



Diseño y elaboración de una guía técnica para la calibración de micrómetros digitales

Carrera Armijos, David Nicolás

Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica

Carrera de Ingeniería Mecánica

Trabajo de titulación, previo a la obtención del título de Ingeniero Mecánico

Ing. Calvopiña Enríquez, Héctor Alejandro

23 de julio de 2026



Certificado de análisis
Compilatio Magister+ | ESPE-ECU

TESIS GUIA TÉCNICA DE CALIBRACIÓN DE MICRÓMETROS (3)

ID : 498572c9e75a3ad4e0d6a5043413b74c7c278219



8%
Textos sospechosos

Nombre del fichero : TESIS GUIA TÉCNICA DE CALIBRACIÓN DE MICRÓMETROS (3).txt
Tamaño del archivo original : 3,63 MB
Número de palabras : 25.517

Depositante : HECTOR ALEJANDRO CALVOPINA ENRIQUEZ
Fecha de depósito : 20 de julio de 2026
Tipo de carga : interface
fecha de fin de análisis : 20 de julio de 2026

Resumen (sección 1/2)

Localización de los textos sospechosos en el documento :



Incluido en el porcentaje de textos sospechosos :

Similitudes 2%
Pasajes con similitudes a fuentes encontradas en diferentes colecciones.



Detección de IA 16%
Textos estilísticamente próximos a un texto generado por una IA.
Este índice es un indicador y no una prueba. Comprueba con el autor si domina los conocimientos mencionados en el documento.



Idiomas no reconocidos 6%
Pasajes en los que parte del vocabulario utilizado no forma parte del diccionario de la lengua.
Puede tratarse de un intento del autor de modificar el texto para evitar ser detectado.



No incluido en el porcentaje de textos sospechosos :

Textos entre comillas <1%
Pasajes entre comillas, a menudo indicativos de una cita.

HECTOR
ALEJANDRO
CALVOPINA
ENRIQUEZ

Firmado digitalmente
por HECTOR
ALEJANDRO
CALVOPINA
ENRIQUEZ
Fecha: 2026.07.23
08:23:09 -05'00'

Ing. Calvopiña Enríquez, Héctor Alejandro
Director



Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica

Carrera de Ingeniería Mecánica

Certificación

Certifico que el trabajo de titulación: **“Diseño y elaboración de una guía técnica para la calibración de micrómetros digitales”** fue realizado por el señor **Carrera Armijos, David Nicolás**, el mismo que cumple con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE; habiéndose efectuado una revisión integral de forma y de fondo conforme a los lineamientos y formatos institucionales vigentes. Además, fue revisado y analizada en su totalidad por la herramienta de prevención y/o verificación de similitud de contenidos; razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que se lo sustente públicamente.

Sangolquí, 23 de Julio del 2026

HECTOR
ALEJANDRO
CALVOPINA
ENRIQUEZ

Firmado digitalmente
por HECTOR
ALEJANDRO
CALVOPINA ENRIQUEZ
Fecha: 2026.09.03
09:36:07 -05'00'

Ing. Calvopiña Enríquez, Héctor Calvopiña

Director

C.C.: 1718823303



Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica

Carrera de Ingeniería Mecánica

Responsabilidad de Autoría

Yo, **Carrera Armijos, David Nicolás**, con cédula de ciudadanía n° 1754349411, declaro que el contenido, ideas y criterios del trabajo de titulación: **Diseño y elaboración de una guía técnica para la calibración de micrómetros digitales** es de mi autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos, y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Sangolquí, 23 de Julio del 2026

Carrera Armijos, David Nicolás

C.C.: 1754349411



Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica

Carrera de Ingeniería Mecánica

Autorización de Publicación

Yo **Carrera Armijos, David Nicolás**, con cédula de ciudadanía n° 1754349411, autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de titulación: **Diseño y elaboración de una guía técnica para la calibración de micrómetros digitales** en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi responsabilidad.

Sangolquí, 23 de Julio del 2026

Carrera Armijos, David Nicolás

C.C.: 1754349411

Dedicatoria

Dedico este trabajo a mis padres, Lidya Armijos y Patricio Carrera, quienes me enseñaron el valor de la responsabilidad, la honestidad y el esfuerzo. Gracias por su amor incondicional, por cada sacrificio realizado y por el apoyo constante que me brindaron a lo largo de mi formación académica. Su dedicación al trabajo y su ejemplo de perseverancia me enseñaron que las metas se alcanzan con disciplina, compromiso y determinación. En los momentos más difíciles de mi carrera, sus consejos, confianza y motivación fueron fundamentales para seguir adelante y no rendirme ante los obstáculos. Este logro también les pertenece a ustedes, porque cada paso que di estuvo respaldado por su esfuerzo, apoyo y confianza en mis capacidades.

A mis hermanos, Juan Pablo Carrera y Paola Carrera, por acompañarme durante este proceso y formar parte de mi crecimiento personal y profesional. Gracias por compartir conmigo los momentos de alegría, dificultad y aprendizaje que marcaron esta etapa de mi vida. Su apoyo, comprensión y motivación fueron un incentivo constante para continuar esforzándome en el cumplimiento de mis metas y objetivos.

La culminación de esta etapa representa años de dedicación, aprendizaje y perseverancia. Cada desafío superado, cada obstáculo enfrentado y cada experiencia vivida durante mi formación como Ingeniero Mecánico han contribuido a convertirme en la persona que soy hoy. Por ello, dedico este trabajo a mi familia, quienes han sido el pilar fundamental de este importante logro.

Agradecimiento

Agradezco profundamente a la Universidad de las Fuerzas Armadas - ESPE, por abrirme sus puertas y brindarme la oportunidad de formarme como profesional en sus aulas. A lo largo de estos años, la institución no solo me ha proporcionado los conocimientos técnicos necesarios para ejercer la Ingeniería Mecánica, sino que también ha sembrado en mí los valores de disciplina, responsabilidad y servicio que distinguen a sus estudiantes y graduados. Mi paso por esta prestigiosa Universidad ha sido una experiencia transformadora que llevaré siempre con orgullo.

De manera muy especial, deseo expresar mi más sincero agradecimiento al Ingeniero Héctor Calvopiña, director de mi tesis, por su invaluable guía y su rigurosidad académica. Sus observaciones precisas, sus consejos oportunos y su constante disposición para ayudar fueron fundamentales para la culminación de este trabajo.

Extiendo mi agradecimiento al Instituto Ecuatoriano de Normalización - INEN, institución que me abrió sus puertas y me brindó todas las facilidades para desarrollar mi trabajo de titulación en sus instalaciones. El acceso a sus laboratorios, la disponibilidad de su personal y el ambiente profesional que allí encontré fueron determinantes para la ejecución de esta investigación.

A mis compañeros y amigos de la universidad, Fernando Muela, Klever Cholango, Gabriel Zambrano y Anddy Salazar, quiero agradecerles por ser mucho más que simples compañeros de aula. Con ustedes compartí innumerables horas de estudio, desvelos previos a los exámenes, momentos de incertidumbre y también de celebración. Su amistad sincera, su apoyo incondicional y su capacidad para motivarme en los momentos más difíciles hicieron que este camino fuera más llevadero y significativo.

Índice de contenidos

Dedicatoria.....	6
Agradecimiento	7
Capítulo I. Introducción	13
1.1 Antecedentes	13
1.2 Planteamiento del problema	14
1.3 Justificación del estudio	14
1.4 Alcance del proyecto	15
1.5 Objetivos	15
1.5.1 Objetivo general.....	15
1.5.2 Objetivos específicos	16
1.6 Metodología.....	16
1.6.1 Enfoque de la investigación	16
1.6.2 Diseño de la investigación	17
1.6.3 Fuentes de información.....	18
Capítulo II. Marco teórico	19
2.1 Metrología y su importancia en la infraestructura de la calidad	19
2.1.1 La metrología.....	19
2.1.2 Evolución	19
2.1.3 De las unidades primitivas al Sistema internacional	20
2.1.4 Clasificación de la metrología	21
2.1.5 El Sistema Internacional de Unidades (SI).....	22
2.1.6 Infraestructura de la calidad	23
2.1.7 Gestión de la calidad	27
2.2 Conceptos fundamentales en metrología dimensional.....	31
2.2.1 Exactitud, error e incertidumbre	35
2.2.2 Trazabilidad metrológica	40
2.2.3 Repetibilidad y reproducibilidad	43
2.3 Micrómetros digitales.....	44
2.3.1 Principio de funcionamiento	44
2.3.2 Partes, características y resolución.....	46
2.3.3 Factores de influencia en la medición	49
2.4 Normativa técnica aplicable	49

2.4.1	ISO 3611.....	49
2.4.2	ISO/IEC 17025.....	50
2.4.3	GUM (Guía para la Expresión de la Incertidumbre).....	53
2.5	Procedimientos de calibración en instrumentos de longitud.....	64
2.5.2	Preparación para la Calibración.....	64
2.5.3	Limpieza meticulosa	65
2.5.4	Verificación de funcionalidad.....	65
2.6	Buenas prácticas metrológicas en laboratorios.....	66
2.6.1	Manipulación y sujeción del instrumento.....	66
2.6.2	Inspección diaria.....	68
2.6.3	Uso correcto del dispositivo de fuerza constante (trinquete o matraca).....	68
2.6.4	Prevención de errores de lectura	69
2.6.5	Almacenamiento de Micrómetros.....	70
2.6.6	Cuidados para Micrómetros Digitales.....	70
2.7	Infraestructura de la calidad en Ecuador e importancia del Inen.....	78
Capítulo III. Desarrollo de la guía técnica.....		80
3.1	Análisis de la Normativa Internacional	80
3.2	Caracterización Metrológica de Micrómetros Digitales.....	81
3.3	Caracterización de Patrones de Referencia.....	84
3.3.1	Exactitud de un bloque patrón.....	85
3.3.2	Requisitos de acorde a la ISO 3650.....	88
3.4	Desarrollo del Procedimiento de Calibración	89
3.4.1	Equipos e instrumentos requeridos.....	89
3.4.2	Condiciones ambientales	91
3.4.3	Procedimiento paso a paso.....	94
3.5	Cálculo de errores de indicación.....	101
3.6	Evaluación de la repetibilidad	102
3.7	Estimación de la incertidumbre de medición.....	103
3.8	Criterios de aceptación y rechazo.....	105
Capítulo IV. Validación de la Guía Técnica.....		106
Capítulo V. Conclusiones y recomendaciones.....		113
Capítulo VI. Referencias bibliográficas.....		115
Apéndices		119

Apéndice 1. Formato de certificado de calibración	119
---	-----

Índice de tablas

Tabla 1. Normativa y documentos de referencia aplicables.	18
Tabla 2. Unidades básicas del S.I.....	22
Tabla 3. Organismos internacionales de normalización y metrología.	25
Tabla 4. <i>Ejemplo de medición de paralelismo</i>	76
Tabla 5. <i>Tabla de Laboratorios del LNM — INEN</i>	78
Tabla 6. Especificaciones técnicas clave	82
Tabla 7. <i>Cinco lecturas pico de fuerza</i>	83
Tabla 8. <i>Selección de tamaños para calibración de micrómetro 0-25 mm</i>	89
Tabla 9. <i>Equipamiento auxiliar</i>	91
Tabla 10. <i>Registro de resultados</i>	97
Tabla 11. <i>Criterios de evaluación</i>	102
Tabla 12. <i>Fuentes de incertidumbre</i>	103
Tabla 13. <i>Recepción e inspección preliminar</i>	108
Tabla 14. <i>Condiciones ambientales</i>	109
Tabla 15. <i>Verificación geométrica (planitud y paralelismo)</i>	109
Tabla 16. <i>Calibración de escala</i>	110
Tabla 17. <i>Resultados de la calibración — Plantilla y ejemplo</i>	111

Índice de figuras

Figura 1. <i>Pieza acotada con medidas lineales y angulares</i>	32
Figura 2. <i>Clasificación de instrumentos y aparatos de medición en metrología dimensional</i>	34
Figura 3. <i>Esquema de precisión y exactitud</i>	36
Figura 4. <i>Puntos Airy o Bessel</i>	40
Figura 5. <i>Micrómetro de exteriores digital</i>	45
Figura 6. <i>Partes de un micrómetro digital</i>	48
Figura 7. <i>Soporte para micrómetros</i>	67
Figura 8. <i>Aislante térmico que algunos micrómetros poseen</i>	68
Figura 9. <i>Juego de paralelos ópticos</i>	71
Figura 10. <i>Paralelo óptico montado para examinar las caras de un micrómetro</i>	72
Figura 11. <i>Juego de paralelas ópticas</i>	75
Figura 12. <i>Pirámide de la normalización</i>	79
Figura 13. <i>Formas típicas de los bloques patrón</i>	85
Figura 14. <i>Grados de exactitud de un bloque patrón</i>	86
Figura 15. <i>Juego de bloques patrón</i>	87
Figura 16. <i>Pirámide representando la organización metroológica nacional para una unidad</i>	88

Resumen

El presente trabajo de titulación desarrolla una guía técnica para la calibración de micrómetros digitales de exteriores y/o analógicos, con un rango de medición de 0 a 150 milímetros y una resolución de 0,0001 milímetros igual o menor, dirigida a laboratorios de metrología dimensional acreditados bajo la norma ISO/IEC 17025. El problema surge de la ausencia, en la infraestructura metrológica del Ecuador, de un documento normativo actualizado para calibrar este tipo de instrumento de alta precisión, situación que limita la trazabilidad de los resultados y reduce la confiabilidad de los servicios de calibración ofrecidos en el país. La investigación tiene un enfoque mixto, en la parte cualitativa se centra en el análisis de la normativa internacional y en la caracterización funcional del micrómetro, mientras que la parte cuantitativa corresponde a la ejecución del procedimiento de calibración y al cálculo de errores, repetibilidad e incertidumbre. El diseño metodológico parte de la adaptación de tres documentos de referencia, el procedimiento DI-005 del Centro Español de Metrología, la norma ISO 3611:2023 y la Guía para la Expresión de la Incertidumbre de Medición, a través de un proceso iterativo revisado en reuniones periódicas con laboratorios de calibración secundarios. Como resultado se obtuvo un procedimiento de once puntos de medición que integra la selección de bloques patrón, el control de condiciones ambientales, el cálculo de errores de indicación, la evaluación de la repetibilidad y la estimación de la incertidumbre expandida mediante el método GUM, además de criterios de aceptación basados en la regla de banda de guarda de la norma ISO 14253-1.

Palabras clave: calibración, micrómetros digitales, metrología dimensional, incertidumbre de medición, trazabilidad.

Abstract

This thesis develops a technical guide for the calibration of digital and/or analog outside micrometers with a measuring range of 0 to 150 millimeters and a resolution of 0.0001 millimeters or less, intended for dimensional metrology laboratories accredited under the ISO/IEC 17025 standard. The problem arises from the lack, within Ecuador's metrological infrastructure, of an updated regulatory document for calibrating this type of high-precision instrument, a situation that limits the traceability of results and reduces the reliability of calibration services offered in the country. The research employs a mixed-methods approach. The qualitative component focuses on the analysis of international standards and the functional characterization of the micrometer, while the quantitative component corresponds to the execution of the calibration procedure and the calculation of errors, repeatability, and uncertainty. The methodological design is based on the adaptation of three reference documents: the Spanish Metrology Centre's procedure DI-005, ISO 3611:2023, and the Guide for the Expression of Measurement Uncertainty. This adaptation was achieved through an iterative process reviewed in regular meetings with secondary calibration laboratories. The result is an eleven-point measurement procedure that integrates the selection of gauge blocks, control of environmental conditions, calculation of indication errors, evaluation of repeatability, and estimation of expanded uncertainty using the GUM method. Acceptance criteria based on the guard band rule of ISO 14253-1 are also included.

Keywords: calibration, digital micrometers, dimensional metrology, measurement uncertainty, traceability.

Capítulo I. Introducción

1.1 Antecedentes

El presente trabajo tiene como propósito fundamental contribuir al fortalecimiento de la infraestructura metrológica del Ecuador mediante la elaboración de una guía técnica para la calibración de micrómetros digitales. La metrología, entendida como la ciencia de las mediciones, constituye un pilar esencial para garantizar la calidad, la trazabilidad y la confiabilidad en los procesos industriales, comerciales y de laboratorio. En este contexto, la ausencia de documentos normativos actualizados y alineados con estándares internacionales limita la capacidad de los laboratorios de calibración y dificulta el cumplimiento de requisitos de calidad en sectores estratégicos.

Los micrómetros digitales son instrumentos de alta precisión utilizados en la industria metalmeccánica, manufacturera y en laboratorios de metrología dimensional. Su adecuada calibración resulta crítica para asegurar la exactitud en la medición de dimensiones lineales, con resoluciones del orden de centésimas de milímetro. La guía propuesta integra elementos técnicos de normas internacionales como ISO 3611 e ISO 17025. El procedimiento propuesto integra desde los principios de funcionamiento del instrumento hasta la evaluación final de la incertidumbre expandida con el método GUM, pasando por la selección del patrón de referencia, la definición de condiciones ambientales, la secuencia de pasos para la verificación dimensional, el cálculo de desviaciones y correcciones sistemáticas. Además, se incluirá un ejemplo práctico de calibración con tablas de resultados, de esta manera los laboratorios podrán contar con un documento aplicable y confiable.

Este trabajo representa un aporte directo al Servicio Ecuatoriano de Normalización (INEN), al dotarlo de herramientas técnicas que estandaricen los servicios de calibración, reduzcan incertidumbres y fortalezcan la confianza en las mediciones. Asimismo, contribuye a la

armonización normativa con organismos internacionales de metrología, favoreciendo la competitividad industrial y el comercio justo.

1.2 Planteamiento del problema

En el Ecuador, la infraestructura metrológica carece de guías técnicas actualizadas y estandarizadas para la calibración de instrumentos de medición de alta precisión, como los micrómetros digitales. Estos equipos son ampliamente utilizados en sectores industriales, metalmecánicos y laboratorios de metrología dimensional, donde la exactitud en la medición de dimensiones lineales resulta crítica para garantizar la calidad de los productos y procesos. Sin embargo, la falta de procedimientos normativos claros y alineados con estándares internacionales (ISO 3611, ISO/IEC 17025, GUM) genera incertidumbre en los resultados de calibración, dificulta la trazabilidad metrológica y limita la confiabilidad de los servicios de calibración ofrecidos a nivel nacional.

Esta carencia afecta directamente la competitividad de la industria ecuatoriana, el cumplimiento de requisitos de exportación y la integración del país en sistemas internacionales de reconocimiento mutuo en metrología

1.3 Justificación del estudio

La metrología sostiene la infraestructura de calidad de un país, ya que asegura la trazabilidad y confiabilidad de las mediciones en procesos productivos, comerciales y de control. En el caso de los micrómetros digitales, su adecuada calibración es necesaria para validar procesos de mecanizado, garantizar tolerancias dimensionales y cumplir con exigencias normativas internacionales. La inexistencia de una guía técnica nacional limita la capacidad de los laboratorios de calibración del INEN y de entidades acreditadas para ofrecer servicios estandarizados, lo que repercute en la calidad de los productos fabricados y en la credibilidad de los resultados de medición.

El desarrollo de una guía técnica para la calibración de micrómetros digitales permitirá cerrar esta brecha normativa, proporcionando procedimientos claros, trazables y repetibles que fortalezcan la infraestructura metrológica del Ecuador. Además, contribuirá a la armonización con estándares internacionales, mejorando la competitividad industrial y facilitando el comercio justo y la certificación de productos ecuatorianos en mercados globales. Desde una perspectiva institucional, este aporte consolidará las capacidades técnicas del INEN, asegurando servicios de calibración confiables y alineados con las mejores prácticas internacionales, lo que representa un avance estratégico hacia la soberanía tecnológica y el fortalecimiento de la calidad nacional.

1.4 Alcance del proyecto

El presente trabajo comprende el diseño y elaboración de una guía técnica para la calibración de micrómetros digitales de exteriores, con un rango de 0 a 25 mm y una resolución de 0,001 mm, aplicable en laboratorios de metrología dimensional acreditados bajo la norma ISO/IEC 17025.

El procedimiento desarrollado contempla la caracterización metrológica del instrumento, la definición de condiciones ambientales de trabajo, la selección de puntos de medición a lo largo del rango nominal, el cálculo de errores de indicación, la evaluación de la repetibilidad y la estimación de la incertidumbre expandida mediante el método GUM (JCGM 100:2008), tomando como referencia los errores máximos permisibles establecidos en la norma ISO 3611:2023.

1.5 Objetivos

1.5.1 Objetivo general

- Desarrollar una guía técnica para la calibración de micrómetros digitales de exteriores.

1.5.2 Objetivos específicos

- Analizar la normativa internacional aplicable a la calibración de micrómetros digitales, considerando los requisitos técnicos de la norma ISO 3611, los criterios de competencia de laboratorios definidos en ISO/IEC 17025 y el marco metodológico para la estimación de incertidumbre establecido en la GUM (JCGM 100:2008).
- Caracterizar metrológicamente los micrómetros digitales y los patrones de referencia utilizados en laboratorios de calibración.
- Establecer el procedimiento técnico de calibración para micrómetros digitales, determinando la secuencia de medición, el cálculo de errores de indicación, la estimación de la incertidumbre expandida mediante el método GUM y los criterios de aceptación conforme a los errores máximos permisibles de la norma ISO 3611.
- Validar el procedimiento de calibración mediante su aplicación práctica, comprobando la exactitud, repetibilidad y confiabilidad de los resultados obtenidos, con el fin de consolidar la guía técnica como un documento aplicable en laboratorios de metrología dimensional.

1.6 Metodología

1.6.1 Enfoque de la investigación

El estudio combina elementos cualitativos y cuantitativos. El componente cualitativo se aplica en el análisis de la normativa internacional y la caracterización funcional de los micrómetros digitales. El cuantitativo se emplea en la ejecución del procedimiento de calibración, el cálculo de errores, la evaluación de la repetibilidad y la estimación de la incertidumbre expandida mediante el método GUM, el cual está desarrollado en el anexo A, de la Guía de Calibración de micrómetros.

La investigación es de tipo aplicada, ya que busca resolver un problema práctico, como lo es la falta de una guía técnica estandarizada para la calibración de micrómetros digitales en Ecuador. Además, tiene un componente descriptivo en la caracterización de los instrumentos y un componente experimental en la validación del procedimiento propuesto.

1.6.2 Diseño de la investigación

El proceso de elaboración de la guía técnica se fundamentó en la revisión y adaptación de tres documentos normativos de referencia: el Procedimiento DI-005 del Centro Español de Metrología, la norma ISO 3611:2023 y la Guía para la Expresión de la Incertidumbre de Medición (GUM).

El desarrollo no es un proceso unidireccional, sino iterativo y colaborativo. Se estableció un mecanismo de revisión periódica mediante reuniones técnicas con laboratorios de calibración secundarios cada 4-6 semanas. Estas sesiones permitieron:

- Validar la claridad y aplicabilidad de cada sección del borrador
- Identificar dificultades prácticas no evidentes en la normativa teórica
- Consensuar interpretaciones sobre aspectos ambiguos de los documentos de referencia
- Incorporar retroalimentación basada en experiencias reales de calibración
- Coordinar detalles operativos (formatos de registro, criterios de aceptación, procedimientos alternativos)

Cada ciclo de revisión genera una versión mejorada del documento, evolucionando desde un borrador inicial hasta la versión final validada por el panel de expertos participantes. Este enfoque aseguró que la guía resultante fuera técnicamente rigurosa, prácticamente viable y contextualizada a las condiciones reales de los laboratorios ecuatorianos.

1.6.3 Fuentes de información

Tabla 1.

Normativa y documentos de referencia aplicables.

Norma/Documento	Título	Aplicación en la metodología
ISO 3611:2023	Geometrical product specifications (GPS) — Dimensional measuring equipment — Design and metrological characteristics of micrometers for external measurements	Define las características metrológicas del micrómetro, los errores máximos permisibles, los métodos de prueba y el sistema de clasificación (Clases 0, 1, 2, 3)
ISO/IEC 17025:2017	General requirements for the competence of testing and calibration laboratories	Establece los requisitos generales para la competencia de laboratorios de calibración, incluyendo trazabilidad, validación de métodos e incertidumbre
ISO/IEC Guide 98-3 (GUM)	Uncertainty of measurement — Part 3: Guide to the expression of uncertainty in measurement	Proporciona la metodología para la evaluación y expresión de la incertidumbre de medición, incluyendo los tipos A y B de incertidumbre
NPL Good Practice Guide No. 40	Callipers and micrometers	Proporciona guías prácticas sobre el uso, calibración y evaluación de incertidumbre para micrómetros y calibradores
CEM DI-005	Procedimiento para la calibración de micrómetros de exteriores de dos contactos (Centro Español de Metrología, edición digital 1)	Define el procedimiento detallado de calibración, incluyendo número de puntos de calibración, repeticiones, condiciones ambientales, cálculo de correcciones e incertidumbre. Es la base del proceso de calibración de esta guía.
JCGM 200:2012 (VIM)	Vocabulario Internacional de Metrología — Conceptos fundamentales y generales y términos asociados	Proporciona las definiciones de los términos metrológicos utilizados en esta guía (calibración, error, incertidumbre, trazabilidad, repetibilidad, etc.), asegurando la coherencia terminológica con estándares internacionales.

Capítulo II. Marco teórico

2.1 Metrología y su importancia en la infraestructura de la calidad

2.1.1 La metrología

La metrología es también conocida como la ciencia que estudia las mediciones, es una rama de la física que está relacionado con las unidades de medida y los sistemas de control de las magnitudes, que a lo largo de la historia ha registrado una gran evolución (Moro Piñeiro, 2017).

Esta disciplina colabora con todas las ciencias existentes para facilitar su comprensión, aplicación, evaluación y desarrollo; de hecho, ha acompañado a la humanidad desde sus primeros avances tecnológicos, cuando la necesidad de comparar y cuantificar magnitudes se volvió indispensable para el comercio y la producción (González González y Zeleny Vázquez, 1995).

La metrología no es una disciplina reciente ni exclusiva del laboratorio, pues desde que el ser humano comenzó a intercambiar bienes y fabricar objetos, la necesidad de medir con un referente común fue inevitable. En términos técnicos, esta ciencia abarca los aspectos teóricos y prácticos de las mediciones, lo que incluye la determinación de las unidades, la evaluación de los errores y la verificación de los instrumentos, sin importar la magnitud que se mida (Vázquez Ramírez, 2019). Por otro lado, conviene no confundir la metrología con la metrotecnica, ya que esta última se ocupa específicamente de los procedimientos de medida y de la manera adecuada de ejecutar dichas mediciones (Sánchez Salinas y Gómez Galán, 2017).

2.1.2 Evolución

La metrología surge de la necesidad del ser humano de describir y cuantificar su entorno de forma ordenada y exacta. Durante siglos el ser humano registró lo que percibía sin mayor método; con el tiempo esa observación pasiva dio paso a la experimentación, donde se elige un fenómeno concreto, se define cómo estudiarlo y se busca un resultado verificable. De ese

proceso fue emergiendo todo lo que hoy sostiene la metrología como son las unidades de medida, los patrones de referencia, la trazabilidad, las normas y los métodos de calibración (González González y Zeleny Vázquez, 1995).

La experimentación metrológica sigue un orden, donde antes de ejecutar cualquier medición, el experimentador delimita el fenómeno que va a estudiar, descartando todo lo que no sea relevante para ese análisis. Tiene además una idea previa de cómo proceder y de los resultados que podría encontrar, aunque debe estar dispuesto a que la realidad lo contradiga. Finalmente, lleva a cabo las operaciones necesarias para obtener datos numéricos que respalden o refuten sus hipótesis (González González y Zeleny Vázquez, 1995).

Con el avance del conocimiento, un experimento físico sin medición numérica perdió valor científico. Cuantificar dejó de ser opcional y se volvió inseparable de cualquier proceso de investigación o producción. Instrumentos como termómetros, micrómetros, calibradores, rugosímetros y medidores de presión son expresión concreta de esta necesidad de cuantificar con exactitud (González González y Zeleny Vázquez, 1995).

2.1.3 De las unidades primitivas al Sistema internacional

La metrología tiene raíces antiguas. Las primeras unidades eran informales y muchas veces arbitrarias, unos ejemplos son el codo egipcio, la pulgada, dimensiones tomadas del cuerpo humano o de tradiciones locales. Para las transacciones simples de la época funcionaban. El problema llegó con la revolución industrial, cuando fabricar en serie obligó a que piezas producidas en distintos lugares fueran intercambiables entre sí. Sin un sistema de medición común eso era inviable. Francia apostó por el Sistema Métrico Decimal para romper con las unidades medievales que frenaban el comercio; Gran Bretaña desarrolló el suyo propio y lo extendió a sus colonias, generando incluso diferencias entre las unidades británicas y las estadounidenses para denominaciones idénticas como el Quart o el Pint. Con el tiempo esa

fragmentación cedió. El Sistema Internacional de Unidades es hoy el referente en prácticamente todo el mundo (Moro Piñeiro, 2017).

2.1.4 Clasificación de la metrología

La metrología no opera como un bloque único; se divide en tres ramas según su campo de aplicación (Instituto Nacional de Metrología, s.f.)

Metrología científica: es la encargada del orden, desarrollo y mantenimiento de los patrones de medida, además de determinar las constantes físicas que sirven de referencia universal (Sánchez Salinas y Gómez Galán, 2017).

Con la metrología científica, los patrones internacionales pueden reproducirse con precisión en cualquier país, anticiparse qué patrones serán necesarios para los avances científicos que aún no han ocurrido y analizar el Sistema Internacional de Unidades para construir las normas que lo sustentan. No interviene en la calibración diaria de instrumentos industriales o comerciales (Meza Sánchez y Zárate, 2017).

Metrología legal: opera desde un enfoque normativo. Se encarga de establecer las exigencias legales sobre unidades, instrumentos y métodos de medición en contextos donde los resultados tienen consecuencias directas como son las transacciones comerciales, la salud del consumidor, seguridad y medio ambiente, también garantiza la credibilidad de los resultados en un escenario nacional o europeo (Sánchez Salinas y Gómez Galán, 2017).

También se encarga del cumplimiento de la normativa metrológica, donde detrás de cada patrón primario y secundario hay laboratorios oficiales que los custodian, los verifican periódicamente y los usan como referencia para contrastar las mediciones que circulan en el comercio y la industria. Sin ese trabajo silencioso, cualquier certificado de calibración perdería su respaldo (Meza Sánchez y Zárate, 2017).

Metrología industrial: está vinculado con la producción, esta de aquí asegura la calidad de los productos. Su trabajo consiste en calibrar y mantener los equipos de medición que intervienen en los procesos de fabricación en buenas condiciones, asegurando que los productos finales cumplan las especificaciones establecidas (Sánchez Salinas y Gómez Galán, 2017).

Medir una magnitud física implica comparar esa magnitud contra un patrón de referencia definido por acuerdos internacionales entre científicos, Sin esos acuerdos, cada industria o país mediría a su manera y la comunicación técnica entre ellos sería inviable. Un sistema de unidades es, en esencia, ese conjunto de referencias. El problema práctico aparece cuando hay que convertir valores de un sistema a otro; es un paso que parece simple pero donde los errores aritméticos se cometen con facilidad. En manufactura, la medición dimensional es la que interviene directamente en el diseño y construcción de productos. Se trabaja en dos formas concretas, la primera es la medición lineal, que evalúa longitudes, y la segunda es la medición angular. Junto a esto, el correcto uso y cuidado de los instrumentos de medición en el taller mecánico es parte fundamental del trabajo. Hoy conviven dos sistemas, específicamente el Sistema Inglés y el Sistema Internacional de Unidades, siendo este último el predominante a nivel mundial (Meza Sánchez y Zárate, 2017).

2.1.5 El Sistema Internacional de Unidades (SI)

El Sistema Internacional de Unidades nació en 1960 como una versión actualizada y simplificada del Sistema Métrico Decimal, desarrollada por el Comité Internacional de Pesos y Medidas con sede en Francia. Está estructurado en siete unidades básicas (como se observa en la tabla 2), a partir de las cuales se derivan todas las demás magnitudes. Su base es decimal, lo que lo distingue del Sistema Inglés, que opera con fracciones y resulta menos intuitivo para cálculos de precisión (Meza Sánchez y Zárate, 2017).

Tabla 2.
Unidades básicas del S.I

Magnitud	Nombre de la unidad	Símbolo de la unidad
Longitud	Metro	m
Masa	Kilogramo	kg
Tiempo, duración	Segundo	s
Corriente eléctrica	Amperio	A
Temperatura termodinámica	Kelvin	K
Cantidad de sustancia	Mol	mol
Intensidad luminosa	Candela	cd

Nota. Tomado de *Metrología dimensional: Resumen de teoría y problemas resueltos* (p. 9), por S. Sánchez Salinas y M. Gómez Galán, 2017, Editorial Universidad de Almería (EdUAL).

El metro es la unidad base de longitud, pero en la práctica industrial rara vez se trabaja con metros enteros. En la industria metalmecánica la unidad de referencia es el milímetro, un submúltiplo del metro que permite expresar con precisión las dimensiones de piezas y componentes. Para contextos de mayor escala se usan múltiplos como el kilómetro, aunque estos no son comunes en taller (Meza Sánchez y Zárate, 2017).

2.1.6 Infraestructura de la calidad

La calidad: se entiende como el conjunto de atributos y características de un producto o servicio que determinan su capacidad para satisfacer necesidades, ya sean explícitas o implícitas de un cliente. En otras palabras, la calidad de un producto se manifiesta en el cumplimiento de una serie de requisitos que deben formularse de manera clara, ser objetivos y medibles; antes para inspeccionar un producto se lo realizaba en la etapa final, actualmente este se lo incluyó en los procesos de fabricación (Moro Piñeiro, 2017).

La calidad de un producto no tiene que ver con si es fino o corriente. Tiene que ver con si cumple la norma bajo la cual fue fabricado. Para evaluar ese cumplimiento se necesita un patrón

de comparación que incluya todas las características requeridas, expresadas mediante especificaciones o normas concretas (Ramírez Tapia y Flores García, 2002)

Definición y componentes de la infraestructura de la calidad

La norma: es un documento elaborado por todos los sectores involucrados representados por quienes producen, consumen o utilizan el producto. Establece cómo deben medirse las especificaciones, se basa en resultados verificados por la ciencia y la experiencia, y requiere aprobación de la autoridad competente para tener validez oficial (Ramírez Tapia y Flores García, 2002).

Normalización: La vida en sociedad funciona porque existen reglas compartidas tales como la hora, el sentido de circulación vehicular, los sistemas monetarios. A ese conjunto de acuerdos se le puede llamar normalización. En la industria, este concepto toma una forma específica en la normalización de productos y procesos (González González y Zeleny Vázquez, 1995).

La normalización técnica es comunicación entre productor, consumidor y usuario, basada en términos técnicos, definiciones, símbolos, métodos de prueba y procedimientos. Se apoya en resultados verificados por la ciencia, la técnica y la experiencia. Durante años se consideró una consecuencia del desarrollo industrial; hoy se reconoce como uno de sus motores principales (González González y Zeleny Vázquez, 1995).

Objetivo de la normalización: El alcance de la normalización es más amplio de lo que parece. Se normaliza lo abstracto como las unidades de medida, los símbolos, la terminología técnica. Se normaliza lo concreto entre los que destacan tornillos, leche, agua, telas, maquinaria. Y se normalizan procesos y sistemas incluyendo procedimientos de fabricación, criterios para el diseño de estructuras, sistemas de tallas para ropa y calzado, documentación técnica. Si algo

puede describirse con precisión y afecta a más de un actor, probablemente ya existe o existirá una norma para ello (González González y Zeleny Vázquez, 1995).

Especificación: Una especificación es un requisito concreto que debe cumplir un producto, proceso o servicio, acompañado siempre del procedimiento para verificar si ese requisito se satisface. Una especificación puede coincidir con una norma completa, pero generalmente es solo una parte de ella. El contenido de humedad de un producto, por ejemplo, es una especificación, pero la norma que regula ese producto puede incluir muchas más exigencias además de esa (González González y Zeleny Vázquez, 1995).

Las normas de carácter internacional se indican en la tabla 3, a continuación:

Tabla 3.
Organismos internacionales de normalización y metrología.

Organización	Sigla	Descripción	Sitio web	Imagen
Comisión Electrotécnica Internacional	IEC	Organismo responsable de la normalización internacional en los sectores electrónico y eléctrico; no cubiertos por la ISO. Facilita el comercio internacional de productos electrotécnicos.	www.iec.ch	
Organización Internacional de Normalización	ISO	Federación mundial de organismos nacionales de normalización. Facilita el desarrollo de la normalización y actividades conexas en el mundo.	www.iso.ch	

Organización Internacional de Metrología Legal	OIML	Promueve la armonización global de los procedimientos de metrología legal. Desarrolla reglamentos tipo y recomendaciones internacionales.	www.oiml.int	
Unión Internacional de Telecomunicaciones	ITU	Trabaja en la normalización de telecomunicaciones mediante estudios técnicos, explotación, tarificación y recomendaciones a nivel mundial.	www.itu.int	
Comisión Panamericana de Normas Técnicas	COPANT	Asociación civil que agrupa organismos de normalización de América.	www.copant.org	
Asociación Española de Normalización	AENOR	Entidad encargada de la normalización y certificación en España.	www.aenor.es	

Nota. Adaptado de *Metrología y sus aplicaciones* (p. 20), por A. Escamilla Esquivel, 2015, Grupo Editorial Patria.

La infraestructura de la calidad no se reduce a los organismos que la conforman. Es el sistema que permite que las mediciones realizadas en Ecuador sean comparables con las de cualquier otro país, que los productos ecuatorianos puedan certificarse localmente en lugar de enviarse al exterior para ese proceso, y que la industria nacional tenga acceso a servicios metrológicos confiables sin depender de laboratorios extranjeros. Para que ese sistema funcione, sus tres pilares, metrología, normalización y acreditación, deben operar de manera coordinada, ya que la debilidad en cualquiera de ellos afecta la confiabilidad del conjunto (Servicio Ecuatoriano de Normalización, s.f.-c).

2.1.7 Gestión de la calidad

En un mercado donde varias empresas producen bienes similares, quien decide cuáles sobreviven es el cliente. Esa realidad hace que contar con un sistema de gestión de calidad no sea una ventaja sino una condición. Un SGC bien estructurado permite identificar no solo lo que el cliente necesita sino lo que espera, y en el mejor de los casos, anticiparse a ello con prestaciones que no esperaba encontrar (Moro Piñeiro, 2017).

Lo que un cliente espera hoy no es lo que esperará mañana. Sus requisitos se transforman en especificaciones concretas del producto o servicio, y esas especificaciones cambian con el tiempo porque los avances tecnológicos y las nuevas tendencias presionan a las empresas a mejorar de forma continua, tanto en lo que fabrican como en la manera en que lo hacen (Moro Piñeiro, 2017).

Proceso de implantación de un sistema de gestión de calidad

Implementar un SGC no es instalar un documento y olvidarse. Exige definir desde el principio la política de calidad de la empresa junto con su misión, visión y valores, identificar qué necesita y qué espera el cliente, y mapear los procesos internos con sus responsabilidades, sin dejar ninguna sin cubrir. A eso se suma determinar qué recursos hacen falta y dónde, establecer indicadores concretos que permitan medir si cada proceso funciona bien, y construir mecanismos que detecten fallas antes de que ocurran. El sistema no termina cuando está en marcha; necesita un proceso permanente de revisión y ajuste (Moro Piñeiro, 2017).

Ventajas de un sistema de gestión de calidad - SGC

Un SGC obliga a la empresa a conocerse a sí misma. Definir misión, visión y valores, no es un ejercicio estético; es lo que permite que todo el personal, desde la dirección hasta el taller, trabaje con un rumbo común (Moro Piñeiro, 2017).

Un SGC exige que cada conclusión tenga respaldo en datos medibles, lo que reduce errores y elimina la discrecionalidad en los procesos críticos; las decisiones dejan de basarse en intuiciones (Moro Piñeiro, 2017).

Con la implantación de un SGC los procesos se vuelven trazables. Cada actividad queda definida, sus responsabilidades asignadas y sus interrelaciones con otros procesos identificadas, lo que hace visible cualquier falla antes de que se convierta en un problema mayor (Moro Piñeiro, 2017).

El cliente deja de ser una variable externa. Sus necesidades y expectativas se integran directamente en las especificaciones del producto o servicio, lo que obliga a la empresa a mantenerse actualizada (Moro Piñeiro, 2017).

La cadena de valor se extiende hacia los proveedores. Un SGC no termina en la puerta de la fábrica, involucra directamente a los proveedores que también deben demostrar evidencia de calidad en los materiales que suministran, convirtiendo la relación en una cooperación orientada a resultado (Moro Piñeiro, 2017).

2.1.8 Impacto de la metrología en la calidad industrial

Afirmar que un producto tiene calidad sin respaldarlo con mediciones no significa nada técnicamente. Un componente puede verse correcto, ensamblarse sin problemas en las primeras pruebas y aun así presentar desviaciones dimensionales que solo un instrumento calibrado puede detectar. De tal manera que la metrología asegura que las mediciones sean exactas, repetibles y confiables, y esa es precisamente la base sobre la que se construye cualquier sistema de control de calidad industrial (TCM Consultoría y Formación, s.f.).

El impacto de la metrología sobre la calidad no se limita a verificar piezas al final de una línea. La exactitud en las mediciones es crítica para garantizar que los productos cumplan las especificaciones del cliente, y que una entrega de lotes fuera de estándar genera rechazos,

devoluciones y costos que van más allá de lo económico, afectando directamente la reputación del proveedor. Este impacto se manifiesta en tres frentes concretos, los cuales son el control de procesos y verificación de productos, la reducción de rechazos, y el cumplimiento de requisitos regulatorios (Sariki, 2024).

- **Control de procesos, tolerancias, verificación de productos.**

Controlar un proceso de fabricación implica medir en cada etapa, no solo al final. AGSA Tech señala que la metrología dimensional permite detectar desviaciones desde las primeras fases de producción, lo que posibilita realizar ajustes antes de que se generen grandes volúmenes de piezas defectuosas. Ese principio, aparentemente simple, tiene consecuencias directas sobre los costos ya que corregir un error en la fase de mecanizado cuesta una fracción de lo que cuesta corregirlo cuando el producto ya está ensamblado o, peor aún, cuando ya salió al mercado (Camacho, 2025).

Las tolerancias dimensionales son el lenguaje técnico con el que se define si una pieza cumple o no cumple su función. En sectores como la aeronáutica o la fabricación de dispositivos médicos, esas tolerancias pueden estar en el orden de micras, y una desviación mínima puede significar que un componente no ensamble, que un sistema falle o que un producto sea rechazado por completo. Por ello, instrumentos como las máquinas de medición por coordenadas, los escáneres 3D y los micrómetros digitales son herramientas indispensables en cualquier proceso de verificación dimensional riguroso (Camacho, 2025).

- **Reducción de rechazos, mejora de la productividad.**

El costo de medir mal no aparece solo en la pieza defectuosa. Una entrega de lotes que no se ajusta a los estándares del cliente genera rechazos y devoluciones cuyo costo puede superar el valor del propio producto, sin contar el daño a la imagen de la empresa y la pérdida de confianza acumulada. Ese deterioro de la relación comercial rara vez se recupera con rapidez, y en mercados competitivos puede traducirse en la pérdida de contratos futuros (Sariki, 2024).

Desde el punto de vista de la productividad, Al aplicar metrología de forma adecuada en los procesos industriales reduce los errores, disminuye el desperdicio de materiales y genera mayor confianza tanto en los equipos de trabajo como en los clientes. Una empresa que mide bien no produce más rápido necesariamente, pero produce con menos interrupciones, menos reprocesos y menos incertidumbre sobre la conformidad de sus productos. Esa estabilidad en el proceso es, en términos prácticos, una mejora real de la productividad (TCM Consultoría y Formación, s.f.).

- **Cumplimiento de requisitos regulatorios y de mercado.**

Acceder a mercados internacionales exige algo más que fabricar bien. Las industrias están sujetas a regulaciones cada vez más estrictas, tanto a nivel nacional como internacional, y que la metrología es la que asegura que las mediciones sean trazables a estándares reconocidos como los definidos por el Sistema Internacional de Unidades. Sin esa trazabilidad, un producto fabricado en Ecuador puede ser rechazado en Europa o en Estados Unidos sin importar su calidad real, simplemente porque no puede demostrarse que fue medido con un referente válido (Instituto de Ingeniería de España, 2025).

El incumplimiento de estos requisitos tiene consecuencias concretas. Si no se tiene las mediciones controladas puede derivar en que una auditoría detecte el incumplimiento de normas ISO obligatorias, lo que puede significar la pérdida de acreditaciones o contratos importantes. En sectores como la farmacéutica, donde la precisión en la dosificación de medicamentos es crítica, o en la aeronáutica, donde las tolerancias dimensionales están directamente vinculadas a la seguridad, el margen para el error regulatorio es prácticamente nulo. La metrología, en ese marco, no es solo una herramienta técnica si no es un requisito de entrada al mercado (TCM Consultoría y Formación, s.f.).

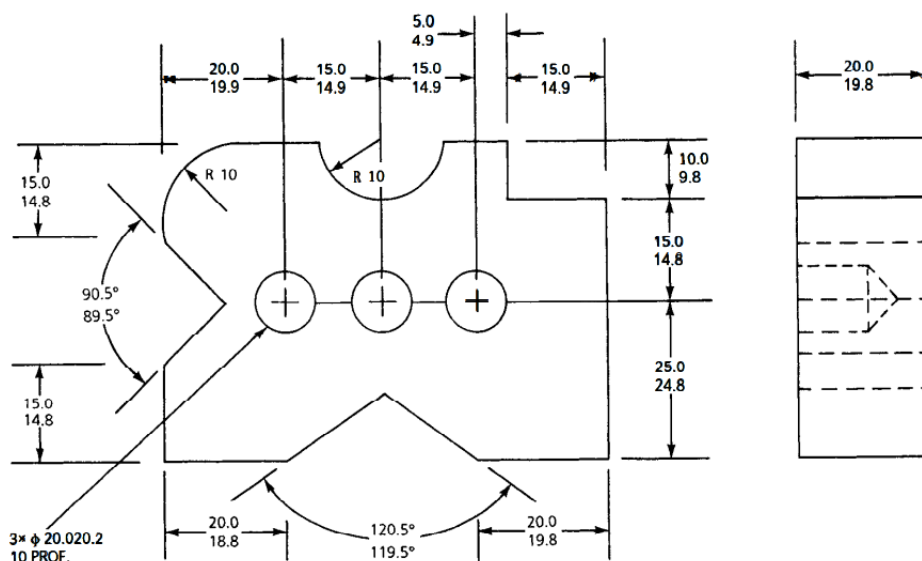
2.2 Conceptos fundamentales en metrología dimensional

La metrología dimensional comprende dos áreas principales, las cuales son la macrogeometría, enfocada en la medición de dimensiones como longitudes y ángulos, así como en la evaluación de formas geométricas como la rectitud, el paralelismo y la perpendicularidad; y la microgeometría, orientada al análisis de las características superficiales de una pieza, como es el caso de la rugosidad, un ejemplo de mediciones angulares y lineales se observa en la Figura 1 (Sánchez Salinas y Gómez Galán, 2017).

La metrología dimensional no se limita a la medición de pequeñas dimensiones. También existe la metrología dimensional a gran escala (LSM, por sus siglas en inglés), que abarca objetos con dimensiones lineales que van desde decenas hasta cientos de metros, con aplicaciones en los sectores automotriz, ferroviario y de construcción naval. Este campo ha impulsado un nuevo paradigma que invierte el enfoque metrológico clásico, en lugar de mover el objeto hasta el instrumento de medición, se utilizan sistemas de medición portátiles que pueden desplazarse fácilmente hasta la ubicación del objeto. Este cambio de enfoque refleja la versatilidad y amplitud de la metrología dimensional como disciplina (Franceschini et al., 2011).

Figura 1.

Pieza acotada con medidas lineales y angulares.



Nota. Tomado de *Metrología* (p. 41), por C. González González y J. R. Zeleny Vázquez, 1995, McGraw-Hill.

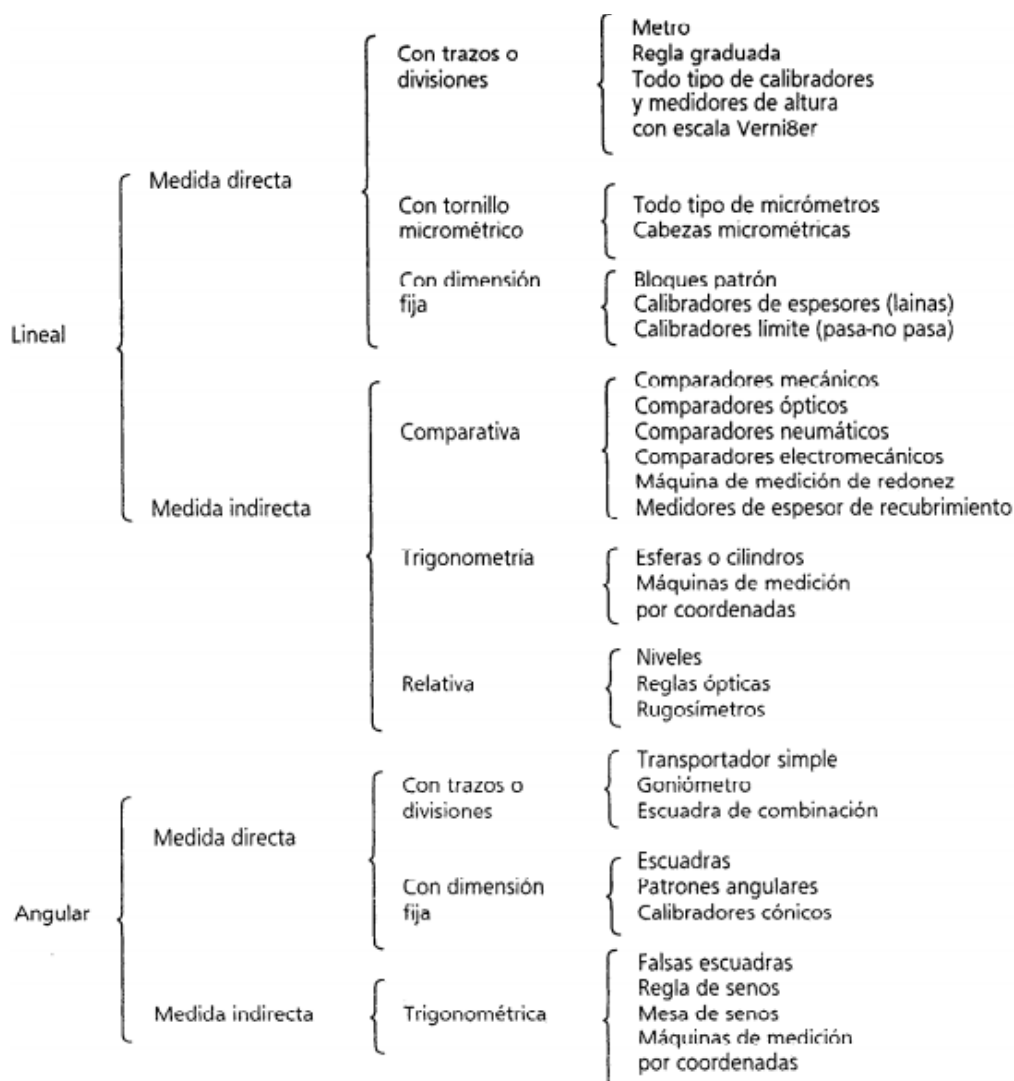
Introducción

La producción en serie no hubiera sido posible sin un principio concreto, el cual es la intercambiabilidad de piezas. Una pieza intercambiable es aquella que puede sustituirse por otra del mismo tipo sin retoques ni ajustes, sin que el mecanismo altere su funcionamiento. Ese concepto, que parece simple, cambió la lógica de la fabricación industrial, debido a que permitió que cualquier unidad tomada al azar de una serie tuviera el mismo rendimiento que las demás, con el consiguiente ahorro de tiempo y reducción de costos de material. Para que eso sea posible, el control dimensional debe definirse desde la etapa de diseño, fijando la precisión que la pieza realmente necesita según su función y condiciones de montaje. Exigir más exactitud de la necesaria no mejora el producto; solo encarece el proceso de medición y obliga a usar instrumental más costoso sin justificación técnica (Grupo Tecnología Mecánica, s.f.).

La eficiencia en la verificación dimensional también depende de cómo se organiza el trabajo de medición, identificando de primera mano cuales son las medidas directas e indirectas, como se observa en la Figura 2. El uso de aparatos automáticos y de operación simple permite que personal auxiliar realice las mediciones rutinarias, liberando a los especialistas para tareas que requieren mayor criterio técnico. Esa distribución no es solo una cuestión de costos, si no que también constituye una forma de garantizar que cada medición la realiza quien tiene la competencia adecuada para interpretarla. Además, la exactitud de un resultado no depende únicamente del instrumento puede ser también las condiciones ambientales en que se mide, especialmente la temperatura y la presión de contacto, influyen directamente en la confiabilidad del dato obtenido. Un mismo micrómetro puede dar resultados distintos si no se controlan esas variables (Grupo Tecnología Mecánica, s.f.).

Figura 2.

Clasificación de instrumentos y aparatos de medición en metrología dimensional



Nota. Tomado de *Metrología* (p. 42), por C. González González y J. R. Zeleny Vázquez, 1995, McGraw-Hill.

Medir mal cuesta más que no medir. Repetir mediciones innecesariamente, usar equipos inadecuados para la magnitud que se evalúa o hacerlo en condiciones ambientales incorrectas son errores frecuentes que generan datos poco confiables y decisiones equivocadas. Las exigencias actuales de la metrología en manufactura apuntan en una dirección clara, como son la exactitud de funcionamiento, intercambiabilidad garantizada, simplicidad en el montaje y

reducción del tiempo y costo de mantenimiento de instrumentos. Cumplir con todo eso no es responsabilidad de una máquina; es responsabilidad de quien dirige el área de verificación, cuyas decisiones deben estar siempre fundamentadas en criterios técnicos objetivos (Grupo Tecnología Mecánica, s.f.).

Medición

Medir es comparar una magnitud con otra de la misma especie para obtener un valor numérico. Esa comparación puede aplicarse a longitudes, ángulos, formas, rugosidad o posición, entre otras características geométricas. Ninguna medición es perfecta; siempre lleva consigo errores, y lo que importa es que la suma de esos errores sea menor que la tolerancia admisible para la pieza. La elección del instrumento depende de qué se mide, el material, el tipo de superficie y la precisión requerida. La medición es directa cuando se lee el valor sin dispositivo auxiliar, como con una regla o un pie de rey, e indirecta cuando el resultado se obtiene mediante cálculo a partir de otras medidas (Grupo Tecnología Mecánica, s.f.).

2.2.1 Exactitud, error e incertidumbre

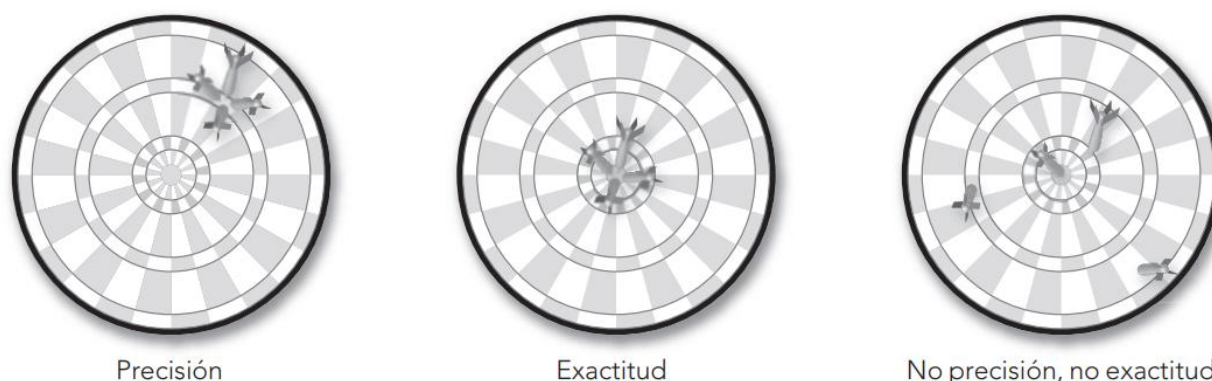
Exactitud: La exactitud expresa qué tan cerca está una medición del valor real de la magnitud que se evalúa. En la práctica, ese valor real se aproxima mediante un patrón de referencia de mayor exactitud conocida, y la desviación entre la lectura del instrumento y ese patrón es lo que cuantifica el error. Un instrumento puede ser preciso, es decir, repetir el mismo valor consistentemente, y aun así ser inexacto si ese valor está sistemáticamente alejado del patrón. Por eso exactitud y precisión no son sinónimos, aunque en el lenguaje cotidiano se usen como si lo fueran (Meza Sánchez y Zárate, 2017).

Precisión: Un instrumento preciso es el que, al medir repetidamente la misma magnitud, obtiene valores muy próximos entre sí. Esa consistencia no garantiza que el valor sea correcto ya que un instrumento puede repetir el mismo error con gran fidelidad. La precisión describe la

dispersión de los resultados, no su cercanía al valor real. En metrología, ambas cualidades son necesarias puesto que un instrumento que no es preciso tampoco puede ser exacto de forma confiable, porque sus resultados varían demasiado para establecer un patrón de comportamiento, en la Figura 3 (Sánchez Salinas y Gómez Galán, 2017).

Figura 3.

Esquema de precisión y exactitud



Nota. Tomado de Metrología y sus aplicaciones (p. 26), por A. Escamilla Esquivel, 2015, Grupo Editorial Patria.

Incertidumbre: La incertidumbre no es un defecto del instrumento ni del operador, es una característica inherente a toda medición. Se define como el parámetro que describe la dispersión de los valores que pueden atribuirse a una magnitud, considerando toda la información disponible. Sus componentes se estiman por dos vías. La evaluación Tipo A se obtiene por análisis estadístico de series de mediciones repetidas, expresada mediante desviaciones típicas. La evaluación Tipo B se determina a partir de información externa como certificados de calibración, especificaciones del fabricante o datos de experiencia previa, también expresada en términos de desviación típica. Ambas contribuyen a la incertidumbre combinada final que acompaña al resultado de cualquier medición (Sánchez Salinas y Gómez Galán, 2017).

Error

Los errores en metrología dimensional tienen fuentes concretas y bien identificadas. La guía técnica de trazabilidad metrológica de la EMA los clasifica en errores por el instrumento, por el operador, por el método, por la temperatura y por el tipo de contacto entre instrumento y pieza (Entidad Mexicana de Acreditación, 2014). En el caso específico de los micrómetros, a diferencia de otros instrumentos como los calibradores vernier, no presentan error de Abbe porque la escala de medición está alineada con el eje de medición, lo que elimina una fuente importante de error geométrico (Rodríguez, 2022). Sin embargo, la fuerza de contacto, la temperatura y la limpieza de las superficies de medición siguen siendo factores de influencia que deben controlarse en cualquier proceso de calibración.

El error de un instrumento es la diferencia entre lo que indica y el valor que debería indicar. Ese valor de referencia se denomina valor convencionalmente verdadero porque en metrología el valor absolutamente verdadero es inaccesible; se trabaja siempre con la mejor aproximación disponible, que es el patrón de mayor exactitud al alcance. El error absoluto se calcula restando ese valor de referencia al valor leído. Conocer el error de un instrumento es indispensable para decidir si sus resultados son aceptables para una aplicación determinada, y es el punto de partida para cualquier corrección de lectura (González González y Zeleny Vázquez, 1995).

Clasificación de los errores

Los errores en medición se clasifican según su origen. Pueden deberse al instrumento, al operador o al método empleado.

Errores por el instrumento

Ningún instrumento se fabrica perfectamente. Deformaciones estructurales, falta de linealidad en la escala, imperfecciones mecánicas o ausencia de paralelismo entre las superficies de contacto son fuentes de error que el propio proceso de fabricación introduce. Esos errores tienen límites tolerables definidos en normas técnicas o en las especificaciones del fabricante, y

se cuantifican mediante calibración. Cuando el error instrumental supera esos límites, el instrumento no cumple con los requisitos para los que fue diseñado y sus lecturas no son confiables (González González y Zeleny Vázquez, 1995).

Errores del operador y del método

El operador es una fuente de error que con frecuencia se subestima. Cansancio, falta de concentración o deficiencias visuales introducen variaciones que ningún instrumento puede compensar. A eso se suma la ausencia de un método documentado, que es cuando el procedimiento de medición no está definido, cada operador mide a su manera y los resultados no son comparables. La solución no es reemplazar al operador sino entrenarlo y darle un procedimiento claro. Un operador bien formado trabajando con un método documentado reduce drásticamente la variabilidad atribuible a este tipo de errores (González González y Zeleny Vázquez, 1995).

Error por instrumento no calibrado

Usar un instrumento sin calibración vigente es medir sin saber con qué error se trabaja. No es solo un incumplimiento normativo, es una decisión técnicamente indefendible porque cualquier resultado obtenido con ese instrumento carece de trazabilidad y no puede respaldarse ante una auditoría o certificación. Los instrumentos con calibración vencida o con comportamiento anómalo deben retirarse del servicio hasta ser verificados y autorizados. Para mediciones que exigen alta exactitud, las lecturas deben corregirse aplicando el error instrumental determinado en el último proceso de calibración (González González y Zeleny Vázquez, 1995).

Error por fuerza de medición

La fuerza con que un instrumento contacta la pieza no es un detalle menor. Una presión excesiva puede deformar la pieza, el instrumento o ambos, generando lecturas que no reflejan

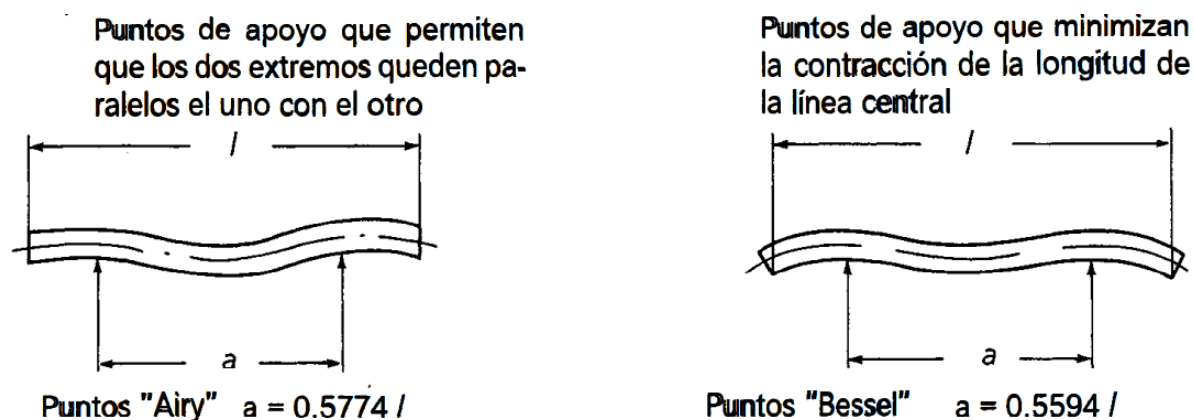
la dimensión real. Este factor es especialmente relevante en piezas de materiales blandos o en mediciones de alta precisión donde cualquier deformación elástica afecta el resultado. Por eso algunos micrómetros incorporan trinquetes o mecanismos de fricción que limitan la fuerza de contacto, y en aplicaciones críticas se especifica directamente un modelo de baja fuerza de medición (González González y Zeleny Vázquez, 1995).

Error por instrumento inadecuado

Elegir mal el instrumento es un error que ocurre antes de hacer cualquier medición. Medir el diámetro exterior de una pieza de hierro fundido con un calibrador vernier puede ser completamente válido; pero usar ese mismo calibrador para medir un perno patrón del mismo diámetro es insuficiente, porque la exactitud requerida supera lo que el instrumento puede ofrecer. La elección correcta depende de la magnitud a medir, el tipo de superficie, la cantidad de piezas y la exactitud que exige la aplicación. Usar un instrumento de menor resolución que la tolerancia de la pieza no es solo impreciso esto hace que el proceso de verificación no tenga sentido (González González y Zeleny Vázquez, 1995).

Error por puntos de apoyo y sujeción

En instrumentos de gran longitud, la posición en que se apoyan no es indiferente. El peso propio del instrumento genera flexiones que afectan la lectura si los puntos de apoyo no están correctamente ubicados. Para minimizar ese efecto se utilizan puntos de apoyo especiales, como los puntos Airy o Bessel, como se observa en la figura 4, cuyas posiciones están calculadas para que la deformación sea mínima y simétrica. Algo similar ocurre con la sujeción, un ejemplo es cuando un indicador de carátula sujeto a gran distancia de su soporte puede desviarse bajo la fuerza de medición, introduciendo un error que no proviene del instrumento sino de cómo está montado. La regla práctica es situar el eje de medición lo más cerca posible del eje del soporte (González González y Zeleny Vázquez, 1995).

Figura 4.*Puntos Airy o Bessel*

Nota. Tomado de *Metrología* (p. 58), por C. González González y J. R. Zeleny Vázquez, 1995, McGraw-Hill.

2.2.2 Trazabilidad metrológica

Trazabilidad: es la posibilidad de demostrar, con evidencia documentada, que una medición realizada en un taller guarda una relación conocida y verificable con el patrón nacional. Un instrumento no se calibra una vez y queda listo para siempre. La periodicidad de calibración depende de con qué frecuencia se usa y de qué tan críticas son las mediciones que realiza. Cada vez que se calibra, se renueva su vínculo con el patrón nacional de la unidad correspondiente a través de una cadena de comparaciones sucesivas que sube por la pirámide metrológica hasta el nivel más alto de referencial (Moro Piñeiro, 2017).

La cadena de trazabilidad en metrología dimensional parte de la definición del metro como unidad base del SI y desciende a través de calibraciones sucesivas hasta los instrumentos de uso industrial. En el nivel superior de esa cadena se encuentran los laboratorios nacionales de metrología, que mantienen los patrones primarios; en los niveles inferiores están los laboratorios secundarios acreditados, que calibran los instrumentos del sector productivo (Rodríguez, 2022). Demostrar esa trazabilidad no es un requisito burocrático: es la evidencia que permite que un

resultado de calibración emitido en Ecuador sea comparable con uno emitido en Alemania o en Japón, porque ambos comparten el mismo origen metrológico (DeFelsko, s.f.).

Sin trazabilidad, un certificado de calibración es solo un papel. Con ella, cualquier resultado de medición puede rastrearse hasta su origen metrológico, lo que le otorga validez técnica y legal en cualquier contexto donde se requiera demostrar conformidad con una norma o especificación (Moro Piñeiro, 2017).

La diseminación de la unidad de longitud (el metro) desde los patrones primarios hasta los instrumentos industriales depende de sistemas de medición de nivel primario custodiados por los Institutos Nacionales de Metrología. Al respecto, Coveney (2020) realizó una revisión exhaustiva de estos instrumentos e identificó desafíos de diseño críticos, tales como el control riguroso de la temperatura, la alineación óptica y la compensación de errores geométricos. La diversidad de enfoques técnicos adoptados por distintos laboratorios evidencia la complejidad inherente al mantenimiento de una cadena de trazabilidad confiable en las mediciones dimensionales (Coveney, 2020).

Calibración: Es comparar su escala contra la de un patrón de nivel superior, registrar la diferencia y repetir ese proceso subiendo por la pirámide metrológica hasta llegar al patrón nacional. Cada comparación acumula un error que se va arrastrando de nivel en nivel. Conocer ese error acumulado es lo que permite saber con qué margen real está midiendo un instrumento en el taller, y es lo que le otorga validez técnica a cualquier resultado obtenido con él, no es simplemente verificar que un instrumento funciona (Moro Piñeiro, 2017).

La calibración no es un proceso que se hace una sola vez. La periodicidad depende de con qué frecuencia se usa el instrumento y de qué tan críticas son las mediciones que realiza. Un instrumento que no se calibra con regularidad puede seguir funcionando aparentemente bien mientras acumula desviaciones que nadie está midiendo. Por eso cualquier instrumento, sin

importar su costo o sofisticación, debe calibrarse debido a que todos están afectados por una incertidumbre, y la única forma de conocerla es calibrando (Moro Piñeiro, 2017).

Tolerancia: En la fabricación mecánica, alcanzar el valor exacto indicado en un plano es algo que no ocurre en la práctica. Siempre existe una desviación. La tolerancia es el mecanismo que hace que esa desviación sea técnicamente aceptable, esta se define entre un valor máximo y un mínimo entre los cuales el valor real de la magnitud se considera válido. Una pieza que esté dentro de esos límites funciona; una que los supere, (Moro Piñeiro, 2017).

Hay dos tipos de tolerancia con propósitos distintos. La tolerancia de diseño es la que el ingeniero define para garantizar que la pieza cumpla su función dentro del mecanismo. La tolerancia de fabricación es la que resulta del método y los medios de producción disponibles. Cuando la tolerancia de fabricación es más amplia que la de diseño, el proceso no es apto para producir esa pieza con la precisión requerida, y eso es un problema que ningún ajuste posterior puede resolver completamente (Moro Piñeiro, 2017).

Temperatura de referencia: Los materiales se dilatan con el calor y se contraen con el frío. En metrología, esa realidad física tiene una implicación directa dado que las escalas de los instrumentos y los valores indicados en los planos solo son válidos a una temperatura de referencia de 20 °C. Medir fuera de esa temperatura no produce necesariamente un resultado inútil, pero sí un resultado que puede estar desviado si no se aplican las correcciones correspondientes por dilatación térmica (Moro Piñeiro, 2017).

En la práctica, para mediciones de precisión se acepta un intervalo de 20 °C $\pm$ 2 °C. En calibraciones de instrumentos ese margen se reduce a 20 °C $\pm$ 1 °C, porque ahí la exactitud exigida es mayor, dependiendo del caso. Por eso en metrología se recomienda no transmitir el calor de las manos al instrumento y trabajar en ambientes con temperatura controlada. Un detalle

que puede parecer menor, pero que en mediciones del orden de micras marca la diferencia entre un resultado válido y uno que no lo es (Moro Piñeiro, 2017).

Un aspecto crítico en la calibración de sistemas de medición de alta resolución es el control de los errores asociados a la temperatura. Investigaciones recientes del Laboratorio Nacional de Metrología Dimensional han demostrado que, incluso después de varias horas de estabilización térmica y utilizando compensación por software con tres sensores de temperatura, las diferencias térmicas a lo largo de la trayectoria de medición siguen siendo la fuente de error más influyente. En el caso de la calibración de escalas lineales, este error puede alcanzar 0,5 μm por cada metro de desplazamiento, mientras que para máquinas de medición por coordenadas puede llegar a 1,1 μm por metro (Lipus et al., 2024).

2.2.3 Repetibilidad y reproducibilidad

En el contexto de los sistemas de medición industriales, la evaluación de la repetibilidad y reproducibilidad se realiza mediante estudios estadísticos conocidos como Gage R&R. Estos estudios permiten separar la variación debida al instrumento de la variación debida al operador, determinando qué proporción de la variabilidad total del sistema de medición es atribuible a cada fuente (Parashare, 2024). Para instrumentos de alta precisión como los micrómetros digitales, la repetibilidad es la base de la evaluación de incertidumbre Tipo A y su cuantificación es un paso obligatorio en cualquier procedimiento de calibración conforme a ISO/IEC 17025.

Repetibilidad: La repetibilidad evalúa qué tan consistentes son los resultados cuando se mide la misma magnitud varias veces seguidas sin cambiar nada, utilizando el mismo instrumento, el mismo operador, el mismo lugar, el mismo procedimiento y en un intervalo de tiempo corto. Si los resultados varían mucho bajo esas condiciones controladas, el instrumento o el método tienen un problema que ninguna corrección posterior puede enmascarar. La repetibilidad se cuantifica con la dispersión estadística de los resultados, generalmente

expresada como desviación estándar, y es la base de la evaluación de incertidumbre Tipo A (Escamilla Esquivel, 2015).

Reproducibilidad: Mientras la repetibilidad mide la consistencia bajo condiciones fijas, la reproducibilidad evalúa qué tan comparables son los resultados cuando algo cambia como puede ser el operador, el instrumento, el lugar, el método o el tiempo. Es una prueba más exigente porque refleja lo que ocurre en condiciones reales, donde no todo puede controlarse. Para que un valor de reproducibilidad tenga sentido técnico, debe especificarse exactamente qué condiciones se variaron; sin eso, el dato no es interpretable. Los resultados que se comparan son habitualmente los ya corregidos por error instrumental (Escamilla Esquivel, 2015).

2.3 Micrómetros digitales

2.3.1 Principio de funcionamiento

El micrómetro de exteriores, también conocido como Palmer, funciona mediante un tornillo micrométrico cuyo giro produce el avance del husillo. La clave del instrumento está en la relación entre el movimiento rotacional y el desplazamiento lineal, esto se genera con un avance muy pequeño del husillo que corresponde a un giro angular considerable del tambor, lo que hace que dimensiones imperceptibles a simple vista puedan leerse directamente en la escala. Cuando el husillo recorre una distancia igual al paso del tornillo, el tambor completa exactamente una vuelta, y esa relación matemática es la que da al instrumento su precisión característica, las partes del micrómetro digital se encuentra en la Figura 6 (Moro Piñeiro, 2017).

El micrómetro digital conserva ese mismo principio mecánico, pero incorpora un sistema de detección electrónico, que puede ser óptico, magnético o capacitivo según el modelo, capaz de digitalizar el desplazamiento del husillo y presentarlo en una pantalla LCD. Esa transición del sistema analógico al digital eliminó los errores de interpolación que dependían de la agudeza visual del operador, y permitió alcanzar resoluciones de 0,01 mm en modelos estándar, con

versiones de 0,005 mm y 0,001 mm disponibles para aplicaciones de mayor exigencia metrológica (Meza Sánchez y Zárate, 2017).

Figura 5.

Micrómetro de exteriores digital



Nota. Tomado de *Metrología y ensayos* (p. 122), por M. Moro, 2017, Marcombo.

Calibración de micrómetros digitales

La calibración de micrómetros digitales ha sido objeto de estudios específicos orientados a cuantificar las fuentes de incertidumbre en condiciones reales de laboratorio. (Nehe et al., 2024) documentan que las principales fuentes de incertidumbre en la calibración de micrómetros exteriores son la repetibilidad de las mediciones, la incertidumbre del patrón de referencia, la resolución del instrumento y las variaciones térmicas del ambiente, todas ellas evaluadas siguiendo el método GUM. Sus resultados demuestran que una calibración sin información sobre la incertidumbre es técnicamente incompleta, independientemente de cuán cuidadoso haya sido el procedimiento.

La calibración de sensores de desplazamiento, como los que integran los micrómetros digitales, requiere de métodos que aseguren la trazabilidad hasta la definición del metro. Los sensores de desplazamiento pueden calibrarse mediante métodos interferométricos que utilizan

como referencia un láser estabilizado con yodo o un peine de frecuencias. Estos métodos permiten cuantificar y mitigar los errores periódicos inherentes a los sistemas interferométricos, alcanzando incertidumbres del orden de sub-nanómetros para sensores de pequeño rango. El conocimiento de esta periodicidad permite separar los errores de no linealidad tanto del instrumento de calibración como del sensor bajo prueba (Haitjema, 2020).

2.3.2 Partes, características y resolución

Cuerpo o marco

El cuerpo del micrómetro tiene forma de herradura y es la estructura que mantiene alineados todos los elementos del instrumento. En muchos modelos va cubierto por placas de material plástico que cumplen una función metrológica concreta la cual es aislar el instrumento del calor de la mano del operador, evitando dilataciones que afecten la lectura. Sobre el cuerpo suelen grabarse las dos características metrológicas fundamentales del instrumento como son el intervalo de valores de su escala y su sensibilidad (Moro Piñeiro, 2017).

Yunque y husillo

El yunque es la superficie fija de referencia contra la que se apoya la pieza. El husillo es el elemento móvil que avanza mediante el tornillo micrométrico hasta contactar la pieza por el lado opuesto. Ambas caras de medición están recubiertas de carburo de tungsteno, un material de alta dureza que resiste el desgaste, pero que por su fragilidad exige evitar golpes. La distancia entre esas dos caras es la que determina la dimensión medida (Moro Piñeiro, 2017).

Palanca de bloqueo o amarre del husillo

Una vez alcanzado el contacto con la pieza y leída la dimensión, la palanca de bloqueo fija la posición del husillo para que la medida no varíe al retirar el instrumento. Puede adoptar distintas formas según el modelo, tornillo, palanca o aro. Su uso es especialmente útil cuando se

necesita trasladar la lectura del instrumento a otro punto sin riesgo de que el husillo se desplace (Moro Piñeiro, 2017).

Eje calado o manguito

El manguito es el elemento sobre el que va grabada la escala principal del instrumento. Esa escala está expresada en milímetros y, en micrómetros métricos, incluye una segunda línea graduada con divisiones de 0,5 mm que permite leer medias vueltas del tornillo. La línea de índice que recorre longitudinalmente el manguito es la referencia visual para leer la posición del tambor graduado (Moro Piñeiro, 2017).

Tambor graduado

El tambor graduado lleva el nonio del instrumento, que permite leer la fracción de vuelta que ha girado el tornillo. Generalmente está dividido en 50 o 100 partes según la sensibilidad del modelo. En instrumentos de sensibilidad milesimal, el tambor incorpora un nonio adicional para afinar aún más la lectura. La parte posterior del tambor tiene un acabado moleteado que facilita su manejo con la mano (Moro Piñeiro, 2017).

Trinquete o limitador de presión

El trinquete está ubicado en el extremo del instrumento y cumple una función crítica, la cual es limitar la fuerza con que el husillo contacta la pieza. A partir de una presión determinada, el mecanismo gira en vacío sin avanzar más, garantizando que todas las mediciones se realicen con la misma fuerza de contacto. Sin ese control, el operador podría ejercer presiones distintas en cada medición, generando resultados inconsistentes o deformando piezas de materiales blandos (Moro Piñeiro, 2017).

Figura 6.*Partes de un micrómetro digital*

Nota. Tomado de “Micrómetro”, de TODO INGENIERIA INDUSTRIAL, s. f., WordPress.

<https://todoingenieriaindustrial.wordpress.com/metrologia-y-normalizacion/micrometro>

Resolución y sensibilidad

La resolución del micrómetro digital estándar es de 0,01 mm, aunque modelos de mayor precisión ofrecen resoluciones de 0,005 mm y 0,001 mm. La sensibilidad se expresa como el cociente entre el paso del tornillo micrométrico y el número de divisiones del nonio, siendo el paso del tornillo igual al valor de la menor división de la escala principal. El campo de medida estándar es de 25 mm, con rangos sucesivos de 0-25 mm, 25-50 mm y así sucesivamente, aunque existen modelos para rangos superiores al metro (Moro Piñeiro, 2017).

Cómo se expresa la sensibilidad, es de acorde a la ecuación (1)

$$s = \frac{\text{paso}}{n^{\circ} \text{ divisiones nonio}} \quad (1)$$

La expresión del paso del tornillo micrométrico es el siguiente:

$$s = \frac{\text{menor división de la regla principal}}{n^{\circ} \text{ divisiones del tambor}} \quad (2)$$

2.3.3 Factores de influencia en la medición

La exactitud de una medición con micrómetro no depende únicamente del instrumento, si no también depende de las condiciones en que se usa. El calor transferido desde la mano del operador dilata el cuerpo metálico del instrumento y desplaza la lectura; por eso los modelos con placas aislantes no son un lujo sino una solución técnica concreta. Las caras de medición deben estar limpias antes de cada uso, considerar que cualquier partícula entre la cara y la pieza suma directamente al valor leído. La fuerza de contacto, si no se controla mediante el trinquete, puede deformar piezas de materiales blandos o comprimir elásticamente la propia pieza, dando una lectura menor a la dimensión real (Moro Piñeiro, 2017).

Antes de tomar cualquier medición es necesario verificar la exactitud del instrumento. Para el rango 0-25 mm esa verificación se realiza sobre el valor cero. Para rangos superiores se utiliza un patrón de longitud auxiliar cuyo valor coincide con el mínimo de la escala; los micrómetros de exteriores vienen provistos de una barra patrón para ese fin. Si se detecta un desajuste, el instrumento puede corregirse antes de medir. Adicionalmente deben verificarse la planitud y paralelismo de las caras de medición, el avance del tornillo, el bloqueo del husillo y el funcionamiento del trinquete. Omitir esa comprobación no acelera el proceso, solo traslada el error al resultado sin que nadie lo detecte hasta que ya causó un problema (Moro Piñeiro, 2017).

2.4 Normativa técnica aplicable

2.4.1 ISO 3611

La norma ISO 3611:2023 es el documento técnico de referencia internacional para los micrómetros de medición exterior, tanto con indicación analógica como con indicación digital. En su tercera edición, publicada en mayo de 2023 por el comité técnico ISO/TC 213, establece las especificaciones dimensionales, los errores máximos permisibles según la clase del instrumento, los requisitos de repetibilidad y las condiciones bajo las cuales deben realizarse las inspecciones, siendo la temperatura de referencia de 20 °C el parámetro ambiental principal (International

Organization for Standardization, 2023). Esta norma es el criterio de aceptación central del procedimiento de calibración desarrollado en este trabajo, ya que determina si un micrómetro digital cumple o no con los requisitos para los que fue diseñado.

2.4.2 ISO/IEC 17025

Para cumplir con ISO/IEC 17025, se necesita 3 cosas primordiales:

Certificados de calibración válidos para todos tus patrones (bloques patrón, anillos calibrados, etc.) (Harris, 2019).

Datos estadísticos del proceso de calibración. Lo ideal es tenerlos de programas de control de medición internos (cartas de control) (Harris, 2019).

Conocimiento técnico del proceso de medición. Esto viene de procedimientos de referencia, papers técnicos, experimentos, comparaciones interlaboratorio, o diagramas de causa-efecto (Harris, 2019).

La norma ISO/IEC 17025 define los criterios que un laboratorio de ensayo o calibración debe cumplir para demostrar que sus mediciones son técnicamente válidas. No es una norma de gestión general, esta nació específicamente para el entorno de laboratorio, donde los errores de medición tienen consecuencias directas sobre la seguridad de productos, la confiabilidad de procesos industriales y la validez legal de los certificados emitidos. Su estructura integra dos dimensiones que no pueden separarse como son los requisitos de gestión organizacional, que determinan cómo se administra el laboratorio, y los requisitos técnicos, que determinan cómo se realizan y documentan las mediciones (Panagiotidou et al., 2024).

En muchos sectores, la acreditación bajo esta norma ha dejado de ser voluntaria. En laboratorios de calibración, cumplir con ISO/IEC 17025 es una condición previa para operar en mercados que exigen reconocimiento internacional de los resultados. Un laboratorio que emite certificados de calibración sin estar acreditado bajo esta norma no puede garantizar que sus

mediciones sean comparables con las de otros laboratorios en el mundo, lo que limita directamente la validez comercial y técnica de su trabajo (Panagiotidou et al., 2024).

Requisitos de competencia técnica del personal

La norma no se conforma con que el personal tenga formación académica esta exige que cada técnico demuestre competencia específica para las tareas que realiza dentro del laboratorio. Eso incluye conocer el fundamento del método que aplica, saber operar y verificar los instrumentos que utiliza, interpretar correctamente los resultados y documentar el proceso con el nivel de detalle que la norma requiere. La competencia se evalúa, se registra y se actualiza; no es un estado permanente sino un proceso que el laboratorio debe gestionar activamente (Panagiotidou et al., 2024).

La experiencia acumulada en tareas concretas es parte indispensable de esa competencia. Un técnico recién incorporado puede tener los conocimientos teóricos correctos y aun así no estar listo para ejecutar determinadas mediciones sin supervisión. Por eso la rotación frecuente de personal representa un riesgo real para la calidad del sistema ya que cada vez que un técnico experimentado sale del laboratorio, se lleva consigo un conocimiento práctico que no está escrito en ningún procedimiento y que tarda tiempo en reconstruirse (Panagiotidou et al., 2024).

Trazabilidad de las mediciones y verificación de métodos

La trazabilidad es el requisito que técnicamente separa a ISO/IEC 17025 de cualquier otro sistema de gestión de calidad. Todo resultado emitido por un laboratorio acreditado bajo esta norma debe tener una cadena documentada de calibraciones sucesivas que lo conecte con un patrón nacional o internacional reconocido, con la incertidumbre de cada eslabón registrada y verificable. Sin esa cadena, el certificado de calibración no tiene validez técnica ni legal, independientemente de qué tan cuidadoso haya sido el procedimiento de medición (Panagiotidou et al., 2024).

La verificación de métodos es el complemento necesario de la trazabilidad. No basta con usar instrumentos calibrados, considerar que el método con el que se realiza la medición también debe estar validado, es decir, debe demostrarse que produce resultados exactos, repetibles y reproducibles dentro del rango de aplicación declarado. En el caso de la calibración de micrómetros digitales, esto implica documentar el procedimiento completo, los puntos de medición seleccionados, las condiciones ambientales controladas y el cálculo de incertidumbre, de modo que cualquier laboratorio que siga el mismo procedimiento obtenga resultados comparables (Panagiotidou et al., 2024).

Aseguramiento y control de la calidad

El aseguramiento de la calidad no es una sección del manual del laboratorio, es el conjunto de mecanismos que permiten verificar, de forma objetiva y continua, que el sistema funciona como se declaró en el momento de la acreditación. ISO/IEC 17025 exige que esos mecanismos sean concretos y periódicos. Los controles internos de calidad, como el uso de materiales de referencia certificados o la repetición sistemática de mediciones de verificación, permiten detectar derivas en el rendimiento del instrumento o del método antes de que afecten a los resultados reales entregados al cliente (Panagiotidou et al., 2024).

La participación en ensayos de aptitud de interlaboratorio (que se realiza entre dos o más laboratorios distintos) es otra exigencia de la norma que va más allá del control interno. Comparar los resultados propios con los de otros laboratorios acreditados que miden la misma magnitud es la única forma de detectar errores sistemáticos que los controles internos no pueden revelar por sí solos. A eso se suman las auditorías internas, que evalúan si los procedimientos documentados se aplican realmente en la práctica, y las revisiones del sistema de gestión, que analizan el desempeño global del laboratorio e identifican oportunidades de mejora. Sin estos controles, la acreditación se convierte en un estado estático que no refleja la realidad operativa del laboratorio (Panagiotidou et al., 2024).

Imparcialidad e integridad operacional

La imparcialidad es el requisito que distingue a ISO/IEC 17025 con mayor claridad de otras normas de gestión. Un laboratorio de calibración no puede operar correctamente si sus resultados están influenciados por lo que el cliente quiere obtener en lugar de lo que la medición realmente indica. La norma exige que el laboratorio demuestre independencia estructural frente a esas presiones, lo que implica tener procedimientos claros sobre cómo se manejan los conflictos de interés, cómo se protege la confidencialidad de los resultados y cómo se garantiza que ningún resultado puede modificarse una vez registrado (Panagiotidou et al., 2024).

La integridad individual del personal es el factor que la norma reconoce como más difícil de gestionar mediante requisitos formales. Un procedimiento documentado no puede obligar a un técnico a reportar un resultado desfavorable cuando hay presión comercial o institucional para hacerlo de otra manera. Por eso ISO/IEC 17025 va más allá de los requisitos organizacionales y señala que es responsabilidad del laboratorio definir criterios explícitos de conducta ética, incorporarlos dentro de los criterios de competencia del personal e implementar sistemas de monitoreo que los hagan cumplir en la práctica. La calidad de una medición empieza en el instrumento, pero termina en la decisión de quien registra el resultado (Panagiotidou et al., 2024).

2.4.3 GUM (Guía para la Expresión de la Incertidumbre)

La Guía para la Expresión de la Incertidumbre en la Medición, conocida como GUM y publicada por el Comité Conjunto de Guías en Metrología bajo la referencia JCGM 100:2008, es el documento de referencia mundial para la evaluación y expresión de la incertidumbre en cualquier proceso de medición. Su propósito fundamental es proporcionar un procedimiento uniforme y aceptado internacionalmente para caracterizar la calidad del resultado de una medición, de modo que los resultados obtenidos en distintos países y laboratorios sean comparables entre sí (Centro Español de Metrología, 2010).

El método GUM establece que toda medición debe ir acompañada de su incertidumbre expandida, obtenida mediante la combinación cuadrática de todas las fuentes de incertidumbre identificadas. Estas fuentes se clasifican en dos tipos: las de Tipo A, evaluadas por análisis estadístico de series de mediciones repetidas y expresadas como desviaciones estándar, y las de Tipo B, determinadas a partir de información externa como certificados de calibración, especificaciones del fabricante o datos de experiencia previa (Schmid y Lazos, 2004). La incertidumbre combinada se amplía mediante un factor de cobertura k , que para un nivel de confianza del 95% toma el valor de $k=2$, obteniéndose así la incertidumbre expandida $U = k \cdot u_c$ (Rodríguez, 2018).

Los laboratorios acreditados bajo ISO/IEC 17025 deben reportar incertidumbres conforme al GUM (Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement).

Concepto clave: La incertidumbre no es lo mismo que el error. El error es un valor desconocido (la diferencia entre lo que medimos y el valor verdadero). La incertidumbre es una estimación cuantificable de cuán grande podría ser ese error (Harris, 2019)

Según el GUM, la incertidumbre de medición es un parámetro que caracteriza la dispersión de los valores que podrían ser razonablemente atribuidos al mensurando. En términos más directos: es el rango dentro del cual probablemente se encuentra el valor verdadero (Joint Committee for Guides in Metrology, 2008)

Ejemplo: si se calibra un instrumento y se reporta una medida de $25.003 \text{ mm} \pm 0.002 \text{ mm}$ ($k=2$) significa que el valor verdadero tiene ~95% de probabilidad de estar entre 25.001 y 25.005 mm (Joint Committee for Guides in Metrology, 2008)

Fuentes de Incertidumbre en Micrómetros Digitales

Las fuentes típicas de incertidumbre en la calibración de micrómetros incluyen:

Repetibilidad: Variación cuando mides el mismo patrón varias veces.

Resolución: El incremento más pequeño que muestra el display digital (típicamente 0.001 mm).

Patrón de calibración: Incertidumbre reportada en el certificado de los bloques patrón.

Temperatura: Desviaciones de 20°C y diferencias de expansión térmica entre el micrómetro y el patrón.

Fuerza de medición: Variación en la fuerza aplicada al cerrar el micrómetro.

Deriva del instrumento: Cambios graduales en la calibración del micrómetro con el tiempo o uso.

METODOLOGÍA PARA DETERMINAR LA INCERTIDUMBRE

La GUM propone un proceso sistemático de 8 pasos. Cada paso se construye sobre el anterior. No se puede saltar ninguno si se quiere que el resultado sea defendible (Harris, 2019)

Paso 1: Especificar el proceso de medición

Se debe definir claramente qué se está midiendo y cómo.

Esto debe incluir:

- El mensurando (error de indicación del micrómetro en cada punto de calibración)
- Los puntos de calibración (por ejemplo: 0, 5, 10, 15, 20, 25 mm)
- Los patrones que se va a usar (bloques patrón grado 1 o 2)
- El procedimiento de medición (SOP específico del laboratorio)
- Las condiciones ambientales (temperatura, humedad, vibración)

Ecuación de medición

Para un micrómetro digital calibrado con bloques patrón:

$$E = L_{mic} - L_{patrón} - \delta_{temp} - \delta_{deriva} \quad (2)$$

Esta ecuación indica que el error del micrómetro es la diferencia entre lo que indica y el valor real del patrón, corregido por efectos de temperatura y deriva (Harris, 2019).

Donde

E = error de indicación

L_{mic} = lectura del micrómetro

$L_{patrón}$ = valor del patrón,

δ_{temp} = corrección por temperatura

δ_{deriva} = corrección por deriva.

Paso 2: Identificar los componentes de incertidumbre

Hay que hacer una lista completa de todo lo que puede contribuir a la incertidumbre. El GUM divide las fuentes en dos tipos:

Tipo A: Evaluación Estadística

Se evalúa mediante análisis estadístico de series de observaciones. Básicamente, cuando existen los datos medidos y se puede calcular las desviaciones estándar.

Ejemplos en micrómetros:

- Repetibilidad del proceso (mediciones repetidas del mismo patrón)
- Datos históricos de cartas de control

Tipo B: Juicio Científico

Se evalúa por otros medios que no sean análisis estadístico. Incluye información de certificados, especificaciones del fabricante, experiencia previa, o referencias técnicas.

Ejemplos en micrómetros:

- Incertidumbre del patrón (del certificado de calibración)
- Resolución del display digital
- Variación de temperatura
- Fuerza de medición

Paso 3: Cuantificar las estimaciones de Incertidumbre

Ahora hay que cuantificar cada componente. Todos los valores deben estar en las mismas unidades al igual que el resultado final (mm para micrómetros) (Harris, 2019).

Tipo A: Métodos Estadísticos

Una vez con los datos medidos ya se puede calcular la desviación estándar. **Ejemplo:** si se midió un bloque patrón de 25 mm diez veces y se obtiene las siguientes medidas:

25.001, 25.002, 25.001, 25.003, 25.002, 25.001, 25.002, 25.003, 25.002, 25.001

Todas las medidas anteriores en mm

La desviación estándar de esas lecturas es “ s_p ” (**incertidumbre del proceso**).

En este caso, $s_p = 0.00082$ mm.

Tipo B: Otros Métodos

Aquí se usa hojas de cálculo o análisis de escenarios.

Ejemplo, para temperatura:

- Variación de temperatura en el laboratorio: $\pm 1^{\circ}\text{C}$
- Coeficiente de expansión térmica del acero: $11.5 \times 10^{-6} /^{\circ}\text{C}$
- Longitud nominal: 25 mm
- Variación dimensional = $25 \text{ mm} \times 11.5 \times 10^{-6} /^{\circ}\text{C} \times 1^{\circ}\text{C} = 0.000288 \text{ mm}$

Paso 4: Convertir a incertidumbres estándar

Todos los valores deben representar un nivel de confianza de 1 sigma ($k=1$), que es aproximadamente 68%. Esto significa convertir todo a desviaciones estándar.

Tipo A: Ya está listo

La desviación estándar que se calculó en el paso 3 ya es una incertidumbre estándar. No se necesita hacer nada más.

Tipo B: Aplicar factores de conversión

En este punto es donde entran las distribuciones de probabilidad. Según el GUM, se usa una distribución rectangular. El factor de conversión es $\sqrt{3}$ (raíz de 3) (Harris, 2019).

Distribución Rectangular

Se usa cuando solo conoces los límites. La fórmula es:

$$u = \frac{a}{\sqrt{3}} \quad (4)$$

donde 'a' es el semiancho del intervalo (la mitad del rango total).

Ejemplo: Resolución del micrómetro = 0.001 mm

$$u_{res} = \frac{0.001}{\sqrt{3}} = 0.00058 \text{ mm}$$

Distribución Normal

Cuando el certificado del patrón reporta una incertidumbre expandida con $k=2$, se divide entre 2:

$$u_s = \frac{U}{k} \quad (5)$$

Ejemplo: Si el certificado reporta $U = 0.20 \mu m$ ($k=2$) para un bloque de 25 mm

$$u_s = \frac{0.20}{2} = 0.10 \mu m = 0.0001 mm$$

Paso 5: Calcular la incertidumbre combinada

Combina todas las incertidumbres estándar usando el método de raíz cuadrada de la suma de cuadrados (RSS).

La ecuación fundamental es:

$$u_c = \sqrt{s_p^2 + u_s^2 + u_o^2 + u_u^2 + u_d^2} \quad (6)$$

Donde:

u_c = incertidumbre estándar combinada

s_p = desviación estándar del proceso

u_s = incertidumbre del patrón

u_o = otros factores (resolución, temperatura, etc.)

u_u = factores no relacionados al proceso

u_d = incertidumbre por sesgos o diferencias (si aplica)

Ejemplo numérico para micrómetro de 0-25 mm

$$s_p = 0.0008 \text{ mm (de 10 mediciones repetidas)}$$

$$u_s = 0.0001 \text{ mm (bloque patrón grado 1)}$$

$$u_{res} = 0.00058 \text{ mm (resolución } 0.001 \text{ mm} / \sqrt{3})$$

$$u_{temp} = 0.00029 \text{ mm (variación } \pm 1^\circ\text{C)}$$

$$u_{deriva} = 0.0002 \text{ mm (histórico del laboratorio)}$$

Aplicando la fórmula RSS:

$$u_c = \sqrt{0.0008^2 + 0.0001^2 + 0.00058^2 + 0.00029^2 + 0.0002^2}$$

$$u_c = \sqrt{0.00000111} = 0.00105 \text{ mm} \approx 0.0011 \text{ mm}$$

Paso 6: Calcular la incertidumbre expandida

La incertidumbre combinada (u_c) representa aproximadamente 68% de confianza. Para reportar en certificados, normalmente se requiere ~95% de confianza. Esto se logra multiplicando por un factor de cobertura k.

$$U = k \times u_c \quad (7)$$

Que valor es recomendable para “k”

El valor de k depende de los grados de libertad efectivos. Cuando se tiene muchos datos (más de 30-50 mediciones), k = 2 es apropiado para ~95% de confianza. Con menos datos, k aumenta.

Valores típicos de k para ~95% de confianza:

∞ grados de libertad: k = 2.000

50 grados de libertad: k = 2.009

20 grados de libertad: $k = 2.086$

10 grados de libertad: $k = 2.228$

5 grados de libertad: $k = 2.571$

Grados de Libertad Efectivos (Ecuación Welch-Satterthwaite)

Cuando se combina múltiples componentes con diferentes grados de libertad, se calcula los grados de libertad efectivos (ν_{eff}) con esta fórmula:

$$\nu_{eff} = \frac{u_c^4}{\sum \left(\frac{u_i^4}{\nu_i} \right)}$$

Reglas para asignar grados de libertad:

Tipo A (mediciones estadísticas): $\nu = n - 1$, donde n es el número de mediciones

Tipo B (distribución rectangular/triangular): $\nu = \infty$ (infinito)

Tipo B (del certificado del patrón)

Ejemplo

$u_c = 0.0011 \text{ mm}$:

Si se calcula $\nu_{eff} = 25$, entonces $k = 2.06$

$$U = 2.06 \times 0.0011 \text{ mm} = 0.0023 \text{ mm} \approx 0.002 \text{ mm}$$

Para simplificar, si se tiene más de 50 grados de libertad efectivos, se puedes usar $k = 2$ directamente.

Paso 7: Evaluar la Incertidumbre Expandida

Antes de reportar, hay que verificar que la incertidumbre sea razonable y cumpla con los requisitos aplicables.

Verificaciones Básicas

Sanidad: Verificar si el resultado tiene sentido. Si la incertidumbre calculada es del mismo orden que la medición, algo salió mal.

Tolerancias: La incertidumbre debe ser significativamente menor que las tolerancias del micrómetro. Regla común: $U < \frac{\text{tolerancia}}{3}$.

Requisitos del cliente: Verificar si el cliente especificó una incertidumbre máxima aceptable.

CMC (Capacidad de Medición y Calibración): Los laboratorios acreditados no pueden reportar incertidumbres menores que las publicadas en su alcance.

Criterios de Decisión de Conformidad

Cuando se evalúa si un micrómetro cumple con especificaciones, la incertidumbre afecta la decisión:

Regla de aceptación simple: El valor medido $\pm U$ debe estar completamente dentro de los límites de especificación.

Zona de guardia: Se establece una zona de seguridad igual a U antes de cada límite.

Ejemplo:

Especificación para micrómetro 0-25 mm es $\pm 2 \mu\text{m}$.

$$U = 0.8 \mu\text{m}.$$

Zona de aceptación: $-1.2 \mu\text{m}$ a $+1.2 \mu\text{m}$ (límite $\pm U$)

Zona de guardia: -2.0 a -1.2 μm y +1.2 a +2.0 μm

PASO 8: Reportar la Incertidumbre

El reporte debe ser claro, completo, y seguir las reglas de redondeo apropiadas.

Reglas de Redondeo

Según GLP 9 (Good Laboratory Practice):

La incertidumbre expandida se redondea normalmente a 1 o 2 cifras significativas.

El resultado de la medición se redondea al mismo número de decimales que la incertidumbre.

Nunca se debe reportear más dígitos en el resultado que los justificados por la incertidumbre.

Ejemplos:

INCORRECTO: 25.00347 mm $\pm$ 0.002 mm

CORRECTO: 25.003 mm $\pm$ 0.002 mm

Declaración de Incertidumbre en el Certificado

Incluye una declaración como la siguiente:

"La incertidumbre estándar combinada incluye la incertidumbre reportada para el patrón, la incertidumbre del proceso de medición, y otros factores considerados significativos. La incertidumbre estándar combinada se multiplica por un factor de cobertura $k = 2.0$ para obtener la incertidumbre expandida, la cual define un intervalo con un nivel de confianza de aproximadamente 95%." (Harris, 2019).

2.5 Procedimientos de calibración en instrumentos de longitud

La calibración establece la relación entre los valores indicados por el instrumento y los valores verdaderos convencionales del mensurando. En el contexto industrial actual, donde las tolerancias se miden en micras, un micrómetro descalibrado puede significar la diferencia entre producir piezas conformes o generar costosos rechazos y reprocesos (Flack, 2014).

2.5.1 Diferencia entre calibración y ajuste

Es crucial entender que calibrar no es ajustar. La calibración es un proceso de comparación que documenta el "estado actual" del instrumento sin modificarlo. El ajuste es una acción correctiva posterior que intenta minimizar los errores detectados. En la práctica industrial, primero se calibra, se evalúa si los errores están dentro de límites aceptables y, solo si exceden estos límites, se procede al ajuste seguido de una recalibración (Flack, 2014).

2.5.2 Preparación para la Calibración

Condiciones ambientales

La temperatura es el factor ambiental más crítico. Según ISO 1:2016, la temperatura de referencia para mediciones dimensionales es **20.0 °C ± 0.5 °C** (Flack, 2014).

Consideraciones térmicas:

Estabilización térmica: Los micrómetros y bloques patrón deben estabilizarse en el ambiente de calibración durante al menos 4 horas (para instrumentos de 0-25 mm) o más para rangos mayores. Un micrómetro de 75-100 mm puede requerir 8-12 horas de estabilización (Flack, 2014).

Coeficiente de expansión térmica: El acero tiene aproximadamente $11.5 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$. Un error de temperatura de 1°C en un micrómetro de 25 mm produce un error de aproximadamente 0.3 µm. Para micrómetros digitales con resolución de 0.001 mm, esto es significativo (Flack, 2014).

Gradientes térmicos: Evitar corrientes de aire, luz solar directa, fuentes de calor radiante. El calor corporal del operador puede afectar; usar guantes térmicos o pinzas (Flack, 2014).

Humedad relativa: Mantener entre 40-60% para minimizar corrosión y problemas electrostáticos en componentes digitales (Flack, 2014).

2.5.3 Limpieza meticulosa

Antes de calibrar:

1. Limpieza de micrómetro:

- Limpiar con solvente adecuado (alcohol isopropílico) usando papel libre de pelusa
- Secar completamente con aire comprimido filtrado (NO dirigir aire a alta presión directamente sobre encoders)
- Verificar que no queden fibras o residuos en las caras de medición
- Inspeccionar visualmente con lupa (10x) las caras de medición buscando rayaduras, burrs o desgaste.

2. Limpieza de bloques patrón:

- Nunca tocar las caras de medición con las manos desnudas
- Usar papel de limpieza especial para bloques patrón
- Aplicar movimientos suaves y circulares
- Verificar mediante un deslizamiento contra un bloque de control (si se adhieren correctamente, están limpios)

2.5.4 Verificación de funcionalidad

Antes de iniciar la calibración propiamente dicha, verificar:

- **Batería:** Nivel de carga suficiente para toda la calibración (considerar batería nueva)
- **Display:** Sin píxeles muertos, legibilidad correcta
- **Movimiento del husillo:** Suave, sin puntos duros ni juego excesivo
- **Trinquete o dispositivo de fuerza constante:** Funcionamiento correcto, "clicks" consistentes
- **Función ZERO:** Responde correctamente

- **Selector mm/inch:** Funciona (si aplica)
- **Salida de datos:** Funciona correctamente (si el micrómetro tiene puerto de datos)

2.6 Buenas prácticas metrológicas en laboratorios

El National Physical Laboratory define seis principios. Son directos y vale la pena tenerlos claros desde el inicio:

Mediciones correctas: medir solo lo que realmente se necesita medir, con un requisito definido detrás (Flack, 2014).

Herramientas correctas: usar equipos y métodos que ya demostraron ser adecuados para la tarea. No asumir, verificar (Flack, 2014).

Personal competente: quien mide debe saber lo que está haciendo. Titulación y conocimiento práctico van juntos (Flack, 2014).

Revisión regular: tanto interna como externa. El que siempre revisa sus propios resultados acaba por no ver sus propios errores (Flack, 2014).

Consistencia demostrable: una medición hecha en el laboratorio A debe coincidir con la del laboratorio B. Si no coincide, algo está mal en alguno de los dos (Flack, 2014).

Procedimientos correctos: todo proceso de medición debe estar documentado y alineado con normas nacionales o internacionales. Sin procedimiento escrito, no hay trazabilidad real (Flack, 2014).

Las mejores prácticas de metrología son:

2.6.1 Manipulación y sujeción del instrumento

Utilización de un soporte para montar el micrómetro

Minimiza la influencia del operador (calor corporal, pulso) y evita que las manos calienten el marco del micrómetro, lo que podría alterar la lectura por expansión térmica. El marco, al estar

fabricado generalmente en acero o materiales con coeficiente de expansión térmica significativo, puede sufrir dilataciones locales que alteren la distancia entre el yunque y el husillo. En micrómetros digitales con resolución de 0,001 mm, incluso una variación térmica de 1 °C puede inducir errores superiores a 0,3 μm en un micrómetro de 25 mm de rango (Flack, 2014).

Figura 7.

Soporte para micrómetros



Nota. Tomado de *Callipers and micrometers* (p. 49), por D. Flack, 2014.

Sujetar el micrómetro por las zonas aislantes térmicas

Muchos micrómetros tienen mangos o insertos de material aislante para evitar la transferencia de calor del operador al instrumento (Flack, 2014).

Figura 8.

Aislante térmico que algunos micrómetros poseen



Nota. Tomado de *Callipers and micrometers* (p. 49), por D. Flack, 2014.

2.6.2 Inspección diaria

Punto cero: puede desplazarse con los cambios de temperatura. Verificarlo al inicio de cada sesión no es burocracia, es condición mínima para que las mediciones sirvan de algo.

Fuerza de medición: una variación en la fuerza afecta directamente el resultado. En micrómetros con trinquete, el barril debe girar de manera suave y consistente.

Ajuste mecánico: el husillo y sus roscas deben moverse sin juego, sin puntos duros, sin irregularidades. Cualquier backlash se corrige con la tuerca cónica ajustadora.

Después de una caída o golpe: revisar punto cero, fuerza, ajuste mecánico, runout del dedal, paralelismo de caras y error instrumental. Un golpe aparentemente menor puede afectar la calibración sin dejar marcas visibles (Flack, 2014).

2.6.3 Uso correcto del dispositivo de fuerza constante (trinquete o matraca)

Accionar el trinquete con el pulgar y el dedo del medio

Lo recomendable es ir girando suavemente hasta escuchar un solo "clic" (o como máximo 2-3 clics). El giro rápido o múltiples clics aplican una fuerza de medición excesiva e inconsistente, deformando la pieza o el instrumento y generando lecturas falsas (Flack, 2014).

Aplicar exactamente la misma fuerza al calibrar (con bloques patrón) que al medir piezas.

La repetibilidad de las mediciones depende de que la fuerza de contacto sea constante. El trinquete está diseñado para proporcionar esa constancia (Flack, 2014).

Verificar que el trinquete gire suavemente

Los "clics" deben ser audibles y consistentes. Un trinquete duro, pegajoso o que no clica correctamente no aplicará la fuerza constante especificada, introduciendo una fuente de error (Flack, 2014).

2.6.4 Prevención de errores de lectura

Leer la escala siempre desde una posición perpendicular al centro de la misma.

Evita el error de paralaje, que ocurre porque la escala del tambor y la línea de referencia del cilindro no están en el mismo plano. Una vista angular desplaza la lectura (Flack, 2014).

En micrómetros digitales, verificar la unidad seleccionada (mm/pulg) antes de cada calibración.

Es fácil seleccionar inadvertidamente la unidad incorrecta. Un error de lectura de 25.4 mm a 1 pulgada es muy representativo (Flack, 2014).

Revisar el ajuste del "zero"

Antes y después de cada serie de mediciones revisar que esté encerrado el micrómetro, hay factores como la temperatura, la limpieza o un pequeño golpe pueden alterar el cero. Verificarlo al inicio y al final de la calibración detecta desviaciones durante el proceso (Flack, 2014).

2.6.5 Almacenamiento de Micrómetros

Esto parece obvio, pero es donde más errores silenciosos se generan, las recomendaciones son:

- Guardarlo en su estuche, siempre.
- Ambiente con baja humedad, sin polvo, sin sol directo.
- Las caras de medición separadas entre 0.1 y 1 mm. No en contacto.
- No fijar el husillo durante el almacenamiento.
- Si va a estar guardado mucho tiempo, limpiar a fondo, aplicar aceite antioxidante y envolverlo en papel o tela impregnados en aceite.

2.6.6 Cuidados para Micrómetros Digitales

Los micrómetros digitales tienen las mismas exigencias que los convencionales, más algunas adicionales:

- Evitar la exposición a UV ni sol directo, porque deteriora las pantallas LCD.
- No debe tener cambios bruscos de temperatura, la condensación interna daña los adhesivos del ensamble.
- No aplicar voltaje externo al instrumento (por ejemplo, marcadores eléctricos sobre la carcasa).
- No someter, interferencias electromagnéticas, electricidad estática y fugas de corriente pueden afectar las lecturas.
- Usar detergente neutro para limpiar, nunca solventes orgánicos.
- Retirar la batería si el instrumento va a estar guardado por un período prolongado.
- Si falla algo interno, no abrirlo. Enviarlo al fabricante.

2.6.7 Verificaciones rutinarias

Verificar la planitud y el paralelismo de las caras de medición utilizando paralelos ópticos

Las franjas de interferencia coloreadas revelan imperfecciones geométricas de las caras (falta de planitud o falta de paralelismo entre yunque y husillo) que un bloque patrón no puede detectar fácilmente (Flack, 2014).

Figura 9.

Juego de paralelos ópticos



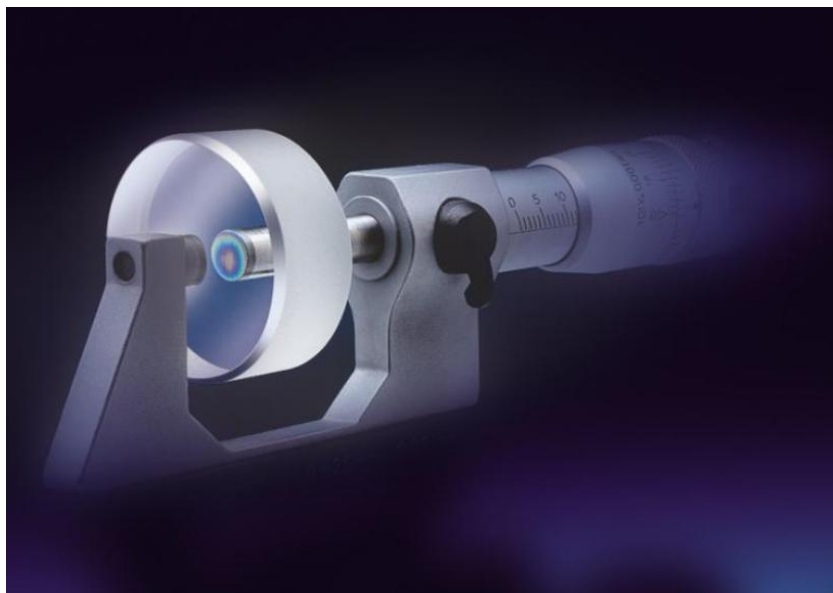
Nota. Tomado de *Callipers and micrometers* (p. 49), por D. Flack, 2014.

Lo que se necesita

- Plano óptico grado 1 o 2 (norma JIS B 7430), o paralela óptica grado 1 (JIS B 7431)
- Fuente de luz blanca (preferible) o monocromática de sodio/mercurio
- Bascular: significa hacer un movimiento de balanceo o cabeceo muy suave con los dedos para eliminar el aire atrapado y lograr el acoplamiento perfecto entre las superficies.

Figura 10.

Paralelo óptico montado para examinar las caras de un micrómetro.



Nota. Tomado de *Callipers and micrometers* (p. 49), por D. Flack, 2014.

Criterio de aceptación para micrómetros 0–25 mm: planitud $\leq 0,6 \mu\text{m}$ (esto equivale a 2 franjas rojas bajo luz blanca, contando cada franja como $0,3 \mu\text{m}$) (Japanese Standards Association, 2016).

Procedimiento para verificar planitud de las caras de medición

Paso 1 — Estabilización térmica. Mínimo 60 minutos antes de cualquier medición. Todo debe estar a temperatura uniforme. El plano óptico, el micrómetro y la sala. No hace falta que sean exactamente 20°C (Japanese Standards Association, 2016).

Paso 2 — Limpiar la cara de medición. Con papel óptico o gamuza limpia. Cualquier partícula de polvo va a distorsionar el patrón de franjas y se va a perder tiempo interpretando algo que no tiene sentido (Japanese Standards Association, 2016).

Paso 3 — Apoyar el plano óptico. Se coloca el plano óptico sobre la cara de medición del husillo (o del yunque). Hacerlo bascular suavemente y deslizarlo hasta que se adhiera, lo que

se llama "wringing", que es eliminar la capa de aire atrapada. Cuando hay adherencia real, el plano no se cae solo y las franjas se estabilizan (Japanese Standards Association, 2016).

Paso 4 — Iluminar e interpretar. Bajo la luz blanca, se observa las franjas rojas. Bajo luz monocromática de sodio ($\lambda \approx 0,58 \mu\text{m}$), las franjas son más nítidas, pero más juntas (Japanese Standards Association, 2016).

Para contar: cada franja completa representa $0,3 \mu\text{m}$ de desviación bajo luz blanca. Si se visualiza 2 franjas, la planitud es de $0,6 \mu\text{m}$ (Japanese Standards Association, 2016).

Paso 5 — Cuidado con la interpretación. Una superficie toroidal simétrica donde se ve una curva central cerrada más una línea a cada lado, y parecería que son 3 franjas. En realidad son 2. La norma lo aclara, si el apartamiento de las líneas laterales es igual a ambos lados y la curva central es simétrica, se cuentan 2 franjas, no 3 (Japanese Standards Association, 2016).

Paso 6 — Orientar el plano correctamente. La planitud es un error de forma, no depende de referencias externas. Gira el plano hasta que el número de franjas sea mínimo. Esa orientación es la que da el valor real. Si se mide en una posición arbitraria se puede sobreestimar el error (Japanese Standards Association, 2016).

Paso 7 — Repetir. Repetir la operación al menos 3 veces hasta obtener lecturas consistentes. Si los patrones varían mucho entre repeticiones, la cara probablemente tenga suciedad o el plano no se está adherido bien (Japanese Standards Association, 2016).

Si la superficie está tan deteriorada que no permite interferencia (rayones profundos, picaduras), se informa esa condición sin dar un valor numérico.

Nota: cada franja equivale a $0,3 \mu\text{m}$.

Ejemplo:

Si se está verificando la cara del husillo de un micrómetro 0–25 mm bajo luz blanca.

En la primera posición del plano óptico, se visualiza 3 franjas rojas. Se rota el plano 45° y se observa 2 franjas. Se rota otros 45° se observa 2 franjas.

Entonces hay 2 franjas.

Cálculo: $2 \text{ franjas} \times 0,3 \mu\text{m/franja} = 0,6 \mu\text{m}$

Se repite el ensayo tres veces y se obtiene: 0,6 μm , 0,6 μm , 0,6 μm .

El procedimiento es consistente.

Interpretación: 0,6 μm es exactamente el límite permitido por la norma JIS B 7502 para micrómetros 0–25 mm. El micrómetro está en el límite, cumple, pero apenas. Si hubiera dado 0,9 μm (3 franjas en la posición mínima), no cumple y hay que rechazar o rectificar la cara. Si hubiera dado 0,3 μm (1 franja), la cara está en excelente estado (Japanese Standards Association, 2016).

Un detalle importante sobre las 3 franjas iniciales que bajaron a 2 al rotar el plano: eso es exactamente por lo que hay que orientar el plano correctamente. Si se hubiera reportado 3 franjas sin buscar el mínimo, se habría declarado 0,9 μm y rechazado un micrómetro que en realidad cumple (Japanese Standards Association, 2016).

Procedimiento para verificar paralelismo de las caras de medición

Paso 1 — Preparar el apilamiento. Para micrómetros 0–25 mm se puede introducir directamente la paralela óptica entre las caras. Para rangos mayores, se necesita combinar bloque patrón más paralelas ópticas, adheridas correctamente (Japanese Standards Association, 2016).

Paso 2 — Buscar la posición de referencia. Introducir la paralela entre las caras y bascular hasta lograr que en una de las caras (generalmente el yunque) no haya franjas, o el mínimo posible. Esa es la referencia inicial (Japanese Standards Association, 2016).

Paso 3 — Contar franjas en la cara opuesta. Con el husillo a esa posición, se cuenta las franjas rojas visibles sobre la cara del husillo. Se multiplica por $0,3\ \mu\text{m}$ por franja. Ese es el valor de paralelismo para esa posición angular (Japanese Standards Association, 2016).

Paso 4 — Rotar el husillo. Esto es obligatorio y es donde muchos procedimientos fallan. Hay que medir en al menos cuatro posiciones angulares del husillo, separadas $\frac{1}{4}$ de vuelta (90° cada una). La razón, es que puede darse que en una posición particular las caras resulten paralelas, aunque el husillo no sea perpendicular al eje de rotación. Al rotar 180° , esa falta de perpendicularidad se manifiesta (Japanese Standards Association, 2016).

Las paralelas ópticas vienen en medidas de 12.00 mm, 12.25 mm, 12,12 mm y 12,37 mm como se observa en la siguiente figura.

Figura 11.

Juego de paralelas ópticas



Nota. Juego de paralelas ópticas de precisión utilizado para la verificación de planitud y paralelismo de superficies. Tomado de *Mitutoyo Optical Flats Data Sheet* (Mitutoyo Corporation, s.f.). <https://www.threadcheck.com/technical-documents/mitutoyo-series-158-optical-flats.pdf>

Paso 5 — Tomar el valor máximo. De todas las posiciones medidas, el paralelismo del micrómetro es el valor más alto obtenido. No el promedio, el máximo.

Método alternativo (Método 2, por contacto con bloque patrón): colocar el bloque en el centro de ambas caras y leer con el trinquete. Luego coloca el bloque en las cuatro esquinas de la cara, leer cada una, y la diferencia entre el mayor y menor valor es el paralelismo. Es más fácil de ejecutar, menos preciso que el interferométrico, pero la norma lo acepta, especialmente para micrómetros de rango superior a 175 mm donde contar franjas se vuelve engorroso porque la separación puede bajar a 0,3 mm entre franjas.

Ejemplo:

Micrómetro 0–25 mm, medición interferométrica. En cada posición angular se logra adherencia sin franjas en el yunque y se cuentan las franjas sobre el husillo

Tabla 4.
Ejemplo de medición de paralelismo

Posición husillo	Franjas en husillo	Cálculo
0°	1 franja	$1 \times 0,3 \mu\text{m} = 0,3 \mu\text{m}$
90°	2 franjas	$2 \times 0,3 \mu\text{m} = 0,6 \mu\text{m}$
180°	4 franjas	$4 \times 0,3 \mu\text{m} = 1,2 \mu\text{m}$
270°	3 franjas	$3 \times 0,3 \mu\text{m} = 0,9 \mu\text{m}$

Nota. Elaboración propia

El paralelismo del micrómetro es el valor máximo: **1,2 μm**

Interpretación: 1,2 μm está por debajo del límite de 2 μm que exige la norma para el rango 0–25 mm. El micrómetro cumple.

Hay que examinar lo que pasaría si solo se hubiera medido en la posición de 0°, se habría reportado 0,3 μm y pensado que la cara está casi perfecta. A 180° el mismo micrómetro muestra 1,2 μm . Esa diferencia entre 0° y 180° (de 0,3 a 1,2 μm) indica que el husillo no es perfectamente

perpendicular al eje de rotación. En una posición las caras coinciden casi en paralelo, en la opuesta la desviación se suma y se hace visible.

Si el valor hubiera salido, por ejemplo, $2,4\ \mu\text{m}$ en alguna posición, el micrómetro no cumple. En ese caso la cara del husillo necesita rectificación y hay que repetir el ensayo de planitud antes de volver a medir paralelismo, porque una cara mal rectificada contamina la lectura.

Cosas que no conviene ignorar:

Primero, los planos ópticos también tienen su propia planitud y paralelismo. Esos valores entran en el cálculo de incertidumbre y hay que conocerlos, de requerir.

Segundo, para el cálculo de incertidumbre en planitud y paralelismo, la longitud de onda que se asume es $\lambda = 0,6\ \mu\text{m}$ bajo luz blanca (franjeas rojas).

Consideraciones adicionales

Comprobar el juego del husillo (backlash) y el ajuste de la tuerca cónica.

Gira el tambor en ambas direcciones sintiendo el punto muerto. Un juego excesivo afecta la repetibilidad. Muchos micrómetros tienen un mecanismo de ajuste (tuerca cónica) para eliminar el juego (Flack, 2014).

Inspeccionar visualmente las caras de medición en busca de rebabas usando una lupa.

Una pequeña rebaba cerca del borde de la cara de medición genera un error sistemático positivo (el micrómetro cierra antes). Las rebabas se pueden eliminar suavemente con una piedra de Arkansas (piedra para afilar (Flack, 2014).

Verificar el descentramiento (runout) del tambor a simple vista al girarlo.

Un tambor que se mueve excéntricamente indica un posible desalineamiento del husillo o desgaste de los cojinetes, afectando la precisión (Flack, 2014).

2.6.8 Limpieza y Prevención de Oxidación

Después de cada uso:

- Limpiar aceites, fluidos de corte, huellas dactilares. Las huellas en particular pueden oxidar las caras.
- Si las caras no tienen recubrimiento de carburo, limpiar y aplicar aceite antioxidante.
- Separar ligeramente las caras antes de guardar.
- Limpiar el husillo de virutas antes de usar el instrumento, no después. Una partícula atrapada entre el husillo y su guía genera errores difíciles de detectar.

2.7 Infraestructura de la calidad en Ecuador e importancia del Inen

El INEN cuenta con varios laboratorios especializados que cubren distintas magnitudes de medición, cada uno con equipamiento, servicios y niveles de trazabilidad definidos, como se observa en la tabla 4.

Tabla 5.

Tabla de Laboratorios del LNM — INEN

Laboratorio	Magnitud	Servicios principales	Trazabilidad
Metrología Legal	Unidades de medida y métodos legales	Control de balanzas, taxímetros, contenido neto	RTE INEN 284
Volumen	Volumen	Calibración gravimétrica y volumétrica hasta 5 000 litros	Laboratorio de Masa del LNM
Temperatura	Temperatura	Calibración por comparación de (-40 a 1100) °C	Patrones primarios e industriales
Fuerza	Fuerza	Calibración de dinamómetros y máquinas universales	Celdas de carga de transferencia
Metrología Química	Cantidad de sustancia	Ensayos de aptitud, materiales de referencia	Sistema Internacional de Medidas
Longitud	Longitud	Calibración de micrómetros, calibradores, bloques patrón, reglas, comparadores	Intercomparación con INM de la región
Masa	Masa	Calibración de pesas E2, 1 mg a 20 kg	BIPM – ISO/IEC 17025 acreditado
Energía	Magnitudes eléctricas	En implementación — trazabilidad eléctrica nacional	En desarrollo

Nota. Elaboración propia con base en información del Servicio Ecuatoriano de Normalización (Servicio Ecuatoriano de Normalización, s.f.-a)

Red Ecuatoriana de Metrología - REM

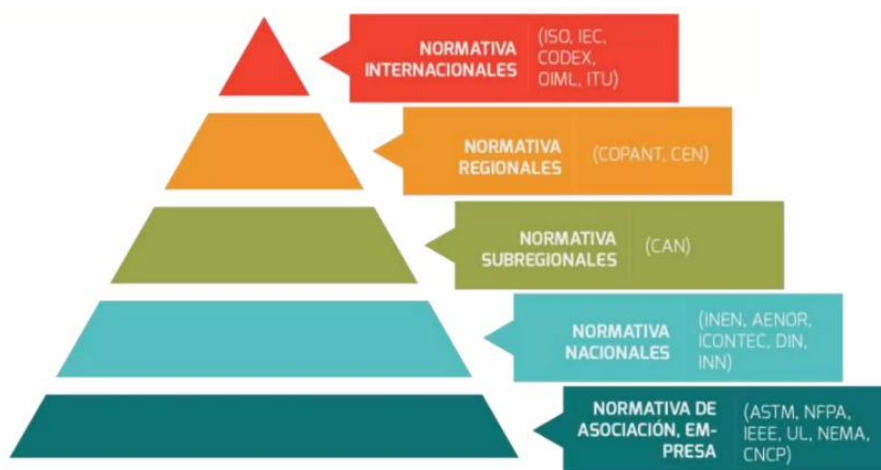
Ecuador no tiene un único laboratorio que pueda atender todas las necesidades de calibración del país. Lo que existe es una red, que es el Sistema Nacional de Calibración, cuyo propósito, establecido en el artículo 44 de la Ley del Sistema Ecuatoriano de la Calidad del año 2007, es garantizar la uniformidad y confiabilidad de las mediciones que se realizan en el territorio nacional, tanto en transacciones comerciales como en procesos industriales, investigación científica y desarrollo tecnológico (Servicio Ecuatoriano de Normalización, s.f.-b)

Dentro de esa red, el Laboratorio Nacional de Metrología del INEN ocupa el nivel más alto de la pirámide metrológica ecuatoriana. Los laboratorios secundarios de calibración, públicos y privados, reciben trazabilidad desde el LNM y la diseminan hacia la industria, el comercio y otros sectores que requieren mediciones confiables. Para que un laboratorio pueda formar parte de la Red Ecuatoriana de Metrología de Laboratorios Secundarios de Calibración debe estar acreditado bajo ISO/IEC 17025 y operar dentro del alcance de exactitud que le ha sido reconocido. Esa estructura jerárquica es la que garantiza que una calibración realizada en Guayaquil o en Cuenca sea comparable con una realizada en Quito, porque todas comparten el mismo origen metrológico (Servicio Ecuatoriano de Normalización, s.f.-b)

Esta estructura normativa jerárquica queda representada en la Figura X, elaborada por el Servicio Ecuatoriano de Normalización (INEN), donde se observan los niveles de normalización según su alcance geográfico: desde el nivel internacional (ISO, IEC, OIML) hasta el nivel nacional (INEN), pasando por los niveles regional (COPANT) y subregional (CAN) (Servicio Ecuatoriano de Normalización, s.f.-b).

Figura 12.

Pirámide de la normalización



Nota. Tomado de *Proceso de elaboración de normas en Ecuador* [diapositiva 11], por Servicio Ecuatoriano de Normalización (INEN), 2016
<https://es.slideshare.net/SERVICIOECUATORIANOD/proceso-de-elaboracin-de-normas-en-ecuador-67929637>).

La conformación de esta red tiene consecuencias prácticas concretas. Un laboratorio que forma parte de la REM-LSC puede usar el logotipo del Sistema Nacional de Calibración en sus certificados, y puede acceder a descuentos de hasta el 25% en capacitaciones organizadas por el LNM del INEN y queda exento del pago del 1,5% de tercerizadores en la calibración de sus patrones. Más allá de los beneficios operativos, cuando un laboratorio pertenece a la red significa que sus resultados están respaldados por una cadena de trazabilidad reconocida, lo que le abre puertas en mercados que exigen ese nivel de garantía (Servicio Ecuatoriano de Normalización, s.f.-b)

Nota. LSC es Sello de Calidad Inen.

Capítulo III. Desarrollo de la guía técnica

3.1 Análisis de la Normativa Internacional

La guía técnica establece los procedimientos de calibración para micrómetros digitales de exteriores de dos contactos con resolución de 0,001 mm, dentro del rango de medición de 0 mm a 25 mm. El documento está diseñado específicamente para laboratorios de calibración que operan bajo los requisitos de ISO/IEC 17025, proporcionando una metodología clara y trazable que garantiza la competencia técnica en la medición dimensional.

El alcance contempla únicamente micrómetros con contactos planos de medición, quedando expresamente excluidos los micrómetros de interiores, los de tres contactos y aquellos con geometrías especiales de medición (contactos de bola, cuchilla u otras configuraciones). Aunque la norma ISO 361 abarca micrómetros con divisiones de escala $\geq 0,0005$ mm, esta guía se concentra en los instrumentos de mayor precisión (0,001 mm) por ser los más demandados en aplicaciones metrológicas industriales.

La metodología descrita sigue los lineamientos del Centro Español de Metrología establecidos en el procedimiento DI-005, adaptados al contexto ecuatoriano y a las necesidades específicas de laboratorios que buscan implementar sistemas de gestión de calidad robustos. Los principios de calibración aquí expuestos son aplicables independientemente del fabricante del instrumento, siempre que el micrómetro cumpla con las características de diseño descritas en la sección 3.2.

3.2 Caracterización Metrológica de Micrómetros Digitales

3.2.1 Componentes principales y nomenclatura

Un micrómetro digital de exteriores consta de elementos mecánicos y electrónicos que trabajan de manera integrada. El cuerpo en forma de arco proporciona rigidez estructural y soporta tanto el yunque fijo como el husillo móvil. Este último se desplaza mediante un sistema de tornillo micrométrico de alta precisión, típicamente con paso de 0,5 mm, que convierte el movimiento rotacional en desplazamiento lineal.

El display digital sustituye a las escalas analógicas tradicionales, mostrando directamente el valor medido con resolución de 0,001 mm. La mayoría de modelos incorporan funciones adicionales como selección de unidades (mm/pulgadas), establecimiento de puntos de referencia y salida de datos. El limitador de fuerza — elemento crítico que diferencia estos instrumentos de

versiones menos sofisticadas — garantiza la aplicación de una fuerza de medición constante (típicamente 5-10 N), eliminando la variabilidad asociada al operador.

Tabla 6.
Especificaciones técnicas clave

Característica	Especificación típica
Rango de medición	0 – 25 mm
Resolución	0,001 mm
Error máximo permitido (según ISO 3611)	$\pm 2 \mu\text{m}$
Repetibilidad	$\leq 1 \mu\text{m}$
Fuerza de medición	5 – 10 N
Diámetro de contactos	6,5 mm (estándar)

La resolución de 0,001 mm no debe confundirse con la incertidumbre de medición, que siempre será mayor y depende de múltiples factores evaluados durante la calibración. El error máximo permitido (MPE) de $\pm 2 \mu\text{m}$ establecido por ISO 3611 para instrumentos de esta clase representa el límite de desviación aceptable respecto al valor verdadero convencional del patrón.

Fuerza de medición

Es un parámetro de rendimiento del micrómetro. Se mide cuánta fuerza ejerce el husillo cuando se acciona el trinquete. La norma dice que debe estar entre 5 y 15 N, y que la dispersión entre mediciones no supere 3 N (Japanese Standards Association, 2016). No tiene nada que ver con planos ópticos

Equipos para medir la fuerza

- Célula de carga de sensibilidad $\leq 0,2 \text{ N}$, o balanza de resorte con escala $\leq 20 \text{ g}$
- Bloque patrón de referencia
- Bolilla de acero (si se usa balanza)

Procedimiento para medir la fuerza de medición

Paso 1 — Posición del micrómetro. Colocar el micrómetro con el yunque mirando hacia abajo y el eje del husillo vertical. Esto es importante, si no está vertical, la lectura de la balanza incluye componentes del peso propio y el resultado no sirve.

Paso 2 — Colocar la célula de carga o balanza. Si se usa célula de carga, hay que centrar en el eje del husillo. Si se usa balanza de resorte, se debe colocar una bola de acero entre el punto de carga de la balanza y el centro de la cara de medición del husillo. Por último, ajustar hasta que la balanza marque cero antes de accionar el trinquete.

Paso 3 — Accionar el trinquete o freno de fricción. Usar el dispositivo limitador de fuerza del micrómetro para llevar el husillo al contacto con la célula/balanza. Leer el valor máximo que marca durante ese movimiento. No el valor final estático, sino el pico.

Paso 4 — Repetir cinco veces. La norma pide exactamente cinco repeticiones. Hay que promediar los cinco valores. Ese promedio es la fuerza de medición del instrumento.

Paso 5 — Verificar dispersión. Tomar el mayor y el menor de los cinco valores y calcular la diferencia. Ese número es la dispersión. La norma JIS B 7502 exige que la dispersión no supere 3 N. Si la fuerza promedio está entre 5 y 15 N y la dispersión es menor a 3 N, el micrómetro cumple (Japanese Standards Association, 2016).

Las caras de medición deben ser planas, paralelas entre sí y perpendiculares al eje del husillo. Su planitud y paralelismo determinan directamente la capacidad del instrumento para realizar mediciones confiables, razón por la cual estas características se verifican durante la calibración mediante patrones plano-paralelos de vidrio.

Ejemplo:

Tabla 7.
Cinco lecturas pico de fuerza

Repetición	Fuerza leída
-------------------	---------------------

1	7,4 N
2	7,8 N
3	7,2 N
4	7,6 N
5	7,5 N

Nota. Autoría propia

$$\text{Promedio: } \frac{(7,4 + 7,8 + 7,2 + 7,6 + 7,5)}{5} = 7,5 \text{ N}$$

$$\text{Dispersión: valor mayor} - \text{valor menor} = 7,8 - 7,2 = \mathbf{0,6 \text{ N}}$$

Interpretación: La fuerza promedio de 7,5 N está dentro del rango 5–15 N que exige la norma JIS B 7502. La dispersión de 0,6 N está muy por debajo del límite de 3 N. El micrómetro cumple en este parámetro. Si el promedio hubiera salido, por ejemplo, 16 N, el trinquete estaría demasiado ajustado y habría que regularlo. Si la dispersión hubiera salido 4 N, indicaría que el freno de fricción tiene desgaste irregular o suciedad en el mecanismo.

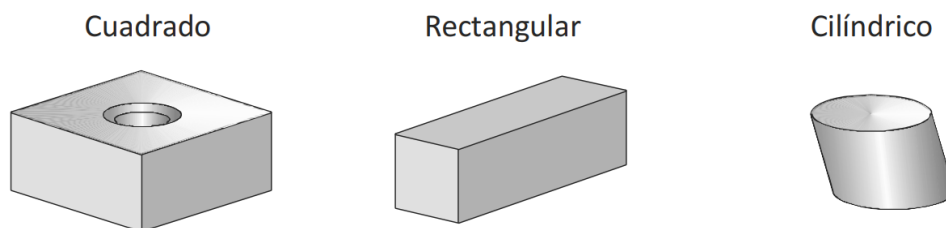
3.3 Caracterización de Patrones de Referencia

Los bloques patrón son herramientas de calibración con dimensiones preestablecidas que sirven como referencia para calibrar otros instrumentos de medición. Las normas modernas de longitud se definen en términos de longitudes de onda, pero dado que es imposible usar esas longitudes de onda directamente en el taller, los bloques patrón traducen esa referencia a una forma física utilizable (Meza Sánchez S. , 2012).

Se fabrican en acero para herramienta endurecido, acero inoxidable o carburo de tungsteno, existen tres formas básicas: triangular, cuadrada y rectangular, como se observa en la Figura 12 con un alto grado de exactitud en tamaño, aplanado y paralelismo (Meza Sánchez S. , 2012).

Figura 13.

Formas típicas de los bloques patrón.



Nota. Tomado de Metrología geométrica (p. 47), por S. Meza Sánchez y J. J. Zárate, 2012, Grupo Editorial Éxodo.

La calibración de bloques patrón se realiza mediante técnicas interferométricas en los niveles superiores de la pirámide metrológica y por comparación mecánica en los niveles inferiores. Según el NIST, la incertidumbre estándar de un bloque patrón de acero es función de su longitud y puede expresarse como $u = 0,011 \mu\text{m} + 0,083 \times 10^{-6} \times L$, donde L es la longitud en milímetros (Doiron y Beers, 1997). Este valor aumenta conforme el bloque descende en la jerarquía metrológica, lo que implica que la selección del grado de exactitud del bloque patrón utilizado en la calibración del micrómetro tiene impacto directo sobre la incertidumbre final del certificado emitido.

3.3.1 Exactitud de un bloque patrón

Los bloques patrón se clasifican en grados de exactitud, como se observa en la figura 13.

Figura 14.

Grados de exactitud de un bloque patrón.

Grado de exactitud	Designación formal	Tolerancia	
		Sistema inglés (pulgadas)	Sistema Métrica (milímetros)
0.5	AAA	± 0.000001	± 0.00003
1	AA	± 0.000002	± 0.00005
2	A+	+ 0.000004 - 0.000002	+ 0.0001 - 0.00005
3	A	+ 0.000006 - 0.000002	+ 0.00015 - 0.00005

Nota. Tomado de Metrología geométrica (p. 48), por S. Meza Sánchez y J. J. Zárate, 2012, Grupo Editorial Éxodo.

Ningún bloque patrón es perfecto, y tampoco podría serlo ya que la perfección es técnicamente inconmensurable. Por eso se establecen tolerancias que controlan el tamaño de cada bloque dentro de su grado de precisión. El tamaño exacto de cada bloque se documenta en su certificado de calibración, trazable a organismos nacionales de normalización. El tamaño nominal, el fabricante y el número de serie se graban directamente sobre el bloque, se observa en la figura 14 un juego de bloques patrón (Meza Sánchez S. , 2012).

Figura 15.

Juego de bloques patrón



Nota. Tomado de Metrología geométrica (p. 48), por S. Meza Sánchez y J. J. Zárate, 2012, Grupo Editorial Éxodo.

Los instrumentos que se usan en talleres y centros de trabajo son menos exactos que los patrones que ocupan los niveles superiores de la jerarquía metrológica. Esa pérdida de exactitud se compensa mediante la calibración, que permite asignarles una incertidumbre determinada y acotar el error cometido al medir con ellos. Esta jerarquía se representa mediante una pirámide metrológica, como se observa en la Figura 15, tomada del contexto español pero aplicable conceptualmente a cualquier sistema nacional de metrología (Moro Piñeiro, 2017). En el caso de Ecuador, el organismo que ocupa el nivel superior de esta pirámide es el Instituto Nacional de Metrología del INEN (Servicio Ecuatoriano de Normalización), al que se encuentran trazados los patrones nacionales de referencia.

Figura 16.

Pirámide representando la organización metrológica nacional para una unidad



Nota. Tomado de *Metrología y ensayos* (p. 75), por M. Moro, 2017, Marcombo.

3.3.2 Requisitos de acorde a la ISO 3650

Grado: Preferiblemente Grado 0 o Grado 1 según ISO 3650:1998 (International Organization for Standardization, 1998).

- Grado 0 (K): incertidumbre $\leq 0.05 \mu\text{m} + 0.001 L$ (L en mm)
- Grado 1: incertidumbre $\leq 0.10 \mu\text{m} + 0.002 L$

Material: Acero, carburo de tungsteno o cerámica. El acero es más común, pero requiere mayor cuidado contra corrosión. Cerámica tiene mejor estabilidad térmica y resistencia al desgaste (Flack, 2014).

Certificado de calibración: Cada bloque debe tener certificado vigente con:

- Desviación central de longitud
- Variación de longitud
- Incertidumbre expandida ($k=2$)
- Trazabilidad al patrón nacional

- Fecha de calibración y validez

En la tabla 5, se indica la combinación de patrones para calibrar un micrómetro de 25 mm.

Tabla 8.

Selección de tamaños para calibración de micrómetro 0-25 mm

Bloque patrón	Propósito
2.5 mm	Verificación inicio de rango, periodicidad del husillo
5.0 mm	Periodicidad del husillo
7.5 mm	Punto medio primer cuadrante
10.0 mm	Error a mitad de rango
12.5 mm	Punto medio segundo cuadrante
15.0 mm	Verificación de linealidad
17.5 mm	Punto medio tercer cuadrante
20.0 mm	Verificación cerca del final
22.5 mm	Punto medio cuarto cuadrante
25.0 mm	Error al final del rango

Nota. Elaboración propia a partir de Flack, D. (2014), *Callipers and micrometers* (Measurement Good Practice Guide No. 40).

La selección a intervalos de 2.5 mm (para micrómetros de paso 0.5 mm) permite detectar tanto errores periódicos del husillo (relacionados con el paso de rosca) como errores progresivos (desgaste, geometría) (Flack, 2014).

3.4 Desarrollo del Procedimiento de Calibración

3.4.1 Equipos e instrumentos requeridos

La calibración de micrómetros digitales demanda un conjunto específico de patrones de referencia y equipamiento auxiliar que garanticen la trazabilidad metrológica y el control de las condiciones de medición.

Patrones de referencia

Los bloques patrón longitudinales constituyen el estándar de medición fundamental para la calibración. Siguiendo las recomendaciones del procedimiento DI-005 (Centro Español de

Metrología, 2011), la selección de su calidad depende directamente de la resolución del instrumento a calibrar:

Para micrómetros con $E = 0,001$ mm: Bloques patrón clase 1 o superior según ISO 3650 (ISO,1998)

Incertidumbre típica requerida: $U \leq 0,10 + 0,001 \times L \text{ } \mu\text{m}$ (donde L es la longitud nominal en mm)

Para un micrómetro de rango 0-25 mm, se requiere un juego de bloques que cubra los puntos de calibración establecidos. La distribución recomendada por DI-005 contempla 11 puntos equidistantes: 0; 2,5; 5,0; 7,5; 10,0; 12,5; 15,0; 17,5; 20,0; 22,5 y 25,0 mm. Alternativamente, pueden emplearse bloques con valores decimales no repetitivos (2,5; 5,1; 7,7; 10,3; 12,9; 15,0; 17,6; 20,2; 22,8; 25,0 mm) para evitar posiciones homólogas del tornillo micrométrico que podrían enmascarar errores cíclicos (Centro Español de Metrología, 2011).

Cada bloque patrón debe poseer certificado de calibración vigente emitido por laboratorio acreditado, especificando su valor certificado, incertidumbre expandida ($k=2$) y trazabilidad al Sistema Internacional de Unidades (Centro Español de Metrología, 2011).

Patrones plano-paralelos de vidrio

La verificación de planitud y paralelismo de las caras de medición requiere patrones plano-paralelos ópticos. Según DI-005 apartado 5.3.1, estos permiten visualizar franjas de interferencia bajo iluminación monocromática. Para micrómetros de rango 0-25 mm, se recomienda un juego de 4 patrones con anchos escalonados en aproximadamente 0,125 mm, permitiendo verificar el paralelismo en diferentes posiciones angulares de la rosca (paso típico 0,5 mm) (Centro Español de Metrología, 2011).

El proceso de calibración demanda instrumentación complementaria, como se observa en la tabla 7.

Tabla 9.*Equipamiento auxiliar*

Equipo	Especificación	Función
Termómetro digital	Resolución 0,1°C, $U \leq 0,5^\circ\text{C}$	Registro de temperatura ambiental
Higrómetro	Rango 30-90% HR, $U \leq 5\%$	Monitoreo de humedad relativa
Lámpara monocromática	Sodio ($\lambda=589\text{ nm}$) o LED equivalente	Observación de franjas de interferencia
Pinzas para bloques patrón	Puntas recubiertas (nylon/teflón)	Manipulación sin transferencia térmica
Paños de limpieza óptica	Sin pelusa (lens tissue)	Limpieza de caras de medición
Alcohol isopropílico	Pureza $\geq 99\%$	Desengrase de superficies
Mesa de granito	Planitud $\leq 5\text{ }\mu\text{m/m}$	Superficie de referencia estable

Nota. Elaboración propia a partir del procedimiento CEM DI-005 (CEM,2011).

Nota sobre alternativas: El procedimiento DI-005 indica que las verificaciones de planitud y paralelismo "podrían no efectuarse, con la consiguiente pérdida de calidad de la calibración". Laboratorios sin acceso a patrones plano-parallellos pueden omitir esta fase, documentando la limitación y considerando una contribución adicional a la incertidumbre por geometría no verificada.

3.4.2 Condiciones ambientales

Las condiciones del entorno de calibración influyen directamente sobre la confiabilidad de los resultados, particularmente a través de efectos térmicos que afectan las dimensiones de patrones e instrumentos.

Temperatura

La norma ISO 1 establece 20°C como temperatura de referencia para especificaciones geométricas y dimensionales. El procedimiento DI-005 en su apartado 5.2.2 especifica:

"Es deseable que la temperatura ambiente del local en el que se realice la calibración del ME2C, se mantenga durante toda la operación dentro del intervalo: $T = (20 \pm 2)^{\circ}\text{C}$ "

Este rango permite compensar variaciones térmicas típicas en laboratorios sin climatización de alta precisión. La justificación técnica radica en que para materiales metálicos comunes (acero, coeficiente de expansión $\alpha \approx 11,5 \times 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$), una desviación de $\pm 2^{\circ}\text{C}$ genera cambios dimensionales del orden de:

$$\Delta L = L \times \alpha \times \Delta T = 25 \text{ mm} \times 11,5 \times 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1} \times 2^{\circ}\text{C} \approx 0,6 \text{ }\mu\text{m}$$

Valor comparable a la incertidumbre típica de calibración, pero manejable si se documenta adecuadamente.

Registro de temperatura:

Debe anotarse como mínimo al inicio y final de la calibración, aunque se recomienda registro horario para detectar derivas significativas. Si la temperatura excede el rango $20 \pm 2^{\circ}\text{C}$ o presenta variaciones superiores a 1°C durante el proceso, existen dos opciones:

1. **Suspender la calibración** hasta recuperar condiciones estables
2. **Aplicar corrección térmica** y aumentar la contribución de incertidumbre por temperatura

La segunda opción requiere conocer con precisión los coeficientes de expansión térmica del micrómetro y los bloques patrón, así como documentar la temperatura real de cada componente (no solo la ambiental).

Estabilización térmica

Un aspecto crítico frecuentemente subestimado es el tiempo de estabilización. El DI-005 apartado 5.2.4 establece:

"Los patrones a emplear se situarán en la zona de calibración [...] dejándolos estabilizar térmicamente al menos durante media hora"

Este período permite que bloques patrón y micrómetro alcancen equilibrio térmico con el ambiente. La transferencia de calor desde las manos del operador o desde ambientes de almacenamiento a diferente temperatura puede generar gradientes térmicos significativos. Por ejemplo, un bloque patrón a 22°C colocado en un laboratorio a 20°C experimentará contracción gradual durante aproximadamente 30-45 minutos hasta estabilizarse (Centro Español de Metrología, 2011).

Humedad relativa

Aunque no especificada estrictamente por DI-005, se recomienda mantener humedad relativa entre 40-60% para:

- Prevenir condensación sobre superficies metálicas pulidas
- Evitar corrosión incipiente en caras de medición
- Minimizar acumulación electrostática que atraiga partículas contaminantes
- Humedades inferiores a 30% incrementan problemas electrostáticos; superiores a 70% favorecen oxidación superficial.

Vibraciones y perturbaciones

La mesa de calibración debe ubicarse alejada de fuentes de vibración (maquinaria, tráfico vehicular pesado, ascensores). Aunque los micrómetros son instrumentos robustos, vibraciones pueden interferir con la observación de franjas de interferencia durante verificaciones de planitud (Centro Español de Metrología, 2011).

Iluminación

Iluminación adecuada (500-1000 lux) facilita la lectura precisa del display digital y la manipulación segura de bloques patrón. Para la verificación con patrones plano-paralelos se requiere adicionalmente fuente monocromática (lámpara de sodio o LED amarillo de banda estrecha) (Centro Español de Metrología, 2011).

3.4.3 Procedimiento paso a paso

FASE 1: Recepción e inspección preliminar

Paso 1 — Identificación del instrumento

Registrar en la hoja de datos de calibración:

- Marca, modelo y número de serie (obligatorio según ISO 3611 apartado 5.2.1)
- Rango de medición y resolución
- Solicitante y fecha de recepción
- Estado físico aparente

Si el instrumento carece de número de serie, asignar identificación interna mediante etiquetado permanente no removible.

Paso 2 — Inspección visual funcional

Verificar sin instrumentación:

Display digital: Caracteres completos, sin segmentos apagados o píxeles faltantes.

Suavidad de movimiento: Girar el husillo en todo el rango; no debe presentar atascos, saltos o resistencias anormales.

Limitador de fuerza: Comprobar que el trinquete active consistentemente con sonido característico.

Caras de medición: Inspección bajo lupa 10x buscando rayaduras profundas, oxidación, rebabas o contaminación adherida.

Integridad estructural: Verificar ausencia de deformaciones en el cuerpo, grietas o daños mecánicos.

Rayaduras superficiales leves son aceptables; daños severos que comprometan la planitud de contactos justifican rechazo preliminar del instrumento sin proceder a calibración completa.

Paso 3 — Limpieza de caras de medición

Procedimiento según DI-005 apartado 5.2.5:

1. Aplicar alcohol isopropílico sobre papel óptico sin pelusa
2. Limpiar cada cara con movimientos circulares suaves (sin presión excesiva)
3. Permitir evaporación completa del solvente (30 segundos)
4. Inspeccionar bajo luz intensa para verificar ausencia de residuos

Nota: nunca utilizar acetona, thinner, limpiadores abrasivos o paños con fibras que dejen residuos.

FASE 2: Estabilización térmica

Paso 4 — Colocación en zona de calibración

Ubicar el micrómetro y el juego completo de bloques patrón sobre la mesa de calibración. Los bloques deben apoyarse sobre sus caras laterales (nunca sobre las caras de medición) para evitar desgaste prematuro y contaminación.

Paso 5 — Registro de condiciones iniciales

Anotar en hoja de datos:

- Temperatura ambiente: _____ °C ($\pm 0,1^{\circ}\text{C}$)

- Humedad relativa: _____ % HR
- Hora de inicio de estabilización: _____ (si es necesario)

Paso 6 — Período de espera

Tiempo mínimo obligatorio: 30 minutos

Durante este período no manipular innecesariamente los instrumentos. La transferencia de calor desde las manos del operador puede elevar la temperatura de un bloque patrón pequeño varios décimos de grado.

FASE 3: Verificación de planitud y paralelismo (opcional)

Esta fase sigue el apartado 5.3.1 del procedimiento DI-005 y puede omitirse en calibraciones de verificación rutinaria, documentando la limitación.

Paso 7 — Verificación de planitud de cada cara

Para cada cara de medición (fija y móvil):

- a) Limpiar el patrón plano-paralelo de vidrio con alcohol
- b) Apoyarlo firmemente sobre la cara de medición
- c) Presionar suavemente con movimiento circular para lograr adherencia óptica
- d) Iluminar con lámpara monocromática ($\lambda=589$ nm, sodio)
- e) Observar y contar las franjas de interferencia visibles
- f) Registrar el número de franjas

Criterio de aceptación

Planitud aceptable: ≤ 4 franjas (equivalente a ≈ 1 μm de defecto)

Cada franja representa aproximadamente $\lambda/2 \approx 0,25$ μm de desviación de planitud.

Paso 8 — Verificación de paralelismo entre caras

Aplicable solo para micrómetros con rango $C \leq 100$ mm:

- a) Colocar el patrón plano-paralelo entre ambas caras
- b) Cerrar el micrómetro usando el limitador de fuerza
- c) Observar franjas en ambas caras simultáneamente
- d) Sumar el total de franjas visibles en ambas superficies

Criterio de aceptación para rango 0-50 mm:

Paralelismo aceptable: ≤ 8 franjas totales ($\approx 2 \mu\text{m}$ según DI-005)

Si se emplea un juego de 4 patrones plano-paralelos con anchos escalonados, repetir la verificación con cada uno para detectar defectos en diferentes posiciones angulares del husillo.

Tabla 10.

Registro de resultados

Verificación	Franjas observadas	Equivalente (μm)	¿Aceptable?
Planitud cara fija			
Planitud cara móvil			
Paralelismo (suma)			

Nota. Elaboración propia

FASE 4: Ajuste del punto de referencia

Paso 9 — Evaluación del ajuste previo

Antes de ajustar, documentar el estado actual:

- a) Cerrar el micrómetro con contacto directo entre caras (sin patrón)
- b) Usar el limitador de fuerza (3-4 clics del trinquete)
- c) Leer y anotar la indicación del display
- d) Abrir, cerrar nuevamente y repetir 10 veces

e) Calcular la media aritmética ($\bar{x}$) de las 10 lecturas

Criterio orientativo DI-005:

Si $|\bar{x}| \geq E$ (división de escala) → Ajuste obligatorio

Para $E = 0,001$ mm: ajustar si $|\bar{x}| \geq 1 \mu\text{m}$

Paso 10 — Ajuste electrónico del punto cero

La mayoría de micrómetros digitales permiten ajuste mediante función ZERO/ORIGIN:

Con caras en contacto y limitador activado, presionar botón "ZERO"

1. Verificar que el display muestre exactamente 0,000 mm
2. Abrir y cerrar nuevamente para confirmar estabilidad del ajuste
3. Algunos modelos requieren mantener presionado el botón durante 2-3 segundos o seguir secuencias específicas (consultar manual del fabricante).

Paso 11 — Confirmación del ajuste

Repetir 10 mediciones del punto cero. La desviación media debe cumplir:

$|\bar{x}| < E/2$ (idealmente $< 0,5 \mu\text{m}$ para $E = 0,001$ mm)

Si no se logra estabilidad, puede indicar:

- Problema electrónico en el sistema de medición
- Desgaste excesivo o daño en las caras de medición
- Contaminación no removida (partículas microscópicas)

Documentar cualquier dificultad; un instrumento que no permite ajuste estable puede requerir mantenimiento previo a la calibración.

FASE 5: Calibración en puntos del rango

Paso 12 — Selección y preparación de bloques patrón

Seleccionar los bloques correspondientes a los 11 puntos de calibración. Para cada bloque:

- a) Verificar que el certificado esté vigente
- b) Limpiar con alcohol isopropílico y papel óptico
- c) Permitir evaporación completa (30 segundos)
- d) Registrar su valor certificado (ℓ_p) e incertidumbre (U_p)

Paso 13 — Medición punto por punto

Para cada punto de calibración i ($i = 1$ a 11):

13.1 — Estabilización del bloque:

Colocar el bloque sobre la mesa y esperar 5 minutos mínimo antes de medir. Este tiempo permite equilibrio térmico entre el bloque y el ambiente.

13.2 — Secuencia de medición (repetir 10 veces):

- a) Abrir el micrómetro más allá del tamaño del bloque
- b) Insertar el bloque entre las caras de medición
- c) Cerrar lentamente girando el tambor hasta contacto suave
- d) Transferir el accionamiento al limitador de fuerza
- e) Girar el limitador hasta que active el trinquete (3-4 clics audibles)
- f) Leer inmediatamente el valor mostrado en el display
- g) Anotar el valor sin redondear
- h) Retirar el bloque completamente

i) Repetir desde el paso (a)

13.3 — Alternancia de posición del bloque:

Según recomendación DI-005, alternar la orientación del bloque 180° cada dos mediciones:

Mediciones 1-2: Bloque en orientación A

Mediciones 3-4: Bloque rotado 180° (orientación B)

Mediciones 5-6: Orientación A

Y así sucesivamente...

Esta práctica promedia efectos de pequeñas imperfecciones de planitud tanto del bloque como de las caras del micrómetro.

Paso 14 — Registro de datos

FASE 6: Cierre de calibración

Paso 15 — Registro de condiciones finales

Anotar:

- Temperatura final: _____ °C
- Humedad final: _____ % HR
- Hora de finalización: _____

Paso 16 — Limpieza y almacenamiento

Limpiar nuevamente las caras de medición del micrómetro

Dejar el husillo en posición intermedia (aproximadamente 12-13 mm para rango 0-25 mm)

Nunca dejar las caras en contacto permanente (genera deformación plástica microscópica)

Devolver bloques patrón a su estuche, apoyados sobre caras laterales

Paso 17 — Verificación de integridad de datos

Antes de que el operador abandone la mesa de calibración:

1. Verificar que las 11 hojas de datos estén completas
2. Confirmar que no hay valores faltantes
3. Revisar que las lecturas sean coherentes (sin saltos anormales)
4. Comprobar que las condiciones ambientales se registraron

La pérdida de datos obliga a repetir toda la calibración, ya que no es válido mezclar resultados de sesiones diferentes (condiciones térmicas distintas).

3.5 Cálculo de errores de indicación

El error de indicación cuantifica la desviación sistemática del micrómetro respecto al valor verdadero convencional proporcionado por el bloque patrón. Su determinación constituye el resultado primario de la calibración.

Procedimiento de cálculo según DI-005 apartado 5.4.1:

Para cada punto de calibración i :

Paso 1 — Valor medio de las indicaciones:

$$\bar{x}_i = \frac{1}{J} \sum_{j=1}^J x_{ij}$$

Donde $J = 10$ repeticiones y x_{ij} representa cada lectura individual.

Paso 2 — Error de indicación:

$$E_i = \bar{x}_i - \ell_{pi}$$

Donde ℓ_{pi} es el valor certificado del bloque patrón utilizado en el punto i .

Interpretación del signo:

- **E positivo:** El micrómetro sobreestima (lee valores mayores que el patrón)

- **E negativo:** El micrómetro subestima (lee valores menores que el patrón)

Paso 3 — Compilación de resultados:

Los errores de todos los puntos se organizan en una tabla que incluye: punto nominal, valor del patrón, media de lecturas y error calculado. Esta información permite identificar tendencias como errores crecientes (defecto de paso de rosca), errores oscilantes (excentricidad) o errores constantes (desajuste del punto de referencia).

Representación gráfica

Se recomienda elaborar un gráfico de error versus posición en el rango de medición para visualización rápida del comportamiento del instrumento a lo largo de su campo de medida.

3.6 Evaluación de la repetibilidad

La repetibilidad cuantifica la dispersión de las indicaciones cuando se mide repetidamente el mismo patrón bajo condiciones idénticas, reflejando la estabilidad intrínseca del sistema de medición.

Cálculo según DI-005 apartado 5.4.1.3:

Para cada punto de calibración i :

$$s_i = \sqrt{\frac{1}{J-1} \sum_{j=1}^J (x_{ij} - \bar{x}_i)^2}$$

Donde s_i es la desviación típica experimental con $J-1$ grados de libertad.

Tabla 11.

Criterios de evaluación

Desviación típica s	Clasificación	Comentario
$s < 0,5 \mu\text{m}$	Excelente	Instrumento en óptimas condiciones
$0,5 \leq s < 1,0 \mu\text{m}$	Buena	Repetibilidad normal para uso industrial
$1,0 \leq s < 2,0 \mu\text{m}$	Aceptable	Instrumento funcional, pero con desgaste
$s \geq 2,0 \mu\text{m}$	Deficiente	Requiere mantenimiento o reemplazo

Nota. Elaboración propia

Variación entre puntos

La repetibilidad puede variar a lo largo del rango de medición. Causas comunes incluyen desgaste concentrado en zonas de uso frecuente, desalineaciones en extremos del rango, o problemas de contaminación y daños en la rosca.

Se calcula la desviación típica para cada punto de calibración y se compila en una tabla resumen que permite identificar zonas problemáticas del instrumento.

3.7 Estimación de la incertidumbre de medición

La incertidumbre cuantifica la duda razonable sobre el resultado de la calibración, siguiendo la metodología de la Guía GUM e implementando el modelo descrito en DI-005 apartado 6.1.1.

Modelo de medición:

$$C_i = \ell_{pi} - \bar{L}_l + C_E$$

Donde C_i es la corrección local (opuesta al error), ℓ_{pi} el valor del patrón, $\bar{L}_l$ la media de indicaciones y C_E la corrección por resolución.

Tabla 12.

Fuentes de incertidumbre

Fuente	Tipo	Método de evaluación
Patrón de referencia	B	Incertidumbre certificada del bloque patrón (k=2)
Repetibilidad	A	Desviación típica experimental de las mediciones
Resolución digital	B	Distribución rectangular en $\pm E/2$
Temperatura	B	Variación dimensional por diferencia a 20°C
Planitud/paralelismo	B	Defectos geométricos cuantificados con patrones plano-paralelos

Nota. Elaboración propia

Cuantificación de contribuciones

Incertidumbre del patrón: Se obtiene del certificado de calibración del bloque patrón, dividiendo la incertidumbre expandida entre el factor de cobertura (típicamente $k=2$).

Incertidumbre por repetibilidad: Se calcula como $u_r = \frac{s_i}{\sqrt{J}}$, donde s_i es la desviación típica del punto y J el número de repeticiones.

Incertidumbre por resolución: Para distribución rectangular: $u_{res} = \frac{E}{\sqrt{12}}$, donde E es la división de escala ($0,001 \text{ mm} = 1 \mu\text{m}$).

Incertidumbre por temperatura: Considerando variación ΔT respecto a 20°C , coeficiente de expansión del material y distribución rectangular: $u_T = \frac{L \times \alpha \times \Delta T}{\sqrt{3}}$.

Incertidumbre por geometría: Si se verificó planitud/paralelismo, se utiliza el defecto medido; si no se verificó, se asume el límite V_{EMT} de ISO 3611. Distribución rectangular: $u_{geo} = \frac{\text{defecto}}{\sqrt{3}}$.

Combinación de incertidumbres:

La incertidumbre combinada se calcula mediante suma cuadrática según GUM:

$$u_c = \sqrt{\sum_i u_i^2}$$

La incertidumbre expandida, que define el intervalo con aproximadamente 95% de confianza, se obtiene:

$$U = k \times u_c$$

donde $k=2$ es apropiado cuando los grados de libertad efectivos (calculados mediante Welch-Satterthwaite) superan aproximadamente 50.

Incertidumbre por punto

Dado que la repetibilidad varía entre puntos y diferentes bloques patrón tienen diferentes incertidumbres certificadas, se calcula una incertidumbre específica para cada punto de calibración. Todas se reportan en el certificado de calibración.

3.8 Criterios de aceptación y rechazo

La decisión de conformidad compara los errores medidos contra límites especificados, considerando la incertidumbre de calibración según ISO 14253-1 (International Organization for Standardization, 2023).

Especificaciones según ISO 3611:2023

Para micrómetros digitales con resolución $E = 0,001$ mm, la Tabla 3 de ISO 3611 establece los siguientes límites para **Clase 0**:

- Error máximo permitido (E_{EMT}): $\pm 0,5$ μm
- Variación máxima permitida (V_{EMT}): $0,8$ μm

Regla de decisión simple (por defecto ISO 14253-1)

El instrumento se declara conforme si todos los errores individuales cumplen $|E_i| \leq E_{EMT}$, sin considerar la incertidumbre de calibración. Esta regla, aunque sencilla, ignora que el error medido posee incertidumbre asociada y puede resultar en decisiones incorrectas cerca de los límites de especificación (International Organization for Standardization, 2023).

Regla de banda de guarda (recomendada):

Considera la incertidumbre mediante tres zonas de decisión:

Zona de aceptación incondicional: $|E_i| + U \leq E_{EMT}$

El error, incluso en su peor caso, no excede el límite. Instrumento CONFORME.

Zona de rechazo incondicional: $|E_i| - U > E_{EMT}$

El error, incluso en su mejor caso, excede el límite. Instrumento NO CONFORME.

Zona de decisión (ambigua): $E_{EMT} - U < |E_i| \leq E_{EMT} + U$

El instrumento podría estar conforme o no conforme dentro de la incertidumbre. Requiere análisis adicional.

Para instrumentos en zona de decisión, las opciones incluyen: ajustar el micrómetro y recalibrar, aceptar con restricción de uso documentada, o reducir la incertidumbre mejorando el procedimiento.

Evaluación de la variación

Adicionalmente a los errores individuales, se verifica:

$$V = \max(E_i) - \min(E_i) \leq V_{EMT}$$

Una variación superior al límite indica comportamiento errático del instrumento (errores de rosca, excentricidad, defectos periódicos) y justifica declaración de no conformidad independientemente de los errores individuales.

Capítulo IV. Validación de la Guía Técnica

La validación tiene como propósito comprobar que el procedimiento de calibración desarrollado para micrómetros digitales es técnicamente correcto, aplicable y reproducible por el personal de laboratorio, garantizando la fiabilidad de los resultados obtenidos.

Checklist de verificación

Bajo los requisitos de la norma ISO 17025, es común utilizar los criterios de Conforme (C), No conforme (NC) o No aplica (NA) para evaluar cada ítem o requisito verificado. En caso de NC, se debe registrar una observación y, si es posible, la acción correctiva tomada. Este enfoque permite categorizar el estado de cumplimiento de cada actividad de forma objetiva y trazable (International Organization for Standardization y International Electrotechnical Commission, 2017)

Conformidad (C): el requisito o paso del procedimiento se ha ejecutado correctamente y el resultado obtenido se encuentra dentro de los límites o tolerancias establecidos. No se requieren acciones correctivas (Servicio de Acreditación Ecuatoriano, 2018).

No conforme (NC): el requisito no se ha cumplido, el resultado está fuera de los límites aceptables o el procedimiento no pudo ejecutarse como está escrito. Una NC no significa que necesariamente el micrómetro esté malo, sino que el procedimiento de la guía reveló una falla (ya sea en el instrumento, en el operador o en la redacción de la propia guía). Para cada NC se debe registrar la desviación y su causa raíz, suspender la calibración hasta que se aplique una corrección y se verifique nuevamente la conformidad y documentar la acción correctiva implementada en los registros de calidad del laboratorio (Servicio de Acreditación Ecuatoriano, 2018).

No aplica (NA): el requisito no es pertinente para el instrumento específico bajo validación o para las condiciones de laboratorio. La categoría No Aplica, se utiliza cuando una actividad específica no es relevante para el instrumento que se está evaluando (Servicio de Acreditación Ecuatoriano, 2018).

Validación de un procedimiento de calibración

Se debe confirmar de manera objetiva los siguientes puntos:

- a) El método de calibración es correcto y apropiado
- b) El personal está debidamente cualificado para ejecutarlo
- c) Los patrones empleados son idóneos y poseen trazabilidad vigente
- d) Las condiciones ambientales se controlan adecuadamente
- e) El cálculo de la incertidumbre es fiable y coherente con la capacidad de laboratorio.

A continuación, se analizan cada fase durante un procedimiento de calibración.

La tabla 13 tiene como propósito verificar la integridad, funcionalidad básica y condiciones documentales iniciales del micrómetro antes de iniciar al proceso de calibración. Su base normativa es la norma ISO 3611:2023 (cláusula 5.2.1) para los requisitos de marcado del instrumento y la norma ISO/IEC:2017 (cláusula 7.8) para el registro documental (International Organization for Standardization y International Electrotechnical Commission, 2017)

Tabla 13.
Recepción e inspección preliminar

No.	Verificación	Conforme (C)	No Conforme (NC)	No Aplica (NA)
1.1	El micrómetro tiene marcado legible: rango de medición, resolución y número de serie (ISO 3611:2023).	Marca legible y permanente.	Marca ilegible o ausente.	—
1.2	El display muestra cifras completas, sin píxeles muertos ni errores de unidad (mm).	Todos los dígitos completos.	Segmentos apagados o error evidente.	—
1.3	El husillo se desplaza sin juego ni resistencia irregular a lo largo de todo el rango.	Movimiento suave y continuo.	Juego excesivo, atascos o puntos duros.	—
1.4	El trinquete actúa con sonido uniforme y fuerza constante (3 clics reproducibles).	Sonido y clics consistentes.	Funcionamiento irregular o ausencia de fuerza constante.	Micrómetros sin trinquete.
1.5	El ajuste de cero es posible y la indicación vuelve a 0,0000 mm con caras en contacto.	El ajuste es estable y reproducible.	No es posible ajustar el punto cero o la lectura es inestable.	—
1.6	Se registra el estado físico del instrumento (rayaduras, rebabas, corrosión, desgaste).	Registro completo y detallado con evidencias.	Registro ausente o incompleto.	—

El ítem 1.4 (trinquete) es fundamental para asegurar la repetibilidad de las medidas. Si el instrumento carece de este mecanismo, se marca como NA, pero se debe registrar en las observaciones esta limitación

La tabla 14, tiene como propósito garantizar que el entorno de trabajo cumple con los requisitos de estabilidad especificados —temperatura y humedad— para no introducir errores

adicionales en la calibración. Su base normativa principal es el procedimiento CEM DI-005 (apartado 5.2.2 y 5.2.4) y la norma ISO 1:2016 (temperatura de referencia de 20 °C para especificaciones dimensionales).

La nomenclatura BPL es bloque de patrón longitudinal.

Tabla 14.
Condiciones ambientales

No.	Verificación	Conforme (C)	No Conforme (NC)
2.1	Temperatura al inicio y al final dentro de (20 ± 2) °C; registrada con el termómetro del laboratorio.	Registro completo dentro de los límites.	Temperatura fuera del rango o sin registro.
2.2	Humedad relativa entre 35 % y 65 % HR.	Registro completo dentro de los límites.	Humedad fuera del rango o sin registro.
2.3	BPL y micrómetros estabilizados térmicamente ≥ 30 min sobre base metálica, antes de cualquier medición.	Cumplimiento del tiempo mínimo registrado.	Tiempo menor al requerido o sin evidencia.
2.4	Los BPL se manipulan con guantes o paños; no se apoyan por las caras de medición.	Manipulación adecuada sin contaminación térmica.	Manipulación directa con las manos o apoyo inadecuado.

La condición establecida en el ítem 2.3 (estabilización térmica de ≥ 30 minutos) es un requisito técnico de obligado cumplimiento. El CEM DI-005 (apartado 5.2.4) establece que los patrones deben situarse en la zona de calibración y dejarse estabilizar térmicamente al menos durante media hora. El incumplimiento de cualquiera de los ítems de esta tabla invalida inmediatamente los resultados de la calibración, constituyendo una No Conformidad.

La tabla 15 tiene como propósito asegurar la calidad geométrica de las superficies de contacto del micrómetro. Los defectos en planitud o paralelismo impactan directamente la exactitud dimensional del instrumento, al impedir el contacto pleno y uniforme con el bloque patrón durante la medición. La base normativa es el procedimiento CEM DI-005 (apartado 5.3.1).

Tabla 15.
Verificación geométrica (planitud y paralelismo)

No.	Verificación	Conforme (C)	No Conforme (NC)	No Aplica (NA)
-----	--------------	--------------	------------------	----------------

3.1	Planitud de la cara fija: ≤ 4 franjas de interferencia con PP sobre luz monocromática ($\approx 1 \mu\text{m}$). Registrar n.º de franjas observado.	Franjas observadas ≤ 4 .	Franjas > 4 .	—
3.2	Planitud de la cara móvil: ídem. Registrar n.º de franjas observado.	Franjas observadas ≤ 4 .	Franjas > 4 .	—
3.3	Paralelismo (aplica para $C \leq 100 \text{ mm}$): suma de franjas en ambas caras ≤ 8 para rango 0–50 mm; ≤ 12 para 50–100 mm (DI-005, §5.3.1).	Cumple con el límite especificado.	Excede el límite especificado.	Rango de medición $> 100 \text{ mm}$.
3.4	Los PP usados están limpios y sin rayaduras que puedan enmascarar franjas.	PP en condiciones óptimas.	Rayaduras o suciedad que afecten la interferometría.	—

Los ítems 3.1 y 3.2 (planitud de caras fija y móvil) son críticos porque cualquier desviación de la planitud afecta la repetibilidad y exactitud de las mediciones. Para contabilizar las franjas correctamente, se debe orientar el patrón plano-paralelo hasta encontrar la posición de mínimo número de franjas

La tabla 16 tiene como propósito verificar la exactitud del micrómetro en todo su rango de medición mediante puntos seleccionados y una secuencia de medición que minimiza los errores sistemáticos. Su base normativa es el procedimiento CEM DI-005 (apartados 5.4.1 y 5.4.2) y la norma ISO 3611:2023 (cláusulas 6.1 a 6.3).

Tabla 16.
Calibración de escala

No.	Verificación	Conforme (C)	No Conforme (NC)
4.1	Se usan exactamente los 10 BPL del juego especificado: 2,5 – 5,1 – 7,7 – 10,3 – 12,9 – 15,0 – 17,6 – 20,2 – 22,8 – 25,0 mm.	Todos los BPL correctos y válidos.	Ausencia o sustitución no justificada de algún bloque.
4.2	El punto cero (caras en contacto, sin BPL) se toma como primer punto de referencia antes de iniciar la secuencia.	Se realizó la lectura de referencia antes de iniciar.	Omisión de la lectura de referencia de punto cero.
4.3	Cada medición se realiza en el centro geométrico del BPL (contacto total de la cara de medición, ISO 3611:2023).	Contacto adecuado verificado visualmente.	Contacto desplazado del centro o inestable.

4.4	Se alternan las dos orientaciones de contacto del BPL en cada punto; para J = 10, se obtienen 5 medidas por orientación.	Alternancia documentada en el registro.	Omisión de alternancia o número incorrecto de mediciones.
4.5	El trinquete se acciona con 1–3 clics consistentes; no se usa fuerza manual directa sobre el husillo para la medición final.	Uso exclusivo del trinquete.	Uso de fuerza manual directa en alguna medición.
4.6	Se registran temperatura del BPL e indicación del micrómetro al finalizar cada punto.	Registro completo de ambos parámetros.	Registro ausente o parcial de temperatura o indicación.
4.7	Al menos un punto de calibración está ubicado en el 90 % o más del rango ($\geq 22,5$ mm para 0–25 mm). Verificado: punto 22,8 mm.	Verificación correcta.	Ausencia de medición cercana al final de rango.

El ítem 4.1 es fundamental, ya que el juego de bloques patrón constituye la referencia principal de la calibración. Su selección a intervalos de 2,5 mm (o con valores no repetitivos según DI-005) permite detectar tanto errores periódicos del husillo como errores progresivos. El ítem 4.4 (alternancia de orientación del BPL) promedia posibles defectos geométricos de los bloques y del instrumento. El ítem 4.5 (uso exclusivo del trinquete) es indispensable para que el procedimiento sea válido y repetible

La tabla 17 presenta una tabla de resultados con mediciones representativas de ejemplo, el análisis detallado de dicha tabla, indicando la conformidad de cada punto con los criterios establecidos en la norma

Tabla 17.
Resultados de la calibración — Plantilla y ejemplo

Punto (mm)	Valor patrón (mm)	Lecturas (5 rep)	Error E (mm)	Criterio ISO 3611:2023
0	0,00000	0,0000; 0,0000; 0,0001; 0,0000; 0,0000	0,0000	$-2 \mu\text{m} \leq E \leq +2 \mu\text{m} \rightarrow$ CONFORME
5	5,00000	5,0001; 4,9999; 5,0000; 5,0000; 5,0000	0,0000	$-2 \mu\text{m} \leq E \leq +2 \mu\text{m} \rightarrow$ CONFORME
10	10,00000	10,0002; 10,0001; 10,0001; 10,0000; 10,0001	+0,0001	$-2 \mu\text{m} \leq E \leq +2 \mu\text{m} \rightarrow$ CONFORME

15	15,00000	15,0003; 15,0002; 15,0002; 15,0002; 15,0003	+0,0002	$-2 \mu\text{m} \leq E \leq +2 \mu\text{m} \rightarrow$ CONFORME
20	20,00000	20,0004; 20,0003; 20,0003; 20,0004; 20,0003	+0,0003	$-2 \mu\text{m} \leq E \leq +2 \mu\text{m} \rightarrow$ CONFORME
25	25,00000	25,0005; 25,0004; 25,0004; 25,0005; 25,0004	+0,0004	$-2 \mu\text{m} \leq E \leq +2 \mu\text{m} \rightarrow$ CONFORME

Nota. Para efectos de esta validación práctica, se aplicó la regla de decisión de aceptación simple conforme a ISO/TR 14253-6. Esta regla es aplicable cuando el índice de capacidad de medición $C_m \geq 4$ (es decir, cuando la incertidumbre expandida U es $\leq 25\%$ del error máximo tolerado EMT).

Todos los puntos de calibración registrados cumplen con la especificación de error máximo permitido (MPE) de $\pm 2 \mu\text{m}$ para micrómetros Clase 1 según la norma ISO 3611:2023. Por lo tanto, desde el punto de vista de los errores absolutos, el instrumento se califica como CONFORME (International Organization for Standardization, 2023).

Validación práctica de la guía

Para completar el proceso de validación de esta guía técnica, se recomienda que el laboratorio que la implemente realice un estudio de validación que incluya:

(a) Verificación de la repetibilidad: Calcular la desviación estándar d en cada punto de calibración, siguiendo el procedimiento de la sección 3.4.3 (Paso 13).

(b) Estimación de la incertidumbre expandida: Aplicar la metodología GUM (JCGM 100:2008, Sección 3.7) para cada punto de calibración, considerando todas las fuentes de incertidumbre de la Tabla 12 (patrón, repetibilidad, resolución, temperatura y geometría). La incertidumbre expandida resultante debe ser coherente con la capacidad de medición del laboratorio y compatible con el MPE del instrumento. La norma ISO/IEC 17025 exige que los laboratorios acreditados no reporten incertidumbres menores que las publicadas en su alcance de acreditación (CMC) (International Organization for Standardization y International Electrotechnical Commission, 2017).

(c) Participación en ensayos de aptitud (intercomparación): Para una validación completa, se recomienda que el laboratorio participe en un programa de ensayos de aptitud para calibración de micrómetros, comparando sus resultados con los de otros laboratorios acreditados. La cláusula 7.7.2 de ISO/IEC 17025 exige que los laboratorios monitoreen su desempeño mediante comparación con resultados de otros laboratorios, donde sea posible y apropiado (International Organization for Standardization y International Electrotechnical Commission, 2017).

Capítulo V. Conclusiones y recomendaciones

Conclusiones

- El análisis de la normativa internacional, particularmente la ISO 3611:2023, la ISO/IEC 17025:2017 y la GUM, permitió establecer una base técnica sólida para el procedimiento de calibración, asegurando que los criterios de error máximo permitido, competencia de laboratorios y estimación de incertidumbre estén plenamente alineados con los estándares globales de metrología dimensional.
- La caracterización metrológica del micrómetro digital, incluyendo sus componentes, resolución y especificaciones de error máximo permitido, junto con la definición de los requisitos de los bloques patrón conforme a la ISO 3650, ha permitido establecer las bases técnicas necesarias para garantizar la trazabilidad de las mediciones.
- El procedimiento de calibración desarrollado, que comprende once puntos de medición, el cálculo de errores de indicación, la evaluación de repetibilidad mediante desviación estándar y la estimación de incertidumbre expandida según el método GUM, constituye un proceso técnicamente riguroso y aplicable en laboratorios de metrología dimensional.

- La guía técnica desarrollada representa un aporte significativo al fortalecimiento de la infraestructura metrológica ecuatoriana, ya que proporciona a los laboratorios un documento actualizado y armonizado con criterios internacionales, lo que favorece la competitividad industrial.

Recomendaciones

- Se recomienda a los laboratorios de calibración implementar esta guía técnica de manera integral, asegurando que el personal técnico reciba capacitación continua sobre el uso correcto del dispositivo de fuerza constante (trinquete) y la correcta interpretación de las reglas de decisión. Esto minimizará los errores atribuibles al operador y al método, que son las fuentes de variabilidad más comunes.
- Es recomendable revisar y actualizar periódicamente esta guía técnica (cada 3 a 5 años) para mantener su alineación con las futuras revisiones de las normas ISO 3611 e ISO/IEC 17025.
- Es recomendable que el laboratorio mantenga un registro histórico de calibraciones por cada micrómetro, que incluya los errores de indicación, la repetibilidad y la incertidumbre expandida obtenida en cada calibración, para analizar la evolución del instrumento, estimar su vida útil y planificar su reemplazo oportunamente.
- Se aconseja que, en la emisión del certificado de calibración, se especifique la regla de decisión aplicada (según ISO 14253-1) para declarar la conformidad o no conformidad del instrumento, indicando si se utilizó la regla de aceptación simple o la regla de banda de guarda con incertidumbre, para que el usuario comprenda el nivel de riesgo asociado a la decisión.

Capítulo VI. Referencias bibliográficas

- American Society of Mechanical Engineers. (2013). *Micrometers (ASME B89.1.13-2013)*.
- Camacho, E. (23 de Abril de 2025). AGSA Technologies. <https://agsatech.com/blog/que-es-la-metrologia-dimensional/>
- Canelas-Santiesteban, E., Harmes-Liedtke, U., Valqui, A., Flores-Campos, M., Lugo, G., Liewald, W., y Rivadeneira, M. (2022). *Infraestructura de la calidad para la economía circular en América Latina y el Caribe*. PTB/QICA. <https://qica.site/wp-content/uploads/2023/03/Estudio-IC-EC-ESP-Online-PTB.pdf>
- Centro Español de Metrología. (2010). *Evaluación de datos de medición: Guía para la expresión de la incertidumbre de medida (GUM 2008)*. <https://www.cem.es/sites/default/files/gum20digital1202010.pdf>
- Centro Español de Metrología. (2011). *Procedimiento DI-005 para la calibración de micrómetros de exteriores de dos contactos*. https://www.cem.es/sites/default/files/di-005_micrometros_de_exteriores_de_dos_contactos_corr_mar20.pdf
- Coveney, T. (2020). A review of state-of-the-art 1D length scale calibration instruments. *Measurement Science and Technology*, 31(4), 042002. <https://doi.org/10.1088/1361-6501/ab5f71>
- DeFelsko. (s.f.). *Calibración, verificación y ajuste*. DeFelsko: <https://es.defelsko.com/resources/cva>
- Doiron, T., y Beers, J. (1997). Uncertainty and dimensional calibrations. *Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology*, 102(6), 647. <https://emtoolbox.nist.gov/publications/nistjresnov-dec97-102-6.pdf>
- Entidad Mexicana de Acreditación. (2014). *Guía técnica de trazabilidad metrológica e incertidumbre de medida en metrología dimensional*. https://www.ema.org.mx/descargas_portalV2/guias_tecnicas/Guias_Tecnicas_CALIBRACION/CALIBRACION_Metrologia_dimensional.pdf
- Escamilla Esquivel, A. (2015). *Metrología y sus aplicaciones*. Grupo Editorial Patria.
- Flack, D. (2014). *Callipers and micrometers Measurement Good Practice Guide No. 40*. National Physical Laboratory. <https://eprintspublications.npl.co.uk/2043/1/mgpg40.pdf>
- Franceschini, F., Galetto, M., Maisano, D., Mastrogiacomo, L., y Pralio, B. (2011). *Distributed large-scale dimensional metrology: New insights*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-0-85729-543-9>
- González González, C., y Zeleny Vázquez, J. (1995). *Metrología*. McGraw-Hill.

- Grupo Tecnología Mecánica. (s.f.). *Metrología dimensional*.
<https://www3.fi.mdp.edu.ar/tecnologia/archivos/TecFab/01.pdf>
- Haitjema, H. (2020). The calibration of displacement sensors. *Sensors*, 20(3), 584.
<https://doi.org/10.3390/s20030584>
- Harris, G. (2019). *Selected laboratory and measurement practices and procedures to support basic mass calibrations NIST IR 6969-2019*. National Institute of Standards and Technology. <https://doi.org/10.6028/NIST.IR.6969-2019>
- Instituto de Ingeniería de España. (11 de Febrero de 2025). *Metrología: pilar para la innovación y la competitividad industrial*. <https://www.iies.es/single-post/metrolog%C3%ADa-pilar-para-la-innovaci%C3%B3n-y-la-competitividad-industrial>
- Instituto Nacional de Metrología. (s.f.). *Concepto y clasificación de la metrología*. INDOCAL:
<https://indocal.gob.do/areas-tecnicas/metrologia/concepto-y-clasificacion/>
- International Organization for Standardization. (1998). *Geometrical product specifications (GPS) — Length standards — Gauge blocks (ISO Standard No. 3650:1998)*.
<https://www.iso.org/standard/1241.html>
- International Organization for Standardization. (2023). *ISO 3611:2023 — Geometrical product specifications (GPS) — Dimensional measuring equipment — Design and metrological characteristics of micrometers for external measurements*.
- International Organization for Standardization, y International Electrotechnical Commission. (2017). *ISO/IEC 17025:2017. Requisitos generales para la competencia de los laboratorios de ensayo y calibración (Traducción oficial al español)*.
https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/913713/0008596-Tema_7_Subtema_1-ISO-17025-2017.pdf
- Japanese Standards Association. (2016). *JIS B 7502:2016 (E): Micrometers*.
- Joint Committee for Guides in Metrology. (2008). *Evaluation of measurement data — Guide to the expression of uncertainty in measurement (JCGM 100:2008)*.
https://www.bipm.org/documents/20126/2071204/JCGM_100_2008_E.pdf
- Lipus, Acko, y Klobucar. (2024). Enhancing calibration accuracy with laser interferometry for high-resolution measuring systems. *Advances in Production Engineering & Management*, 19, 386-394. <https://doi.org/10.14743/apem2024.3.514>
- Meza Sánchez, S. (2012). *Metrología geométrica*. Grupo Editorial Éxodo.
- Meza Sánchez, S., y Zárate, J. (2017). *Metrología dimensional aplicada en elementos mecánicos*. Grupo Editorial Éxodo.
- Mitutoyo Corporation. (s.f.). *Mitutoyo Optical Flats Data Sheet*. Mitutoyo Corporation:
https://res.cloudinary.com/iwh/image/upload/q_auto,g_center/assets/1/26/Mitutoyo-Optical-Flats-DataSheet.pdf

- Moro Piñeiro, M. (2017). *Metrología y ensayos*. Marcombo.
- Nehe, S., Jaju, S., Bembrekar, V., Dabhole, S., Raushan, R., Ekatpure, A., . . . Sherje, N. (2024). Determination of uncertainty in calibration of external micrometer. *Advances in Nonlinear Variational Inequalities*, 27. <https://internationalpubls.com/index.php/anvi/article/view/1373>
- Panagiotidou, E., Chountalas, P., Magoutas, A., Georgakellos, D., y Lagodimos, A. (2024). Systematic Identification and Validation of Critical Success Factors for ISO/IEC 17025 Implementation. *Standards*, 15, 60. <https://www.mdpi.com/2076-3387/15/2/60>
- Parashare, G. (2024). Measurement system analysis: A comprehensive review. *International Journal of Scientific Research and Management*, 2. <https://ijsrm.net/index.php/ijsrm/article/view/5255/3977>
- Ramírez Tapia, M., y Flores García, A. (2002). *Metrología y normalización*. Instituto Politécnico Nacional.
- Rodríguez, J. (2018). Estimación de incertidumbres: Guía GUM. *Revista e-medida*. <https://www.e-medida.es/numero-3/estimacion-de-incertidumbres-guia-gum/>
- Rodríguez, J. (2022). Mediciones de longitud: aspectos básicos y errores típicos en metrología dimensional. *Revista e-medida*. <https://www.e-medida.es/numero-20/mediciones-de-longitud-aspectos-basicos-y-errores-tipicos-en-metrologia-dimensional/>
- Sánchez Salinas, S., y Gómez Galán, M. (2017). *Metrología dimensional: Resumen de teoría y problemas resueltos*. Universidad de Almería (EdUAL).
- Sariki. (27 de Junio de 2024). *Metrología Industrial: la clave para reducir costes*. Sariki - Metrología Industrial: <https://www.sariki.es/metrologia-industrial-la-clave-para-reducir-costes/>
- Schmid, W., y Lazos, R. (2004). *Guía para estimar la incertidumbre de la medición*. CENAM. [https://paginaspersonales.unam.mx/app/webroot/files/5404/GUIAPARAESTIMARLAINECERTIDUMBRE\(CENAM\)_26566.pdf](https://paginaspersonales.unam.mx/app/webroot/files/5404/GUIAPARAESTIMARLAINECERTIDUMBRE(CENAM)_26566.pdf)
- Servicio de Acreditación Ecuatoriano. (2018). *Norma ISO/IEC 17025:2017: Requisitos generales para la competencia de los laboratorios de ensayo y calibración*. https://www.acreditacion.gob.ec/wp-content/uploads/2018/04/CURSO-NORMA-ISO-17025_2017.2.pdf
- Servicio Ecuatoriano de Normalización. (s.f.-a). *INEN apoya al Sistema Ecuatoriano de Calidad a través del Laboratorio Nacional de Metrología*. INEN: <https://www.normalizacion.gob.ec/inen-apoya-al-sistema-ecuadoriano-de-calidad-a-traves-del-laboratorio-nacional-de-metrologia/>
- Servicio Ecuatoriano de Normalización. (s.f.-b). *INEN fortalece Red Ecuatoriana de Metrología de laboratorios*. INEN: <https://www.normalizacion.gob.ec/inen-fortalece-red-ecuatoriana-de-metrologia-de-laboratorios/>

Servicio Ecuatoriano de Normalización. (s.f.-c). *Infraestructura de la calidad*.

<https://www.normalizacion.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2025/05/6.-Infraestructura-de-la-Calidad.pdf>

TCM Consultoría y Formación. (s.f.). *La importancia de la metrología en la industria*. TCM

Consultoría y Formación: <https://www.tcmetrologia.com/blog/importancia-metrologia-industria/>

Vázquez Ramírez, V. (2019). *Metrología y normalización*. Tecnológico Nacional de México, Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez.

<https://rinacional.tecnm.mx/bitstream/TecNM/4867/1/1er%20Informe%20Metrolog%C3%ADa%20y%20Normalizaci%C3%B3n.pdf>

Apéndices

Apéndice 1. Formato de certificado de calibración

CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN

N° Certificado

CC-2026-001

Fecha de recepción

[YYYY-MM-DD]

Fecha de calibración

[YYYY-MM-DD]

Fecha de emisión

[YYYY-MM-DD]

1. DATOS DEL CLIENTE

Nombre / Razon Social:

[Nombre del Cliente]

Dirección:

[Dirección del Cliente]

Contacto:

[Correo / Teléfono]

2. DATOS DEL INSTRUMENTO BAJO CALIBRACION (IBC)

Instrumento:

Micrometro de Exteriores Digital

Identificación (ID):

[ID Interno]

Marca:

[Marca del Instrumento]

Rango de Medida:

0 - 25 mm

Modelo / Tipo:

[Modelo]

Resolución (d):

0.001 mm

Numero de Serie:

[Numero de Serie]

Clase de Exactitud:

Clase 1 [ISO 3611:2023]

3. CONDICIONES AMBIENTALES

Parametro

Inicial

Final

Unidad

Tolerancia

Temperatura

20.6

20.2

°C

20 ± 2 °C

Humedad Relativa

[% HR]

[% HR]

% HR

35% - 65% HR

4. TRAZABILIDAD METROLOGICA (PATRONES UTILIZADOS)

Patron

Marca

Modelo

Serie

Certificado / Trazabilidad

Juego de Bloques Patron (Grado 1)

[Marca BPL]

[Modelo BPL]

[Serie BPL]

[No. Certificado]

Plano Paralelo Optico (PP)

[Marca PP]

[Modelo PP]

[Serie PP]

[No. Certificado]

La trazabilidad metrológica se asegura utilizando BPL que estén calibrados directamente, o mediante una cadena ininterrumpida de comparaciones contra patrones nacionales o internacionales de longitud.

5. PROCEDIMIENTO DE CALIBRACION

Metodo:

Comparacion directa con Bloques Patron segun Guia Tecnica (ISO 3611:2023 / CEM DI-005)

6. RESULTADOS DE LA CALIBRACION

Medida No.	Valor patrón (mm)	Lectura promedio (mm)	Error de Medida (mm)	Incertidumbre expandida U (mm)	Factor k
1					
2					
3					
4					
5					
6					
7					
8					
9					
10					

INCERTIDUMBRE DE MEDIDA: La incertidumbre expandida de medida informada, se ha obtenido multiplicando la incertidumbre típica combinada por un factor de cobertura k que, corresponde a un nivel de confianza de al menos el 95%;y, se la estimó de acuerdo al documento "Evaluation of measurement dataGuide to the expression of uncertainty in measurement", JCGM 100:2008 Karen Stephanie Espinoza Malavé 14:40 KS El SI es el organismo que estandariza las unidades de medida

7. OBSERVACIONES

El error de medida presentado no incluye la correccion. Para el valor corregido: Valor Corregido = Lectura - Error.

Calibrado por:

Firma:

Cargo:

Autorizado por:

Firma:

Cargo: