3 \text{ mm}$$

Tabla 2

Dimensiones de rosca para tornillos HA. Adaptado de (ISO Central Secretary, 1991).

Código y diámetro de la rosca	d_1	d_5	e	P	r_4	r_5	α	β
	0 -0,15	tol.	\simeq		\simeq	\simeq	\simeq	\simeq
HA 1,5	1,5	1,1	0	0,1	0,5	0,3	0,1	35° 3°
HA 2,0	2	1,3	-0,10	0,1	0,6	0,4	0,1	35° 3°
HA 2,7	2,7	1,9	$\frac{0}{-0,15}$	0,1	1	0,6	0,2	35° 3°
HA 3,5	3,5	2,4		0,1	1,25	0,8	0,2	35° 3°
HA 4	4	2,9		0,1	1,5 ¹⁾²⁾	0,8	0,2	35° 3°
HA 4,5	4,5	3		0,1	1,75	1	0,3	35° 3°
HA 5	5	3,5		0,1	1,75	1	0,3	35° 3°

■ **Tornillos esponjosos (HB)**

- Diámetro del cabezal entre entre 6 mm y 8 mm.
- Diámetro de la punta entre 4 mm y 6,5 mm.
- Distancia de profundidad de rosca entre 1,75 mm y 2,75 mm.

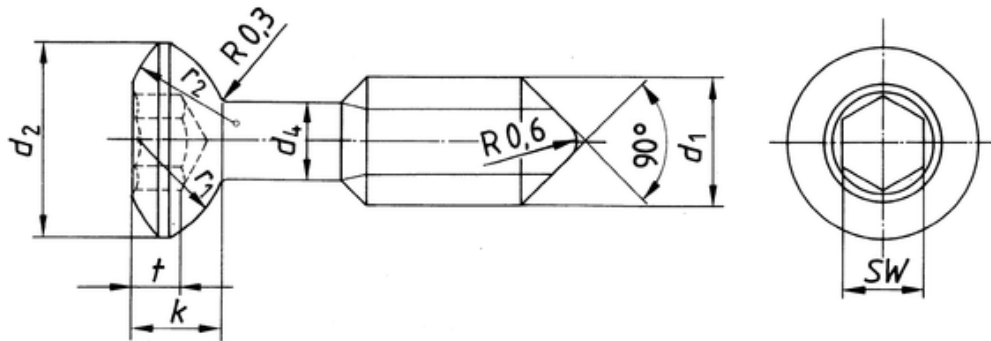


Figura 6. Diseño de cabeza y punta para tornillos HB. Tomado de ISO Central Secretary (1991).

Tabla 3

Dimensiones de cabeza y punta para tornillos HB. Adaptado de ISO Central Secretary (1991).

Código y diámetro de la rosca	Diámetro nominal	d ₂	d ₄	k	r ₁	r ₂	SW	t
	d ₁	0 -0,15	0 -0,15	≈	+0,25 0	≈	F10 ¹⁾	min.
HB 4	4	6	2,4	2,9	3	2,5	2,5	1,5
HB 6,5	6,5	8	4,5	4,6	4	2,5	3,5	2,8

$1) F10 = \begin{cases} +0,047 \\ +0,007 \end{cases} \text{ for } SW \leq 3 \text{ mm}$
 $F10 = \begin{cases} +0,058 \\ +0,010 \end{cases} \text{ for } SW > 3 \text{ mm}$

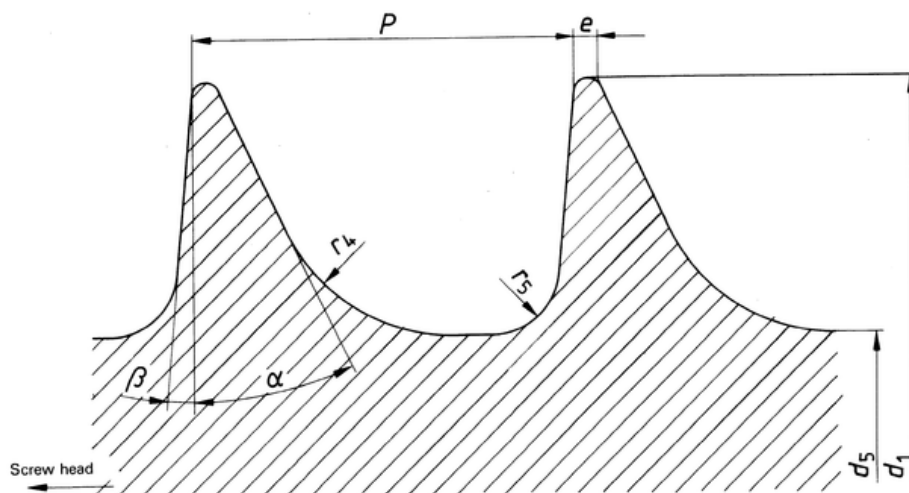


Figura 7. Diseño de rosca para tornillos HB. Tomado de ISO Central Secretary (1991).

Tabla 4

Dimensiones de rosca para tornillos HB. Adaptado de ISO Central Secretary (1991).

Código y diámetro de la rosca	d_1	d_5	e	P	r_4	r_5	α	β
	0	0	\approx		\approx	\approx	\approx	\approx
HB 4	4	1,9	0,1	$1,75^{1)2)}$	0,8	0,3	25°	5°
HB 6,5	6,5	3	0,2	2,75	1,2	0,8	25°	5°

Para los tornillos HA pueden haber variaciones con ciertas restricciones; por ejemplo, que los radios de la parte inferior de la cabeza y el perfil de la rosca no se puedan modificar, ya que son críticos desde el punto de vista quirúrgico y tienen relación directa con placas y otros instrumentos quirúrgicos como las llaves hexagonales y machos para perforar; en cambio, los tornillos HB con respecto a los HA, poseen una rosca más profunda. Finalmente, en la ISO 6475 se estandarizan las propiedades mecánicas requeridas para los tornillos citados anteriormente (Render and Heizer, 2007; ISO Central Secretary, 1989).

2.2. Metrología óptica

La metrología óptica tiene como propósito efectuar medidas de muy alta precisión mediante métodos ópticos. La metrología es una actividad en la que se cuantifica una variable física para diferenciar un sistema de otro o para analizar el mismo sistema bajo diferentes circunstancias. Una vez se define la unidad de medida fundamental, se pueden obtener varias unidades derivadas de esta. Para poder hacer una comparación de medidas, se debe establecer un estándar y debe ser accesible e invariable. El sistema de unidades generalmente aceptado es el Sistema Internacional (SI) (OSA, 1994).

La precisión es un término utilizado para definir la repetibilidad de las mediciones de un instrumento. En las mediciones, se debe desarrollar un método para la adquisición y análisis de datos. El proceso de medición está sujeto a errores sistemáticos o estocásticos:

- Los errores sistemáticos son los errores que permanecen constantes en todas las mediciones realizadas y pueden producirse por un defecto del instrumento, diseño del método de medición o ejecución de medidas por parte del operador. La precisión es una medida que depende de la cantidad de errores sistemáticos y se puede mejorar mediante un seguimiento adecuado a un estándar establecido en el método de medición.
- los errores estocásticos son causados por el ruido aleatorio del entorno que afectan al sistema de medición. Estos errores pueden ser reducidos al tomar varias medidas y promediándolas.

Por lo tanto, se infiere que un sistema es preciso cuando la magnitud de los errores sistemáticos y estocásticos es bajo. (OSA, 1994).

2.3. Cámaras digitales

Dentro de un sistema de visión, la cámara digital es el elemento que permite recoger información por medio de los rayos de luz reflejados por uno o más objetos en una escena de trabajo. Una vez que estos rayos alcanzan la cámara, por medio de la óptica y el sensor del dispositivo, transforma la luz en imágenes digitales. La cámara es aplicada en visión por computador para percibir objetos en el entorno y obtener información en forma de imagen. Algunas de las aplicaciones son: fotogrametría, rectificación métrica, reconstrucción 3D, estimación de movimiento, entre otras (Szeliski, 2010; Gonzalez and Woods, 2018).

La conversión de fotones que llegan al sensor de la cámara, a través de la óptica, en valores digitales (R, G, B) consta de un proceso definido (ver fig. 8), donde se establece una versión simple de las etapas de procesamiento que ocurren en las cámaras digitales en la actualidad (Szeliski, 2010).

2.3.1. Parámetros ópticos. Uno de los elementos más importantes dentro de una cámara digital es la óptica. Esta se componen de un juego de lentes que sobresalen de la cámara cuya función principal es captar los rayos de luz para después concentrarlos sobre el elemento sensible de la cámara, provocando como resultado final una imagen (De la Escalera, 2001).

Se han definido ciertos parámetros importantes a la hora de escoger la óptica. Algunos de ellos suelen venir impresos en la carcasa de la cámara, como es el caso de la distancia focal y el número F . Además, existen algunos otros de los cuales va a depender enormemente la calidad de la imagen tomada como es el caso de la luminosidad y su rango de enfoque. A continuación se

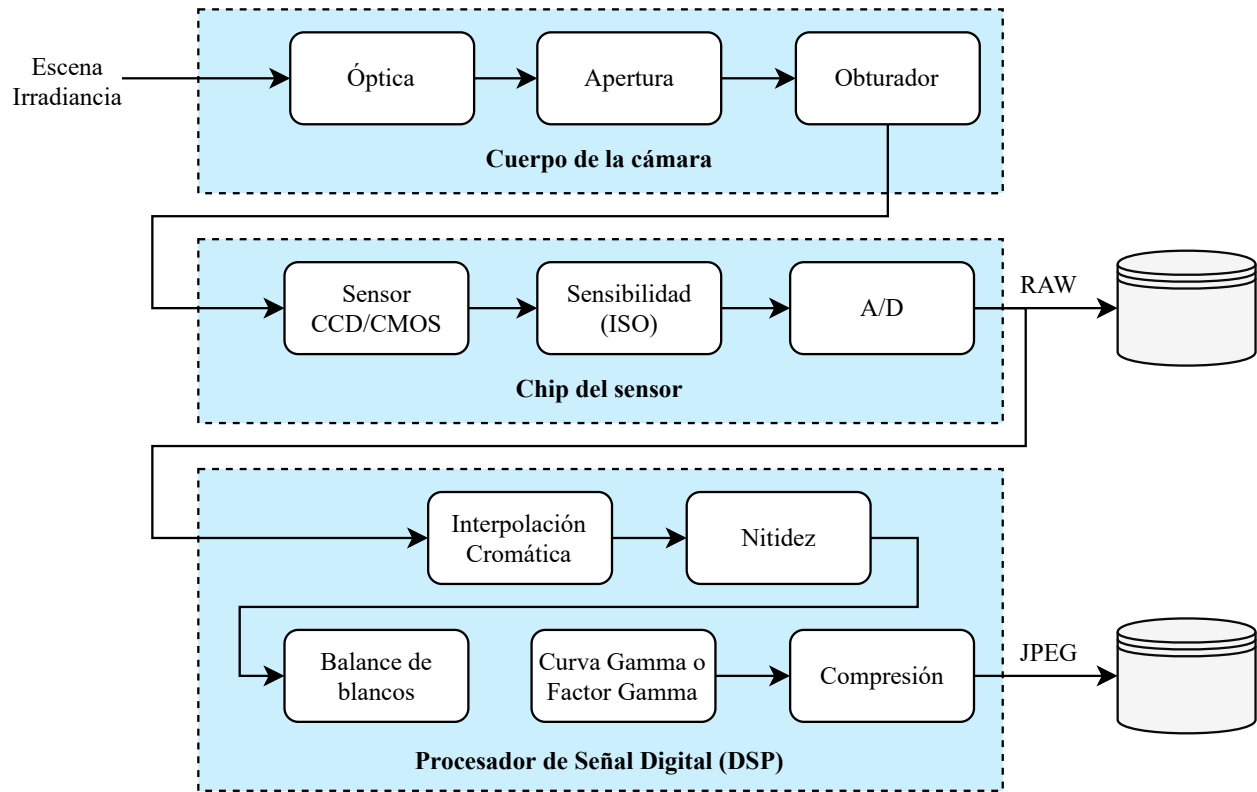


Figura 8. Tubería de detección de imágenes con las diversas fuentes de ruido y pasos de postprocesamiento digital. Adaptado de Szeliski (2010).

describen algunos de los parámetros ópticos más importantes (De la Escalera, 2001):

- Distancia focal.** Cuando los rayos paralelos pasan a través de una lente convexa, convergen hacia un punto denominado foco o punto focal. La distancia entre el centro óptico de la lente y el punto focal se llama distancia focal (ver fig. 9). Este parámetro es el principal a la hora de calcular la posición y el tamaño de los objetos en la imagen. También, la distancia focal está relacionada con la cantidad de luz refractada por la lente. Este es el factor de potencia D , cuyo valor es la inversa de la distancia focal y su unidad de medida es la dioptría (De la Escalera, 2001).

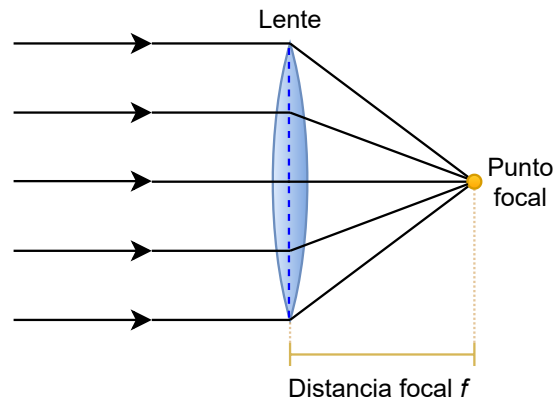


Figura 9. Distancia focal f .

Existen dos tipos de óptica según la distancia focal: las ópticas de distancia focal fija y las de distancia focal variable o de tipo zoom. En el caso de las ópticas de distancia focal fija poseen un tamaño más pequeño debido a que están construidas con un menor número de elementos; por consiguiente, son más luminosas desde el punto de vista de calidad de la imagen y tienen menos aberraciones geométricas y cromáticas.

Las ópticas de tipo zoom ofrecen varias distancias focales dentro de un rango establecido y suelen ser demasiado versátiles, ya que diferentes distancias focales se consiguen mediante el movimiento de los elementos ópticos de la carcasa de la cámara. La desventaja de este tipo de ópticas es que son construidas con una mayor cantidad de elementos ópticos, produciendo una mayor probabilidad de aparición de aberraciones y pérdida de luz (De la Escalera, 2001).

- **El número F.** Este parámetro indica la relación entre la distancia focal y la apertura máxima

del diafragma. Se obtiene la ecuación (1) partir del cociente entre ellos:

$$F = \frac{f}{d}. \quad (1)$$

En la ecuación anterior se observa una relación inversa entre el número F y la apertura máxima del diafragma. Por lo tanto, a menor número F , un mayor diámetro y cantidad de luminosidad que pasa por la óptica donde el nivel luminosidad puede ser regulado a través de un anillo presente en la montura de la óptica. En la figura 10 se observa el rango establecido para el diámetro d del diafragma, según un número F determinado (De la Escalera, 2001).

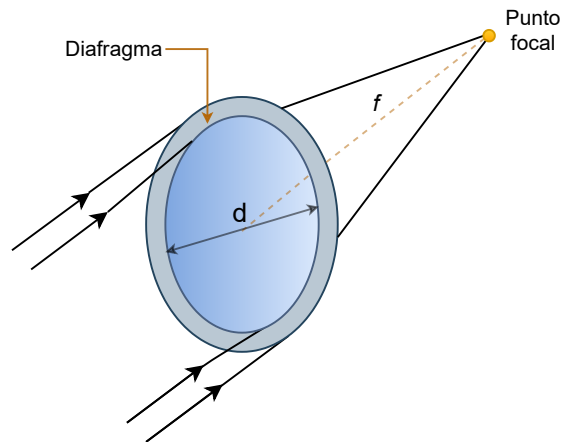


Figura 10. Relación entre el número f y la apertura de diafragma d .

- **Profundidad de campo.** Es el espacio de la imagen donde todos los objetos presentes en la escena se encuentran nítidos y enfocados. Esta zona se encuentra dentro de la profundidad de enfoque, que es la zona por delante y por detrás del plano de la imagen. Si un objeto en la escena se ubica fuera de la zona de enfoque en un margen de distancia mínimo, el

desenfoque llega a ser indetectable y la imagen aparecerá nítida; este efecto está determinado por el elemento sensible de la cámara, definiendo el círculo de confusión permisible.

Una profundidad de campo pequeña se controla por varios elementos como la apertura del diafragma y la distancia focal. La apertura del diafragma es más importante, ya que a mayor apertura, menor profundidad de campo como se muestra en la figura 11. Por otro lado, en una profundidad de campo grande la distancia focal es la más importante.

La profundidad de campo es afectada por cuatro factores: la distancia de enfoque, el tamaño del sensor, la distancia focal y la apertura del diafragma (De la Escalera, 2001).

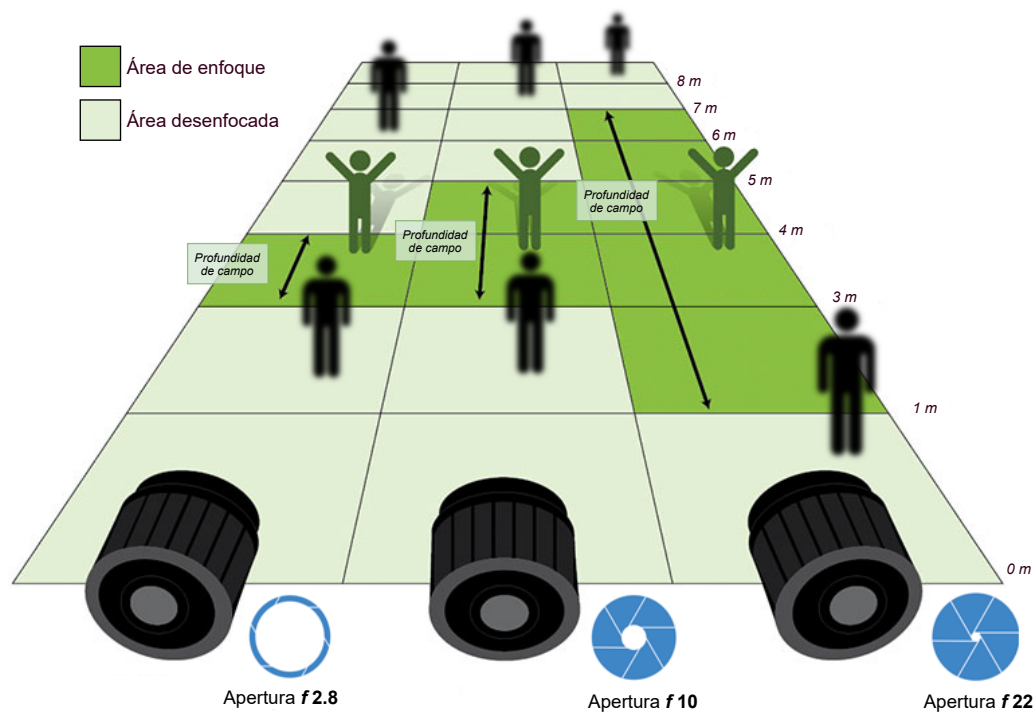


Figura 11. Profundidad de campo y su relación con la apertura del diafragma. Adaptado de Diligent (2021).

- **Campo de observación.** Está determinado por los rayos de luz que inciden sobre los extremos de la zona sensible de la imagen, es decir, el campo de observación hace referencia a las dimensiones del área captada por la óptica como se muestra en la figura 12. Esta depende del tamaño del sensor, así como también de la distancia focal utilizada.

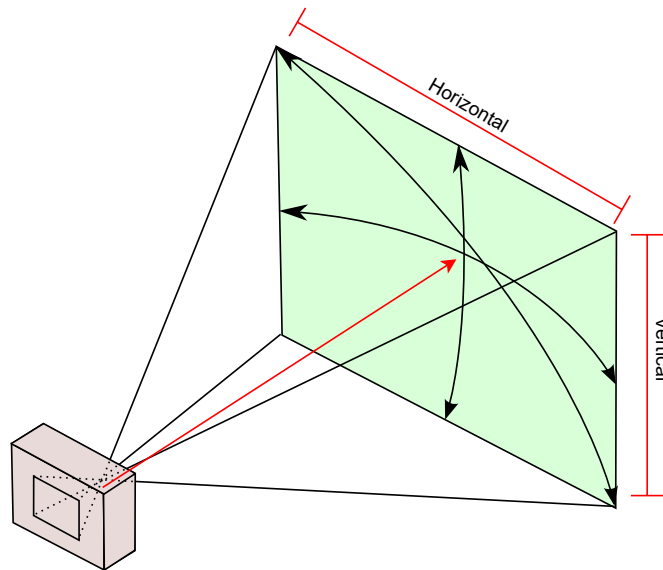


Figura 12. Campo de observación horizontal y vertical de una óptica con la distancia de trabajo.

2.3.2. Sensores de imagen. Es el componente de una cámara digital que se encarga de percibir la información de la escena en forma de rayos de luz y transmitirla al computador como una señal del tipo analógica o digital. Estos rayos son captados por un área de detección activa, la cual es integrada durante la duración de la exposición, para después pasar a un conjunto de amplificadores sensoriales (De la Escalera, 2001).

Existen dos tipos de sensores que se utilizan actualmente en las cámaras digitales: CCD (Charge Coupled Device) y CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor). Ambos tipos

de sensores están formados por semiconductores de metal-óxido (MOS) y están distribuidos en forma de matriz (Szeliski, 2010).

Los sensores CCD son circuitos integrados de silicio cuyo propósito principal es la de funcionar como transductores de imagen. Debido a su tamaño reducido y de bajo consumo de potencia es posible conseguir disminuir drásticamente el tamaño y volumen de las cámaras (De la Escalera, 2001).

Por otra parte, la tecnología CMOS permite acceder a cada píxel de forma independiente sin necesidad de transferir toda la imagen, aumentando la velocidad de los algoritmos una vez detectada la zona de interés de la imagen. Además, exige una menor fuente de alimentación y presentan inmunidad a la influencia de altas radiaciones, ya que el efecto blooming no se presenta en este tipo de tecnología (De la Escalera, 2001).

2.4. Imágenes

Una imagen puede interpretarse como una función bidimensional $f(x,y)$ cuya amplitud es la intensidad de la luz en cada punto dentro de un espacio de coordenadas (x,y) determinado por la resolución de la imagen. El valor de $f(x,y)$ depende de dos funciones que componen la escena captada por una cámara digital: la cantidad de luz que incide sobre la escena vista $i(x,y)$ y los rayos de luz reflejados y/o dispersados por los objetos $r(x,y)$ (ver fig. 13). El producto de ambas funciones proporciona la función $f(x,y)$ como se muestra en la ecuación (2):

$$f(x,y) = i(x,y)r(x,y), \quad (2)$$

donde el intervalo de definición está dado por las ecuaciones (3) y (4):

$$0 < i(x,y) < \infty, \quad (3)$$

$$0 < r(x,y) < 1, \quad (4)$$

de este modo $f(x,y)$ estará acotada por el intervalo que se presenta en la ecuación (5):

$$0 < f(x,y) < \infty. \quad (5)$$

La iluminación es determinada por la fuente de luz y las características del objeto captado producen la naturaleza de la reflexión y/o dispersión.

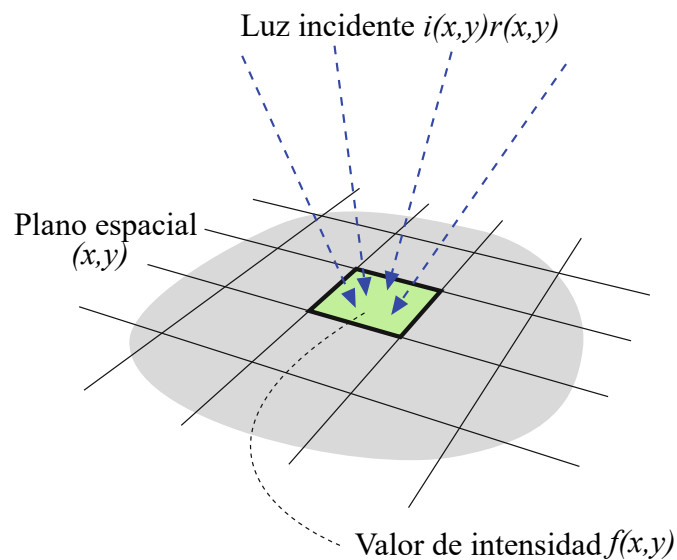


Figura 13. Representación de una imagen. Adaptado de Burger and Burge (2016).

Un imagen digital puede ser almacenada en un formato de archivo que se compone de un encabezado, el cual es seguido de varios píxeles. La información de la imagen como resolución horizontal, vertical y definición de píxeles depende del formato del archivo (Szeliski, 2010).

2.4.1. Resolución. En una imagen, el tamaño está determinado por el número de columnas M y el número de filas N de la matriz de intensidad que corresponde a la imagen. Estas definen el ancho y alto de la imagen.

La resolución de una imagen especifica las dimensiones espaciales de la imagen en el mundo real y pueden darse en puntos por pulgada (dpi), líneas por pulgada (lpi) o incluso en píxeles por kilómetro para imágenes satélites. Además, la resolución espacial presenta una gran importancia al momento de medir distancias o dibujar figuras geométricas dentro de una imagen. Mantener una resolución espacial precisa influirá en el valor de las medidas haciéndolas mas cercanas a los valores reales (Burger and Burge, 2016).

2.4.2. Procesamiento de imágenes. El procesamiento de imágenes es un conjunto de técnicas que consisten en la aplicación de algoritmos que modifican o transforman una imagen en otra. Un sistema de procesamiento de imágenes se puede representar por la ecuación (6):

$$g(x,y) = T[f(x,y)], \quad (6)$$

siendo $f(x,y)$ la imagen original, $g(x,y)$ la imagen resultante y T la transformación (De la Escalera, 2001).

En la figura 14 se muestran las etapas involucradas para el desarrollo de una aplicación

basada en visión por computador.

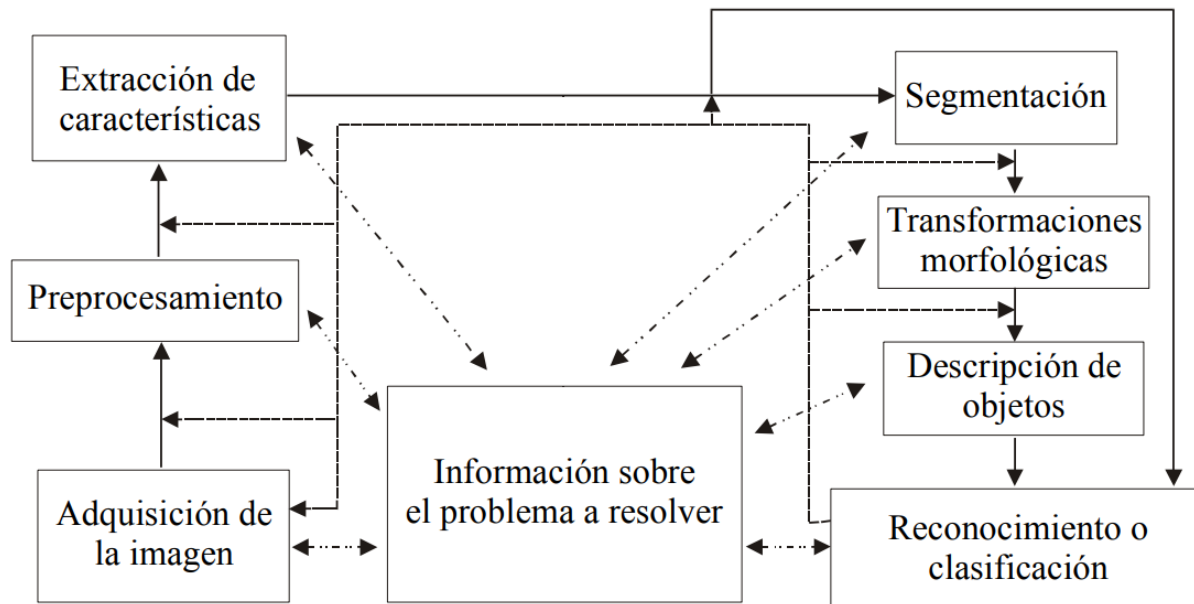


Figura 14. Etapas en el desarrollo de una aplicación basada en visión por computador. Tomado de De la Escalera (2001).

En el procesamiento de imágenes se busca resaltar cierta información de interés y/o atenuar o eliminar información que sea irrelevante para la aplicación. Esta disciplina ha sido de gran impacto en diferentes áreas tales como la medicina, telecomunicaciones, control de procesos industriales e incluso al entretenimiento (Gonzalez and Woods, 2018).

Algunas de las tareas que comprende el procesamiento de imágenes es la supresión de ruido, mejoramiento de contraste e incluso la eliminación de efectos que no son deseados en la captura de la imagen como, por ejemplo: difuminaciones o distorsiones por efectos ópticos, de movimientos, mapeos geométricos, transformación de color, etc (Gonzalez and Woods, 2018).

Se puede definir la visión artificial como un conjunto de actividades cuyo fin es obtener,

caracterizar e interpretar la información de una imagen tomada de un mundo tridimensional. Este conjunto de actividades está dividido en cinco áreas principales De la Escalera (2001):

- **Adquisición:** proceso mediante el cual es posible obtener una imagen que representa la escena de trabajo.
- **Procesado:** permite el uso de técnicas cuyo fin es reducir el ruido y realzar detalles.
- **Segmentación:** permite dividir la imagen en las zonas u objetos de interés.
- **Representación y descripción:** por este medio es posible obtener las características de un objeto para diferenciarlo de otro, como, por ejemplo: el tamaño, perímetro, etc.
- **Reconocimiento e interpretación:** en esta etapa, es posible identificar los objetos presentes en la escena y la interpretación le asocia un significado a estos objetos que son reconocidos previamente.

2.4.3. Segmentación de imágenes. Al capturar una imagen, se puede observar dentro de ella uno o mas objetos. La segmentación tiene como objetivo principal identificar y separar estos objetos del medio en que se encuentran ubicados. Es necesario establecer algunas características, mencionadas anteriormente, que facilitaran este proceso, tales como: niveles de gris, color, textura, bordes o movimiento. Luego de separar los objetos presentes en la imagen, se inicia el proceso de descripción individual de ellos, su reconocimiento e interpretación (De la Escalera, 2001).

- **Umbralización.** Como se mencionó anteriormente, los objetos presentan uniformidad en una o mas características y se deben identificar los píxeles que presentan continuidad y una

propiedad en común. La umbralización convierte una imagen que posee varios niveles de gris a una con solamente dos, de tal manera que es relativamente sencillo separar los objetos del fondo, estableciendo un nivel de gris para los píxeles que pertenecen a un objeto. Por consiguiente, el uso de esta técnica es bastante útil para objetos que tengan una superficie similar y el fondo es uniforme. Un ejemplo clásico es el de un texto presente en un libro donde las letras destacan visiblemente del entorno (De la Escalera, 2001).

Convertir una imagen que posee solo niveles de gris, en una imagen a blanco y negro, es lo que se conoce como el proceso de binarización. Esta técnica consiste en comparar los niveles de gris presentes en la imagen con un valor predeterminado, conocido como umbral (De la Escalera, 2001).

El umbral se define como un valor de intensidad positivo T que determina la cantidad de píxeles considerados pertenecientes a uno de los dos subconjuntos: blancos (0) o negros (1).

La umbralización de una imagen en escala de grises se basa en el siguiente método: si el valor de gris de un píxel $f(x,y)$ es menor o igual que el umbral T , se le asigna el valor de 1; de lo contrario, se le asigna un valor de 0. De esta manera, es posible separar el objeto presente en la imagen del fondo aplicando la ecuación (7) donde el resultado es una imagen binarizada $g(x,y)$ (Gonzalez and Woods, 2018).

$$g(x,y) = \begin{cases} 1, & \text{si } |f(x,y)| > T \\ 0, & \text{de otra manera} \end{cases} \quad (7)$$

2.4.4. Región. R es un subconjunto conectado de píxeles de una región en una imagen binaria. Se dice que dos regiones, R_i y R_j son adyacentes si su unión forma un conjunto conectado donde se considera 4 u 8 adyacencia. Una región R de una imagen binaria puede ser representada como una distribución de puntos en primer plano $P_i = (x_i, y_i)$ sobre un plano discreto \mathbb{Z}^2 , es decir, como un conjunto representado por la ecuación (8):

$$R = \{(x_0, y_0), (x_1, y_1), \dots, (x_{N-1}, y_{N-1})\}. \quad (8)$$

- **Contorno** El contorno de una región (C_R) es el conjunto de píxeles en la región R que tiene al menos un píxel vecino de fondo. Para reconocer el contorno es necesario especificar la conectividad que se usa para definir la adyacencia.

A partir de una imagen binaria se puede obtener el contorno de una región C_R . En la figura 15 se muestra que las regiones conectadas poseen un contorno exterior. Además, pueden contener contornos interiores debido a agujeros (Burger and Burge, 2016).

La anterior distinción es importante en el desarrollo de algoritmos de determinar contornos de regiones en una imagen, los cuales se basan principalmente en el siguiente proceso (Burger and Burge, 2016):

1. Identificar las regiones con conectividad de píxeles en la imagen.
2. Para cada región, se procede a recorrer su contorno a partir de un píxel del mismo borde o píxel fronterizo.

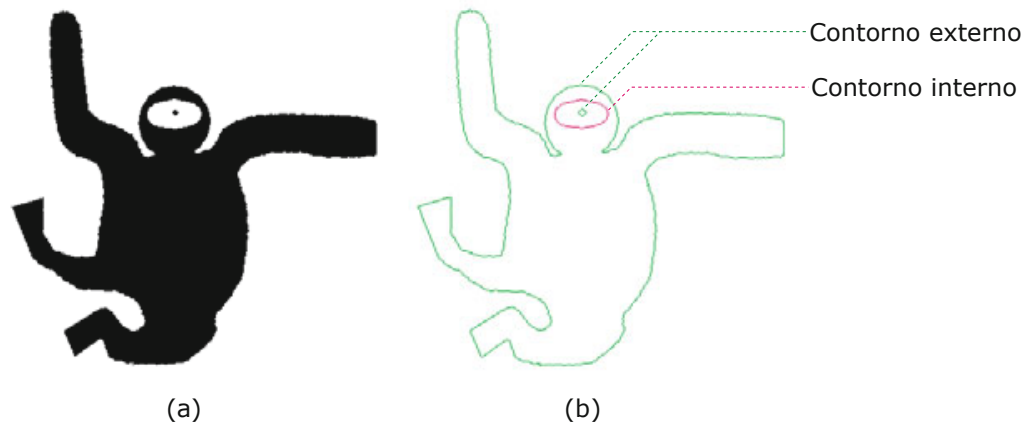


Figura 15. (a) Región de una imagen binaria con (b) contorno interior y exterior. Adaptado de Gonzalez and Woods (2018).

- De la misma manera, se puede encontrar un contorno interno comenzando por un píxel fronterizo del agujero de una región.

Algunos algoritmos requieren que los puntos en el contorno de una región se ordenen en sentido horario o antihorario para generar una salida que consta de una secuencia ordenada de puntos coordinados como se observa en la figura 16 (Burger and Burge, 2016).

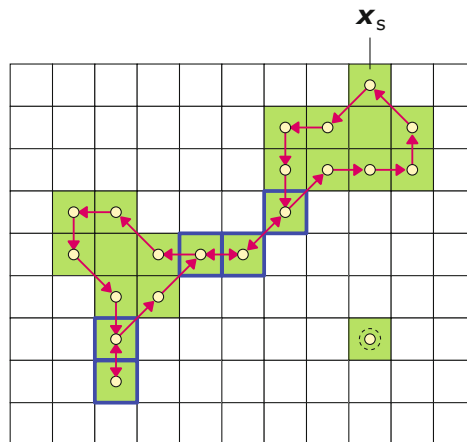


Figura 16. Ruta digital a lo largo de un contorno obtenida partir de punto inicial dado X_s . Además, un solo píxel aislado puede tener un contorno (abajo a la derecha). Tomado de Burger and Burge (2016).

2.4.5. Análisis geométrico en imágenes. Algunos métodos y algoritmos implementados para el análisis geométrico en imágenes bidimensionales son los siguientes:

- **Distancia.** Para los píxeles p , q y s , con coordenadas (x_1, y) , (x_2, y_2) y (x_3, y_3) , respectivamente, D es una función de distancia o métrica si se cumplen las ecuaciones (9), (10) y (11) (Gonzalez and Woods, 2018):

$$D(p, q) \geq 0, (D(p, q) = 0 \text{ sí } p = q), \quad (9)$$

$$D(p, q) = D(q, p), \quad (10)$$

$$D(p, s) \leq D(p, q) + D(q, s). \quad (11)$$

La distancia euclidiana (D_{euc}) entre p y q se define por medio de la ecuación (12):

$$D_{euc}(p, q) = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2}. \quad (12)$$

La distancia del taxista (D_{tax}) entre p y q está dada por la ecuación (13):

$$D_{tax}(p, q) = |x_1 - x_2| + |y_1 - y_2|. \quad (13)$$

- **Perímetro.** El perímetro de una región es la longitud del contorno de una región C_R con conectividad de píxeles. Por lo tanto, para un contorno cerrado de una región R descrita por la ruta digital cerrada $c_R = (u_0, u_1, \dots, u_{N-1})$ con puntos $u_i = (x_i, y_i)$, el perímetro de R , medido en píxeles, está dado por la ecuación (14) (Gonzalez and Woods, 2018):

$$\text{Perímetro}(R) = \sum_{i=1}^N D_{tax}(u_{i-1}, u_i), \quad (14)$$

donde D_{tax} es la distancia del taxista o rectilínea definida en (13).

- **Área.** El área de una región binaria R se puede encontrar contando los píxeles de la imagen que componen la región como se muestra en la ecuación (15) (Burger and Burge, 2016):

$$A(R) = N = |R|. \quad (15)$$

- **Cuadro delimitador (bounding box).** El cuadro delimitador de un región R es el rectángulo mínimo (ver fig. 17) paralelo al eje, el cual encierra todos los puntos de R como se muestra en la ecuación (16):

$$\text{BoundingBox}(R) = (x_{min}, x_{max}, y_{min}, y_{max}), \quad (16)$$

donde x_{min}, x_{max} y y_{min}, y_{max} son los mínimos y máximos de valores coordenados de todos los puntos $(x_i, y_i) \in R$ en direcciones x y y , respectivamente (Burger and Burge, 2016).

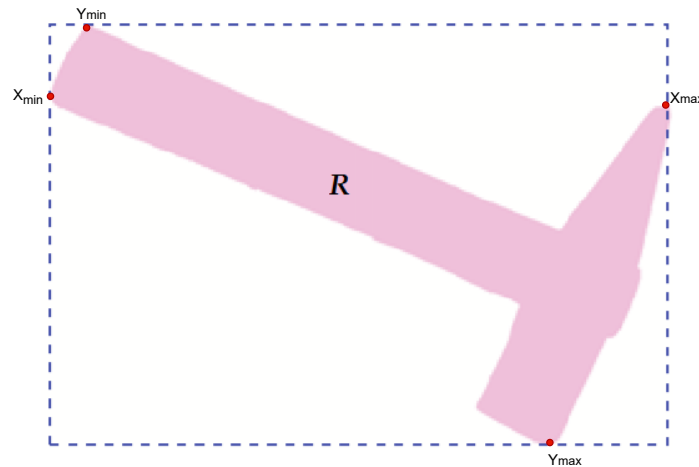


Figura 17. Representación geométrica del cuadro delimitador en una región. Adaptado de Burger and Burge (2016).

- **Diámetros de Feret.** El algoritmo de Feret se puede aplicar en una imagen binarizada para medir el diámetro mayor y diámetro menor de una región R . El diámetro de Feret es la medida longitudinal del tamaño del objeto definido a lo largo de una dirección entre dos líneas paralelas que se obtienen al encerrar perpendicularmente el objeto.

El diámetro máximo F_{max} es la distancia máxima calculada en píxeles, entre todos los pares de píxeles $d(x,y)$ que pertenecen al contorno de la región C_R como se define en la ecuación (17).

$$F_{max} = \{max d(x,y) \mid x,y \in C_R\}. \quad (17)$$

De la misma forma, en la ecuación (18) se define el diámetro mínimo F_{min} , el cual se obtiene al cambiar la orientación de los planos y obtener el valor mínimo de distancia entre pares de

píxeles en C_R (Debayle, 2019).

$$F_{min} = \{min d(x,y) \mid x,y \in C_R\}. \quad (18)$$

- **Centroide.** El centroide de una región $\bar{X} = (\bar{x}, \bar{y})$ es el punto de equilibrio, es decir el centro de gravedad. Este puede ser calculado a partir de la media aritmética de los puntos coordenados $P_i = (x_i, y_i)$ como se muestra en la ecuación (19) (Burger and Burge, 2016):

$$\bar{X} = \frac{1}{|R|} \cdot \sum_{P_i \in R} P_i, \quad (19)$$

o bien a partir a partir de las ecuaciones (20) y (21):

$$\bar{x} = \frac{1}{|R|} \cdot \sum_{(x_i, y_i)} x_i, \quad (20)$$

$$\bar{y} = \frac{1}{|R|} \cdot \sum_{(x_i, y_i)} y_i. \quad (21)$$

Donde $|R|$ es el número de píxeles de la región y (x_i, y_i) pertenecen a R .

- **Cuadro delimitador alineado al eje mayor.** Teniendo una región binaria R y su respectivo contorno C_R , es posible obtener el cuadro delimitador que la encierra (ver fig. 18) a partir del ángulo de orientación del contorno (θ), donde θ es calculado a partir de la ecuación (22)

(Burger and Burge, 2016):

$$\theta = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left(\frac{2\mu_{11}(R)}{\mu_{20}(R) - \mu_{02}(R)} \right) \quad (22)$$

Siendo μ_{11} , μ_{20} , μ_{02} los momentos centrales estadísticos de R calculados con la ecuación (23):

$$\mu_{pq}(R) = \sum_{(x,y) \in R} (x - \bar{x})^p \cdot (y - \bar{y})^q, \quad (23)$$

donde (\bar{x}, \bar{y}) es el punto coordenado del centroide \bar{X} hallado con la ecuación (19).

A partir de θ se tiene en la ecuación (24) que:

$$e_a = \begin{pmatrix} x_a \\ y_a \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos(\theta) \\ \text{sen}(\theta) \end{pmatrix}, \quad (24)$$

es el vector unitario paralelo a su eje mayor. Por lo tanto en la ecuación (25) se tiene que,

$$e_b = e_a^\perp = \begin{pmatrix} y_a \\ -x_a \end{pmatrix}, \quad (25)$$

es el vector unitario ortogonal a e_a . Entonces, el cuadro delimitador se puede determinar de la siguiente manera:

1. Proyectar cada punto del contorno de la región $U_i = (u_i, v_i)$ en el vector e_a (paralelo al eje mayor de la región) calculando el producto escalar como se muestra en la ecuación (26)

$$a_i = U_i \cdot e_a, \quad (26)$$

y manteniendo los valores mínimos y máximos de la ecuación (27),

$$a_{min} = \min a_i, U_i \in C_R; \quad a_{max} = \max a_i, U_i \in C_R. \quad (27)$$

2. De manera análoga, proyectar cada punto de región U_i sobre el eje ortogonal (especificado por el vector e_b) mediante la ecuación 28,

$$b_i = U_i \cdot e_b, \quad (28)$$

y manteniendo los valores mínimos y máximos de la ecuación (29),

$$b_{min} = \min b_i, U_i \in C_R; \quad b_{max} = \max b_i, U_i \in C_R. \quad (29)$$

3. Finalmente, a partir de a_{min} , a_{max} , b_{min} , b_{max} , se calculan los cuatro puntos que com-

prenden las esquinas A, B, C, D del cuadro delimitador usando la ecuación (30),

$$\begin{aligned} A &= a_{\min} \cdot e_a + b_{\min} \cdot e_b, & B &= a_{\min} \cdot e_a + b_{\max} \cdot e_b, \\ C &= a_{\max} \cdot e_a + b_{\max} \cdot e_b, & D &= a_{\max} \cdot e_a + b_{\min} \cdot e_b. \end{aligned} \quad (30)$$

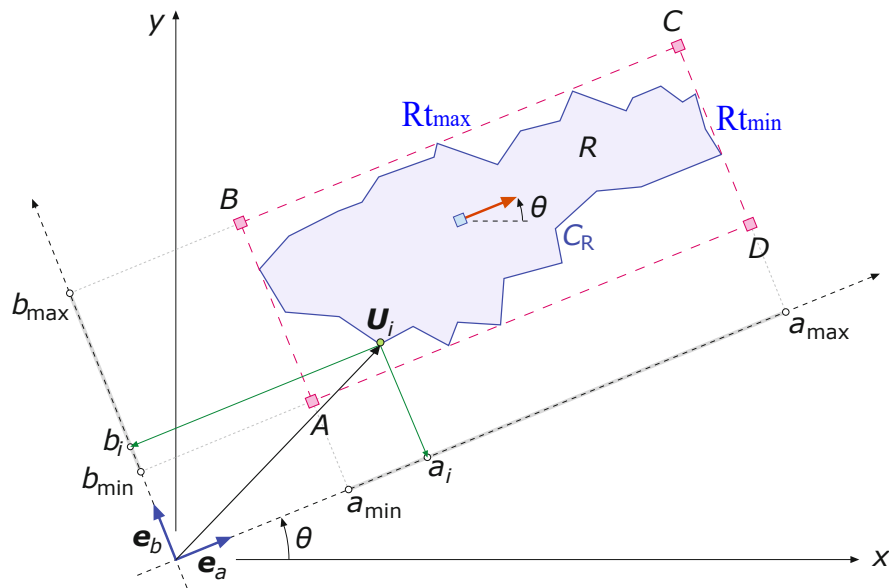


Figura 18. Representación geométrica del cuadro delimitador alineado al eje mayor de una región con sus lados Rt_{\max} y Rt_{\min} . Adaptado de Burger and Burge (2016).

2.5. Estado del arte

El análisis métrico bidimensional a partir de imágenes conlleva un proceso que consta de etapas donde se aplican técnicas de procesamiento de imágenes. Generalmente, el proceso consta de las siguientes etapas: montaje, adquisición de muestras, pre-procesamiento de imagen y algoritmos de análisis de regiones (ver fig. 19).

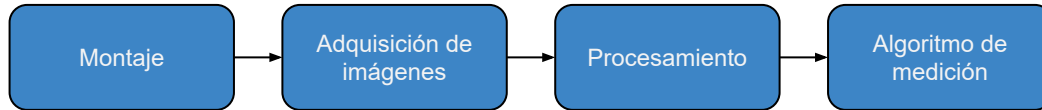


Figura 19. Etapas generalizadas del análisis métrico bidimensional.

Primero, para el montaje del sistema de imágenes es necesario analizar previamente las condiciones del entorno como las diferentes fuentes y tipos de iluminación que se pueden seleccionar dependiendo del tipo de problema. En LeeHoonsoo et al. (2017) el autor propone usar la luz de ambiente para evaluar una serie de muestras de raíces con diferentes longitudes y espesores durante siete días de germinación. Por otro lado, la iluminación de fondo LED es utilizada en Samae et al. (2020) para evaluar el diseño y fabricación de micromixers a través de medidas precisas de la eficiencia de mezcla; En Guerrieri et al. (2018) se utiliza contraluz para medir los defectos del perfil transversal de una cabeza de carril. Por último, la elección de la fuente de luz y el tipo puede ser un proceso riguroso como en Ramzi and Bakar (2018) donde se prueban tres diferentes fuentes de luz y se establece un ángulo de proyección de la luz para analizar el desgaste superficial de una broca utilizada como herramienta en el montaje en la capa externa de un avión sobre su esqueleto metálico después de muchas operaciones (ver fig. 20).

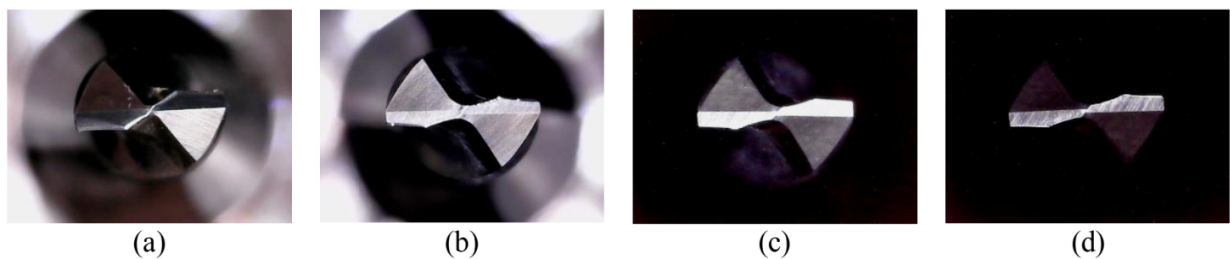


Figura 20. Imágenes capturadas a partir de varios brillos de iluminación y fuentes de luz: (a) luz ambiental, (b) luz de microscopio digital (c) tira de LED de alto brillo y (d) tira de LED de bajo brillo. Tomado de Ramzi and Bakar (2018).

Es importante establecer el posicionamiento y el soporte del objeto. Una adecuada posición del objeto es ubicarlo de manera perpendicular a la cámara, procurando mantener la ortogonalidad para evitar posibles aberraciones geométricas que perjudiquen la precisión métrica (ver fig. 21) (Zhang, 2020; Guerrieri et al., 2018). El soporte debe adaptarse a la morfología del objeto como en Ramzi and Bakar (2018) donde se utiliza un mandril que bloquea y asegura la alineación vertical de la broca. Por otra parte, los soportes o bases horizontales son ampliamente usados en inspección de formas o perfiles debido al acoplamiento del objeto en una posición que mantiene la ortogonalidad con el sensor digital; por ejemplo, en Samae et al. (2020) con la hoja de papel sujeta con ganchos, en Zhang (2020) con la hoja de kiwi puesta sobre una lámina de fondo blanco fijo, en LeeHoonsoo et al. (2017) con las raíces distanciadas a 0.4 m de la cámara y en Guerrieri et al. (2018) con el riel sobre una base horizontal blanca.

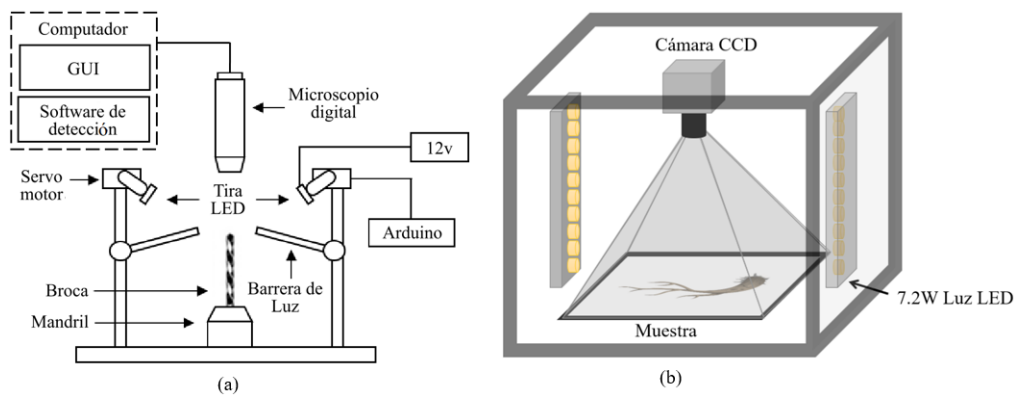


Figura 21. Montaje del sistema de inspección para analizar: (a) el desgaste de una broca y (b) la germinación de una raíz. Adaptado de Ramzi and Bakar (2018); LeeHoonsoo et al. (2017).

La adquisición de muestras se realiza con una profundidad de campo que permita enfocar correctamente el objeto con el propósito de obtener imágenes nítidas en regiones de interés y optimizar el rendimiento en técnicas de procesamiento de imágenes utilizadas en etapas posteriores

(ver fig. 22). Por lo tanto, las características ópticas de las cámaras digitales son factores incidentes en la obtención de resultados satisfactorios en un sistema de imagen. De esta manera, las imágenes se adquieren a través de un equipo apto para un problema en específico como por ejemplo, la utilización de microscopios digitales para captar objetivos demasiados pequeños (Ramzi et al., 2019; Ramzi and Bakar, 2018; Samae et al., 2020; Zhang, 2020; Guerrieri et al., 2018; LeeHoonsoo et al., 2017).

El control de captura y análisis de imágenes se realizan a través de una interfaz (GUI). Existe una alta dependencia de desarrollo de aplicativos personalizados en software propietario como MATLAB donde las funcionalidades de estos permiten realizar rutinas de inspección simples y avanzadas del objeto (Ramzi et al., 2019; Ramzi and Bakar, 2018; Samae et al., 2020; Guerrieri et al., 2018; LeeHoonsoo et al., 2017). En proyectos relacionados se utilizan componentes de hardware y software separados; es decir, primero se toma la imagen a través de la cámara y después se realiza el procesamiento en el computador. Los aplicativos o GUI que se integran junto con el hardware se convierten en un sistema de inspección completo. En Ramzi and Bakar (2018), el sistema de inspección permite manipular la captura de imágenes y ejecutar medición del nivel de desgaste superficial en términos de porcentaje.

Luego de la captura de las muestras se realiza el procesamiento de las imágenes con el propósito de eliminar ruido, regiones no deseadas y otros detalles que dificultan el análisis métrico. Las técnicas aplicadas siguen un método general: conversión de imagen a escala de grises, segmentación de región de interés por umbralización o binarización, detección de bordes y operaciones morfológicas. Este proceso no es un patrón estándar de procesamiento; sin embargo, al

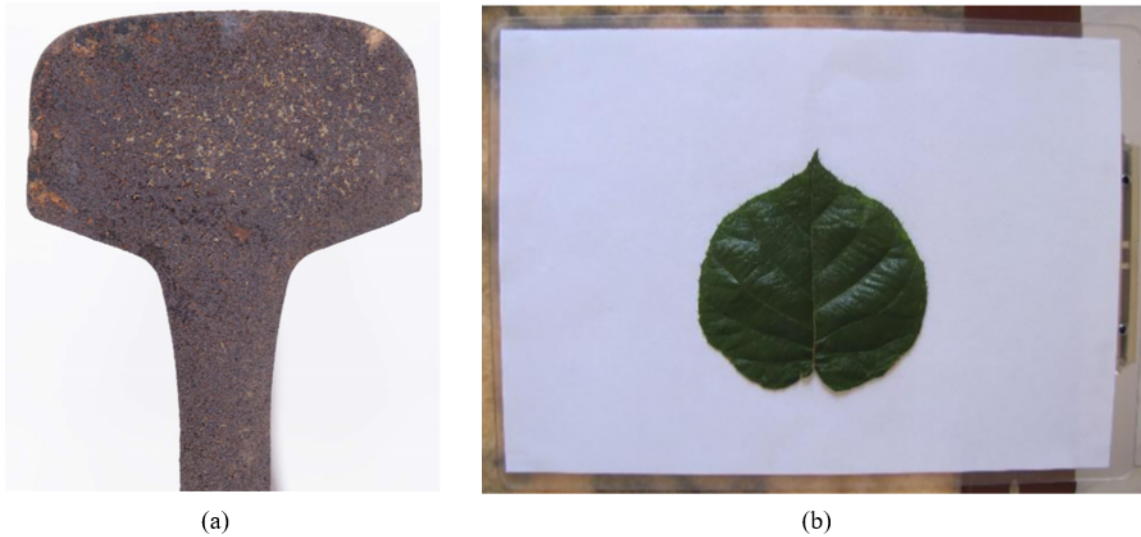


Figura 22. Dos muestras inspeccionadas: (a) imagen del riel y (b) imagen de la hoja de kiwi. Adaptado de Guerrieri et al. (2018); Zhang (2020).

ser ampliamente aplicado en el análisis bidimensional de objetos es implementado con pequeñas variaciones producidas a las condiciones ópticas y de iluminación del sistema de inspección.

En LeeHoonsoo et al. (2017) se selecciona el canal azul para binarizar la imagen RGB, se procesa con el algoritmo morfológico de *thinning* para obtener la forma esquelética de las raíces, y por último, se extraen las medidas como longitudes y áreas superficiales. En Zhang (2020) se aplica un proceso similar, aplicando otras técnicas como la simplificación del ruido mediante el filtro de mediana antes de la binarización, corrección de distorsiones provocadas por la lente y reducción del costo computacional mediante la eliminación del fondo no deseado de las imágenes corregidas antes del análisis de longitudes (ver fig. 23 y 24).

Los elementos brillantes o metálicos poseen una alta reflectancia y la eficiencia de las técnicas de umbralización aplicadas depende de etapas previas como el montaje del sistema de iluminación, ya que se deben obtener imágenes óptimas en términos de valores de intensidad que permitan

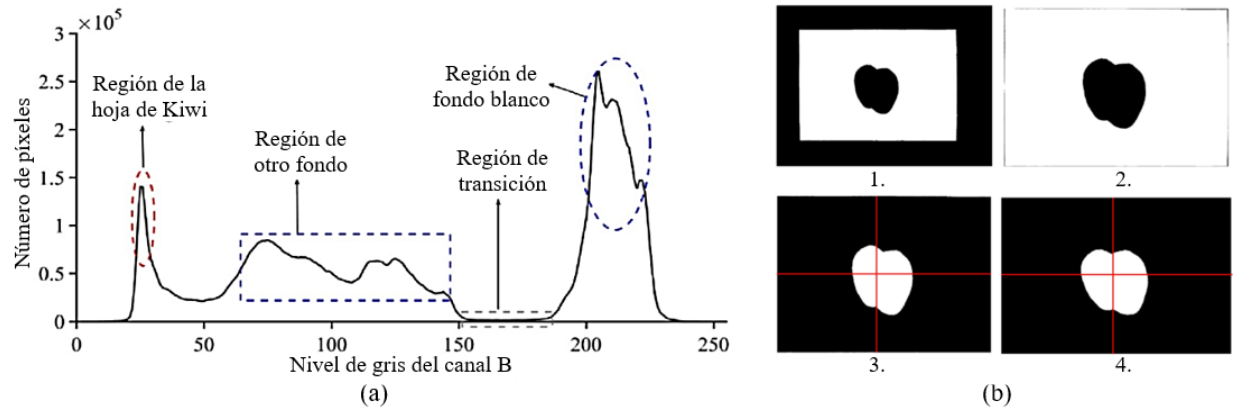


Figura 23. (a) Identificación del umbral a partir del histograma del canal B de la imagen binarizada y (b) método de procesamiento. Adaptado de Zhang (2020).

segmentar correctamente la región del objeto y el fondo para evitar la pérdida de información contenida en los píxeles.

La utilización de técnicas de umbralización automáticas, como la de otsu e *hysteresis thresholding*, satisfacen considerablemente la segmentación de objetos altamente reflectivos (Ramzi and Bakar, 2018; Guerrieri et al., 2018). Además, poseen la ventaja de reducir el sesgo de percepción respecto a hallar el valor del umbral provocado por las técnicas manuales de umbralizado (Guerrieri et al., 2018; Gonzalez and Woods, 2018).

Finalmente, para el análisis de dimensiones del objeto, es indispensable realizar una calibración espacial de la imagen. Este proceso consiste en calcular un factor de calibración *px/unidad*, el cual permite interpretar las mediciones que se realicen en una escala de unidad métrica real (LeeHoonsoo et al., 2017). Las mediciones aplicadas en un sistema de inspección bidimensional son de tipo superficial sobre el objeto: distancia entre puntos, perímetro, área, redondez, entre otras.

En Ramzi et al. (2019) se implementa un algoritmo que ejecuta un conteo de los píxeles

contenidos para calcular el área de desgaste de la broca, en el cual se realiza operaciones morfológicas con el fin de generar una conectividad completa entre píxeles vecinos, ya que la binarización de la imagen provoca imperfecciones en el relleno de la región; una técnica similar de conteo de píxeles vecinos (neighboring) se aplica para calcular longitudes y distancias entre puntos de la región (LeeHoonsoo et al., 2017; Zhang, 2020). Para analizar el perímetro, en Guerrieri et al. (2018) se aplica codificar el borde del objeto de la imagen binarizada mediante el algoritmo “*chain code*”, el cual consiste en el registro de una lista de coordenadas de píxeles (x,y) y que permite calcular el perímetro del riel (ver fig. 24). En cuanto a mediciones de largo y ancho de un objeto, pueden ser calculadas por medio del diámetro máximo y mínimo de Feret respectivamente, como se analiza en (Debayle, 2019) donde se plantean las funcionalidades de herramientas morfométricas que permiten el análisis en aleaciones metálicas.

Por lo tanto, la obtención de estas medidas superficiales requieren de rutinas de procesamiento que contemplen el análisis de las características de los píxeles en regiones: adyacencia, vecindad y operaciones morfológicas. Por último, la validación de las medidas reales de los objetos (ver fig. 25) consta en calcular diferentes tipos de errores basándose en los valores dimensionales del sistema de inspección visual y los resultados de los sistemas de medición físicos obtenidos de una muestra-patrón (Ramzi et al., 2019; Ramzi and Bakar, 2018; Samae et al., 2020; Zhang, 2020; Guerrieri et al., 2018; LeeHoonsoo et al., 2017).

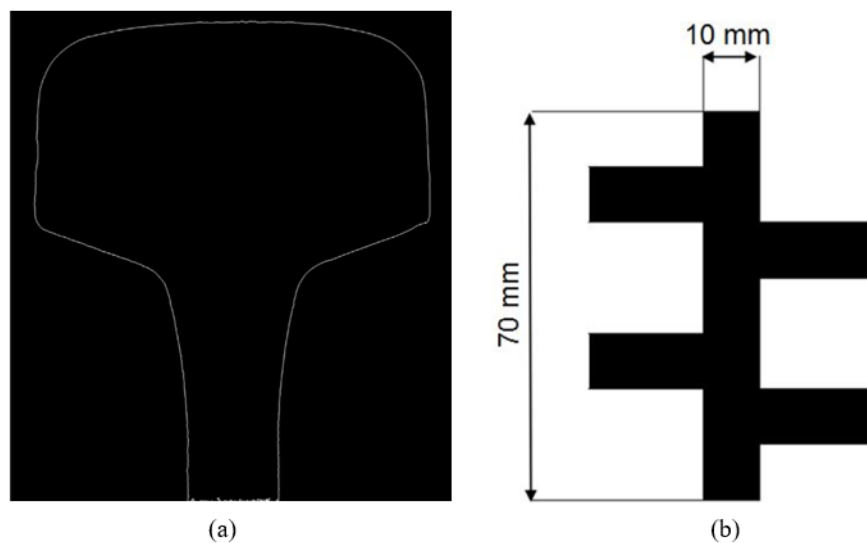


Figura 24. (a) Contorno del riel en Guerrieri et al. (2018) y (b) patrón esqueletonizado para la confirmación de la superficie total. Adaptado de LeeHoonsoo et al. (2017).

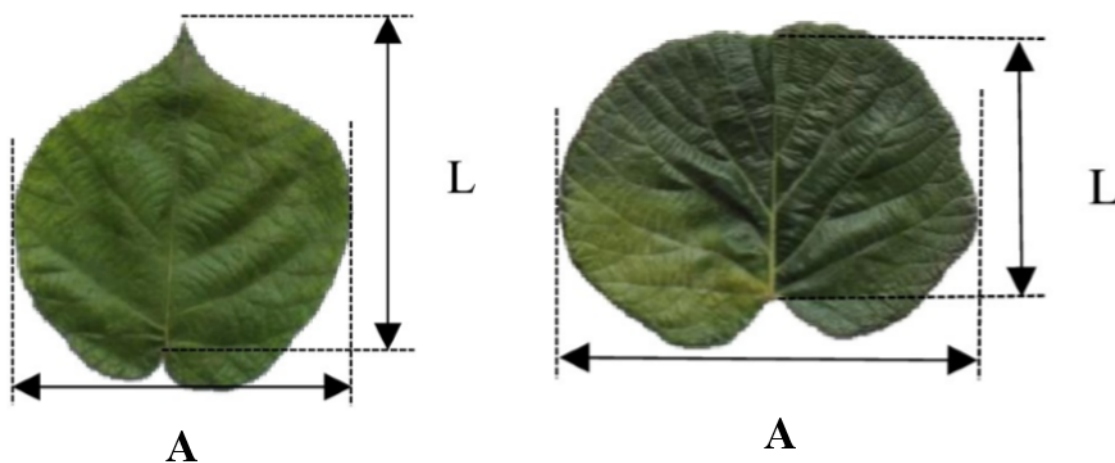


Figura 25. Posición de las medidas de largo y ancho para hojas de kiwis. Adaptado de Zhang (2020).

3. Metodología

La metodología planteada se enfoca en la medición automática de los tornillos utilizados en osteosíntesis. Primero, se selecciona un dispositivo óptico-digital que cumple con los requerimientos necesarios para la adquisición de imágenes de objetos milimétricos. Posteriormente, se definen las condiciones experimentales de iluminación, distancia de referencia, rango de distancia de los tornillos y rango de magnificación. Finalmente, a partir de los datos experimentales obtenidos, se detalla el proceso de calibración del sistema utilizando el patrón de calibración propuesto y se realiza la medición automática del área, perímetro, ancho y largo a través de una interfaz open source desarrollada en ImageJ denominada Osteocontrol, la cual implementa funcionalidades adecuadas para el análisis métrico bidimensional de los tornillos de osteosíntesis (ver fig. 26).

3.1. Microscopio digital

Se adquirió un microscopio digital USB 3.0 Dino-Lite Edge AM73915MZTL, con rango de magnificación entre 10x y 140x, un sensor CMOS de 5 MP, resolución espacial máxima de 2592x1944 píxeles, profundidad de campo ampliada entre 0.09 *mm* y 12 *mm* con una distancia larga de trabajo (distancia en *Z*) entre 23,45 *cm* y 3,05 *cm* respectivamente, dimensiones de 11.9 *cm* (largo) x 3.3 *cm* (ancho), un peso de 110 *g* y 8 LEDs integrados controlables (ver fig. 27).

Dentro de las diferentes opciones disponibles en el mercado, se eligió este dispositivo por sus características ópticas adecuadas para la adquisición de imágenes que garanticen mediciones de tornillos utilizados en osteosíntesis (ver tabla 5):

- Amplio rango de magnificación.

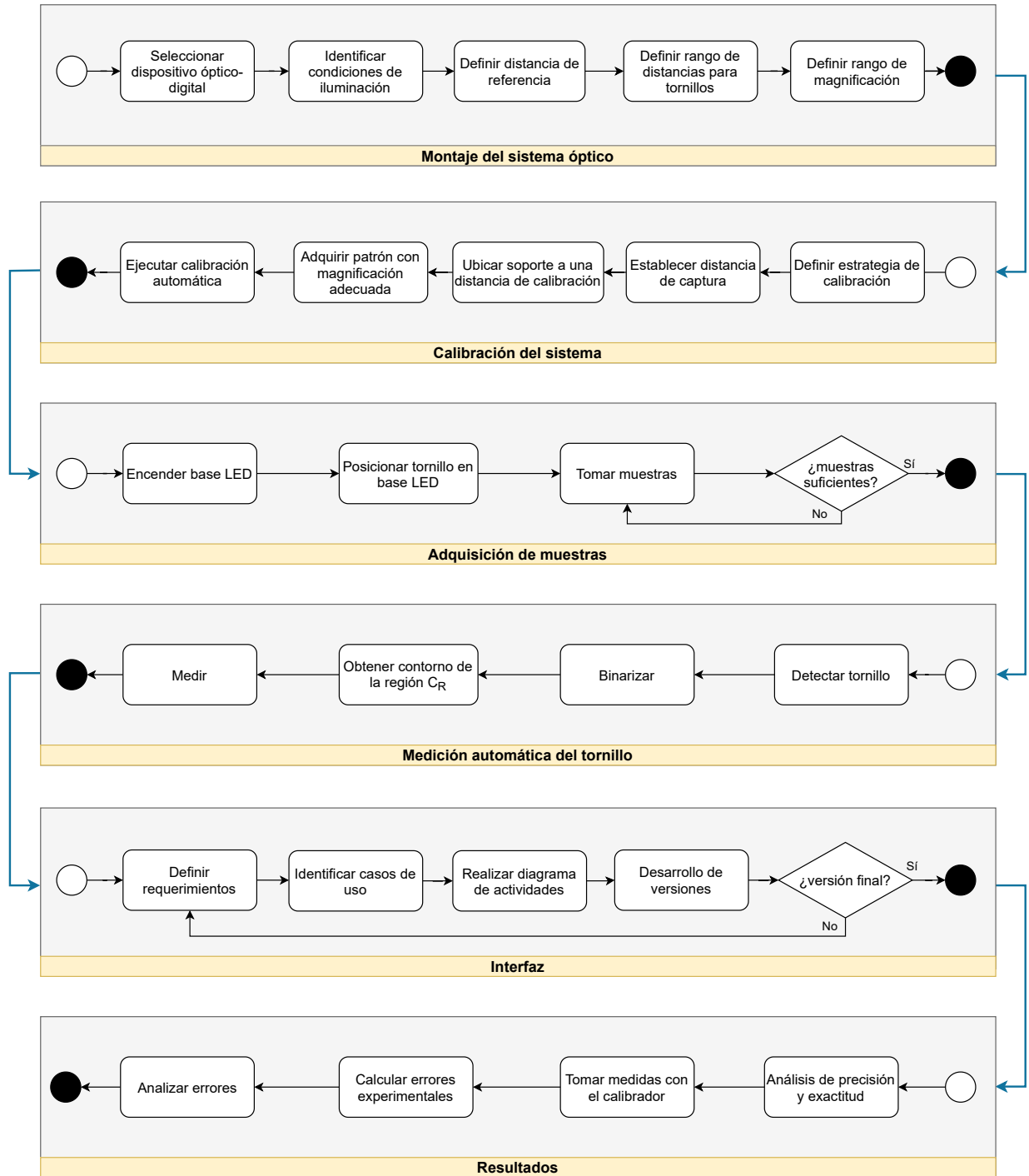


Figura 26. Diagrama de la metodología utilizada.

- Sistema de lentes diseñado para proporcionar aumento a una distancia más larga en comparación con los microscopios típicos.
- Distancia de trabajo muy flexible.
- Profundidad de campo extendido.

Además, el microscopio es cómodo para manipularlo en un entorno controlado de inspección de calidad, como el caso de los tornillos, ya que es liviano y posee una carcasa metálica resistente.



Figura 27. Microscopio Digital USB y sus partes. Adaptado de Dino-Lite (2021).

Tabla 5

Especificaciones ópticas del microscopio digital. Adaptado de Dino-Lite (2021).

Magnificación [x]	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140
Distancia de trabajo [mm]	234,5	112,5	72,5	54,5	43,5	37,5	33,7	31,3	29,9	29,2	29,1	29,3	29,8	30,5
Campo de observación (H) [mm]	39	19,5	13	9,8	7,8	6,5	5,6	29,9	4,3	3,9	3,5	3,3	3,1	2,8
Campo de observación (V) [mm]	29,2	14,6	9,7	7,3	5,8	4,8	4,2	4,3	3,2	2,9	2,6	2,4	2,2	2,1
Profundidad de campo [mm]	12	4,5	3,1	1,8	1,2	0,9	0,6	3,2	0,37	0,28	0,22	0,17	0,12	0,09

3.2. Condiciones experimentales

3.2.1. Iluminación. Se experimentó con dos tipos de iluminación: directa y a contraluz. Al aplicar iluminación directa mediante los LEDs integrados del microscopio (ver fig. 27), se perdían segmentos en las imágenes binarizadas del tornillo, obteniendo un perfil deformado e irregular debido a la alta reflectancia que presenta la superficie metálica del objeto.

La iluminación a contraluz se realizó con una base LED dimerizable (ver fig. 28), con la cual se obtuvo un contorno del tornillo más visible, debido a que los rayos de luz inciden por debajo del tornillo, produciendo un perfil más nítido y por consiguiente una mejor binarización de las imágenes con respecto al uso de iluminación directa. Por esta razón, se ha seleccionado esta base LED como fuente de iluminación del sistema de control.



Figura 28. Base LED de luz fría dimerizable.

La base LED cuenta con cuatro modos de flujo de luz: 150, 300, 350, y 600 lúmenes, otorgando un correcto funcionamiento del sistema de control bajo condiciones lumínicas variables existentes en un entorno cerrado y controlado como, por ejemplo, un laboratorio de inspección de calidad.

Finalmente, se identifica un patrón de luz circular no uniforme al binarizar una imagen capturada de la base LED encendida como se muestra en la figura 29. Este fenómeno lumínico es provocado por una mayor distribución del flujo de luz en el centro del panel de la base. Por lo tanto, se establece una condición experimental en el espacio de trabajo que contemple la región circular generada. De esta manera, es posible garantizar una correcta adquisición y procesamiento de las imágenes de muestras en el algoritmo de medición automática (ver sección 3.5).

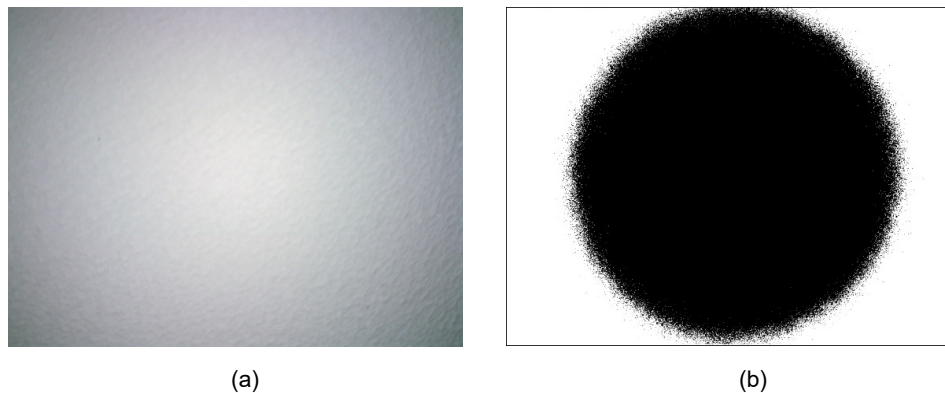


Figura 29. (a) Panel de la Base LED a 150 lúmenes e (b) imagen binarizada del patrón de luz generado por la base LED.

3.2.2. Distancia de referencia (Z). La distancia de trabajo es la distancia entre la lente frontal del objetivo y la muestra cuando se encuentra enfocada. Por lo tanto, es indispensable adquirir un soporte vertical calibrado que funcione como elemento de referencia en la adquisición de

imágenes de los tornillos dentro del rango de distancia de trabajo suministrado por el microscopio digital USB.

El soporte universal Dino-Lite RK-10 es una plataforma de mesa compatible con el microscopio digital USB, la cual cuenta con una perilla de ajuste fino (movimiento suave) y un botón de liberación rápida (movimiento rápido) como se observa en la figura 30, siendo el movimiento suave una característica muy útil cuando se definen variaciones de distancias pequeñas muy precisas como se evidencia en la calibración del sistema (ver sección 3.3).

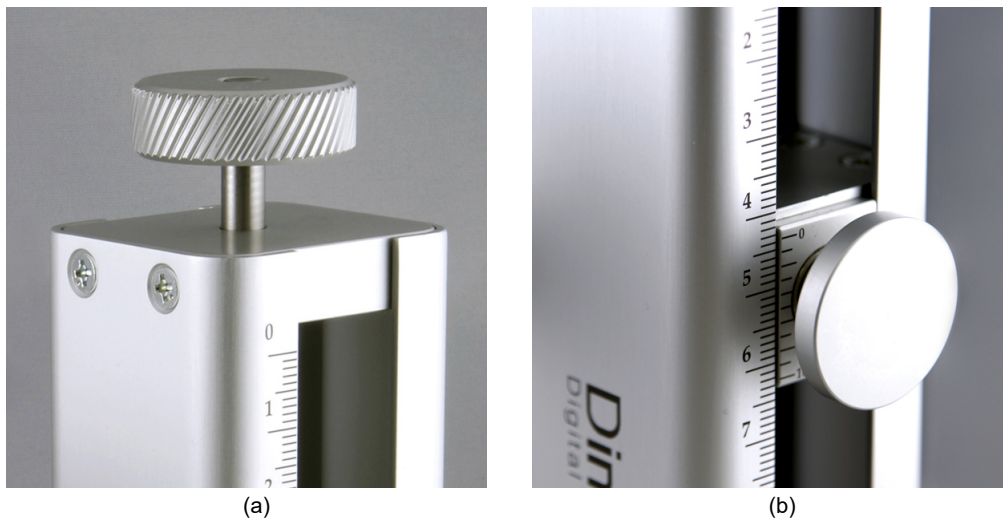


Figura 30. (a) Botón de liberación rápida y (b) perilla de enfoque fino del soporte vertical RK-10. Tomado de Dino-Lite (2021).

Se define un rango de distancia en el espacio de trabajo basado en el sistema coordinado del soporte vertical denominada distancia de referencia Z (ver fig. 31), la cual brinda una experiencia confortable en variaciones de distancia con las perillas de ajuste respecto a las etiquetas calibradas.

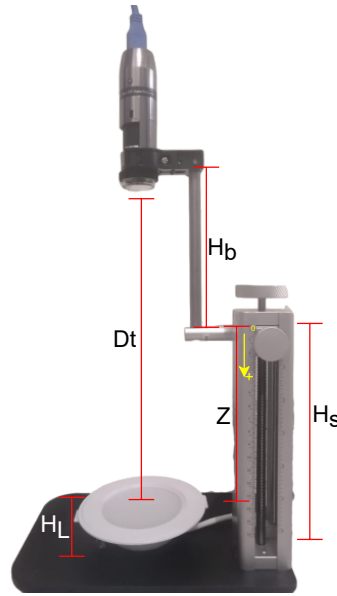


Figura 31. Definición de Z con punto de referencia en el espacio de trabajo.

Debido a que la base LED tiene una altura $H_L = 2 \text{ cm}$ y el soporte RK-10 una altura $H_s = 16 \text{ cm}$. Por lo tanto, en la ecuación (31) se tiene que:

$$Z_{max} = H_s - H_L = 14 \text{ cm.} \quad (31)$$

Entonces, el rango de distancia de Z , en cm, está dada por la distancia mínima Z_{min} y máxima Z_{max} como se muestra en la ecuación (32):

$$Z = [Z_{min}, Z_{max}] = [0, 14] \text{ cm.} \quad (32)$$

Sin embargo, la distancia de trabajo del microscopio no coincide con la distancia de referencia Z , ya que existe un desfase entre ambas distancias provocado por la altura del brazo que sostiene el microscopio.

Teniendo en cuenta que la base LED tiene 2 *cm* de alto, se halla la relación de distancias, bajo el sistema de referencia *Z*, entre la altura del brazo *H_b* y la altura máxima de referencia *Z_{max}* respecto a la base LED.

Si se ajusta la plataforma en *Z* = 0 *cm*, la máxima distancia en la cual se puede ubicar el microscopio en el soporte vertical *D_{total}* está dada por la ecuación (33):

$$D_{total} = H_b + Z_{max} = 29 \text{ cm.} \quad (33)$$

Como *D_{total}* es la máxima distancia de trabajo del microscopio permitida en el rango de *Z*, la distancia de trabajo máxima del microscopio *D_{tmax}* es igual a *D_{total}* como se muestra en la ecuación (34):

$$D_{tmax} = D_{total} = 29 \text{ cm.} \quad (34)$$

A partir de *D_{tmax}* y *Z* = 0 *cm*, se define un punto de referencia positivo (+) hacia la base LED. Por lo tanto, la distancia de trabajo del microscopio *D_t* se puede determinar en función de la distancia de referencia (*Z*) como se muestra en la ecuación (35):

$$D_t(Z) = D_{tmax} - Z = 29 \text{ cm} - Z. \quad (35)$$

3.2.3. Rango de distancia de los tornillos. Para la toma de muestras se utilizaron dos tipos de tornillos de diferente forma y tamaño suministrados por una empresa local:

- **Tornillo A:** bloqueado 2.4 mm Ti AR Torx × 12 con referencia T1-424-2ART12.
- **Tornillo B:** esponjoso canulado 4,0 mm SS R.Parcial AP Hex × 24 con referencia T1-90-1RPAPH24.

En la figura 32 se observa que el tornillo B posee mayor reflectividad que el tornillo A.



Figura 32. (a) Tornillo tipo A y (b) tornillo tipo B.

A partir del tamaño de los tornillos y el patrón circular de luz generado por la base LED (ver fig. 29), un rango de distancia de referencia Z diferente es definido para garantizar un espacio de trabajo adecuado. Para el tornillo A se define un rango de distancia de $[0, 12]$ cm y para el tornillo B de $[0, 5]$ cm de acuerdo con las ecuaciones (36) y (37).

$$Z_A = [Z_{Amin}, Z_{Amax}] = [0, 12] \text{ cm}, \quad (36)$$

$$Z_B = [Z_{Bmin}, Z_{Bmax}] = [0, 5] \text{ cm}. \quad (37)$$

3.2.4. Rango de magnificación. El enfoque varía proporcionalmente a la distancia de referencia Z . Por lo tanto, en la ecuación (38) define el rango de magnificación del espacio del trabajo M a través de la perilla de ajuste de enfoque y aumento del microscopio digital:

$$M = [M_{min}, M_{max}] = [9x, 20x]. \quad (38)$$

Para las distancia de referencia de los tornillos Z_A y Z_B , se obtiene experimentalmente los valores de M_A y M_B respectivamente en la ecuación (39) y (40):

$$M_A = [M_{Amin}, M_{Bmax}] = [9x, 15.4x], \quad (39)$$

$$M_B = [M_{Bmin}, M_{Bmax}] = [9x, 10.4x]. \quad (40)$$

3.3. Calibración automática

La calibración automática del sistema de control requiere de una imagen del patrón diseñado de calibración (ver fig. 33), que contiene información métrica de una distancia conocida en escala real. El patrón de calibración diseñado es un cuadrado negro con lados de 10 mm , impreso en una hoja blanca.

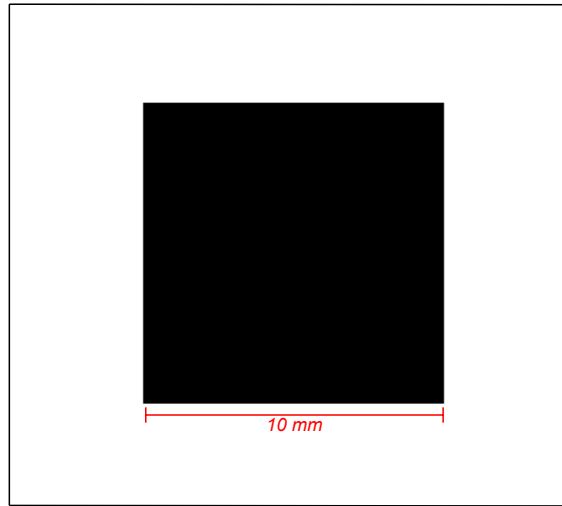


Figura 33. Diseño del patrón de calibración.

La diferencia del grosor entre la hoja del patrón de calibración y el tornillo influye notablemente en la calibración del sistema, provocando pérdida de información espacial en profundidad en término de píxeles, ya que el objeto no se ubica a la misma distancia y ángulo en Z que el patrón (ver fig. 34).

Una alta precisión en las mediciones dependen de reducir errores sistemáticos. Por tal razón, esta condición es contemplada en el proceso de calibración como paso inicial. Primero, se debe obtener el radio aproximado del tornillo (r_T) mediante las medidas especificadas por el fabricante o midiendo la cabeza con un calibrador pie de rey. Luego, por medio de la ecuación (47), se calcula el valor del desfase respecto a la base (ΔZ_{base}) entre el radio del tornillo r_T y el grosor de la hoja del patrón (h_P):

$$\Delta Z_{base} = r_T - h_P. \quad (41)$$

Aproximando $h_p \approx 0$ se tiene entonces la ecuación (42),

$$\Delta Z_{base} = r_T. \quad (42)$$



Figura 34. Desfase entre el tornillo y la hoja del patrón de calibración ΔZ_{base} .

En resumen, el proceso de calibración consta de los siguientes pasos:

1. Obtener el valor de desfase ΔZ_{base} por medio de la ecuación (42).
2. Establecer la distancia de referencia Z dentro del rango establecido para cada tornillo.
3. Ubicar el patrón de calibración sobre la base.
4. Posicionar el soporte vertical en una distancia de calibración $Z_{calib} = Z - \Delta Z_{base}$.
5. Ajustar la perilla de magnificación a un aumento de calibración M_c que enfoque el patrón en el campo de observación.
6. Capturar la imagen con iluminación directa a través de la interfaz.
7. Ejecutar el algoritmo de calibración automática (ver sec. 3.3.1).

En la figura 35 se muestra la imagen del patrón de calibración capturada a una distancia Z_{calib} con el fin de calibrar el sistema y medir el tornillo A a una distancia $Z = 12 \text{ cm}$ utilizando

el algoritmo de medición automática (ver sección 3.5). Para hallar Z_{calib} es necesario realizar los pasos del proceso de calibración mencionados. Primero, se procede a calcular experimentalmente el valor ΔZ_{base} para un tornillo con una cabeza de radio $r_T \approx 0.17 \text{ cm}$ (ver fig. 36), mediante la ecuación (43):

$$\Delta Z_{base} = 0,17 \text{ cm.} \quad (43)$$

Luego, se obtiene Z_{calib} reemplazando $Z = 12 \text{ cm}$ y $\Delta Z_{base} = 0,17 \text{ cm}$ en la ecuación (44):

$$Z_{calib} = 12 \text{ cm} - 0,17 \text{ cm} = 11,83 \text{ cm.} \quad (44)$$

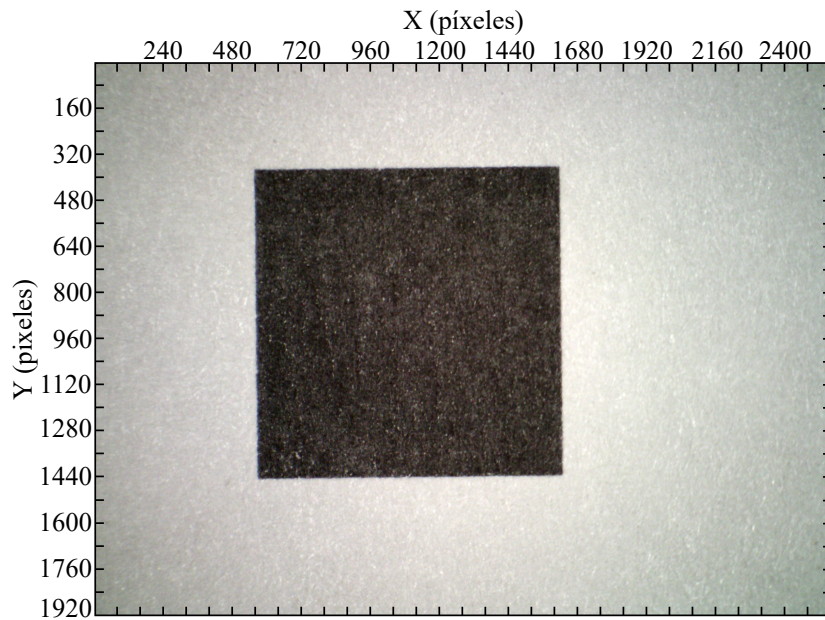


Figura 35. Imagen del patrón de calibración adquirida con el microscopio digital a una distancia $Z_{calib} = 11,83 \text{ cm}$.

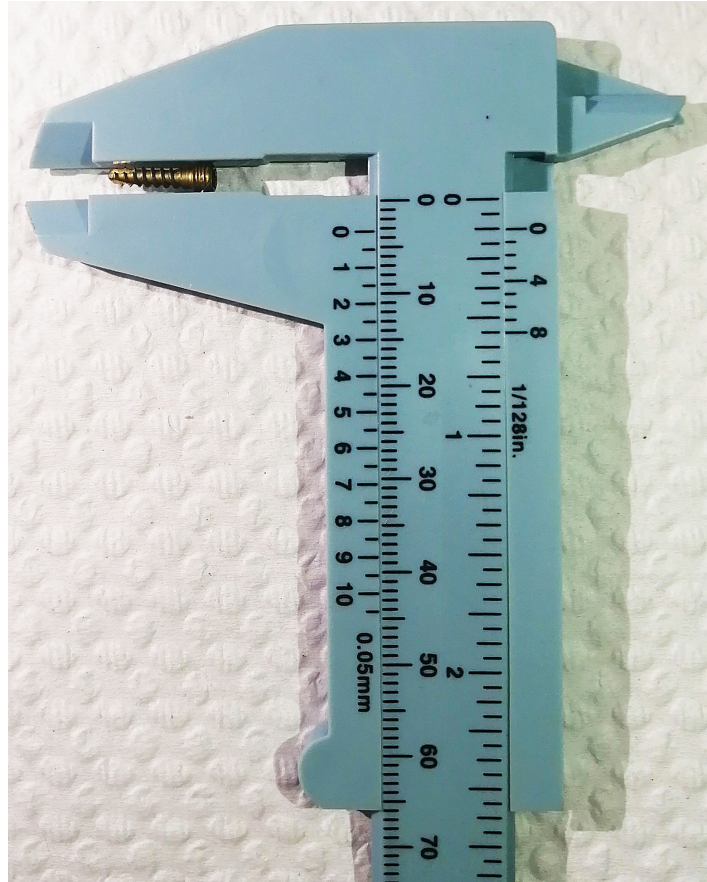


Figura 36. Obtención experimental del radio r_T del tornillo.

3.3.1. Algoritmo de calibración automática. El algoritmo de calibración automática requiere de una imagen del patrón de calibración (IP) y una métrica de longitud conocida (D_{um}), que para este caso experimental es $D_{um} = 10 \text{ mm}$. Primero, se binariza aplicando la ecuación (7) donde el valor de umbral T se halla con el algoritmo ISODATA, ya que este posee una alta eficiencia para segmentar imágenes en donde el objeto está correctamente definido (Ridler TW, 1978). Este algoritmo recibe como parámetro de entrada un valor inicial de umbral T_0 , el cual es el valor de intensidad promedio de la imagen en escala de grises (ver fig. 37).

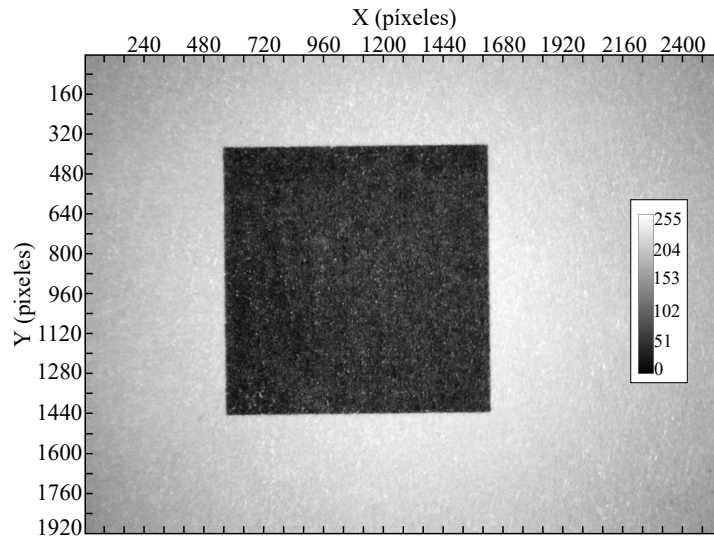


Figura 37. Patrón de calibración IP , capturado a una distancia de calibración $Z_{calib} = 11,83 \text{ cm}$, en escala de grises con $D_{um} = 10 \text{ mm}$.

Teniendo en cuenta que el valor promedio de intensidad de IP es $T_0 = 165$, la imagen se segmenta en dos grupos de píxeles: uno para los valores de intensidad menores a T_0 (g_1) y otro para los mayores (g_2) (ver fig. 38).

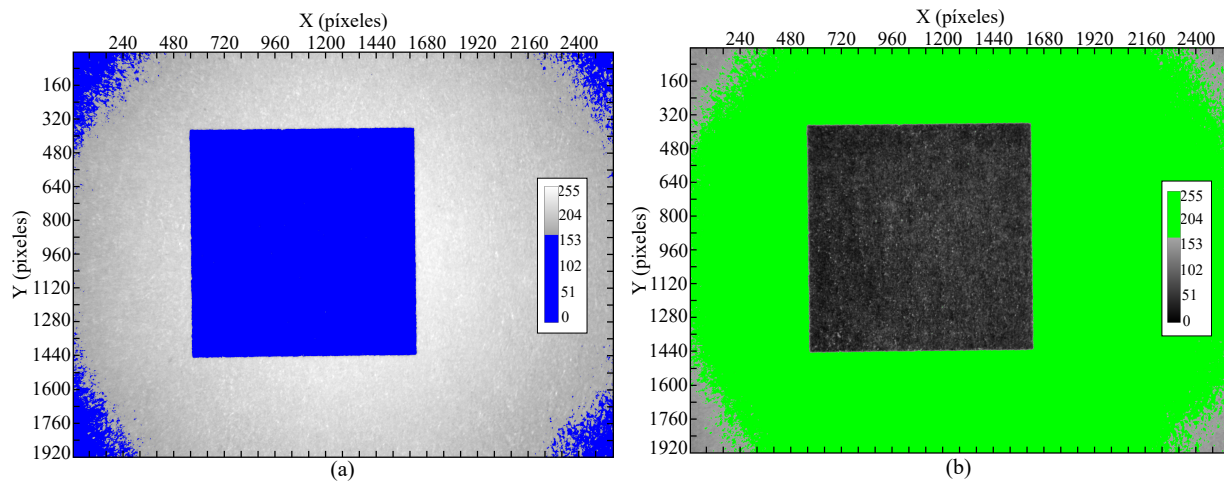


Figura 38. Segmentación de la imagen con grupo de píxeles: (a) g_1 y (b) g_2 .

Luego, se hallan los valores intensidad promedio u_1 y u_2 para la región g_1 y g_2 respecti-

vamente. Estos son utilizados para calcular un nuevo valor de umbral T_i como se muestra en la ecuación 45:

$$T_i = \frac{u_1 + u_2}{2}. \quad (45)$$

Por lo tanto, se halla T_1 a partir de u_1 y u_2 en la ecuación (46):

$$T_1 = \frac{68 + 202}{2} = 135. \quad (46)$$

El proceso anterior se repite hasta que un valor $T_i \leq T_0$, donde los valores u_1 y u_2 se modifican dependiendo del valor de umbral T_i para cada iteración (ver fig. 39), generando como resultado una imagen binaria del patrón (IP_{bin}) como se muestra en la figura 40, en la cual se distingue la región blanca del cuadrado con respecto al fondo negro (Ridler TW, 1978).

Posteriormente, se halla el conjunto de puntos de la región del patrón de calibración (IPR), considerando que los píxeles con valores de intensidad $f(x,y) = 0$ pertenecen al fondo y los píxeles con valores de intensidad $f(x,y) = 1$ pertenecen al patrón de calibración.

Cuando hay una clara separación entre un objeto y el fondo, obtener el contorno recorriendo secuencialmente los puntos de una región es más complejo en imágenes filtradas con operadores de gradiente que en imágenes binarias, ya que el recorrido del contorno en bordes detectados con métodos como Laplace o Canny puede conducir a puntos ambiguos en bordes cruzados, ramificarse en varias direcciones o terminar en regiones con gradiente de intensidad desvanecido (Burger and Burge, 2016). Por tal razón, se obtiene el contorno del patrón de calibración (IPC_R), recorriendo

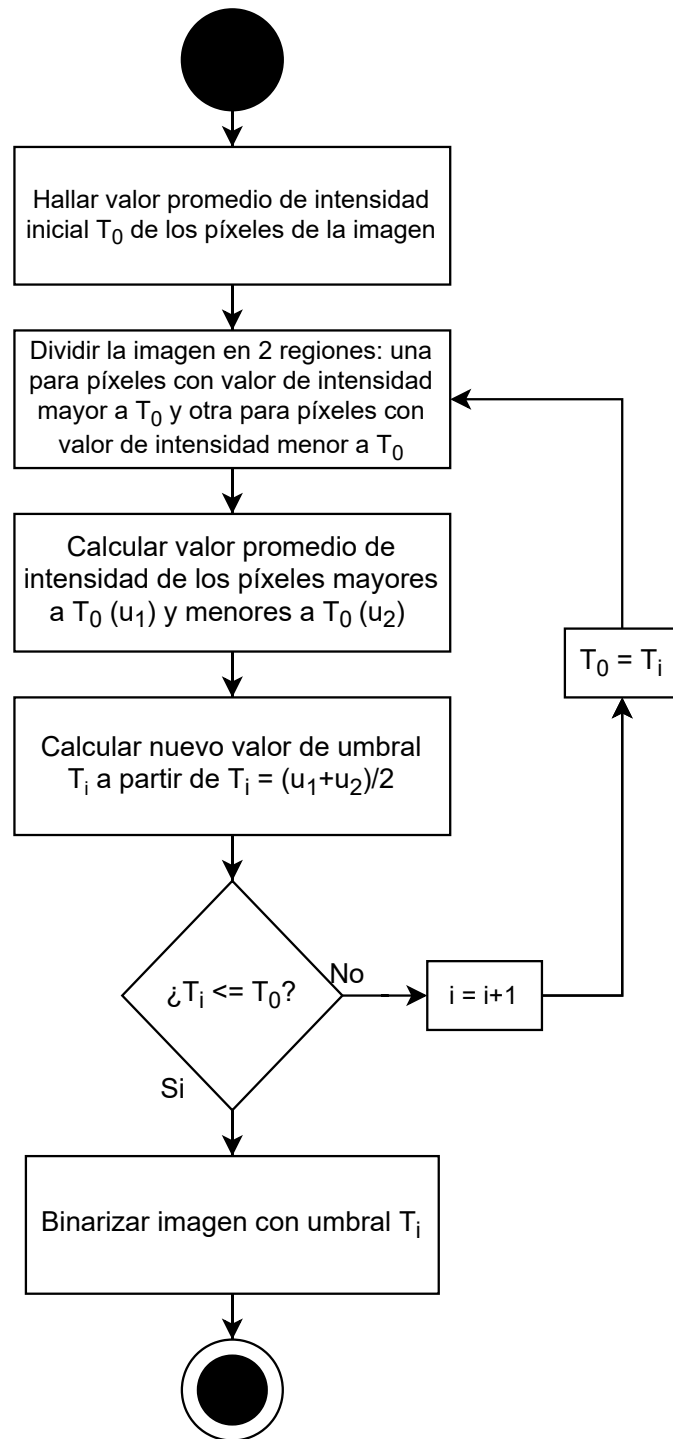


Figura 39. Diagrama de flujo del algoritmo ISODATA.

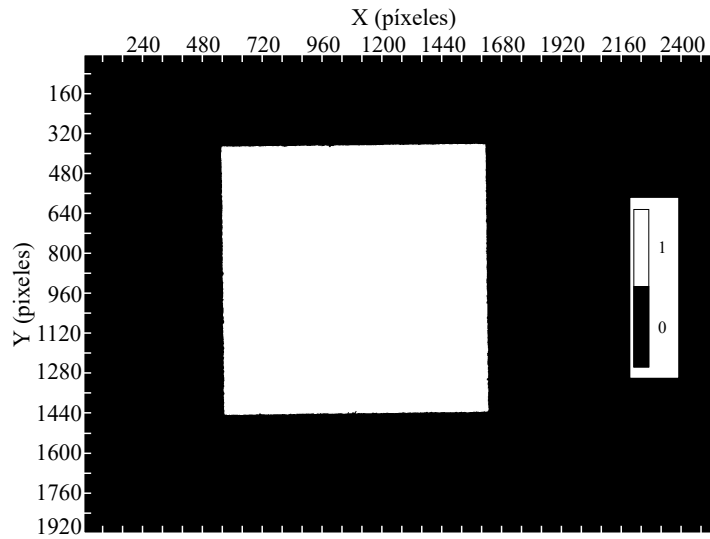


Figura 40. Imagen binaria del patrón de calibración IP_{bin} .

horizontalmente el conjunto de puntos IPR , y etiquetando los píxeles que tienen al menos un píxel vecino con $f(x,y) = 0$ como puntos pertenecientes al contorno IPC_R . En la figura 41 se muestra el contorno experimental obtenido con un total de 1780 pares coordenados.

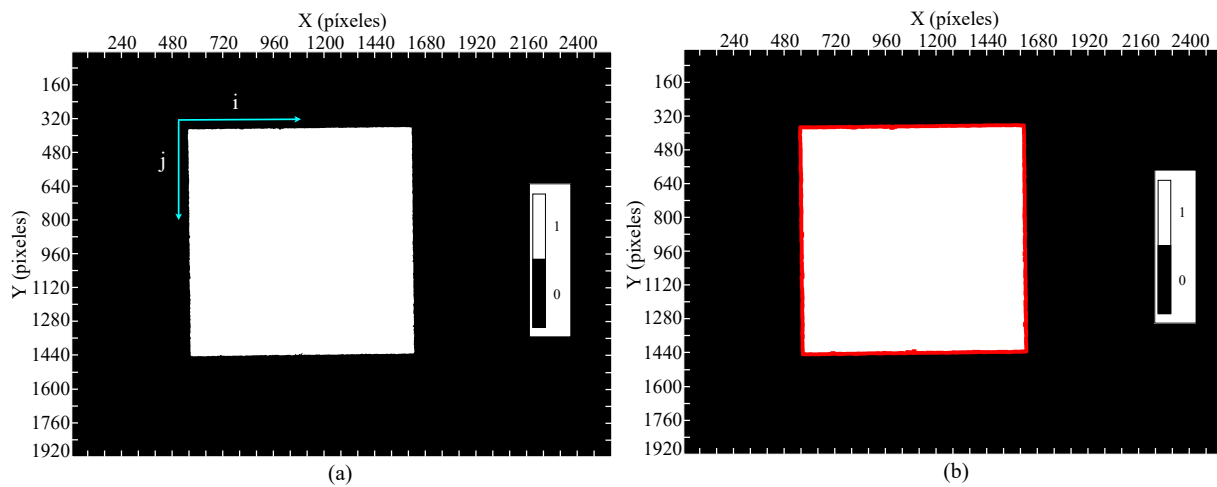


Figura 41. (a) Recorrido de la región y (b) obtención del contorno IPC_R a partir del recorrido de la región.

Después, se aplica algoritmo de Feret (ver sec. 2.4.5) en el conjunto de puntos IPC_R para hallar el diámetro menor (IPF_{min}) y mayor (IPF_{max}) del patrón. Como se observa en la figura 42(a), IPF_{max} es la longitud más larga de un punto a otro del contorno del patrón. La distancia euclidiana de IPF_{max} se calcula en (47) con los pares coordenados del diámetro mayor: $(x_1, y_1) = (568, 1442)$ y $(x_2, y_2) = (1611, 361)$. Reemplazando los puntos (x_1, y_1) y (x_2, y_2) en la ecuación (12):

$$IPF_{max} = \sqrt{(568 - 1611)^2 + (1442 - 361)^2} = 1502,1351 [px]. \quad (47)$$

Por otro lado, IPF_{min} representa geoméricamente la longitud aproximada en píxeles del lado del cuadrado. Por lo tanto, en la ecuación (48) se asume que la distancia conocida en píxeles:

$$D_{px} = IPF_{min}. \quad (48)$$

En la figura 42(b) se muestran los puntos obtenidos del diámetro menor: $(x_3, y_3) = (560, 1086)$ y $(x_4, y_4) = (1622, 1074)$. Por consiguiente, en (49) se calcula la distancia euclidiana de IPF_{min} reemplazando los puntos (x_3, y_3) y (x_4, y_4) en la ecuación (12):

$$D_{px} = \sqrt{(560 - 1622)^2 + (1086 - 1074)^2} = 1062,0678 [px]. \quad (49)$$

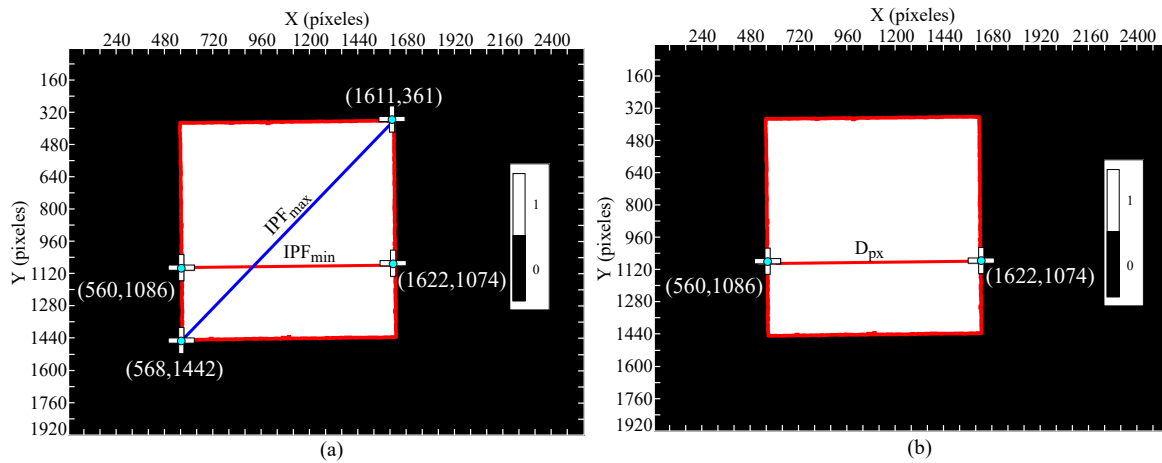


Figura 42. (a) Longitud IPF_{min} en rojo e IPF_{max} en azul y (b) equivalencia de IPF_{min} en escala píxeles D_{px} .

Finalmente, para calibrar el sistema, utilizando la ecuación (50) se calcula la equivalencia entre la distancia conocida en unidades métricas de longitud y la distancia conocida en píxeles denominada factor de escala k :

$$k = D_{um}/D_{px}, \quad (50)$$

donde D_{um} es la longitud de cualquier lado del cuadrado en escala métrica y D_{px} es el valor equivalente en píxeles. Por lo tanto, como la longitud conocida $D_{um} = 10 \text{ mm}$, reemplazando en (50), el factor de escala experimental k se define en la ecuación (51):

$$k = \frac{10}{1062,0678} = 9,415 \times 10^{-3} [\text{mm}/\text{px}]. \quad (51)$$

La visión general del proceso de calibración automática se encuentra detallada en el algoritmo 1.

Algoritmo 1 Algoritmo de calibración automática. Recibe una imagen RGB del patrón cuadrado IP y calcula el factor de escala k a partir de IP y la distancia conocida D_{um} . Complejidad: $O(n^2)$.

```

1: CalibracionAutomatica( $IP, D_{um}$ )
   Entrada:  $IP$  es una imagen bidimensional con píxeles ubicados en un plano coordenado  $xy$  y
   valores de intensidad  $f(x,y)$ .  $D_{um}$  es la distancia conocida. Retorna el factor de escala  $k$ .
2:  $IP_{bin} \leftarrow$  Binarizar( $IP$ )                                ▷ ver sec. 3.3.1
3:  $IPR \leftarrow$  ObtenerRegion( $IP$ )                             ▷ ver sec. 3.3.1
4:  $IPC_R \leftarrow$  ObtenerContorno( $IPR$ )                       ▷ ver sec. 3.3.1
5: Si Tamaño( $IPC_R$ ) = 0 entonces
6:   Finalizar algoritmo                                       ▷ Patrón no detectado
7: No
8:    $\langle IPF_{min}, IPF_{max} \rangle \leftarrow$  ObtenerFeret( $IPC_R$ )   ▷ ver sec. 3.3.1
9:    $D_{px} \leftarrow IPF_{min}$                                    ▷ ver ec. 48
10:   $k \leftarrow D_{um}/D_{px}$                                    ▷ ver ec. 50
11: Fin Si

```

3.4. Adquisición de muestras

Teniendo el sistema calibrado a una distancia de calibración $Z_{calib} = 11,83 \text{ cm}$, hallada en la sección 3.3, se procede a la adquisición de muestras a una resolución espacial constante de 2560 píxeles para el largo y 1920 píxeles para el ancho (2560x1920).

Las medidas de ancho (CO_{ancho}) y largo (CO_{alto}) del área comprendida por el campo de observación (CO) se hallan convirtiendo las medidas de la resolución espacial en píxeles a unidades métricas de longitud mediante el factor de escala k como se muestra en las ecuaciones (52) y (53):

$$CO_{ancho} = 2560 \cdot k, \quad (52)$$

$$CO_{alto} = 1920 \cdot k. \quad (53)$$

Por consiguiente, los valores experimentales del campo de observación se calculan reemplazando el factor de escala $k = 9,415 \times 10^{-3} [mm/px]$ hallado en la ecuación (51). En las ecuaciones (54) y (55) se obtienen las medidas experimentales en unidades métricas del campo de observación.

$$CO_{ancho} = 2560 \cdot 9,415 \times 10^{-3} = 24,1024 [mm], \quad (54)$$

$$CO_{alto} = 1920 \cdot 9,415 \times 10^{-3} = 18,0768 [mm]. \quad (55)$$

Es importante tener en cuenta que el tornillo debe estar ubicado dentro del patrón circular de luz con el fin de evitar errores de procesamiento en la siguiente etapa (ver fig. 43).

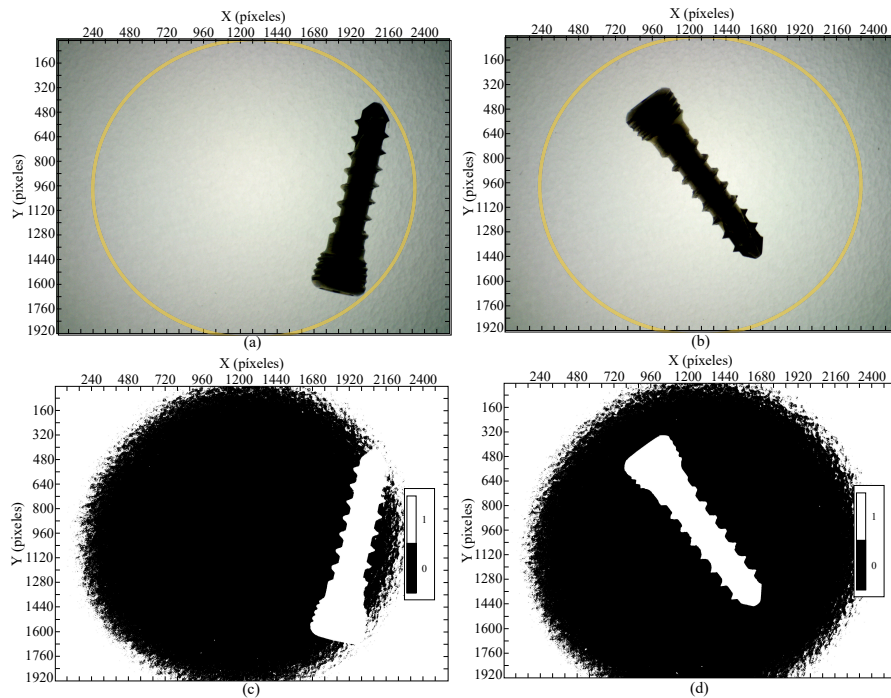


Figura 43. (a) Muestra errónea y (b) muestra correcta, con sus respectivas imágenes binarizadas (c) y (d).

3.5. Algoritmo de medición automática del tornillo

El algoritmo de medición automática requiere de una imagen RGB del tornillo (I) ubicado en cualquier posición sobre la región circular de la base LED y un factor de escala k que determina la calibración del sistema. El proceso de medición automática se divide en dos etapas: detección del tornillo y medición del tornillo.

3.5.1. Detección del tornillo. La imagen I , es una imagen bidimensional del tornillo, adquirida con iluminación a contraluz (ver fig. 43(b)). Luego, I es binarizada a partir del algoritmo automático ISODATA, mencionado en la sección 3.3.1. Este método facilita una correcta segmentación entre el fondo y el tornillo, ya que la región del objeto en la imagen se encuentra muy bien definida por la iluminación a contraluz. Después, a partir del nivel de intensidad promedio inicial $T_0 = 177$ y la imagen I en escala de grises (I_α) se obtienen los valores $u_1 = 119$ y $u_2 = 198$. En la figura 43(d) se encuentra la imagen binarizada del tornillo (I_{bin}) retornada por el algoritmo ISODATA.

Sin embargo, en I_{bin} se evidencia una región blanca que se produce por la subexposición de píxeles en la imagen I , los cuales son provocados a la radiación de luz centrada no uniforme en la base LED. Para segmentar la región del tornillo respecto a la región circular, se considera que los píxeles de mínima intensidad en todo el campo xy de la imagen en escala de grises I_α están contenidos en el conjunto de píxeles pertenecientes a la región binaria del tornillo (R).

Teniendo en cuenta la anterior condición, se identifican los píxeles de mínima intensidad $f(x,y) = 0$ de la imagen del tornillo en escala de grises I_α y se encuentra el centroide \bar{X}_α de una

región (R_α) representado por los puntos (\bar{x}, \bar{y}) . como se muestra en la figura 44(a). De esta manera, se garantiza que el punto coordenado (\bar{x}, \bar{y}) es de mínima de intensidad y pertenece a la región binaria del tornillo R (ver fig. 44(b))

Remplazando el número de píxeles que conforman la región $|R| = 184938$, la sumatoria de las coordenadas $\sum x_i = 229069138$ y $\sum y_i = 161036673$ en las ecuaciones (20) y (21), se calculan las coordenadas experimentales del centroide \bar{X}_α en (56) y (57):

$$\bar{x} = \frac{1}{184938} \cdot (229069138) = 1239, \quad (56)$$

$$\bar{y} = \frac{1}{1132257} \cdot (161036673) = 871. \quad (57)$$

resultando \bar{X}_α con los puntos coordenados $(\bar{x}, \bar{y}) = (1239, 871)$.

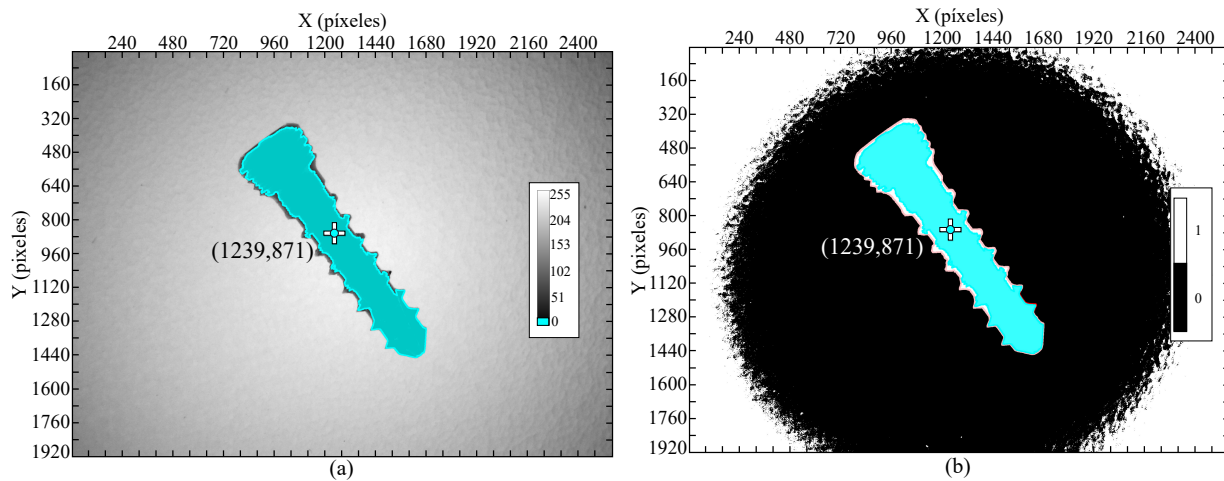


Figura 44. (a) Región R_α segmentada con centroide \bar{X}_α y (b) región R_α contenida en la región binaria R .

Por lo tanto, como el centroide \bar{X}_α pertenece a la región binaria del tornillo R (ver fig. 44(b)), es posible segmentar el tornillo y la región circular en la imagen binaria I_{bin} mediante el algoritmo de inundación, el cual se puede interpretar como una inundación de agua que comienza desde el píxel (\bar{x}, \bar{y}) y fluye a través de la región plana R (Burger and Burge, 2016). El proceso de inundación es iterativo y se basa en comparar el valor de intensidad de un píxel con sus píxeles vecinos, agrupándose los píxeles pertenecientes a la región blanca del tornillo hasta toparse con el fondo negro.

Finalmente, teniendo la región R segmentada, se realiza el recorrido en el conjunto de puntos para determinar el contorno de la región C_R de la misma manera que en la sección 3.3.1. Experimentalmente, se determinan 2560 puntos coordenados pertenecientes al contorno de la región del tornillo (C_R) como se muestra en la figura 45(a). Por último, se genera una máscara de la región blanca del tornillo R y se ubica sobre un fondo completamente negro para crear una imagen segmentada del tornillo I_{seg} (ver fig. 45(b)).

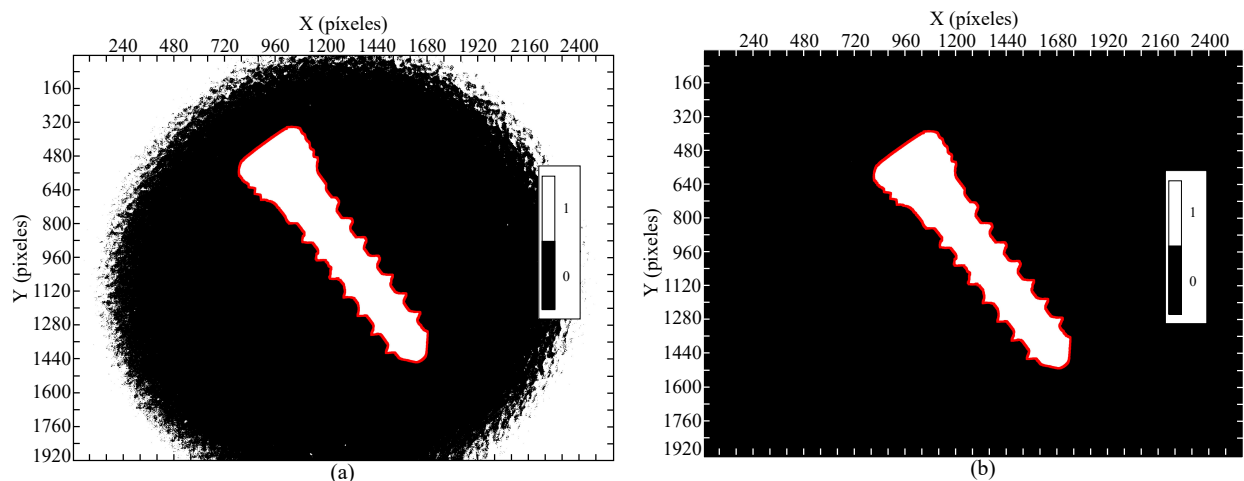


Figura 45. (a) Contorno del tornillo C_R delimitado en rojo e (b) imagen segmentada I_{seg} con el contorno C_R .

siendo P_a el número total de bordes de los píxeles pertenecientes a C_R y P_b el número total de bordes etiquetados como no adyacentes.

Reemplazando $P_a = 4552 \text{ px}$ y $P_b = 1391 \text{ px}$ se obtiene P_{px} en la ecuación (60):

$$P_{px} = 4552 \text{ px} - [1391 \text{ px} \cdot (2 - \sqrt{2})] = 3737,171 \text{ px}. \quad (60)$$

Luego, se calcula el valor del perímetro (P) equivalente a P_{px} en unidades métricas de longitud a partir de la ecuación (61):

$$P = k \cdot P_{px}, \quad (61)$$

donde P_{px} es el perímetro calculado anteriormente y k es el factor de escala de calibración del sistema.

Reemplazando $k = 9,415 \times 10^{-3} [\text{mm}/\text{px}]$ hallado en la sección 3.3.1 y $P_{px} = 3737,171 \text{ px}$ se obtiene el valor del perímetro experimental en la ecuación (62):

$$P = 9,415 \times 10^{-3} \cdot 3737,171 = 35,185 \text{ mm}. \quad (62)$$

Por otro lado, el área (A_{px}) en unidades de píxeles se obtiene a partir de la ecuación (15). Después, se calcula el valor del área A equivalente a A_{px} en unidades métricas con la ecuación (63):

$$A = k^2 \cdot A_{px}, \quad (63)$$

donde A_{px} es el total de píxeles contenidos en la región del tornillo R .

Reemplazando $A_{px} = 284576 \text{ px}^2$ y $k = 9,415 \times 10^{-3} [\text{mm}/\text{px}]$, en la ecuación (64) se obtiene el área experimental:

$$A = 8.8642225 \times 10^{-5} \cdot 284576 = 25,225 \text{ mm}^2. \quad (64)$$

Posteriormente, se obtiene el valor de ancho (F_{min}) de Feret en unidades de píxeles a partir de la ecuación (12) reemplazando los puntos $(F_{x_1}, F_{y_1}) = (801, 591)$ y $(F_{x_2}, F_{y_2}) = (1089, 366)$ (ver ec. 65). De la misma manera, el valor de largo (F_{max}) de Feret se obtiene a partir de $(F_{x_3}, F_{y_3}) = (1012, 341)$ y $(F_{x_4}, F_{y_4}) = (1647, 1445)$ como se muestra en la ecuación (65):

$$F_{minpx} = \sqrt{(801 - 1089)^2 + (591 - 366)^2} = 365,470 \text{ px}, \quad (65)$$

$$F_{maxpx} = \sqrt{(1012 - 1647)^2 + (341 - 1445)^2} = 1273,594 \text{ px}.$$

Luego, para obtener el valor de ancho (Rt_{min}) en unidades de píxeles, a partir del cuadro delimitador alineado al eje mayor, se utiliza la ecuación (12) reemplazando los puntos $(Rx_1, Ry_1) = (1042, 306)$ y $(Rx_2, Ry_2) = (753, 530)$ (ver ec. 66). De la misma manera, el valor de largo (Rt_{max}) del cuadro delimitador alineado al eje mayor se obtiene a partir de $(Rx_3, Ry_3) = (753, 530)$ y $(Rx_4, Ry_4) = (1533, 1533)$ como se muestra en la ecuación (66):

$$Rt_{minpx} = \sqrt{(1042 - 753)^2 + (306 - 530)^2} = 365,646 \text{ px}, \quad (66)$$

$$Rt_{maxpx} = \sqrt{(753 - 1533)^2 + (530 - 1533)^2} = 1270,593 \text{ px}.$$

Los valores de ancho y largo en unidades métricas se calculan a partir de k y sus valores respectivos en píxeles (ver ec. 67 y 68), los cuales se obtienen mediante los diámetros de Feret y lados del cuadro delimitador alineado al eje mayor (ver sec. 2.4.5).

$$F_{min} = F_{minpx} \cdot k, \quad F_{max} = F_{maxpx} \cdot k, \quad (67)$$

$$Rt_{min} = Rt_{minpx} \cdot k, \quad Rt_{max} = Rt_{maxpx} \cdot k. \quad (68)$$

Reemplazando $F_{minpx} = 365,470 \text{ px}$, $F_{maxpx} = 1273,594 \text{ px}$, $Rt_{minpx} = 365,646 \text{ px}$, $Rt_{maxpx} = 1270,593 \text{ px}$ y $k = 9,415 \times 10^{-3} [\text{mm}/\text{px}]$ en las ecuaciones (69) y (70), se calculan los valores de largo (max) y ancho (min):

$$F_{min} = 365,470 \cdot 9,415 \times 10^{-3} = 3,441 \text{ mm}, \quad (69)$$

$$F_{max} = 1273,594 \cdot 9,415 \times 10^{-3} = 11,990 \text{ mm},$$

$$Rt_{min} = 365,646 \cdot 9,415 \times 10^{-3} = 3,442 \text{ mm}, \quad (70)$$

$$Rt_{max} = 1270,593 \cdot 9,415 \times 10^{-3} = 11,962 \text{ mm}.$$

Las longitudes experimentales calculados para ancho y largo pueden ser vistas en la figura 47. Estas longitudes se tabulan en la tabla 6 junto con los valores experimentales del perímetro y área hallados en esta sección.

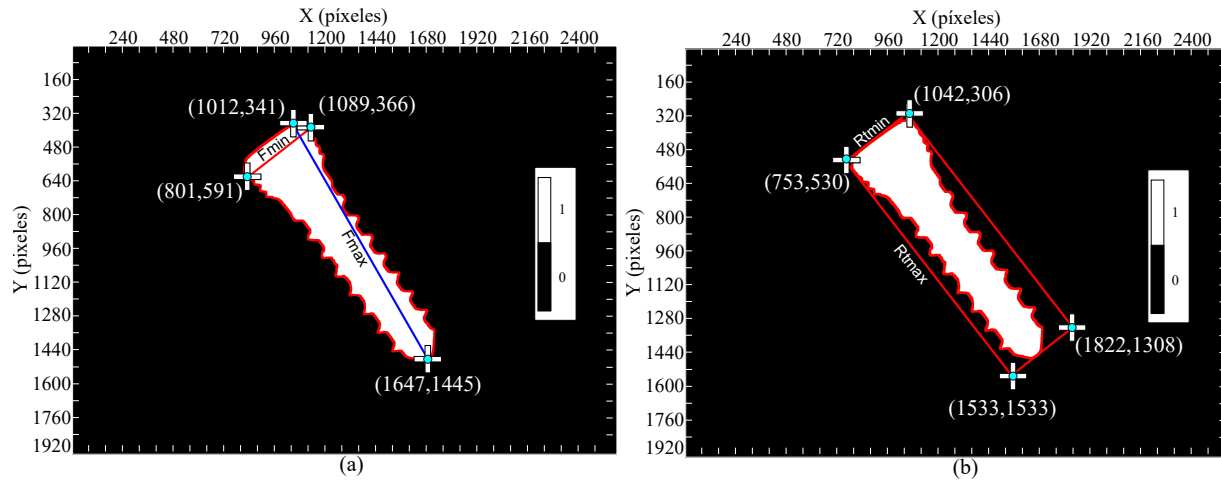


Figura 47. (a) Diámetros de Feret y (b) cuadro delimitador alineado al eje mayor obtenidos experimentalmente.

Tabla 6

Medidas experimentales del largo y ancho del tornillo a una distancia $Z = 12$ cm.

P [mm]	A [mm ²]	F_{min} [mm]	F_{max} [mm]	Rt_{min} [mm]	Rt_{max} [mm]
35,185	25,225	3,441	11,990	3,442	11,962

Finalmente, se representa el ancho y largo utilizando Rt_{max} y F_{min} , respectivamente, mediante dos líneas longitudinales trazadas sobre la imagen segmentada del tornillo I_{seg} . Luego, la ecuación (16) es utilizada para construir el cuadro delimitador (A_{rec}) que encierra el área mínima de C_R a partir de los puntos coordenados mínimos $(x_{min}, y_{min}) = (784, 339)$ y máximos $(x_{max}, y_{max}) = (1678, 1453)$ como se observa en las figuras 48(a) y 48(b). Después, se recorta el área del objeto (en blanco) encerrado por A_{rec} con respecto al fondo (en negro) de la imagen I_{bin} , retornando una nueva imagen recortada (I_{rec}) (ver fig. 48(c)).

La visión general del proceso de mediación automática del tornillo se encuentra detallada en el algoritmo 2.

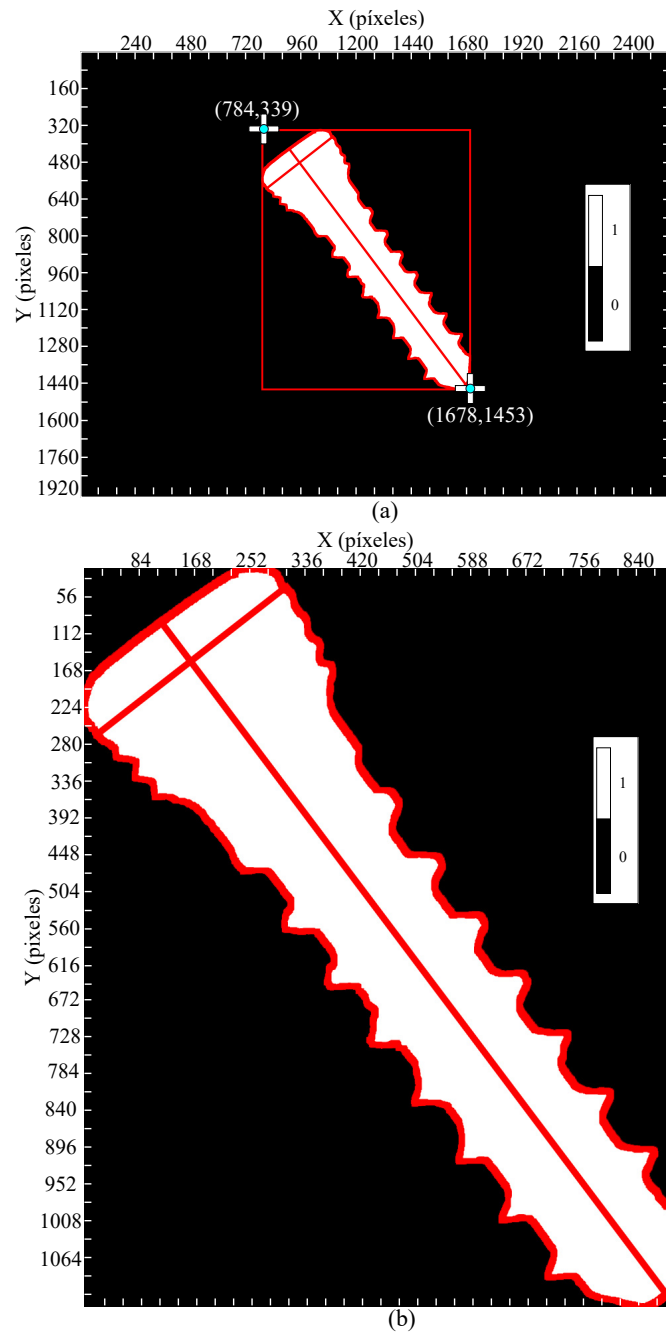


Figura 48. (a) Ajuste del cuadro delimitador con puntos coordenados máximos y mínimos e (b) imagen recortada del tornillo I_{rec} .

Algoritmo 2 Medición automática propuesta (visión general). Los detalles se encuentran en los algoritmos 3 y 4. Complejidad: $O(n^2)$.

- 1: **MedicionAutomatica**(I, k)
Entrada: I es una imagen RGB del tornillo capturada con el microscopio USB y factor de escala k . Retorna la estimación de medidas $A, P, F_{min}, F_{max}, Rt_{min}, Rt_{max}$ en escala métrica.
 - 2: $C_R, I_{seg} \leftarrow$ **DetectarTornillo**(I) ▷ ver alg. 3
 - 3: $\langle A, P, F_{min}, F_{max}, Rt_{min}, Rt_{max} \rangle \leftarrow$ **MedirTornillo**(C_R, I_{seg}, k) ▷ ver alg. 4
 - 4: **Retornar** $\langle A, P, F_{min}, F_{max}, Rt_{min}, Rt_{max} \rangle$
-

Algoritmo 3 Detección del tornillo. A partir de un píxel perteneciente al objeto, ubicado en $\langle \bar{x}, \bar{y} \rangle$, se detecta el tornillo y se obtiene su contorno C_R . Descripción del proceso: sección 3.5.1.

- 1: **DetectarTornillo**(I)
Entrada: I es una imagen bidimensional RGB del tornillo. Retorna imagen segmentada del tornillo I_{seg} y un vector con n puntos del contorno de la región $C_R = \langle X_R, Y_R \rangle$ donde $X_R = (x_0, \dots, x_{n-1})$ y $Y_R = (y_0, \dots, y_{n-1})$.
 - 2: $\langle \bar{x}, \bar{y} \rangle \leftarrow$ **ObtenerCentroide**(I) ▷ ver sec. 3.5.1
 - 3: $I_{bin} \leftarrow$ **Binarizar**(I) ▷ ver sec. 3.5.1
 - 4: $C_R \leftarrow$ **ObtenerContorno**($\bar{x}, \bar{y}, I_{bin}$) ▷ ver sec. 3.5.1
 - 5: **Si** $\text{Tamaño}(C_R) = 0$ **entonces**
 - 6: **Finalizar** algoritmo ▷ tornillo no detectado
 - 7: **No**
 - 8: $I_{seg} \leftarrow$ **Segmentar**(C_R, I_{bin}) ▷ ver sec. 3.5.1
 - 9: **Retornar** C_R, I_{seg}
 - 10: **Fin Si**
-

Algoritmo 4 Medición del perfil bidimensional del tornillo. Se obtienen los valores estimados de área, perímetro, ancho y largo del tornillo mediante C_R . Descripción del proceso: sección 3.5.2.

- 1: **MedirTornillo**(C_R, I_{seg}, k)
Entrada: Vector de puntos $C_R = \langle X_R, Y_R \rangle$, imagen binaria segmentada del tornillo I_{seg} y factor de escala k del sistema. Retorna los tipos de medidas $\langle A, P, F_{min}, F_{max}, Rt_{min}, Rt_{max} \rangle$.
 - 2: $P \leftarrow$ **ObtenerPerimetro**(C_R, I_{seg}, k) ▷ ver Ec. 61
 - 3: $A \leftarrow$ **ObtenerArea**(C_R, I_{seg}, k) ▷ ver Ec. 63
 - 4: $\langle F_{min}, F_{max} \rangle \leftarrow$ **ObtenerFeret**(C_R, I_{seg}, k) ▷ ver Ec. 67
 - 5: $\langle Rt_{min}, Rt_{max} \rangle \leftarrow$ **ObtenerRect**(C_R, I_{seg}, k) ▷ ver Ec. 68
 - 6: $I_{rec} \leftarrow$ **RecortarAreaCuadro**(C_R, I_{seg}) ▷ ver sec. 3.5.2
 - 7: **Retornar** $\langle A, P, F_{min}, F_{max}, Rt_{min}, Rt_{max} \rangle$
-

3.6. Interfaz

Se diseña un diagrama de actividades (ver fig. 49) en base a la funcionalidad de medición automática del tornillo, en la cual se contempla una visión global de la metodología del proyecto mediante una interfaz desarrollada en ImageJ llamada Osteocontrol.

ImageJ es un programa de procesamiento de imágenes digitales, programado en Java y distribuido bajo dominio público. Se puede ejecutar en los sistemas operativos Windows, Linux y MacOS para arquitecturas de 32 bits y 64 bits. Además, este software proporciona extensibilidad vía plugins Java, permitiendo el desarrollo de aplicaciones personalizadas como Osteocontrol (Rueden et al., 2017; Mutterer, 2020, 2016).

El objetivo principal de Osteocontrol es conectar al usuario con el sistema de control y brindar una experiencia automatizada para el análisis métrico de los tornillos (ver fig. 50). La ventana principal de la interfaz es una barra de herramientas que permite diferentes funcionalidades como el manejo del microscopio digital USB, donde se implementa una grilla que facilita una buena adquisición de muestras (ver fig. 51), y la medición automática de los tornillos. En la tabla 7 se describen las principales funcionalidades de Osteocontrol y en la sección 3.6.1 y 3.6.2 se documenta el proceso en la interfaz para ejecutar la calibración y medición automática.

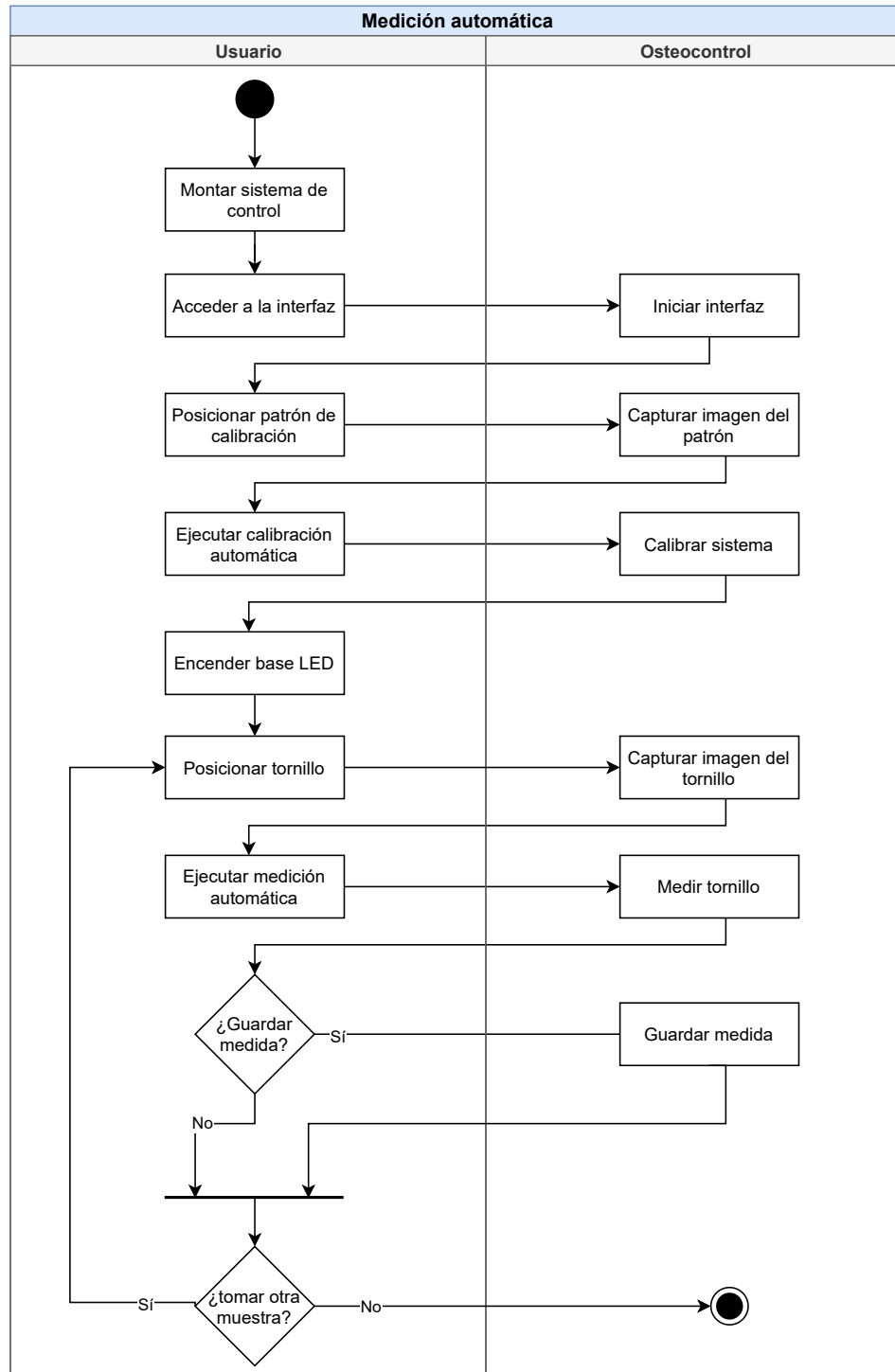


Figura 49. Diagrama de actividades para medición automática de tornillos.

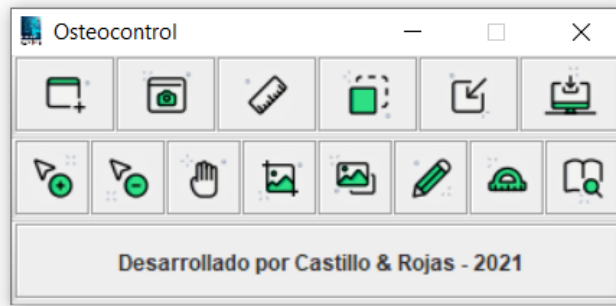


Figura 50. Interfaz gráfica de usuario desarrollada.

Tabla 7

Funcionalidades de Osteocontrol. Íconos diseñados por PixelPerfect (2021).

Ícono	Nombre	Atajo	Funcionalidad
	Abrir archivo	Ctrl + O	Abrir archivos de extensiones BMP, JPEG, TIFF, CSV, entre otros
	Encender cámara	Mayus + E	Mostrar ventana de captura si se encuentra conectado el microscopio USB al computador
	Calibrar sistema	Mayus + C	Establecer la calibración del sistema de manera automática o manual, guardar y cargar el perfil de calibración y mostrar el factor de escala de calibración k
	Medición automática	Mayus + A	Medir de manera automática el área, perímetro y largo y ancho del tornillo en una imagen
	Medir	Ctrl + M	Realizar medidas manuales de segmento, ángulo o rectángulo trazado en la imagen
	Guardar como BMP	Ctrl + S	Guardar imagen activa en formato BMP
	Zoom	+	Ampliar imagen
	Zoom	-	Reducir imagen
	Mover	Barra espaciadora	Desplazarse sobre una imagen ampliada
	Seleccionar región	Mayus + R	Seleccionar región rectangular sobre la imagen
	Duplicar imagen o región	Ctrl + Mayus + D	Duplicar la imagen o una región de la imagen
	Trazar segmento	Mayus + D	Trazar una línea de forma manual en la imagen desde un píxel inicial hasta un píxel final
	Trazar ángulo	Mayus + F	Trazar un ángulo de forma manual en la imagen a partir de un píxel inicial, intermedio y final
	Ayuda	Mayus + H	Redireccionar a pagina web con documentación y manual de uso de la interfaz

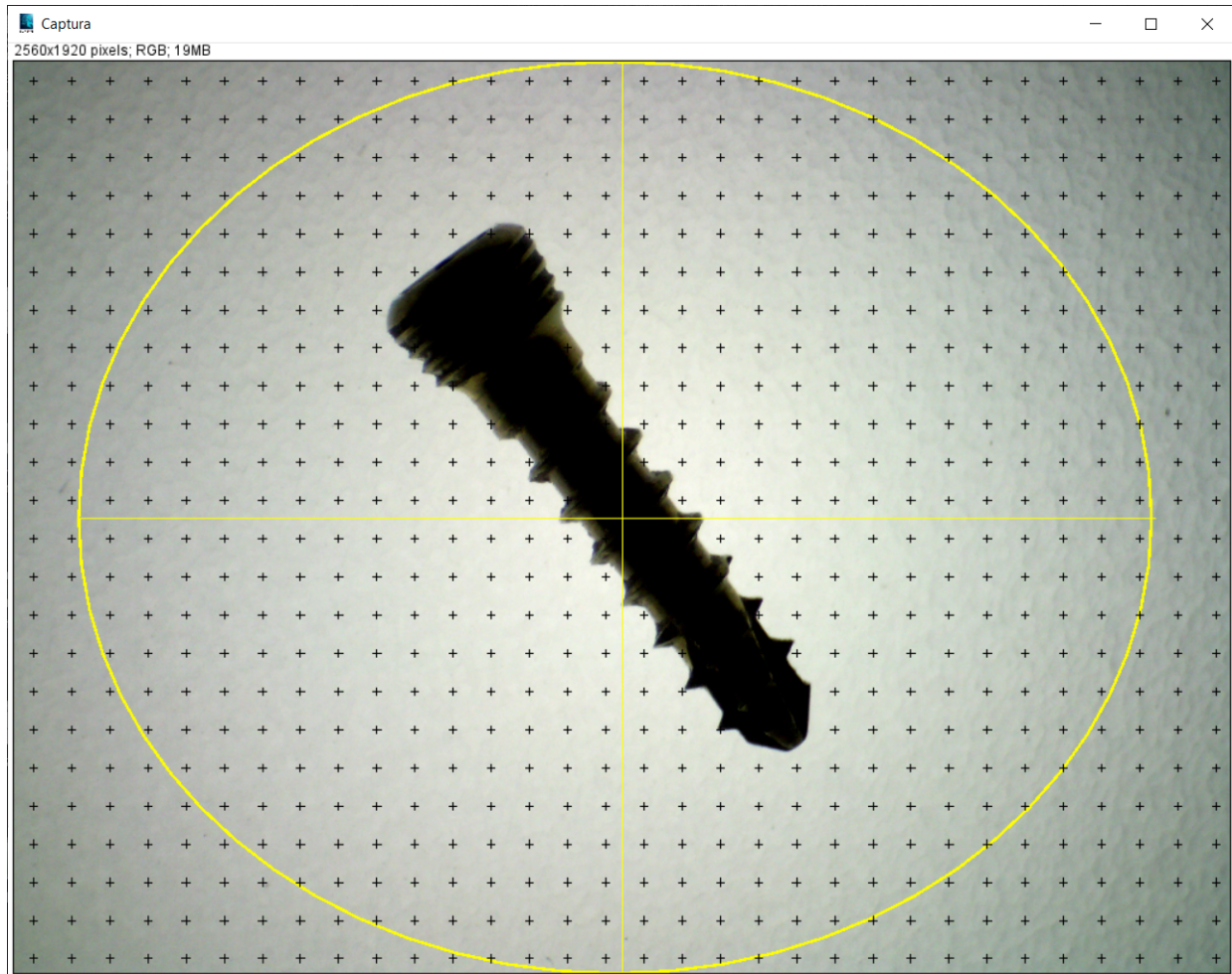


Figura 51. Grilla implementada para una mejor adquisición de muestras con el microscopio.

3.6.1. Calibración automática en Osteocontrol. Para calibrar el sistema, Osteocontrol requiere de una imagen del patrón de calibración adquirida con el microscopio USB en el botón *Encender cámara*. Además, es posible abrir una imagen guardada previamente con el botón *Abrir archivo*.

Posteriormente, se presiona el botón *Calibrar sistema*, el cual muestra una ventana donde se despliega una lista de opciones que permite calibrar el sistema de manera automática, manual o

cargando un perfil de calibración guardado. Luego, se selecciona la opción de calibración automática (ver fig. 52(a)).

Finalmente, se carga una nueva ventana que permite ingresar los valores correspondientes al patrón de calibración y condiciones experimentales: referencia, magnificación Mc , distancia conocida D_{um} y unidades (ver fig. 52(b)). El sistema se calibra mediante el algoritmo 1 y se retorna el perfil de calibración con el valor D_{px} (ver fig. 52(c)). Este perfil se puede guardar para calibrar el sistema posteriormente sin repetir todo el proceso anterior .

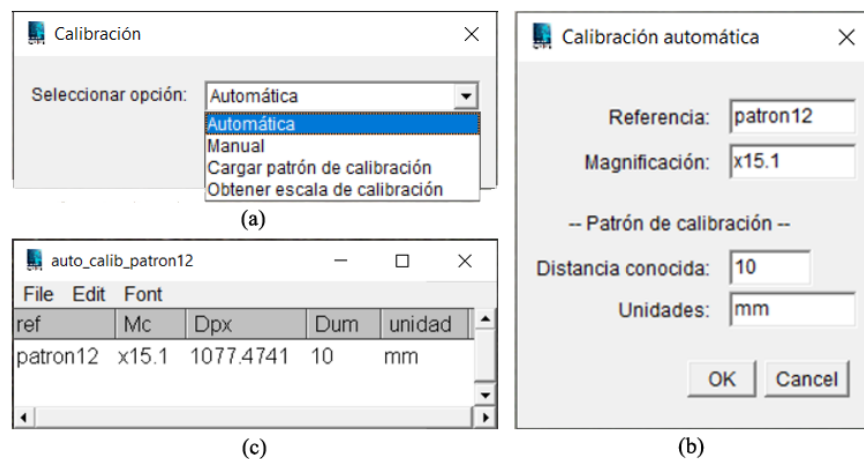


Figura 52. Calibrar sistema: (a) selección de opción de calibración, (b) ingreso de valores experimentales y (c) calibración del sistema con los valores de la tabla o perfil de calibración.

3.6.2. Medición automática en Osteocontrol. Se adquiere una imagen del tornillo por medio del microscopio USB utilizando el botón *Encender cámara* o una imagen adquirida previamente por medio de botón *Abrir archivo*. Posteriormente, se presiona el botón de *Medición automática* para ejecutar el algoritmo 2.

Finalmente, si el sistema se encuentra calibrado, se muestra la tabla *Mediciones Automáticas* con los valores en escala métrica del perímetro, área y largo y ancho del tornillo hallados

respectivamente con Feret y cuadro delimitador alineado al eje mayor. Además, se muestra I_{seg} con las longitudes del largo y ancho del tornillo trazadas (ver fig. 53).

Osteocontrol permite registrar más de una medición en la tabla *Mediciones Automáticas*. Esta tabla tabula cada medición realizada con el nombre de la imagen correspondiente y puede guardarse en formato CSV para facilitar el análisis de los datos.

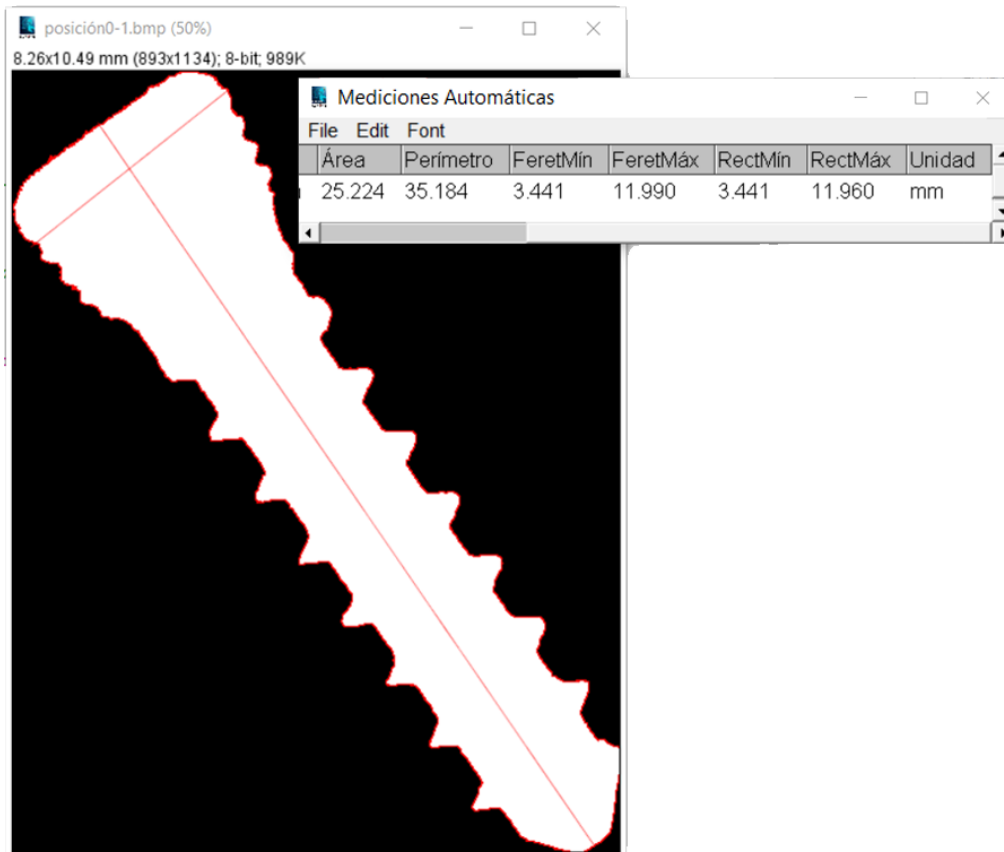


Figura 53. Medición del tornillo utilizando Osteocontrol.

4. Resultados

Siguiendo la metodología propuesta, el sistema de control planteado (ver fig. 54) es validado en términos de precisión y exactitud métrica a partir de los siguientes tipos de análisis:

- Análisis de exactitud: distancia Z variable y posición del tornillo variable. Para cada Z , se toman muestras del tornillo ubicado en cuatro posiciones establecidas.
- Análisis de precisión: distancia Z fija y posición del tornillo variable. Para un Z , se toman muestras del tornillo ubicado en quince posiciones al azar.



Figura 54. Montaje del sistema de control propuesto.

En general, el proceso consta en obtener los perfiles binarizados (ver fig. 55) y las mediciones de los tornillos para todas las muestras adquiridas mediante el algoritmo de medición

automática (ver alg. 1). Los resultados son agrupados por distancia en Z y se filtran los valores:

- F_{max} y R_{max} : largo del tornillo.
- F_{min} y R_{min} : ancho del tornillo.

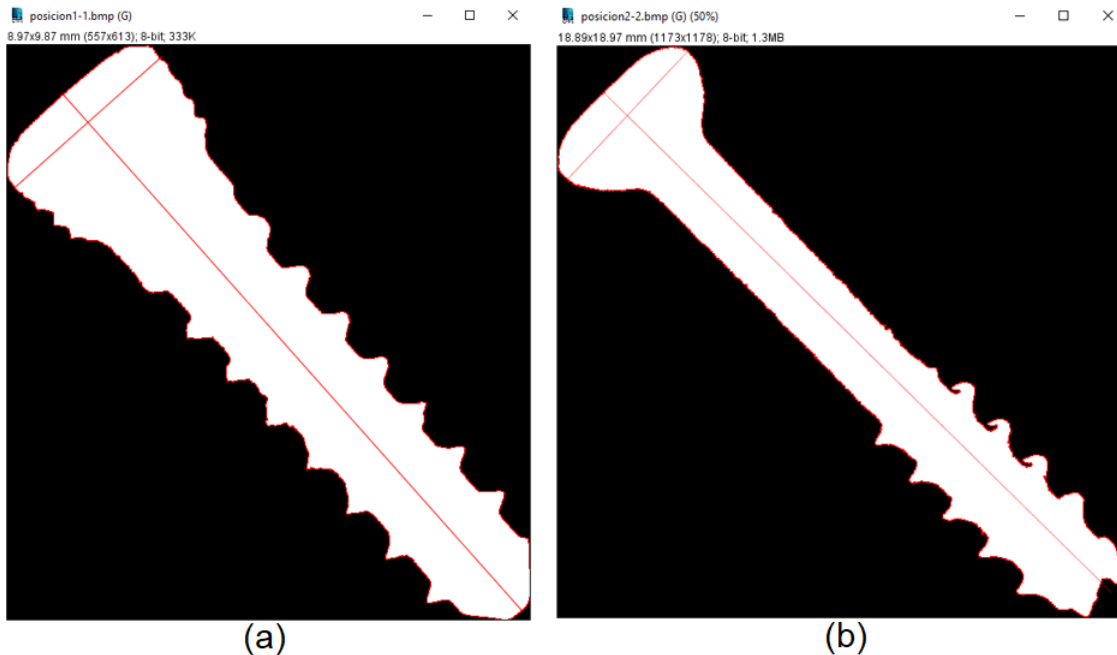


Figura 55. Perfiles binarizados del (a) tornillo tipo A y (b) tipo B con sus respectivos largo y ancho en color rojo.

Finalmente, el largo y ancho de los tornillos son medidos con el calibrador pie de rey como se muestra en la figura 56 para obtener las medidas de referencia o teóricas (ver tabla 8). Estos valores se comparan respecto las medidas experimentales obtenidas por el sistema de control, calculando el error relativo porcentual (ver ec. 71):

$$Error = \frac{|V_T - V_{exp}|}{V_T} * 100, \quad (71)$$

donde V_T es el valor teórico y V_{exp} es el valor experimental. A partir de la ecuación (71), se calculan los errores E_1 , E_2 , E_3 y E_4 :

- E_1 : F_{max} vs. largo medido con calibrador
- E_2 : F_{min} vs. ancho medido con calibrador
- E_3 : R_{max} vs. largo medido con calibrador
- E_4 : R_{min} vs. ancho medido con calibrador

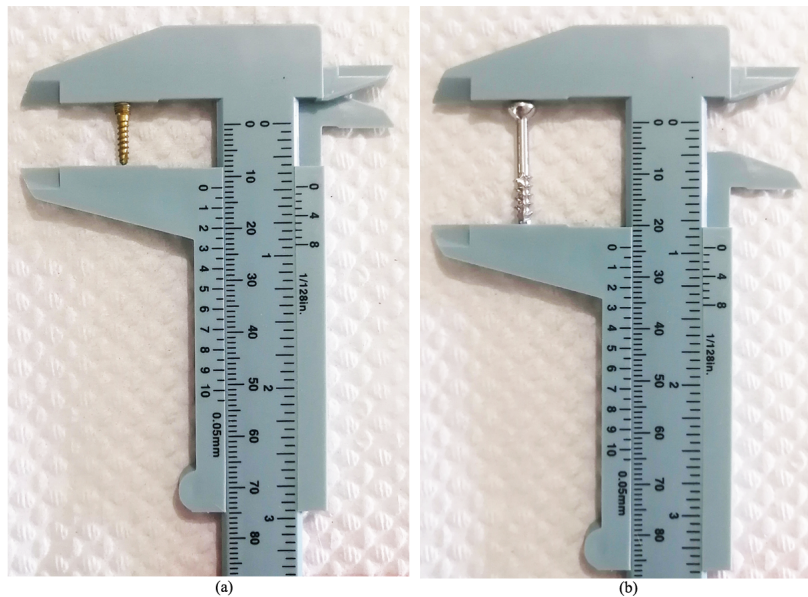


Figura 56. Toma de medida del (a) tornillo A y (b) tornillo B con calibrador pie de rey.

Tabla 8

Medidas teóricas tomadas con el calibrador pie de rey de los tornillos tipo A y tipo B.

Tipo	Ancho [mm]	Largo [mm]
A	3.45	12
B	6	24

4.1. Análisis de exactitud

Para analizar la exactitud del sistema, los tornillos *A* y *B* son capturados a tres diferentes distancias de referencia *Z*:

- Para el tornillo tipo *A*, los valores de *Z* son de 1 *cm*, 6 *cm* y 12 *cm*.
- Para el tornillo tipo *B*, los valores de *Z* son de 1 *cm*, 3 *cm* y 5 *cm*.

Para cada distancia *Z* propuesta, los tornillos se posicionan aproximadamente en ángulos de 0°, 45°, 90° y 135° con respecto a la abscisa (ver fig.57), obteniéndose un total de 12 muestras para cada tornillo. Los resultados de este análisis se encuentran en las secciones 4.1.1 y 4.1.2.

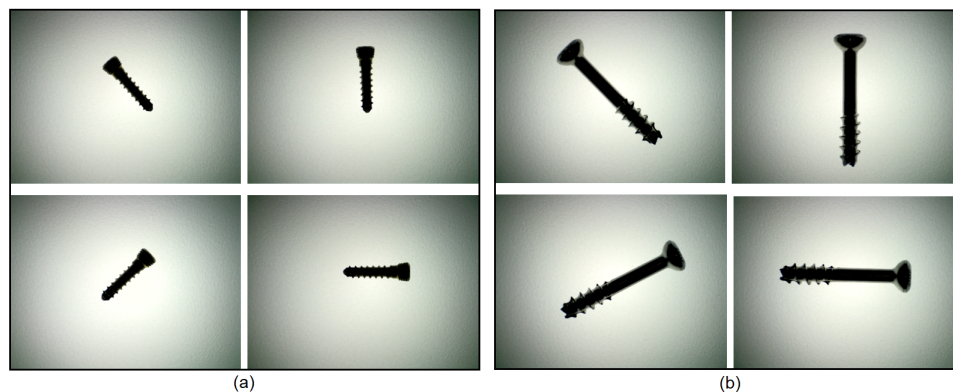


Figura 57. Muestras de tornillos (a) tipo *A* y (b) tipo *B* en las cuatro posiciones establecidas a una distancia $Z = 1 \text{ cm}$.

4.1.1. Tornillo tipo A. Para el tornillo *A*, las medidas obtenidas se tabulan en la tabla 9.

El error máximo en ambos algoritmos se presenta a una distancia $Z = 1 \text{ cm}$ con 1,142 % y 2,435 % para largo y ancho respectivamente. Por otro lado, las medidas más exactas se encuentran a una distancia $Z = 12 \text{ cm}$ en la posición de 90° y 135°, siendo de 12,010 *mm* y 11,990 *mm* para largo y, 3,446 *mm* y 3,441 *mm* para ancho.

Tabla 9

Medidas obtenidas para el tornillo A variando la distancia de referencia Z.

Distancias [cm]	Posición [°]	F_{max} [mm]	F_{min} [mm]	E_1 [%]	E_2 [%]	R_{max} [mm]	R_{min} [mm]	E_3 [%]	E_4 [%]
Z = 1	0	11,899	3,366	0,842	2,435	11,868	3,366	1,100	2,435
	45	11,886	3,397	0,950	1,536	11,863	3,397	1,142	1,536
	90	11,898	3,382	0,850	1,971	11,868	3,382	1,100	1,971
	135	11,895	3,386	0,875	1,855	11,886	3,386	0,950	1,855
Z = 6	0	11,907	3,374	0,775	2,203	11,889	3,374	0,925	2,203
	45	11,899	3,405	0,842	1,304	11,873	3,406	1,058	1,275
	90	11,908	3,385	0,767	1,884	11,876	3,387	1,033	1,826
	135	11,933	3,387	0,558	1,826	11,926	3,387	0,617	1,826
Z = 12	0	11,972	3,407	0,233	1,246	11,947	3,408	0,442	1,217
	45	11,978	3,427	0,183	0,667	11,947	3,427	0,442	0,667
	90	12,010	3,446	0,083	0,116	11,953	3,452	0,392	0,058
	135	11,990	3,441	0,083	0,261	11,960	3,441	0,333	0,261

4.1.2. Tornillo tipo B. Para el tornillo B las medidas obtenidas se tabulan en la tabla 10.

Tabla 10

Medidas obtenidas para el tornillo B variando la distancia de referencia Z.

Distancias [cm]	Posición [°]	F_{max} [mm]	F_{min} [mm]	E_1 [%]	E_2 [%]	R_{max} [mm]	R_{min} [mm]	E_3 [%]	E_4 [%]
Z = 1	0	23,850	5,861	0,625	2,317	23,763	5,863	0,987	2,283
	45	23,854	5,910	0,608	1,500	23,746	5,911	1,058	1,483
	90	23,849	5,871	0,629	2,150	23,774	5,871	0,942	2,150
	135	23,861	5,881	0,579	1,983	23,777	5,885	0,929	1,917
Z = 3	0	23,892	5,927	0,450	1,217	23,785	5,935	0,896	1,083
	45	23,887	5,953	0,471	0,783	23,806	5,958	0,808	0,700
	90	23,873	5,904	0,529	1,600	23,795	5,907	0,854	1,550
	135	23,901	5,868	0,413	2,200	23,818	5,868	0,758	2,200
Z = 5	0	24,128	5,968	0,533	0,533	23,981	5,981	0,079	0,317
	45	24,206	6,024	0,858	0,400	24,055	6,057	0,229	0,950
	90	24,061	5,968	0,254	0,533	23,938	5,972	0,258	0,467
	135	24,088	5,946	0,367	0,900	23,990	5,952	0,042	0,800

El error máximo en ambos algoritmos se presenta a una distancia $Z = 1$ cm con 1,058% y 2,317% para largo y ancho respectivamente. Por otro lado, las medidas registradas más exactas se encuentran a una distancia $Z = 5$ cm en la posición de 90° y 135°, siendo de 24,061 mm y 23,990

mm para largo y, $5,968 mm$ y $5,972 mm$ para ancho.

4.2. Análisis de precisión

La precisión del sistema se evalúa por medio de 15 muestras del tornillo A (ver fig. 58) a una distancia fija de referencia $Z = 12 cm$ donde se varía el ángulo y posición del tornillo A sobre la base LED. Los resultados obtenidos son mostradas en la tabla 11.

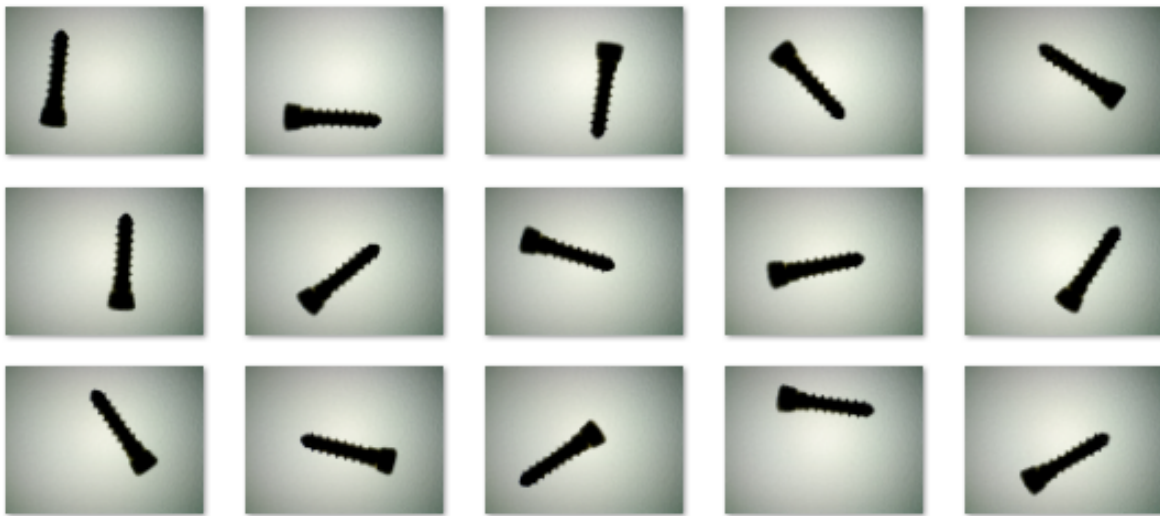


Figura 58. Muestras de tornillo A en diferentes posiciones a una distancia $Z = 12 cm$.

Los valores obtenidos para el largo se encuentran dentro de un rango de $11,929 mm$ y $12,036 mm$, con un promedio de $11,984 mm$ para F_{max} y $11,961 mm$ para R_{max} y un error de $0,177\%$ y $0,326\%$ respectivamente. Por otro lado, los valores para el ancho se encuentran dentro de un rango de $3,409 mm$ y $3,477 mm$, con un promedio de $3,433 mm$ para F_{min} y $3,434 mm$ para R_{min} y un error del $0,973\%$ y $0,986\%$ respectivamente. Por lo tanto, se observa que las medidas son casi exactas a las obtenidas por el calibrador sin importar a la posición en la que se encuentre el tornillo.

Tabla 11

Tabla de medidas del tornillo tipo A a una distancia $Z = 12$ cm.

Distancias Z [cm]	F_{max} [mm]	F_{min} [mm]	E_1 [%]	E_2 [%]	R_{max} [mm]	R_{min} [mm]	E_3 [%]	E_4 [%]
	11,985	3,438	0,125	0,348	11,962	3,438	0,317	0,348
	11,977	3,434	0,192	0,464	11,967	3,434	0,275	0,464
	11,999	3,409	0,008	1,188	11,971	3,410	0,242	1,159
	11,976	3,425	0,200	0,725	11,929	3,425	0,592	0,725
	11,983	3,431	0,142	0,551	11,954	3,431	0,383	0,551
	11,974	3,437	0,217	0,377	11,962	3,439	0,317	0,319
	11,971	3,439	0,242	0,319	11,946	3,439	0,450	0,319
Z = 12	11,956	3,421	0,367	0,841	11,949	3,421	0,425	0,841
	11,995	3,426	0,042	0,696	11,969	3,427	0,258	0,667
	11,953	3,441	0,392	0,261	11,949	3,441	0,425	0,261
	12,002	3,442	0,017	0,232	11,959	3,445	0,342	0,145
	11,974	3,422	0,217	0,812	11,963	3,422	0,308	0,812
	11,981	3,414	0,158	1,043	11,966	3,414	0,283	1,043
	11,995	3,440	0,042	0,290	11,977	3,440	0,192	0,290
	12,036	3,477	0,300	0,783	11,991	3,477	0,075	0,783
Promedios	11,984	3,433	0,177	0,595	11,961	3,434	0,326	0,582

En la figura 59 y 60 se ilustra la distribución de probabilidad a partir de las medidas experimentales del largo (F_{max}) y ancho (F_{min}) del tornillo, calculadas con el método más preciso: el algoritmo de Feret. De esta manera, es posible representar gráficamente la precisión del sistema del control en términos métricos. Para el largo se obtiene una media (μ_1) de 11,984 mm y una desviación estándar σ_1 de $\pm 0,02$ mm, y para el ancho se observa una media (μ_2) de 3,433 mm con una desviación estándar σ_2 de $\pm 0,01$ mm.

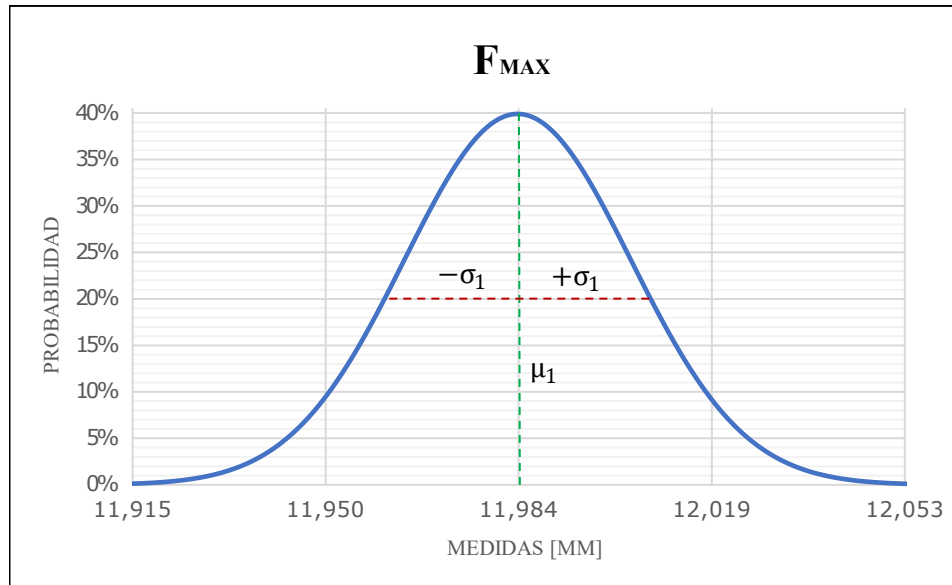


Figura 59. Precisión de medidas experimentales para F_{max} .

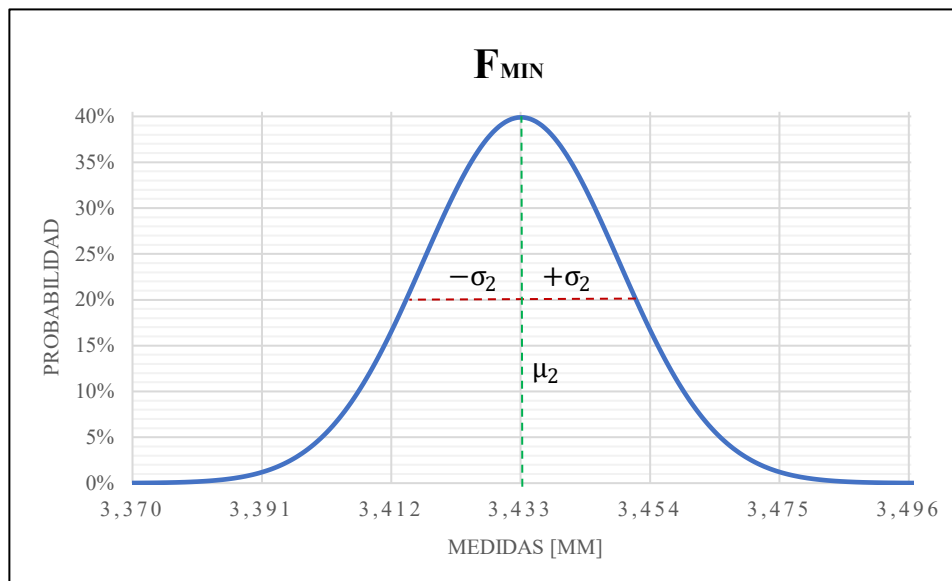


Figura 60. Precisión de medidas experimentales para F_{min} .

5. Conclusiones

Las condiciones de iluminación como el tipo y flujo de iluminación suministrado por la base LED definida en el sistema de control, garantizan la reducción de errores estocásticos provocados por la alta reflectividad del material y la iluminación del entorno. Por otro lado, una correcta calibración y adquisición de muestras dependen de parámetros como la distancia de trabajo, el enfoque y la resolución del microscopio digital, los cuales influyen significativamente en los errores sistemáticos presentados en la ejecución del algoritmo de medición automática.

A partir del análisis experimental, se comprueba que el nivel de precisión y exactitud de las medidas de largo y ancho de un tornillo ubicado en cualquier posición sobre la base LED es directamente proporcional a la distancia de referencia Z : a mayor distancia Z , mayor precisión y exactitud del sistema. Por otra parte, la orientación del tornillo es un factor que no altera notablemente los resultados, ya que se evidencia un mayor error en las medidas al variar Z que al variar la orientación del tornillo a una distancia Z fija.

A nivel de software, Osteocontrol es una interfaz intuitiva que cumple con los requerimientos establecidos, optimizando el proceso de inspección de calidad en términos de precisión mediante la implementación de algoritmos especializados en el análisis geométrico bidimensional.

Finalmente, se concluye que el sistema de control diseñado a partir de técnicas ópticas y de visión por computador satisface medidas de alta precisión y exactitud de tornillos utilizados en osteosíntesis respecto a otro sistema de medida como el calibrador pie de rey.

6. Recomendaciones

- Validar automáticamente las medidas del largo y ancho obtenidas respecto a las medidas de diseño, identificando el tipo de tornillo por referencia del fabricante mediante técnicas de inteligencia artificial.
- Automatizar el proceso de inspección acoplando una cinta transportadora para trasladar los tornillos hacia un punto de inspección, el cual funcione con el sistema de control planteado. De esta manera, es posible obtener mediciones sin intervención humana y en un menor tiempo.
- Mejorar la calibración del sistema promediando los factores de escala k obtenidos con imágenes del patrón en diferentes posiciones.
- Optimizar el proceso de calibración, teniendo en cuenta el desfase en Z con el diseño de un nuevo patrón cuadrado volumétrico de grosor igual al radio del tornillo a medir.
- Adaptar el algoritmo de medición automática para el análisis bidimensional de otras partes del tornillo según requerimientos específicos de diseño de fabricantes.
- En general, el sistema de control propuesto puede adaptarse para realizar mediciones de otros objetos metálicos que cumplan las condiciones experimentales establecidas.
- Desarrollar un complemento open source para ImageJ, basado en los algoritmos planteados en este trabajo, con el propósito de compartir con la comunidad que utiliza ImageJ.

Referencias Bibliográficas

- Barrena, E. and Ampuero, J. (2019). *Traumatología Y Ortopedia: Generalidades*. Tratado SECOT de cirugía ortopédica y traumatología. Elsevier Health Sciences.
- Besterfield, D. (2009). *Control de calidad* (8va ed.). Pearson Educación.
- Burger, W. and Burge, M. (2016). *Digital Image Processing: An Algorithmic Introduction Using Java* (2nd ed.). Texts in Computer Science. Springer-Verlag London.
<https://doi.org/10.1007/978-1-4471-6684-9>.
- Cognet, J.-M., Altman, M., and Simon, P. (2009). Material de osteosíntesis: tornillos y placas. *EMC-Técnicas Quirúrgicas-Ortopedia y Traumatología*, 1(1):1–10.
[https://doi.org/10.1016/S2211-033X\(09\)71603-2](https://doi.org/10.1016/S2211-033X(09)71603-2).
- De la Escalera, A. (2001). *Visión por computador: fundamentos y métodos*. Pearson, Prentice Hall.
- Debayle, J. (2019). Geometrical and morphometrical tools for the inclusion analysis of metallic alloys. *Metallurgical Research & Technology*, 116(5):508.
<https://doi.org/10.1051/metal/2019011>.
- Diligent (2021). *Fotografía de producto, conceptos básicos: Apertura y velocidad de disparo*.
<https://t.ly/L5wQ>.
- Dino-Lite (2021). *AM73915MZTL*. <https://www.dinolite.us/en/am73915mztl>.

- Gil, L. and Larez, L. (2013). Determinación de las causas de la falla una placa de compresion dinamica (DCP) y de un sistema de fijación con tornillos transpediculares para columna. In *Eleventh LACCEI Latin American and Caribbean Conference for Engineering and Technology*. LACCEI.
- Gonzalez, R. and Woods, R. (2018). *Digital Image Processing* (4th ed.). Pearson.
- Gryna, F. M., Chua, R. C. H., Defeo, J. A., and Magaña, J. P. (2007). *Método Juran: análisis y planeación de la calidad*. McGraw-hill New York.
- Guerrero, G. C. (2009). Complicaciones con clavos centromedulares. *Ortho-tips*, 5(2):175–181.
- Guerrieri, M., Parla, G., and Celauro, C. (2018). Digital image analysis technique for measuring railway track defects and ballast gradation. *Measurement*, 113:137–147. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2017.08.040>.
- Herrera-Baquero, L. P. and Prieto-Ortiz, F. A. (2018). Metodología para la inspección de la herramienta en el taladrado de piezas. *Revista de Investigación, Desarrollo e Innovación*, 9(1):187–200. <https://doi.org/10.19053/20278306.v9.n1.2018.7937>.
- Herrera J.C., Medina S.M., K. B. and Gualdrón, O. (2016). Diseño de un sistema automático de selección de frutos de café mediante técnicas de visión artificial. *Revista UIS Ingenierías*, 15(1). <http://dx.doi.org/10.18273/revuin.v15n1-2016001>.
- ISO Central Secretary (1989). Implants for surgery – metal bone screws with asymmetrical thread

and spherical under-surface – mechanical requirements and test methods. Standard ISO TR 6475:1989, International Organization for Standardization, Geneva, CH.

ISO Central Secretary (1991). Implants for surgery – metal bone screws with hexagonal drive connection, spherical under-surface of head, asymmetrical thread – dimensions. Standard ISO TR 5835: 1991, International Organization for Standardization, Geneva, CH.

ISO Central Secretary (2015). ISO 9000:2015 – quality management systems – fundamentals and vocabulary. Standard ISO 9000:2015, International Organization for Standardization, Geneva, CH.

Jiménez, L. F. V. (2016). Los costos de la mala calidad como quinto elemento del costo: aproximación teórica en la gestión de la competitividad en medio de la convergencia contable. *Revista de la Facultad de Ciencias Económicas: Investigación y Reflexión*, 24(1):63–84. <https://doi.org/10.18359/rfce.1622>.

Kashi, A. and Saha, S. (2020). Failure mechanisms of medical implants and their effects on outcomes. In Sharma, C. P., editor, *Biointegration of Medical Implant Materials*, Woodhead Publishing Series in Biomaterials, pages 407 – 432. Woodhead Publishing, 2 edition. doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102680-9.00015-9>.

LeeHoonsoo, Quoc, H., ParkEunsoo, BaeHyung-Jin, BaekInsuck, S., K., MoChangyeun, and ChoByoung-Kwan (2017). Machine vision technique for rapid measu-

- rement of soybean seed vigor. *Journal of Biosystems Engineering*, 42(3):227–233.
<https://doi.org/10.5307/JBE.2017.42.3.227>.
- Malacara, D. (2007). *Óptica tradicional y moderna*. Colección Ciencia para todos. Fondo de Cultura Económica.
- Mutterer, J. (2016). A generic webcam image acquisition plugin for imagej.
<https://doi.org/10.6084/m9.figshare.3397732.v1>.
- Mutterer, J. (2020). Custom toolbars and mini applications with action bar.
<https://doi.org/10.6084/m9.figshare.3397603.v6>.
- OSA (1994). *Handbook of Optics, Vol. 2: Devices, Measurements, and Properties* (2nd. Edition). McGraw-Hill Education.
- PixelPerfect (2021). *Iconos diseñados por Pixel Perfect*. <https://t.ly/ANFv>.
- Ramos-Maza, E., García-Estrada, F., Domínguez-Barrios, C., Chávez-Covarrubias, G., Meza-Reyes, G., and Buffo-Sequeira, I. (2016). Principios biomecánicos para la osteosíntesis, re-evolución. *Acta Ortopédica Mexicana*, 30(S1):S1–S8.
- Ramzi, R. and Bakar, E. A. (2018). Optical wear inspection of countersink drill bit for drilling operation in aircraft manufacturing and assembly industry: A method. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 370:012041. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/370/1/012041>.
- Ramzi, R., Bakar, E. A., and Mahmud, M. (2019). Drill bit flank wear monitoring system in

- composite drilling process using image processing. In *10th International Conference on Robotics, Vision, Signal Processing and Power Applications*, pages 551–557. Springer Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-13-6447-1_70.
- Render, B., HANNA, M., Stair, R., and Hanna, M. (2006). *Métodos cuantitativos para los negocios*. Pearson Educación.
- Render, B. and Heizer, J. (2007). *Administración de la producción*. Pearson Educación, 1 edition.
- Ridler TW, C. S. (1978). Picture thresholding using an iterative selection method. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 8(8):630–632. <https://doi.org/10.1109/TSMC.1978.4310039>.
- Rodríguez, L., Manzanero, D., Campos, W., Millano, V., and Valbuena, C. (2011). Falla de implantes ortopédicos metálicos en hospitales de la ciudad de maracaibo, venezuela. *Multiciencias*, 11(1):85–91.
- Rueden, C. T., Schindelin, J., Hiner, M. C., DeZonia, B. E., Walter, A. E., Arena, E. T., and Eliceiri, K. W. (2017). ImageJ2: ImageJ for the next generation of scientific image data. *BMC bioinformatics*, 18(1):529. <https://doi.org/10.1186/s12859-017-1934-z>.
- Samae, M., Ritmetee, P., Chirasatitsin, S., Kojić, S., Kojić, T., Jevremov, J., Stojanović, G., and Al Salami, H. (2020). Precise manufacturing and performance validation of paper-based passive microfluidic micromixers. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 21(3):499–508. <https://doi.org/10.1007/s12541-019-00272-0>.

Szeliski, R. (2010). *Computer Vision: Algorithms and Applications*. Springer-Verlag London.

<https://doi.org/10.1007/978-1-84882-935-0>.

Xiao, J. and Gao, Y. (2017). The manufacture of 3d printing of medical grade tpu. *Progress in*

Additive Manufacturing, 2(3):117–123. <https://doi.org/10.1007/s40964-017-0023-1>.

Zhang, W. (2020). Digital image processing method for estimating leaf length and

width tested using kiwifruit leaves (*actinidia chinensis* planch). *PLOS ONE*, 15(7):1–14.

<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0235499>.