UNIVERSIDAD DISTRITAL
FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

DISPOSITIVO METROLÓGICO PARA VERIFICACIÓN DE COMPARADORES DE CARÁTULA

Autores:

Richard David Romero Ballén

Juan Camilo Amado Bolaños

Tutor:

Mauricio González Colmenares

Universidad Distrital Francisco José de Caldas
Ingeniería Mecánica
Facultad Tecnológica
Bogotá D.C.
2026

Índice

1. Resumen del Proyecto **6**

2. Planteamiento del Problema **7**

3. Objetivos **8**
3.1. Objetivo General 8
3.2. Objetivos Específicos 8

4. Justificación **9**

5. Marco Teórico **10**
5.1. Metrología Dimensional 10
5.2. Comparadores de carátula 10
5.3. Micrómetro como patrón de referencia 11
5.4. Accesorio indicador de orificios 12
5.5. Verificación y calibración de instrumentos 12
5.6. Trazabilidad metrológica 13
5.7. Exactitud 13
5.8. Precisión 13
5.9. Repetibilidad 13
5.10. Incertidumbre de medición 14
5.11. Error de medición 14
5.12. Error local 14
5.13. Estadística aplicada a la metrología 14
5.14. Variables estadísticas en metrología 15
5.15. Media aritmética 15
5.16. Desviación estándar 15
5.17. Repetibilidad 16
5.18. Reproducibilidad 16
5.19. Distribución normal 16
5.20. Intervalos de confianza 16
5.21. Incertidumbre tipo A y tipo B 16
5.22. Longitud de arco 17
5.23. Centro de Mecanizado 17
5.24. Software CAD CAM 17

6. Estado del arte **18**

7. Metodologia propuesta **19**
7.1. Tipo y enfoque de la investigación: 19
7.2. Diseño de la investigación: 19
7.3. Materiales y equipos: 19
7.4. Diseño y construcción del dispositivo: 20
7.5. Procedimiento experimental: 20

7.6. Análisis de datos: . . . 21
7.7. Validación del dispositivo: . . . 21
7.8. Variables del estudio: . . . 21
7.8.1. Variable independiente . . . 21
7.8.2. Variable dependiente . . . 21
7.8.3. Variables controladas . . . 22
7.9. Criterios de aceptación: . . . 22
7.10. Limitaciones del estudio: . . . 22

8. DESARROLLO Y CONSTRUCCIÓN DEL DISPOSITIVO METROLÓGICO 23
8.1. Definición de requerimientos del dispositivo . . . 23
8.2. Diseño conceptual del dispositivo . . . 25
8.2.1. Ensamble inicial de prueba . . . 28
8.3. Selección de materiales, diseño y fabricación de componentes . . . 29
8.3.1. Base estructural . . . 29
8.3.2. Elementos de fijación . . . 32
8.3.3. Tornillería y elementos de ajuste . . . 36
8.3.4. Comparador de carátula . . . 37
8.3.5. Micrómetro patrón . . . 37
8.4. Certificación y trazabilidad metrológica del micrómetro patrón . . . 38
8.5. Ensamblaje del dispositivo metrológico . . . 39
8.5.1. Instalación de Tornillos y elementos de fijación . . . 40
8.5.2. Montaje del micrómetro patrón . . . 40
8.5.3. Montaje del comparador de carátula . . . 42
8.5.4. Alineación y ajustes del sistema . . . 44
8.5.5. Resultado del ensamble final . . . 44
8.6. Análisis de costos . . . 44
8.6.1. Comparación con dispositivos comerciales de verificación . . . 46
8.6.2. Comparación económica . . . 48
8.6.3. Análisis de los costos . . . 48

9. PRUEBAS Y DATOS EXPERIMENTALES 49
9.1. Objetivo de las pruebas experimentales . . . 50
9.2. Condiciones y configuración experimental . . . 50
9.2.1. Instrumentos y elementos utilizados . . . 51
9.3. Preparación del sistema de medición . . . 51
9.4. Alineación del sistema . . . 52
9.5. Procedimiento experimental . . . 52
9.5.1. Posición inicial . . . 53
9.5.2. Metodología de captura de datos . . . 54
9.5.3. Mediciones en sentido ascendente y descendente . . . 58
9.6. Registro de los datos experimentales . . . 58
9.7. Estudio para la verificación del comparador . . . 59
9.7.1. Valor Promedio . . . 59

9.7.2. Evaluación de la exactitud . . . 61
9.7.3. Evaluación de la precisión . . . 65
9.7.4. Evaluación de la histéresis . . . 68
9.7.5. Evaluación de repetibilidad . . . 74
9.7.6. Evaluación de reproducibilidad . . . 76
9.7.7. Evaluación de intervalos locales . . . 81
9.8. Fuentes de error considerado . . . 84
9.8.1. Análisis geométrico del mecanismo de transmisión . . . 84
9.8.2. Causal asociado al certificado de calibración . . . 87
9.8.3. Otros causales posibles . . . 88
9.9. Evaluación de la incertidumbre de medición . . . 88
9.9.1. Incertidumbre tipo A . . . 89
9.9.2. Incertidumbre tipo B . . . 90
9.9.3. Incertidumbre combinada . . . 91
9.9.4. Regla de decisión . . . 93
9.10. Criterios de evaluación . . . 93
9.11. Discusión de resultados . . . 94

10. ELABORACIÓN DEL MANUAL DE USO DEL DISPOSITIVO METROLÓGICO 96

10.1. Información general . . . 96
10.2. Especificaciones técnicas . . . 98
10.3. Condiciones de operación . . . 99
10.4. Inspección previa al uso . . . 100
10.5. Montaje del dispositivo . . . 101
10.5.1. Instalación de la base sobre la superficie de trabajo . . . 102
10.5.2. Instalación del micrómetro patrón . . . 102
10.5.3. Instalación de la palanca de transmisión . . . 104
10.5.4. Instalación del comparador de carátula . . . 105
10.5.5. Ajuste de los elementos de fijación . . . 105
10.5.6. Comprobación del montaje . . . 105
10.6. Puesta en funcionamiento . . . 106
10.6.1. Comprobación del desplazamiento . . . 106
10.6.2. Posicionamiento inicial del micrómetro . . . 106
10.6.3. Puesta a cero del comparador . . . 107
10.6.4. Preparación para la toma de datos . . . 107
10.7. Procedimiento de verificación . . . 108
10.7.1. Aplicación del desplazamiento . . . 108
10.7.2. Verificación en sentido ascendente . . . 108
10.7.3. Verificación en sentido descendente . . . 108
10.7.4. Repetición de las mediciones . . . 108
10.7.5. Finalización del procedimiento . . . 108

11. Conclusiones 110

12.Referencias **111**

1. Resumen del Proyecto

En la industria manufacturera y mecánica, el control de calidad dimensional es fundamental para garantizar la precisión de las piezas fabricadas y la correcta operación de sistemas mecánicos. Uno de los instrumentos más utilizados para medir dimensiones pequeñas es el comparador de carátula, Sin embargo, para asegurar su precisión y confiabilidad, es necesario verificar regularmente su correcta calibración ya que con el tiempo y el uso constante pueden degradarse estos aspectos. En este contexto, surge la necesidad de contar con métodos confiables, económicos y sencillos para la verificación periódica de estos instrumentos por esto, el proyecto propone el desarrollo de un dispositivo metrológico que, utilizando un micrómetro como patrón, con una resolución mayor al comparador, permitirá verificar la exactitud de estos instrumentos.

Esta herramienta busca aportar una solución viable a la necesidad de verificación periódica de instrumentos de medición en entornos industriales o líneas de producción que no cuentan con acceso inmediato a laboratorios de calibración certificados. Como principales referentes se consideran los principios de metrología dimensional, las normativas ISO aplicables a equipos de medición mecánica, y los conceptos de errores sistemáticos y aleatorios en instrumentos de medición. Se revisarán antecedentes y la norma NTC ISO 10012 sobre técnicas de calibración y dispositivos metrológicos similares para asegurar una base sólida en el desarrollo del dispositivo. El objetivo principal es construir y validar un dispositivo que permita comprobar la exactitud de los comparadores de carátula.

La metodología incluirá la fase de modelado del dispositivo, seguida por su construcción y pruebas experimentales para evaluar su desempeño en condiciones reales. Se espera que el dispositivo desarrollado no solo facilite la verificación de los comparadores de carátula, sino que también mejore la precisión en las mediciones industriales, contribuyendo así a la calidad y seguridad de los productos manufacturados con un dispositivo funcional, de fácil uso y bajo costo relativo.

2. Planteamiento del Problema

En el entorno industrial, la precisión en la medición de componentes es esencial para garantizar la calidad y funcionalidad de los productos finales. Los comparadores de carátula son instrumentos utilizados para medir variaciones pequeñas en dimensiones, pero su precisión depende de una calibración correcta y regular. Sin embargo, existe una carencia de dispositivos accesibles y fiables para la verificación de estos comparadores, lo que genera un riesgo significativo de errores en la medición. A pesar de su uso frecuente, no todas las empresas o talleres cuentan con acceso inmediato a laboratorios de calibración certificados o con recursos suficientes para verificar periódicamente el estado metrológico de estos instrumentos. Esta situación puede llevar al uso de comparadores desajustados o fuera de tolerancia, afectando directamente la calidad del producto final, incrementando los rechazos o reprocesos, y comprometiendo la trazabilidad de las mediciones.

Ante esta problemática, surge la siguiente pregunta de investigación: ¿Es posible fabricar un dispositivo metrológico de bajo costo y fácil operación que permita verificar de manera precisa la correcta indicación de comparadores de carátula con resolución de 0,01 mm, utilizando como referencia un micrómetro patrón de 0,001 mm?

Este proyecto busca desarrollar un dispositivo que responda a esta necesidad, contribuyendo así a mejorar la precisión en la medición y, por ende, la calidad de los productos en la industria mecánica. Las limitaciones del proyecto incluyen la necesidad de asegurar que el dispositivo sea práctico y fácil de usar en entornos industriales, y que pueda ser integrado en procesos de control de calidad existentes sin dejar de lado que se busca un dispositivo de bajo costo.

3. Objetivos

3.1. Objetivo General

Desarrollar un dispositivo metrológico que permita verificar la precisión de comparadores de carátula con una resolución de 0,01 mm, utilizando un micrómetro con resolución de 0,001 mm.

3.2. Objetivos Específicos

1. Construir un dispositivo metrológico funcional basado en un micrómetro de alta precisión con resolución 0,001 mm previamente calibrado por un laboratorio acreditado por la ONAC.

2. Realizar pruebas experimentales para evaluar la precisión, exactitud y confiabilidad del dispositivo en la verificación de comparadores de carátula.

3. Elaborar un manual de uso que facilite su implementación y futuras mejoras.

4. Justificación

La calidad de los productos en los procesos industriales depende, en gran medida, de la confiabilidad de los instrumentos de medición utilizados en el control dimensional. Los comparadores de carátula son ampliamente empleados en talleres, líneas de producción y laboratorios, debido a su precisión y facilidad de uso. Sin embargo, su rendimiento puede degradarse con el tiempo, lo que genera errores que afectan directamente la calidad del producto final. Esta situación hace necesaria su verificación periódica, la cual muchas veces no se realiza por falta de acceso a equipos especializados o servicios de calibración certificados, especialmente en pequeñas y medianas empresas.

Desde el punto de vista tecnológico, este proyecto propone el desarrollo de un dispositivo de verificación práctico y de bajo costo, que permita contrastar comparadores de carátula con un micrómetro de alta resolución. Esto representa un aporte significativo, ya que brinda una solución técnica viable, que puede integrarse fácilmente a los procesos de control de calidad existentes, sin requerir una infraestructura metrológica compleja.

5. Marco Teórico

En esta sección se desarrollan los conceptos fundamentales, teorías y antecedentes que sustentan la presente investigación en el campo de la metrología dimensional. El objetivo es proporcionar un marco conceptual que permita comprender los principios de medición, calibración y verificación de instrumentos dimensionales, así como las normas y procedimientos utilizados para garantizar la exactitud y confiabilidad de las mediciones. Este marco teórico servirá como base para interpretar los resultados obtenidos y establecer una relación lógica entre el planteamiento del problema, los objetivos y las conclusiones del estudio.

5.1. Metrología Dimensional

La metrología dimensional es la rama de la metrología encargada de la medición de magnitudes geométricas como longitud, diámetro, espesor, desplazamiento y posición. Su aplicación es fundamental en los procesos industriales y de manufactura, ya que permite garantizar la calidad de los productos, la uniformidad de las piezas y el cumplimiento de especificaciones técnicas establecidas en normas nacionales e internacionales.

En la industria moderna, la metrología dimensional desempeña un papel importante en el control de calidad y en la verificación de instrumentos de medición, debido a que cualquier error en las mediciones puede generar fallas en los procesos productivos, pérdidas económicas y problemas de funcionamiento en los productos finales. Por esta razón, los instrumentos de medición deben ser sometidos periódicamente a procesos de calibración y verificación que aseguren su confiabilidad metrológica.

De acuerdo con el Bureau International des Poids et Mesures (BIPM, 2012), la metrología proporciona la base técnica necesaria para asegurar mediciones comparables y confiables a nivel internacional, permitiendo mantener la trazabilidad de las mediciones mediante patrones reconocidos.

5.2. Comparadores de carátula

El comparador de carátula es un instrumento de medición utilizado para detectar pequeñas variaciones dimensionales mediante un sistema mecánico amplificador que transforma desplazamientos lineales en movimientos angulares de una aguja indicadora. Estos instrumentos son ampliamente utilizados en procesos de inspección dimensional, alineación, concentricidad y control de tolerancias geométricas.

Los comparadores de carátula poseen alta sensibilidad y permiten realizar mediciones relativas con resoluciones del orden de centésimas o milésimas de milímetro. Debido a su importancia en procesos de control dimensional, es necesario verificar periódicamente su exactitud y funcionamiento para garantizar la confiabilidad de las mediciones realizadas.

La norma ISO 463 establece los requisitos metrológicos y las características técnicas relacionadas con los comparadores de carátula utilizados en mediciones lineales. Esta norma

define aspectos como errores máximos permisibles, resolución, repetibilidad y condiciones de verificación.

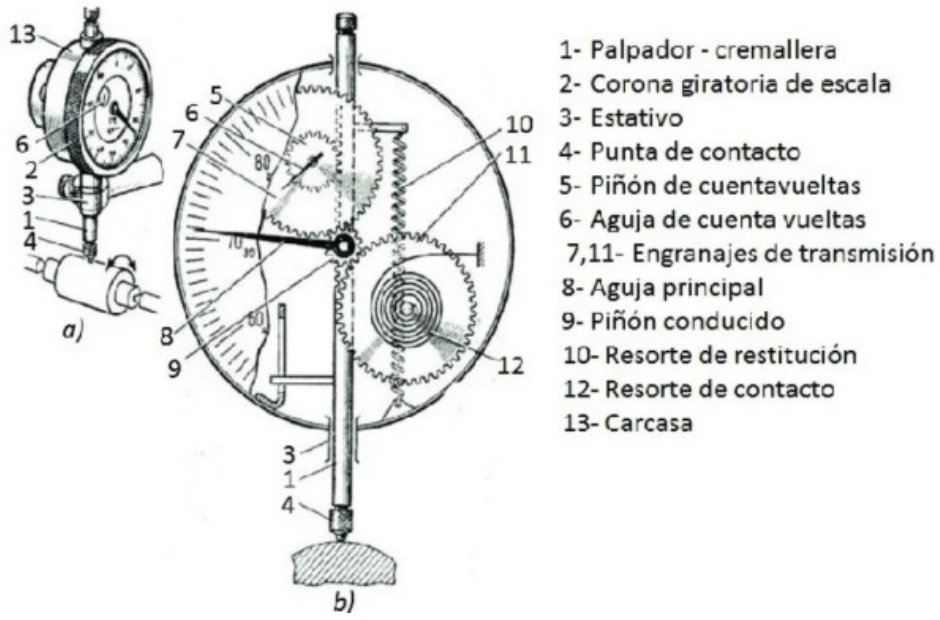


Figura 1: Partes comparador de carátula

5.3. Micrómetro como patrón de referencia

El micrómetro es un instrumento de medición de alta precisión utilizado para medir dimensiones lineales con gran exactitud. Su funcionamiento se basa en un tornillo micrométrico que transforma el movimiento rotacional en desplazamiento lineal controlado.

En aplicaciones metrológicas, el micrómetro puede emplearse como patrón de referencia debido a su capacidad para generar desplazamientos conocidos y controlados. En el presente proyecto, el micrómetro será utilizado como elemento principal para generar los desplazamientos necesarios durante la verificación de comparadores de carátula.

La precisión del micrómetro y su correcta calibración son factores fundamentales para garantizar la confiabilidad del dispositivo metrológico desarrollado. Por ello, es indispensable que el instrumento utilizado cuente con trazabilidad metrológica y certificados de calibración vigentes.

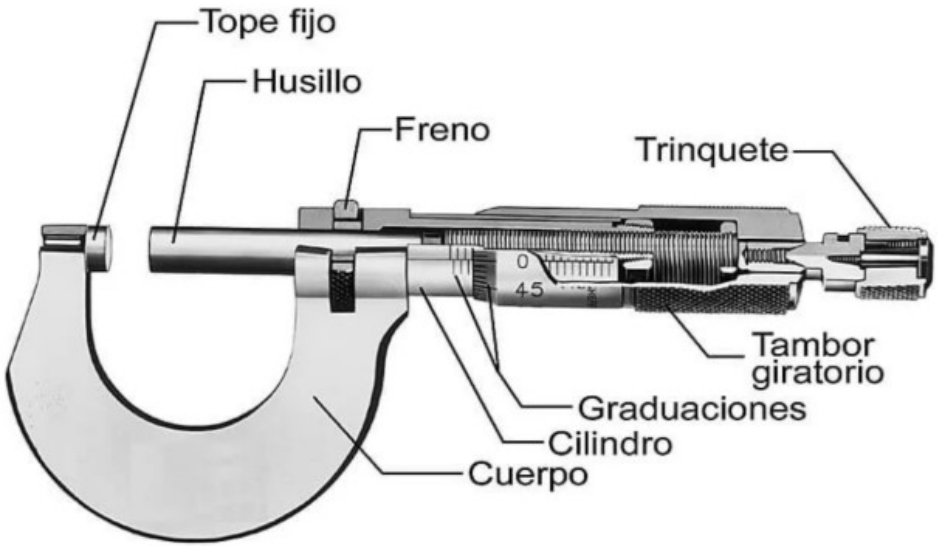


Figura 2: Partes micrómetro

5.4. Accesorio indicador de orificios

Un accesorio indicador de orificios es un complemento de medición que se acopla a un indicador de carátula para medir diámetros interiores, tolerancias cilíndricas y redondez de agujeros con alta precisión en piezas mecánicas.



Figura 3: Palanca transmisora

5.5. Verificación y calibración de instrumentos

La verificación metrológica consiste en el conjunto de actividades destinadas a comprobar que un instrumento de medición cumple con los requisitos especificados para su funcionamiento. Este proceso permite determinar si el instrumento se encuentra apto para ser utilizado dentro

de determinados límites de error.

Por otro lado, la calibración es el procedimiento mediante el cual se establece la relación entre los valores indicados por un instrumento de medición y los valores proporcionados por un patrón de referencia. Según el Vocabulario Internacional de Metrología (VIM), la calibración permite determinar errores de indicación y evaluar la incertidumbre asociada a las mediciones.

La verificación y calibración de comparadores de carátula son procedimientos esenciales para asegurar la confiabilidad de las mediciones dimensionales y reducir errores en procesos industriales.

5.6. Trazabilidad metrológica

La trazabilidad metrológica es una propiedad de los resultados de medición que permite relacionarlos con referencias establecidas, generalmente patrones nacionales o internacionales, mediante una cadena ininterrumpida de calibraciones, cada una con su respectiva incertidumbre.

La trazabilidad garantiza la confiabilidad y comparabilidad de las mediciones realizadas en diferentes laboratorios o procesos industriales. En el desarrollo del dispositivo metrológico propuesto, la trazabilidad será un aspecto fundamental, ya que el micrómetro utilizado como referencia debe estar calibrado conforme a patrones reconocidos.

Según el BIPM (2012), la trazabilidad constituye uno de los principios esenciales de la metrología moderna, debido a que asegura uniformidad y validez internacional en las mediciones.

5.7. Exactitud

La exactitud hace referencia al grado de cercanía entre el valor medido y el valor verdadero o de referencia. Un instrumento exacto proporciona resultados con errores mínimos respecto al valor real.

5.8. Precisión

La precisión se relaciona con la capacidad de un instrumento para proporcionar resultados consistentes cuando se realizan mediciones repetidas bajo las mismas condiciones.

5.9. Repetibilidad

La repetibilidad corresponde a la variación observada entre mediciones sucesivas realizadas con el mismo método, operador, instrumento y condiciones ambientales.

Estos conceptos son fundamentales en la evaluación del desempeño del dispositivo metrológico, debido a que permiten determinar la calidad y confiabilidad de las mediciones obtenidas durante el proceso experimental.

5.10. Incertidumbre de medición

La incertidumbre de medición es un parámetro asociado al resultado de una medición que caracteriza la dispersión de los valores que podrían ser atribuidos razonablemente a la magnitud que se desea medir.

Toda medición posee cierto nivel de incertidumbre debido a factores como errores instrumentales, condiciones ambientales, método de medición y capacidad del operador. Por esta razón, la estimación de la incertidumbre es indispensable en cualquier proceso metrológico.

La Guía para la Expresión de la Incertidumbre de Medición (GUM) establece metodologías para evaluar y expresar la incertidumbre asociada a resultados de medición. En este proyecto, la incertidumbre permitirá evaluar la confiabilidad de las mediciones realizadas por el dispositivo construido.

5.11. Error de medición

El error de medición corresponde a la diferencia entre el valor medido y el valor verdadero o de referencia. Los errores pueden clasificarse como sistemáticos o aleatorios.

Los errores sistemáticos se presentan de manera constante y pueden estar relacionados con fallas de calibración o condiciones del instrumento. Los errores aleatorios, por otro lado, varían de forma impredecible debido a factores externos o variaciones en el proceso de medición.

El análisis de errores permitirá evaluar el comportamiento del comparador de carátula durante el proceso de verificación y determinar la confiabilidad del dispositivo desarrollado.

5.12. Error local

Un error local en metrología es la diferencia entre el valor medido en un punto específico y el valor verdadero de la magnitud. Este desvío surge por condiciones particulares de un sitio de trabajo, como variaciones de temperatura o defectos en una zona concreta del instrumento.

5.13. Estadística aplicada a la metrología

La estadística aplicada a la metrología constituye una herramienta fundamental para el análisis, interpretación y validación de resultados obtenidos en procesos de medición. Debido a que toda medición presenta variaciones ocasionadas por factores instrumentales, ambientales y humanos, es necesario utilizar métodos estadísticos que permitan evaluar la confiabilidad y calidad de los datos experimentales.

En metrología, el análisis estadístico permite determinar el comportamiento de un instrumento de medición, identificar errores, evaluar la repetibilidad de los resultados y estimar la incertidumbre asociada a las mediciones. Además, facilita la comparación entre valores medidos y valores de referencia, permitiendo establecer si un instrumento cumple con los

requisitos establecidos en normas técnicas.

Durante el proceso experimental del presente proyecto, las herramientas estadísticas serán utilizadas para analizar los datos obtenidos en la verificación de comparadores de carátula, evaluando la estabilidad y confiabilidad de las mediciones realizadas mediante el dispositivo metrológico diseñado.

5.14. Variables estadísticas en metrología

Las variables estadísticas corresponden a las magnitudes obtenidas durante el proceso de medición y permiten describir el comportamiento de los datos experimentales.

En metrología dimensional, las variables más utilizadas son:

- Valores medidos.
- Errores de indicación.
- Desviaciones respecto al patrón.
- Variaciones dimensionales.
- Incertidumbre asociada.

El análisis de estas variables permite identificar tendencias, dispersiones y posibles anomalías en las mediciones.

5.15. Media aritmética

La media aritmética corresponde al promedio de un conjunto de mediciones y representa el valor central de los datos experimentales. En metrología, este parámetro se utiliza para estimar el valor más representativo de una serie de mediciones repetidas.

La media aritmética es importante porque reduce el efecto de variaciones aleatorias presentes durante el proceso de medición.

5.16. Desviación estándar

La desviación estándar es un parámetro estadístico que indica el grado de dispersión de los datos respecto a la media aritmética. En metrología, este parámetro permite evaluar la repetibilidad y estabilidad de un instrumento.

Un valor bajo de desviación estándar indica que las mediciones presentan poca dispersión y, por lo tanto, mayor repetibilidad.

5.17. Repetibilidad

La repetibilidad corresponde a la capacidad de un instrumento para generar resultados similares cuando se realizan mediciones repetidas bajo las mismas condiciones de operación.

En el contexto de este proyecto, la repetibilidad permitirá evaluar la estabilidad del comparador de carátula durante múltiples verificaciones realizadas con el dispositivo metrológico.

5.18. Reproducibilidad

La reproducibilidad se refiere al grado de concordancia entre resultados obtenidos bajo diferentes condiciones, como cambios de operador, instrumentos o ambiente.

Este parámetro es importante debido a que permite determinar si el dispositivo puede generar resultados confiables independientemente de las condiciones de uso.

5.19. Distribución normal

La distribución normal o distribución gaussiana es uno de los modelos estadísticos más utilizados en metrología. Muchas variables de medición presentan un comportamiento aproximadamente normal debido a la influencia de múltiples factores aleatorios.

La distribución normal facilita el análisis de incertidumbre y permite estimar probabilidades asociadas a errores de medición.

5.20. Intervalos de confianza

Los intervalos de confianza representan un rango dentro del cual se espera que se encuentre el valor verdadero de una medición con una determinada probabilidad.

En metrología, los intervalos de confianza son utilizados para expresar la confiabilidad de los resultados experimentales y establecer límites aceptables de variación.

5.21. Incertidumbre tipo A y tipo B

La evaluación de incertidumbre puede clasificarse en incertidumbre tipo A e incertidumbre tipo B.

La incertidumbre tipo A se determina mediante métodos estadísticos a partir de mediciones repetidas, mientras que la incertidumbre tipo B se obtiene mediante información externa como certificados de calibración, especificaciones técnicas o experiencia previa.

La combinación de ambos tipos de incertidumbre permite obtener la incertidumbre expandida del sistema de medición.

5.22. Longitud de arco

La longitud de arco es la medida de la distancia o el camino real recorrido a lo largo de una curva entre dos puntos. En geometría y cálculo, equivale a "estirar" una línea curva sobre una regla recta para saber cuánto mide.

5.23. Centro de Mecanizado

Un centro de mecanizado CNC es un tipo de máquina que funciona por control numérico, lo hace que el proceso sea automático. Gracias a este tipo de máquinas es posible realizar numerosas operaciones de mecanizado con la ayuda de un ordenador y con la mínima intervención de operarios.

El control numérico permite que la máquina sea totalmente automática y que opere gracias a códigos y caracteres alfanuméricos programables. El CNC supone, en sí mismo, toda una revolución para la industria de los mecanizados. Este tipo de tecnología, que se desarrolló en la segunda mitad del siglo XX, funciona gracias a sofisticados programas informáticos que, con los años, se han simplificado haciendo posible que cada vez más fábricas y talleres instruyan a sus operarios para el manejo de las máquinas que los incorporan.

Para el funcionamiento de un centro mecanizado CNC se requiere de los programas CAD y CAM. El primero de estos programas es el que hace el diseño propiamente dicho de la pieza a mecanizar.

5.24. Software CAD CAM

El software CAM CAD se refiere a una plataforma integrada que combina funcionalidades de diseño asistido por computadora (CAD) y fabricación asistida por computadora (CAM). CAD se utiliza para crear modelos y diseños digitales precisos de productos, mientras que CAM toma estos diseños y genera las instrucciones de máquina (como el código G) necesarias para producirlos físicamente utilizando máquinas CNC (control numérico por computadora). Este software combinado permite a los ingenieros, diseñadores y fabricantes realizar una transición sin problemas del diseño a la producción en un flujo de trabajo unificado.

6. Estado del arte

En los últimos años, la metrología dimensional ha experimentado avances significativos orientados a mejorar la precisión, reducir la incertidumbre y optimizar los procesos de calibración. Uno de los principales enfoques actuales es el desarrollo de metodologías basadas en la incertidumbre de medición para la gestión de equipos, permitiendo establecer intervalos de recalibración más eficientes (Schaude y Hausotte, 2024).

En el ámbito de la calibración de patrones dimensionales, investigaciones recuentes destacan la importancia de considerar la incertidumbre como criterio clave para la evaluación de la conformidad, especialmente en laboratorios acreditados bajo la norma ISO/IEC 17025 (stepien et al.,2025).

Asimismo, se han desarrollado métodos de calibración basados en modelos matemáticos avanzados y técnicas experimentales, los cuales permiten reducir errores sistemáticos y alcanzar niveles de incertidumbre cada vez más bajos (Measurement Journal, 2024).

No obstante, a pesar de estos avances, persiste una limitación relacionada con el acceso a equipos de calibración, debido a su alto costo y a la necesidad de condiciones controladas de laboratorio. Por esta razón, se han propuesto soluciones alternativas de bajo costo que permiten realizar verificaciones directamente en planta.

En este contexto, estudios recientes han demostrado la viabilidad de utilizar instrumentos comparativos en sistemas de verificación accesibles, manteniendo niveles adecuados de precisión sin incurrir en altos costos. Estas soluciones han sido aplicadas en áreas como la calibración de sistemas robóticos (Chen et al., 2022).

En general, el estado del arte evidencia una tendencia hacia el desarrollo de herramientas metrológicas que sean precisas, accesibles y de fácil implementación. Sin embargo, aún existe una brecha en la disponibilidad de dispositivos económicos que permitan verificar instrumentos de medición con suficiente exactitud en entornos industriales.

En este sentido, el presente proyecto se enmarca en esta tendencia, proponiendo una solución práctica, económica y aplicable en el ámbito industrial.

7. Metodologia propuesta

7.1. Tipo y enfoque de la investigación:

El presente estudio se desarrolla bajo un enfoque **Cuantitativo**, debido a que se basa en la medición de variables numéricas y en el análisis de datos obtenidos a partir de instrumentos de medición. Asimismo, corresponde a una investigación de tipo **aplicada**, ya que busca resolver un problema específico mediante el diseño y construcción de un dispositivo de verificación metrológica.

Adicionalmente, el estudio tiene un alcance **experimental**, dado que se realizan pruebas controladas para evaluar el desempeño del dispositivo desarrollado, comparando sus resultados con un patrón de referencia.

7.2. Diseño de la investigación:

El diseño de la investigación es **experimental de tipo comparativo**, ya que se analiza la relación entre las mediciones obtenidas por el comparador de carátula y las generadas por el instrumento patrón (micrómetro).

Se busca determinar la **exactitud, repetibilidad y error de indicación** del comparador, utilizando el dispositivo de verificación desarrollado.

7.3. Materiales y equipos:

Para el desarrollo del proyecto se emplearon los siguientes elementos:

- Comparador de carátula (resolución de 0,01 mm)
- Micrómetro como patrón de referencia (resolución de 0,001 mm)
- Base o estructura del dispositivo de verificación
- Palanca transmisora de un dispositivo a otro
- Soportes y elementos de fijación
- Superficie de referencia
- Elementos de ajuste fino
- Instrumentos de medición auxiliares
- Software para el registro y análisis de datos (Excel o similar)

7.4. Diseño y construcción del dispositivo:

El dispositivo de verificación fue diseñado con el propósito de garantizar la alineación y estabilidad durante el proceso de medición. Para ello, se consideraron los siguientes aspectos:

- Rigidez estructural para evitar deformaciones
- Paralelismo entre el comparador y el micrómetro
- Sistema de ajuste fino para aplicar desplazamientos controlados
- Facilidad de uso y portabilidad

La construcción se realizó utilizando materiales metálicos y elementos de precisión, asegurando condiciones adecuadas para la medición.

7.5. Procedimiento experimental:

El procedimiento para la verificación del comparador de carátula se llevó a cabo en las siguientes etapas:

1. Preparación
    - Limpieza de los instrumentos y superficies de contacto
    - Verificación del estado del comparador y del micrómetro
    - Ajuste inicial a cero del sistema
2. Montaje
    - Fijación del comparador en el dispositivo
    - Alineación con el micrómetro
    - Verificación del contacto entre las superficies de medición
3. Toma de datos
   Se realizaron mediciones en diferentes puntos de desplazamiento, definidos previamente (por ejemplo: 0 mm, 1 mm, 2 mm, etc.).
   Para cada punto:
    - Se ajustó el micrómetro al valor deseado
    - Se registró la lectura del comparador
    - Se repitió la medición al menos 3 veces para evaluar repetibilidad
4. Registro de datos
    - Los datos se registraron en tablas que incluyen:
    - Valor patrón (micrómetro)
    - Valor medido (comparador)
    - Error de medición

7.6. Análisis de datos:

El análisis de los resultados se realizó mediante:

1. Error de indicación
   Se calcula como: **Error = Valor medio − Valor patrón**

2. Error de histéresis
   $Error_{Histeresis} = Lectura_{Subida} - Lectura_{Bajada}$

3. Error máximo
   Se determina el mayor valor absoluto del error obtenido.

4. Repetibilidad
   Se evalúa mediante la siguient ecuación:
   $P_i = (x_{i\,\text{máx}} - x_{i\,\text{mín}})$

5. Incertidumbre de medición
   Se estima considerando:

   - Resolución del instrumento
   - Repetibilidad
   - Posibles fuentes de error

7.7. Validación del dispositivo:

La validación del dispositivo se realizó comparando los resultados obtenidos con criterios de aceptación basados en normas metrológicas.

Se verificó que:

- El error de indicación se encuentre dentro de los límites permisibles
- La repetibilidad sea adecuada
- La incertidumbre sea aceptable para el uso industrial

7.8. Variables del estudio:

7.8.1. Variable independiente

- Desplazamiento generado por el micrómetro

7.8.2. Variable dependiente

- Lectura del comparador de carátula

7.8.3. Variables controladas

- Temperatura ambiente
- Condiciones de medición
- Posición del instrumento

7.9. Criterios de aceptación:

El comparador se considera apto si:

- Tomando como regla de decisión se podría contemplar que el error máximo no supere 5 veces la resolución del instrumento (0,01 mm)
- La repetibilidad es consistente
- Los resultados son estables

7.10. Limitaciones del estudio:

- Dependencia de las condiciones ambientales
- Precisión limitada por el micrómetro utilizado
- Posibles errores de alineación

8. DESARROLLO Y CONSTRUCCIÓN DEL DISPOSITIVO METROLÓGICO

En el presente capítulo se describe detalladamente el proceso de desarrollo y construcción del dispositivo metrológico propuesto para la verificación de comparadores de carátula. El dispositivo fue concebido con el propósito de proporcionar una alternativa funcional y confiable para la evaluación de estos instrumentos de medición, empleando como patrón de referencia un micrómetro de alta precisión con resolución de 0,001 mm, previamente calibrado por un laboratorio acreditado por el Organismo Nacional de Acreditación de Colombia (ONAC), garantizando así la trazabilidad metrológica de las mediciones realizadas.

Para alcanzar este objetivo, se desarrolló una metodología que abarcó diferentes etapas, iniciando con la identificación de los requerimientos funcionales y metrológicos que debía cumplir el sistema. Posteriormente, se llevó a cabo el diseño conceptual y mecánico del dispositivo, considerando aspectos relacionados con la estabilidad estructural, la alineación de los elementos de medición, la facilidad de operación y la minimización de posibles fuentes de error. Asimismo, se realizó la selección de materiales y componentes teniendo en cuenta criterios de resistencia mecánica, disponibilidad, facilidad de manufactura y comportamiento dimensional durante la operación.

Una vez definida la configuración del sistema, se procedió con la fabricación de cada uno de los componentes mediante diferentes procesos de mecanizado y acondicionamiento, seguidos de las actividades de ensamblaje y ajuste necesarias para garantizar el correcto funcionamiento del dispositivo. Durante esta etapa se verificó el cumplimiento de las dimensiones establecidas en el diseño y se implementaron las condiciones requeridas para asegurar una adecuada interacción entre el micrómetro patrón y el comparador de carátula sometido a verificación.

Finalmente, se presentan las pruebas preliminares de funcionamiento realizadas sobre el dispositivo construido, así como las consideraciones metrológicas adoptadas para garantizar la confiabilidad de las mediciones obtenidas. De esta manera, el presente capítulo constituye la evidencia del cumplimiento del primer objetivo específico de la investigación, relacionado con la construcción de un dispositivo metrológico funcional capaz de servir como base para los procesos posteriores de verificación, análisis y validación experimental.

8.1. Definición de requerimientos del dispositivo

La construcción de un dispositivo metrológico destinado a la verificación de comparadores de carátula requiere la definición previa de una serie de requerimientos funcionales, mecánicos y metrológicos que permitan garantizar su adecuado desempeño durante las actividades de medición. Estos requerimientos constituyen la base para el desarrollo del diseño, ya que establecen las condiciones mínimas que debe cumplir el sistema para asegurar resultados confiables, repetibles y trazables.

La identificación de dichos requerimientos se realizó considerando las características técnicas de los comparadores de carátula comúnmente utilizados en la industria, las recomendaciones establecidas en la normativa aplicable y las necesidades específicas del proceso de verificación. Asimismo, se tuvieron en cuenta las capacidades del instrumento patrón seleccionado, correspondiente a un micrómetro de alta precisión con resolución de 0,001 mm y certificado de calibración vigente emitido por un laboratorio acreditado por la ONAC.

Desde el punto de vista metrológico, uno de los principales requerimientos del dispositivo consiste en garantizar la generación de desplazamientos lineales controlados y conocidos, los cuales permitan comparar las indicaciones del comparador de carátula con valores de referencia confiables. Para ello, el sistema debe asegurar una adecuada transmisión del movimiento generado por el micrómetro hacia el palpador del comparador, minimizando pérdidas de movimiento, deformaciones mecánicas y posibles errores de alineación que puedan afectar los resultados de la verificación.

Otro aspecto fundamental corresponde a la estabilidad estructural del dispositivo. Debido a que se trabajará con desplazamientos del orden de micrómetros, cualquier vibración, flexión o movimiento no deseado puede introducir errores significativos en las mediciones. Por esta razón, la estructura debía diseñarse con suficiente rigidez mecánica para soportar las cargas de operación sin experimentar deformaciones apreciables que comprometieran la exactitud del sistema.

Adicionalmente, se estableció como requisito la correcta alineación entre el eje de desplazamiento generado por el micrómetro y el eje de medición del comparador de carátula. La falta de paralelismo o perpendicularidad entre estos elementos puede generar errores geométricos, particularmente el denominado error de coseno, el cual ocasiona discrepancias entre el desplazamiento real aplicado y el valor registrado por el instrumento bajo verificación. En consecuencia, el diseño del dispositivo debía incorporar mecanismos de ajuste y posicionamiento que permitieran garantizar una adecuada alineación durante las pruebas.

La facilidad de montaje y operación también fue considerada dentro de los requerimientos de diseño. El dispositivo debía permitir la instalación rápida y segura de comparadores de diferentes características dimensionales sin necesidad de modificaciones complejas o herramientas especializadas. De esta manera, se busca que el sistema pueda ser utilizado de forma práctica en actividades de laboratorio, investigación o verificación metrológica.

Desde el punto de vista de la trazabilidad metrológica, se definió que el sistema debía emplear como referencia un instrumento previamente calibrado y respaldado mediante un certificado emitido por una entidad competente. Este requisito garantiza que los valores utilizados durante la verificación puedan relacionarse con patrones nacionales e internacionales de medición, permitiendo asegurar la confiabilidad y validez de los resultados obtenidos.

Asimismo, se consideró la necesidad de que los materiales seleccionados para la fabricación del dispositivo presentaran buenas propiedades mecánicas y estabilidad dimensional. Los componentes estructurales debían ofrecer resistencia suficiente para soportar las condiciones de uso

sin deformaciones permanentes, además de facilitar los procesos de mecanizado requeridos para su fabricación. De igual forma, se buscó minimizar los efectos asociados a la expansión térmica y al desgaste mecánico que pudieran afectar el comportamiento del sistema a largo plazo.

Finalmente, se estableció que el dispositivo debía ser capaz de cubrir el rango de medición requerido para la verificación de comparadores de carátula de uso común, manteniendo niveles adecuados de exactitud, repetibilidad y confiabilidad. El cumplimiento de estos requerimientos permitió definir los criterios de diseño y construcción que orientaron el desarrollo del dispositivo metrológico presentado en esta investigación.

Cuadro 1: Requerimientos

Requerimiento	**Descripción**
Trazabilidad metrológica	Uso de un micrómetro calibrado por laboratorio acreditado por ONAC.
Resolución	Capacidad de trabajar con incrementos de 0,001 mm.
Estabilidad estructural	Minimizar deformaciones y vibraciones durante la medición.
Alineación geométrica	Garantizar el paralelismo entre el micrómetro y el comparador.
Repetibilidad	Obtener resultados consistentes en mediciones sucesivas.
Facilidad de operación	Permitir un montaje rápido y sencillo del instrumento a verificar.
Adaptabilidad	Posibilidad de verificar diferentes modelos de comparadores de carátula.
Resistencia mecánica	Soportar las condiciones normales de uso sin deterioro significativo.
Exactitud	Mantener la relación entre el desplazamiento aplicado y el valor de referencia.

8.2. Diseño conceptual del dispositivo

El diseño conceptual y la estructuración del dispositivo de verificación metrológico están concebidas por la necesidad de verificar los comparadores de carátula de los talleres, los cuales, no tienen acceso a un laboratorio para la calibración de dichos instrumentos, adicional a esto, los costos que esto genera representa un rubro importante que los propietarios al final deciden no asumir, por otra parte, otro factor importante, es el tiempo que demanda la calibración de un instrumento en un laboratorio, ya que, los tiempos de los tramites administrativos, sumado a la ejecución de la calibración son bastantes altos y esto genera un retraso importante en las operaciones de las empresas si no se cuenta con otra herramienta metrológica de respaldo.
Una vez establecidos los requerimientos funcionales, mecánicos y metrológicos del proyecto, se procedió al desarrollo del diseño conceptual del dispositivo. Esta etapa tuvo como finalidad definir una solución mecánica capaz de satisfacer las necesidades identificadas durante el análisis preliminar, garantizando la generación de desplazamientos lineales controlados y la correcta interacción entre el instrumento patrón y el comparador de carátula sometido a verificación.

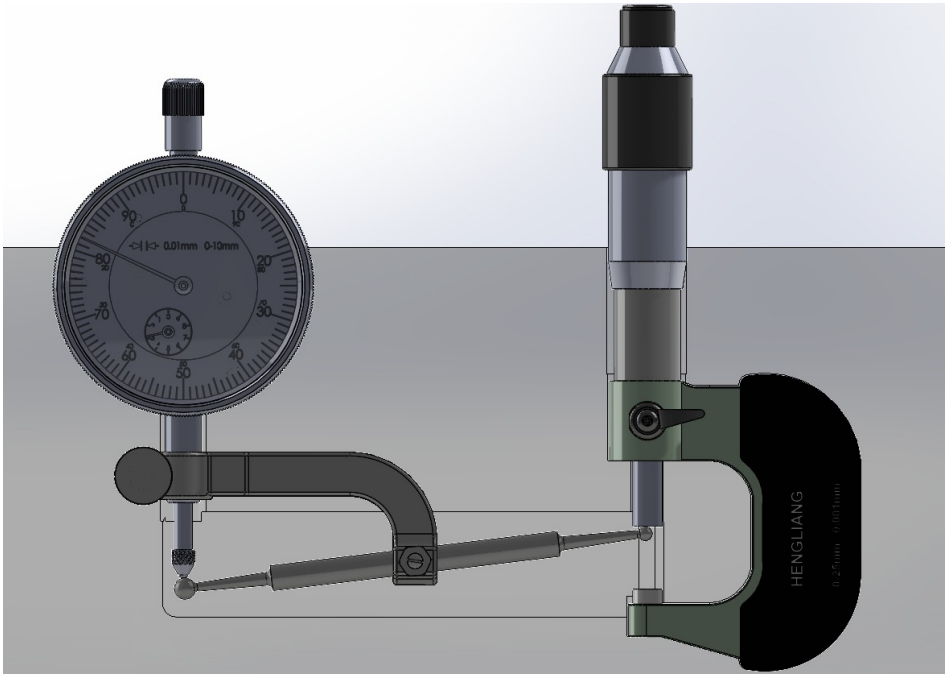


Figura 4: Diseño conceptual

El principio de funcionamiento adoptado se fundamenta en la utilización de un micrómetro de alta precisión como elemento generador de desplazamientos conocidos. Mediante el accionamiento del tornillo micrométrico, se producen movimientos lineales controlados que son transmitidos directamente al palpador del comparador de carátula. De esta manera, es posible comparar las indicaciones registradas por el comparador con los desplazamientos reales generados por el micrómetro, permitiendo evaluar el comportamiento metrológico del instrumento bajo verificación.

Durante la fase de diseño se analizaron diferentes alternativas de configuración mecánica. Entre las opciones consideradas se evaluaron sistemas basados en guías lineales, estructuras tipo banco de medición y mecanismos con soportes ajustables. Después de analizar aspectos relacionados con la estabilidad, facilidad de fabricación, costo y precisión requerida, se seleccionó una configuración compuesta por una base rígida, un sistema de fijación para el micrómetro y el comparador de carátula y una palanca móvil que trasmitirá el movimiento entre el micrómetro patrón y el comparador de carátula.

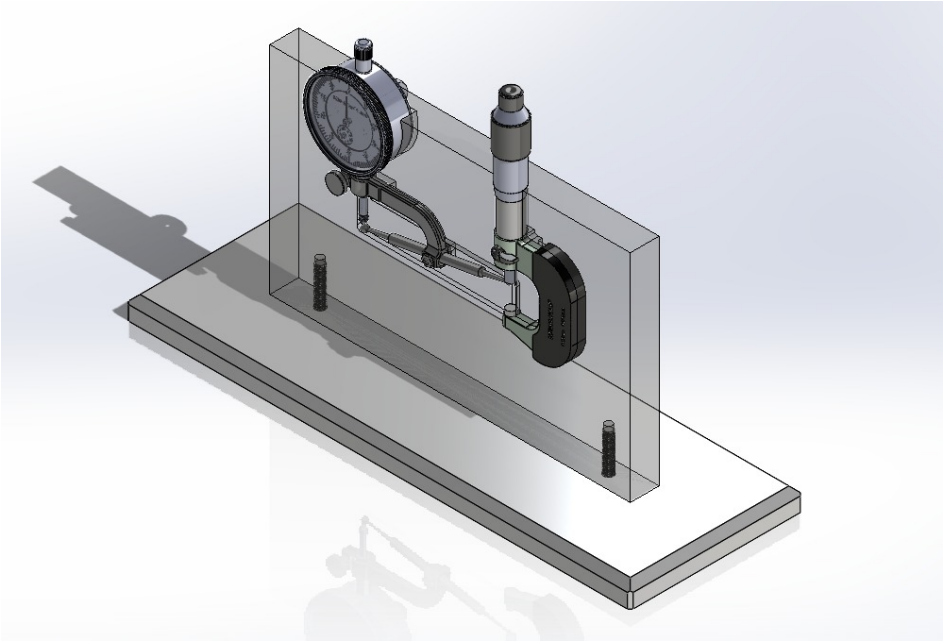


Figura 5: Diseño conceptual, configuración completa del dispositivo

La estructura principal del dispositivo fue concebida como un sistema de soporte capaz de mantener una alineación estable entre el eje de desplazamiento del micrómetro y el eje de medición del comparador. Este criterio de diseño resulta fundamental para minimizar errores geométricos asociados a la desalineación de los elementos de medición, los cuales pueden afectar significativamente la exactitud de los resultados obtenidos.

Con el propósito de garantizar la estabilidad dimensional del sistema, se planteó una estructura compacta con un número reducido de componentes móviles. La reducción de elementos susceptibles a desplazamientos o deformaciones permite disminuir posibles fuentes de incertidumbre y mejorar la repetibilidad de las mediciones. Asimismo, se consideró la necesidad de proporcionar suficiente rigidez mecánica para evitar flexiones o vibraciones que pudieran alterar el comportamiento del dispositivo durante su utilización.

Otro aspecto relevante del diseño conceptual fue la incorporación de mecanismos de ajuste que permitieran posicionar adecuadamente el comparador de carátula respecto al micrómetro patrón. Debido a que los comparadores pueden presentar diferencias en dimensiones, geometría o sistemas de montaje, el dispositivo debía ofrecer cierto grado de adaptabilidad sin comprometer la estabilidad de la medición. Por esta razón, se contempló la utilización de elementos de fijación ajustables capaces de facilitar la instalación y alineación del instrumento a verificar.

Desde el punto de vista metrológico, el diseño también consideró la necesidad de preservar la trazabilidad de las mediciones. Para ello, el micrómetro seleccionado como patrón de referencia constituye el elemento principal del sistema, permitiendo generar desplazamientos con resolución de 0,001 mm y respaldados por un certificado de calibración emitido por un laboratorio acreditado por la ONAC. Esta característica asegura que las mediciones reali-

zadas mediante el dispositivo puedan relacionarse con patrones reconocidos y mantener la confiabilidad requerida para actividades de verificación dimensional.

Una vez definida la configuración conceptual del sistema, se procedió a la elaboración de modelos tridimensionales mediante software de diseño asistido por computadora (CAD). Esta etapa permitió visualizar la interacción entre los diferentes componentes, verificar interferencias mecánicas, establecer dimensiones preliminares y optimizar la distribución de los elementos estructurales antes de iniciar la fabricación. Además, facilitó la generación de planos técnicos necesarios para los procesos de mecanizado y ensamblaje posteriores.

8.2.1. Ensamble inicial de prueba

Como resultado del proceso de fabricación y ensamblaje se obtuvo un dispositivo metrológico funcional capaz de generar desplazamientos controlados mediante un micrómetro calibrado y transmitirlos al comparador de carátula bajo verificación.

El sistema desarrollado presenta una configuración compacta, desmontable y adaptable, permitiendo realizar procesos de verificación dimensional con un nivel adecuado de estabilidad y trazabilidad metrológica.

La construcción exitosa del dispositivo permitió dar cumplimiento al primer objetivo específico de la investigación, estableciendo las bases necesarias para las etapas posteriores de validación experimental y análisis estadístico de resultados.

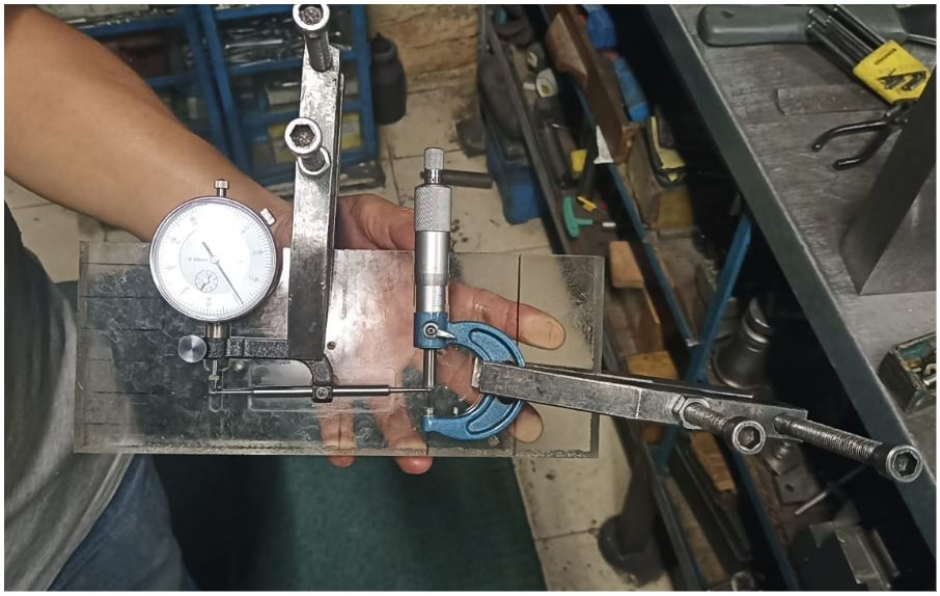


Figura 6: Ensamblaje inicial de prueba basado en el diseño conceptual

Para el ensamble inicial del dispositivo, se utilizaron herramientas de sujeción básicas como los son las prensas manuales de tornillo, con lo cual se buscaba demostrar la funcionalidad

de éste, de una manera práctica, adicionalmente, verificar que el mecanizado de la base estructural estuviera acorde a los diseñado en el software CAD.

Seguidamente, se realizaron pruebas de funcionamiento, y con esto poder evidenciar que cada mecanismo realizara su movimiento sin obstrucción alguna y que no se generara rozamiento con la base estructural.

El resultado de esta etapa fue la definición de un dispositivo metrológico compacto, funcional y adaptable, diseñado específicamente para la verificación de comparadores de carátula mediante la utilización de un micrómetro de alta precisión como patrón de referencia. La solución propuesta permitió satisfacer los requerimientos establecidos inicialmente y proporcionó las bases necesarias para las etapas de selección de materiales, fabricación y ensamblaje descritas en las secciones siguientes.

8.3. Selección de materiales, diseño y fabricación de componentes

La selección de materiales y componentes constituye una etapa fundamental dentro del desarrollo de cualquier dispositivo metrológico, debido a que las características mecánicas, dimensionales y funcionales de cada elemento influyen directamente en la calidad y confiabilidad de las mediciones realizadas. En el caso particular del dispositivo desarrollado para la verificación de comparadores de carátula, se priorizaron criterios relacionados con la estabilidad dimensional, facilidad de fabricación, disponibilidad comercial, resistencia mecánica y compatibilidad con los instrumentos de medición empleados.

Considerando que el objetivo principal del sistema consiste en transmitir desplazamientos controlados generados por un micrómetro de alta precisión hacia el palpador de un comparador de carátula, fue necesario seleccionar materiales que garantizaran un comportamiento estable durante la operación, minimizando deformaciones, vibraciones y movimientos indeseados que pudieran afectar los resultados obtenidos.

Adicionalmente, el proceso de fabricación se llevó a cabo empleando materiales de fácil acceso y procesos convencionales de fabricación, buscando desarrollar un dispositivo funcional, de bajo costo y con capacidad para generar mediciones confiables. Asimismo, se procuró que cada componente pudiera ser fabricado mediante herramientas disponibles en talleres de manufactura convencionales, facilitando la reproducibilidad del diseño y su posible implementación en otros entornos académicos o industriales.

8.3.1. Base estructural

La base principal del dispositivo fue fabricada en acrílico transparente, material seleccionado debido a su facilidad de mecanizado, bajo costo, disponibilidad comercial y adecuada rigidez para las condiciones de operación previstas. Adicionalmente, su transparencia facilita la observación de los elementos de fijación y permite realizar inspecciones visuales durante el montaje y ajuste del sistema.

Aunque el acrílico presenta un módulo de elasticidad inferior al de materiales metálicos como el acero o el aluminio, las cargas aplicadas durante el proceso de verificación son relativamente bajas, lo que permite obtener una estructura suficientemente estable para el propósito del proyecto. Asimismo, la utilización de una placa de espesor adecuado contribuye a reducir deformaciones y proporciona una superficie plana para la correcta alineación de los instrumentos.

La base cumple además la función de soporte principal para todos los componentes del dispositivo, sirviendo como referencia geométrica para el posicionamiento del micrómetro patrón y del comparador de carátula.

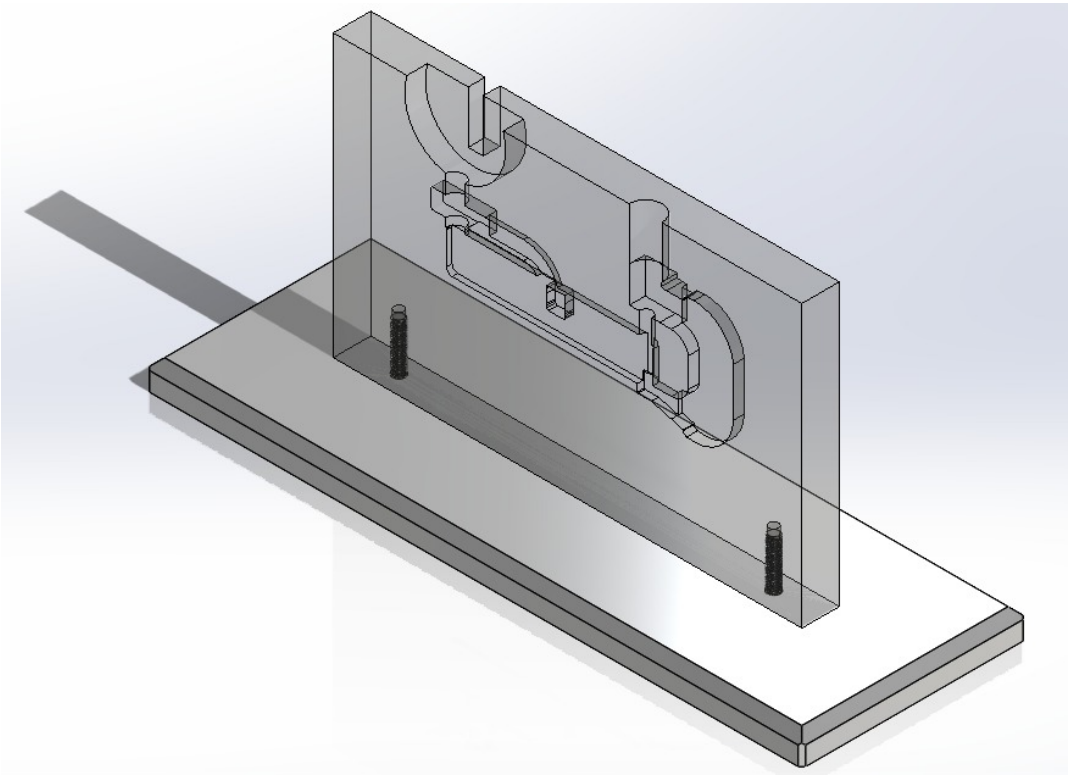


Figura 7: Diseño de la base estructural

Inicialmente se definieron las dimensiones generales de la base en función del espacio requerido para la instalación del micrómetro patrón y el comparador de carátula, procurando mantener una configuración compacta que facilitara el manejo del dispositivo y redujera posibles errores asociados a deformaciones estructurales.



Figura 8: Control numérico del centro de mecanizado Haas TM-2

Posteriormente, se realizaron operaciones de corte y mecanizado sobre la lámina de acrílico para obtener la geometría final del componente. Adicionalmente, se efectuaron perforaciones con rosca estratégicamente ubicadas para la instalación de tornillos y elementos de fijación requeridos durante el ensamblaje.

La transparencia del acrílico permitió además realizar inspecciones visuales del montaje y verificar el posicionamiento relativo de los componentes instalados.

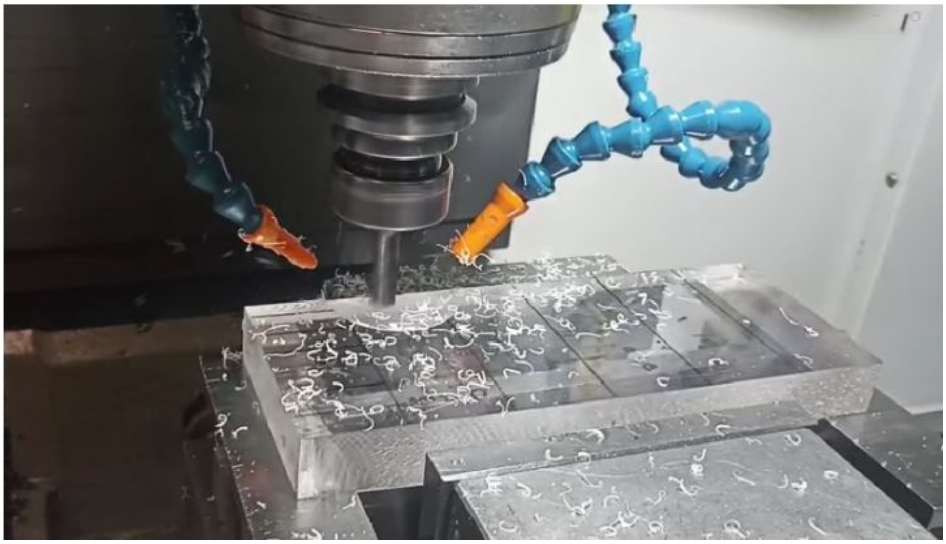


Figura 9: Mecanizado de la base

El objetivo de fabricar la base de toda la estructura bajo parámetros programados en los softwares CAD CAM y posteriormente ejecutados y mecanizados en el centro de mecanizado control numérico, es garantizar que, al momento del ensamble, todos los elementos involucrados conserven tanto una perpendicularidad como el paralelismo entre sí, y con esto evitar al máximo posibles errores de medición al momento de comparar los dos elementos metrológicos.

8.3.2. Elementos de fijación

Uno de los principales desafíos identificados durante el desarrollo del dispositivo metrológico fue garantizar la correcta inmovilización de los instrumentos utilizados durante el proceso de verificación. Tanto el micrómetro patrón como el comparador de carátula requieren permanecer en posiciones estables y perfectamente alineadas para asegurar que los desplazamientos generados durante la medición correspondan fielmente a los valores registrados por cada instrumento.

Los soportes convencionales disponibles comercialmente no satisfacían completamente las necesidades del proyecto, debido a diferencias geométricas entre los instrumentos, limitaciones de espacio dentro de la estructura y requerimientos específicos de alineación. Por esta razón, fue necesario diseñar y fabricar un conjunto de sistemas de fijación personalizados que permitieran integrar adecuadamente los componentes dentro del dispositivo.

El diseño de estos elementos tuvo como objetivo principal proporcionar una sujeción segura, minimizar movimientos indeseados durante las mediciones y facilitar el montaje y desmontaje de los instrumentos cuando fuera necesario.

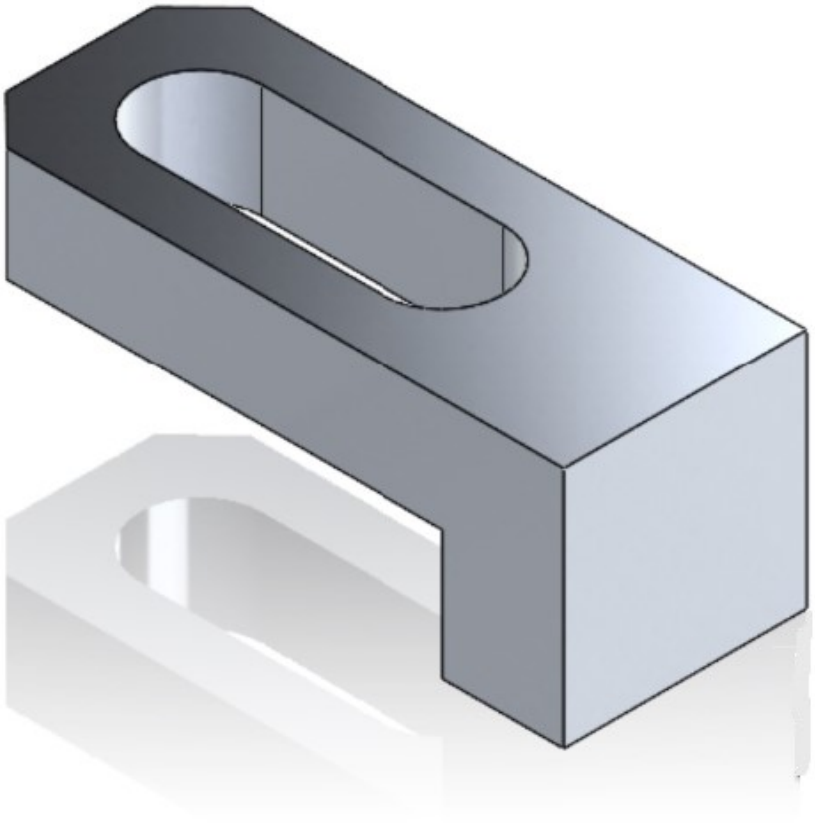


Figura 10: Diseño de elementos de fijación

A partir de las dimensiones obtenidas mediante medición directa de los instrumentos, se diseñaron abrazaderas mecánicas capaces de adaptarse a las geometrías particulares del cuerpo del micrómetro y de los soportes del comparador de carátula.

Durante esta etapa se consideraron diversos factores de diseño, entre ellos:

- Distribución uniforme de las fuerzas de apriete.
- Prevención de deformaciones en los instrumentos.
- Facilidad de ajuste.
- Resistencia mecánica.
- Facilidad de fabricación.
- Posibilidad de desmontaje para mantenimiento o modificaciones futuras.

Las abrazaderas fueron diseñadas con ranuras alargadas que permiten pequeños ajustes de posición durante el montaje. Esta característica facilita las tareas de alineación y contribuye

a reducir posibles errores geométricos asociados al posicionamiento de los instrumentos.

Asimismo, la geometría seleccionada permite aplicar fuerza de sujeción suficiente para evitar desplazamientos durante la operación sin comprometer la integridad física de los instrumentos de medición.

Para garantizar la inmovilización y perfecta alineación del micrómetro y del comparador durante las pruebas, se hace la fabricación de este diseño de abrazaderas ajustables. Estos elementos permiten sujetar los instrumentos de forma segura, evitando desplazamientos involuntarios durante el proceso de medición.

La utilización de abrazaderas mecanizadas proporciona ventajas importantes en términos de repetibilidad, ya que permite reinstalar los instrumentos manteniendo condiciones similares de posicionamiento entre diferentes ensayos. Asimismo, facilita las operaciones de montaje y desmontaje requeridas durante las actividades experimentales.

Para la fabricación se seleccionó aluminio como material principal, debido a la combinación de propiedades mecánicas y características de manufactura que ofrece para este tipo de aplicación. La elección de este material estuvo orientada a garantizar una adecuada resistencia estructural, facilidad de mecanizado y reducción del peso total del dispositivo, sin comprometer la estabilidad necesaria durante el proceso de verificación metrológica.

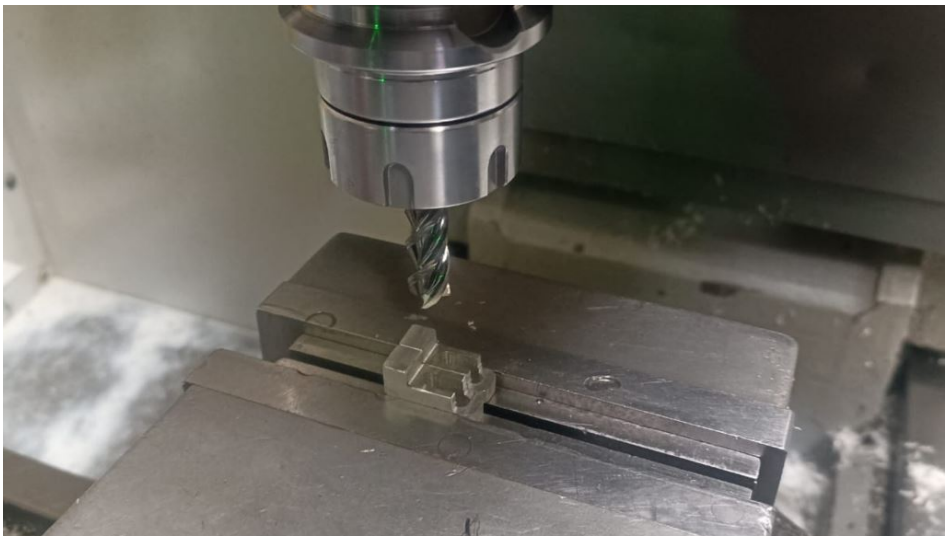


Figura 11: Proceso de fabricación de elementos de fijación

El aluminio presenta una relación resistencia-peso favorable en comparación con otros materiales comúnmente utilizados en elementos de fijación, lo que permite fabricar componentes suficientemente rígidos para soportar las fuerzas de apriete requeridas durante la operación. Adicionalmente, su menor densidad contribuye a disminuir la carga total sobre la estructura, facilitando el manejo y transporte del dispositivo.

Otro aspecto importante considerado durante la selección del material fue su excelente maquinabilidad. El aluminio permite realizar operaciones de corte, taladrado, fresado y conformado con relativa facilidad, lo que simplificó el proceso de fabricación de las abrazaderas y redujo los tiempos de mecanizado. Esta característica resultó especialmente beneficiosa debido a la necesidad de fabricar ranuras de ajuste y superficies de contacto con dimensiones específicas para la correcta fijación de los instrumentos.

Asimismo, el aluminio posee una buena resistencia a la corrosión gracias a la formación natural de una capa superficial de óxido, lo que contribuye a preservar las condiciones físicas de los componentes durante su uso y almacenamiento. Esta propiedad resulta favorable para aplicaciones de laboratorio y ambientes industriales donde los elementos pueden estar expuestos a variaciones de humedad o condiciones ambientales moderadas.

Desde el punto de vista metrológico, la utilización de aluminio permitió fabricar elementos de fijación con la precisión dimensional requerida para garantizar una adecuada alineación entre el micrómetro patrón y el comparador de carátula. Aunque este material presenta un coeficiente de expansión térmica superior al de algunos aceros, las condiciones controladas bajo las cuales se empleará el dispositivo y las bajas cargas mecánicas involucradas hacen que este efecto tenga una influencia mínima sobre el desempeño general del sistema.

Por las razones anteriormente expuestas, el aluminio se consideró una alternativa adecuada para la fabricación de los sistemas de fijación, proporcionando un equilibrio entre resistencia mecánica, facilidad de manufactura, estabilidad dimensional y funcionalidad dentro del dispositivo metrológico desarrollado.

El proceso de fabricación inició con el trazado de las dimensiones sobre platinas de aluminio, tomando como referencia las dimensiones reales de los instrumentos a fijar. Posteriormente, se realizaron operaciones de corte para obtener las dimensiones aproximadas de cada pieza.

Una vez obtenidas las piezas en bruto, se efectuaron operaciones de taladrado para la incorporación de la tornillería de fijación y mecanizado de ranuras alargadas que permiten realizar ajustes finos de posición durante el montaje.

Finalmente, se llevaron a cabo procesos de acabado superficial y desbarbado con el fin de eliminar irregularidades generadas durante el mecanizado, mejorando la funcionalidad y apariencia de los componentes fabricados.



Figura 12: Elementos de Fijación o bridas

Las bridas obtenidas proporcionan suficiente rigidez mecánica y permiten sujetar los instrumentos sin generar deformaciones que puedan afectar su desempeño metrológico.

8.3.3. Tornillería y elementos de ajuste

Los sistemas de fijación fueron complementados mediante tornillería de acero, seleccionada por su resistencia mecánica y capacidad para mantener fuerzas de apriete constantes durante la operación. Estos elementos permiten realizar ajustes de posición y garantizar la estabilidad de los componentes ensamblados.



Figura 13: Tornillería seleccionada (M4 x 0,7 mm)

La utilización de uniones atornilladas ofrece además la ventaja de permitir modificaciones

futuras en la configuración del dispositivo, facilitando actividades de mantenimiento, calibración o mejora del sistema.

8.3.4. Comparador de carátula

El comparador de carátula constituye el instrumento objeto de verificación dentro del dispositivo desarrollado. Para las pruebas iniciales se empleó un comparador analógico de resolución 0,01 mm, ampliamente utilizado en procesos de inspección dimensional industrial.

Este instrumento fue seleccionado debido a su disponibilidad y a su representatividad dentro de los equipos comúnmente utilizados en actividades de control de calidad y manufactura. Su incorporación permitió evaluar la capacidad del dispositivo para generar desplazamientos conocidos y comparar dichos valores con las indicaciones proporcionadas por el instrumento bajo verificación.

8.3.5. Micrómetro patrón

Como elemento de referencia metrológica se seleccionó un micrómetro exterior con rango de medición de 0 mm a 25 mm y resolución de 0,001 mm. Este instrumento constituye el componente principal del sistema debido a que es el encargado de generar los desplazamientos lineales utilizados durante la verificación de los comparadores de carátula.



Figura 14: Micrómetro patrón seleccionado

La elección de este instrumento se fundamentó en su elevada resolución, facilidad de operación y capacidad para producir desplazamientos controlados con alta exactitud. Adicionalmente, el micrómetro utilizado cuenta con certificado de calibración emitido por un laboratorio acreditado por la ONAC, garantizando la trazabilidad metrológica de las mediciones realizadas durante el desarrollo experimental.

La incorporación de un instrumento calibrado permite relacionar los resultados obtenidos con patrones reconocidos, asegurando la confiabilidad de los datos y proporcionando soporte

técnico para los análisis posteriores de incertidumbre y error.

La confiabilidad de cualquier sistema de verificación metrológica depende directamente de la calidad y exactitud del instrumento utilizado como referencia. Por esta razón, uno de los aspectos más importantes durante el desarrollo del dispositivo fue la selección de un patrón de medición capaz de generar desplazamientos lineales conocidos con un nivel adecuado de precisión y trazabilidad.

La selección del micrómetro se realizó considerando diversos criterios técnicos, entre los cuales se destacan la resolución del instrumento, el rango de medición disponible, la estabilidad mecánica del sistema de tornillo micrométrico y la disponibilidad de un certificado de calibración vigente. Estos aspectos permiten asegurar que los desplazamientos utilizados como referencia durante el proceso experimental correspondan a valores confiables y técnicamente sustentados.

Uno de los factores más relevantes en la selección del instrumento fue la disponibilidad de un certificado de calibración emitido por un laboratorio acreditado por el Organismo Nacional de Acreditación de Colombia (ONAC). Dicho certificado garantiza que las mediciones realizadas por el micrómetro pueden relacionarse con patrones nacionales e internacionales mediante una cadena ininterrumpida de comparaciones, proporcionando la trazabilidad metrológica requerida para el desarrollo del proyecto.

La resolución de 0,001 mm del instrumento resulta adecuada para la verificación de comparadores de carátula utilizados en aplicaciones industriales y de laboratorio, permitiendo generar incrementos de desplazamiento suficientemente pequeños para evaluar el comportamiento del instrumento bajo verificación en diferentes puntos de su escala.

Adicionalmente, se realizó una inspección preliminar del estado físico y funcional del micrómetro antes de su integración al dispositivo. Durante esta actividad se verificó la ausencia de daños visibles, holguras mecánicas, desgaste excesivo en las superficies de contacto y anomalías que pudieran afectar la confiabilidad de las mediciones.

Finalmente, el micrómetro fue incorporado al dispositivo mediante un sistema de fijación diseñado específicamente para garantizar su estabilidad y correcta alineación respecto al comparador de carátula. Esta configuración permite que los desplazamientos generados por el tornillo micrométrico sean transmitidos de manera controlada al sistema de medición, constituyendo la referencia principal para las actividades de verificación desarrolladas en esta investigación.

8.4. Certificación y trazabilidad metrológica del micrómetro patrón

Con el propósito de garantizar la confiabilidad y validez de las mediciones realizadas durante el proceso de verificación, el micrómetro utilizado como patrón de referencia fue sometido previamente a un proceso de calibración por parte de un laboratorio acreditado por el Organismo Nacional de Acreditación de Colombia (ONAC). Este procedimiento permitió establecer la

relación entre los valores indicados por el instrumento y los valores correspondientes a patrones de referencia trazables al Sistema Internacional de Unidades (SI).

El certificado de calibración emitido por el laboratorio proporciona información relacionada con los errores de indicación del micrómetro, la incertidumbre asociada a las mediciones, las condiciones ambientales bajo las cuales se efectuó la calibración y la trazabilidad metrológica de los patrones empleados. Estos elementos constituyen evidencia objetiva de la confiabilidad del instrumento y permiten asegurar que los desplazamientos generados durante la verificación de comparadores de carátula se encuentran respaldados por una cadena ininterrumpida de comparaciones metrológicas.

La utilización de un instrumento calibrado es un requisito fundamental en aplicaciones metrológicas, ya que garantiza la comparabilidad de los resultados y reduce la posibilidad de errores sistemáticos asociados al patrón de referencia. En consecuencia, el uso de un micrómetro con certificado de calibración vigente fortalece la validez técnica del dispositivo desarrollado y proporciona soporte a los análisis experimentales realizados en etapas posteriores de la investigación.

El certificado de calibración del micrómetro utilizado en este proyecto se presenta en el **Anexo A**, donde se detallan las características metrológicas del instrumento, los resultados obtenidos durante la calibración y la incertidumbre expandida reportada por el laboratorio acreditado.

Cuadro 2: Datos de verificación del micrómetro patrón

Característica	**Valor**
Tipo de instrumento	Micrómetro exterior
Rango de medición	0-25 mm
Resolución	0,001 mm
Laboratorio de calibración	Equipos y Controles Industriales S.A.
Acreditación	ONAC 10-LAC-024
Número de certificado	LML-1162-26
Fecha de calibración	10-07-2026
Incertidumbre expandida	1,701 μm

8.5. Ensamblaje del dispositivo metrológico

La etapa de ensamblaje constituyó una fase fundamental en el desarrollo del dispositivo metrológico propuesto, debido a que permitió materializar el diseño conceptual previamente establecido y verificar la integración funcional de sus diferentes componentes. Durante esta etapa se ejecutaron diversas operaciones de montaje orientadas a garantizar la estabilidad estructural, la alineación geométrica y la funcionalidad metrológica del sistema.

8.5.1. Instalación de Tornillos y elementos de fijación

Con el fin de asegurar el montaje de los diferentes componentes sobre la base estructural, se instalaron tornillos y elementos de fijación distribuidos estratégicamente en la superficie del dispositivo.

Estos elementos permiten anclar los sistemas de sujeción y facilitan futuras modificaciones o ajustes de posición sin necesidad de alterar permanentemente la estructura principal.

La utilización de uniones mecánicas desmontables proporciona ventajas importantes en términos de mantenimiento, calibración y adaptabilidad del sistema ante posibles mejoras futuras.



Figura 15: Posicionamiento de tornillos y elementos de fijación

8.5.2. Montaje del micrómetro patrón

El micrómetro patrón fue instalado mediante las abrazaderas diseñadas específicamente para adaptarse a su geometría. Durante el montaje se procuró que el instrumento permaneciera firmemente sujeto, evitando desplazamientos relativos durante el proceso de medición.

Asimismo, se verificó que el eje de desplazamiento del husillo micrométrico permaneciera alineado con el sistema de transmisión del comparador, reduciendo la posibilidad de errores geométricos asociados a desalineaciones.

La correcta fijación del micrómetro resulta esencial debido a que este instrumento constituye el patrón de referencia empleado para generar los desplazamientos utilizados durante la verificación.



Figura 16: Ensamblaje de micrometro

El micrómetro debe estar posicionado con la figura previamente mecanizada en la base de acrílico, la cual garantiza el paralelismo con respecto al comparador y la perpendicularidad con respecto a la palanca que transmite el movimiento entre los elementos de medición.

Para realizar la fijación del micrómetro se utilizaron tres bridas de fijación con tres tornillos M4 X 0,7 mm, los cuales se deben aproximar hasta hacer el tope correspondiente y realizar un ajuste tan solo de una cuarto de vuelta



Figura 17: Ajuste tonillos M4 x 0,7 mm

8.5.3. Montaje del comparador de carátula

El comparador de carátula fue instalado mediante un sistema de soporte ajustable que permite posicionar el palpador en contacto directo con el elemento móvil de la palanca transmisora y el micrómetro.

En el caso del casquillo de reducción de 3/8 de pulgada a 8 mm,el cual soporta el comparador de carátula, es indispensable que toda la superficie este en contacto con el alojamiento de la palanca transmisora como se muestra a continuación:

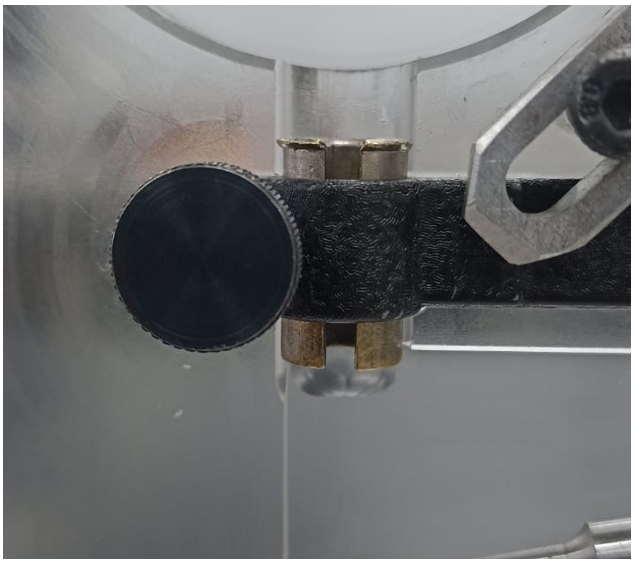


Figura 18: Posición correcta casquillo de reducción 3/8” a 8 mm

Durante esta etapa se realizaron ajustes orientados a garantizar la co-axialidad entre ambos instrumentos y asegurar que el desplazamiento generado por el micrómetro fuera transmitido de forma lineal al comparador.

La posibilidad de ajustar la posición del comparador facilita la adaptación del dispositivo a diferentes configuraciones de instrumentos y contribuye a mejorar la repetibilidad de las mediciones.



Figura 19: Ensamblaje del comparador de carátula

8.5.4. Alineación y ajustes del sistema

Una vez ensamblados todos los componentes, se llevó a cabo un proceso de alineación y ajuste orientado a garantizar el correcto funcionamiento del dispositivo.

Durante esta etapa se verificó el paralelismo entre el eje del micrómetro y el eje de actuación del comparador de carátula. La alineación adecuada es indispensable para minimizar errores geométricos como el error de coseno y asegurar que los desplazamientos aplicados correspondan fielmente a los valores registrados.

Asimismo, se realizaron pruebas preliminares de movimiento para comprobar la ausencia de interferencias mecánicas, holguras o desplazamientos no deseados.

Los ajustes efectuados permitieron obtener una configuración estable y funcional, adecuada para las etapas posteriores de verificación y análisis experimental.

8.5.5. Resultado del ensamble final

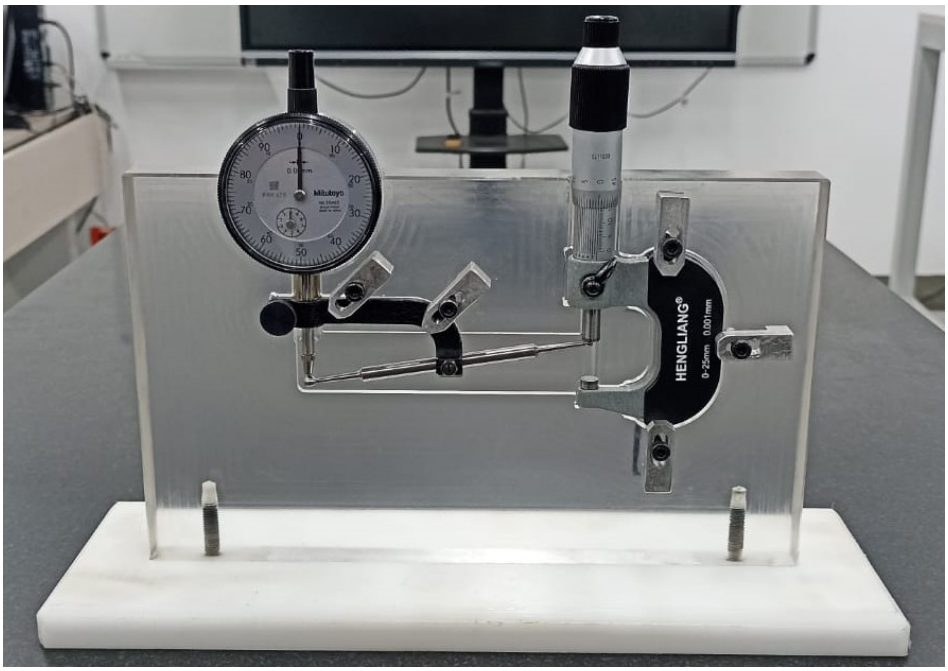


Figura 20: Dispositivo totalmente armado

8.6. Análisis de costos

El análisis de costos se realizó con el propósito de determinar los recursos económicos requeridos para la fabricación del dispositivo metrológico desarrollado y establecer una comparación con soluciones comerciales destinadas a la verificación de comparadores de carátula. Este análisis permite evaluar económicamente la alternativa propuesta, considerando los materiales, componentes e instrumentos empleados durante su construcción, así como los valores de

referencia de equipos comerciales que cumplen funciones similares.

Para determinar el costo de fabricación del dispositivo se consideraron los costos directos asociados a los materiales y componentes empleados en su construcción. Los valores correspondientes a cada elemento fueron organizados de acuerdo con la cantidad utilizada, el costo unitario y el costo total.

Para el presente análisis, la mano de obra correspondiente al diseño y fabricación podrá ser incorporada como un costo adicional en caso de disponer de una estimación económica de las horas de trabajo empleadas.

Cuadro 3: Costos asociados a la fabricación del dispositivo

N.º	**Componente**	**Cantidad**	**Costo unitario (COP)**	**Costo total (COP)**
1	Base y Soporte de Base	1	$80.000	$80.000
2	Palanca transmisora	1	$273.500	$273.500
3	Micrómetro patrón	1	$128.460	$128.460
4	Elementos de fijación	5	$20.000	$100.000
5	Tornillería	7	$450	$ 3.150
6	Calibración Micrómetro	1	$248.640	$248.640
7	Fabricación / mecanizado (Horas)	2	$120.000	$240.000
			Costo total	**$1’073.750**

Los costos relacionados con la construcción del dispositivo se presentan en la Tabla 3. En esta se incluyen los principales elementos que intervienen en la conformación del sistema, entre ellos la base y soporte de la misma, la palanca transmisora, el micrómetro patrón, los elementos de fijación y la tornillería. El costo correspondiente a cada componente será determinado a partir del valor de adquisición o fabricación registrado durante el desarrollo del proyecto, permitiendo obtener el costo total asociado a la construcción del dispositivo.

En el caso de la calibración del micrómetro patrón, se presenta su valor de forma diferenciada, debido a que este instrumento constituye el patrón de referencia empleado para generar los desplazamientos utilizados durante la verificación. De esta manera, se podrán establecer dos valores de referencia: el costo del micrómetro y el costo de la calibración.

8.6.1. Comparación con dispositivos comerciales de verificación

Cuadro 4: Comparación económica con alternativas comerciales

Alternativa	**Rango de uso**	**Resolución**	**Valor de referencia**
Dispositivo desarrollado	0 - 15 mm	0,001 mm (patrón)	**$1'073.750 COP**
Mitutoyo UDT-2 170-102-12	0–25 mm	0,001 mm	$\approx$ \$8′600,000 COP
Mitutoyo 521-103	Hasta 1 mm	0,0002 mm	$\approx$ \$23′100,000 COP
Mitutoyo i-Checker 170-402	Hasta 100 mm	0,01 μm	Referencia de importación: COP\$38'074.820



Figura 21: Mitutoyo UDT-2 170-102-12 [12]

- De acuerdo con Mitutoyo [12], el modelo UDT-2 170-102-12 presenta un rango de medición de 0 a 25 mm y una graduación de 0,001 mm.
- Diámetros de montaje: ϕ6, ϕ8 mm (métrico) ϕ1/4", ϕ3/8" (pulgada)



Figura 22: Mitutoyo 521-103
[13]

- El calibrador de indicadores de cuadrante se ha desarrollado especialmente para calibrar indicadores de cuadrante, sondas y comparadores electrónicos con un recorrido corto.
- La abrazadera universal admite cualquier modelo de indicador de cuadrante, sonda o comparador electrónico, sin necesidad de accesorios adicionales.
- Capacidad de sujeción: de ø4 mm a ø10 mm. [13]



Figura 23: Mitutoyo i-Checker 170-402
[14]

- Se pueden inspeccionar directamente indicadores con hasta 100 mm de recorrido. Con una variedad de opciones, es posible inspeccionar comparadores de cuadrante, comparadores de cuadrante de palanca, instrumentos de medición de aguja, calibres de cilindro, indicadores Digimatic, calibres lineales y micrómetros eléctricos con diferentes diámetros de vástago y patrones de soporte.
- Los indicadores de tipo analógico (manómetro, manómetro de palanca, instrumento de medición de puntero, calibre de cilindro, etc.) pueden mover automáticamente el puntero a la posición de medición con la función de medición semiautomática.

- Los indicadores digitales con función de salida de datos (indicador Digimatic, calibre lineal, etc.) son totalmente automáticos, moviéndose a la posición de medición y adquiriendo datos medidos con la función de medición totalmente automática. [14]

8.6.2. Comparación económica

La diferencia económica entre el dispositivo desarrollado y la alternativa comercial de referencia se ve expresado en el cuadro 4. Como resultado se puede observar la reducción significativa del costo asociado a la fabricación local del dispositivo, tomando como referencia un equipo comercial destinado a una función de verificación equivalente.

8.6.3. Análisis de los costos

El análisis de costos permitió establecer una comparación entre el valor requerido para la fabricación del dispositivo desarrollado y el costo de una alternativa comercial destinada a la verificación de comparadores de carátula. Para esta comparación se tomó como referencia el calibrador de relojes Mitutoyo UDT-2 170-102-12, el cual presenta un rango de medición de 0 a 25 mm, una graduación de 0,001 mm y está diseñado específicamente para la verificación de instrumentos indicadores. Su valor comercial constituye una referencia para analizar la diferencia económica existente entre una solución comercial especializada y el dispositivo desarrollado.

A partir de los costos obtenidos durante la construcción del dispositivo, se pudo establecer que su fabricación requiere una inversión menor en comparación con la adquisición de un equipo comercial especializado. Esta diferencia se relaciona principalmente con la utilización de componentes de fácil disponibilidad, una configuración mecánica sencilla y la fabricación local de los elementos que conforman el dispositivo. Sin embargo, la comparación se realiza considerando que los equipos comerciales pueden incorporar características adicionales de automatización, precisión y adquisición de datos que no hacen parte del alcance del dispositivo desarrollado.

En consecuencia, el análisis económico permite evidenciar que el dispositivo propuesto constituye una alternativa de fabricación de bajo costo para el proceso de verificación estudiado, manteniendo como elemento de referencia un micrómetro con resolución de 0,001 mm. El costo definitivo del dispositivo será determinado a partir de los valores reales de los materiales, componentes y procesos utilizados durante su fabricación.

9. PRUEBAS Y DATOS EXPERIMENTALES

En el presente capítulo se desarrollan las pruebas experimentales realizadas con el dispositivo metrológico construido, con el propósito de evaluar su desempeño en la verificación de comparadores de carátula. Esta etapa corresponde al segundo objetivo específico de la investigación, orientado a realizar pruebas experimentales que permitan evaluar la precisión, exactitud y confiabilidad del dispositivo desarrollado.

El principio experimental consiste en utilizar un micrómetro como patrón de referencia para generar desplazamientos controlados y transmitirlos mediante un mecanismo de palanca al palpador del comparador de carátula. De esta manera, se establece una relación entre el desplazamiento generado por el micrómetro y la indicación obtenida por el comparador sometido a verificación.

El micrómetro empleado como patrón posee una resolución de $0,001$ mm y cuenta con certificado de calibración emitido por un laboratorio acreditado por el Organismo Nacional de Acreditación de Colombia (ONAC). Esta condición permite disponer de una referencia metrológica trazable para el desarrollo de las pruebas experimentales.

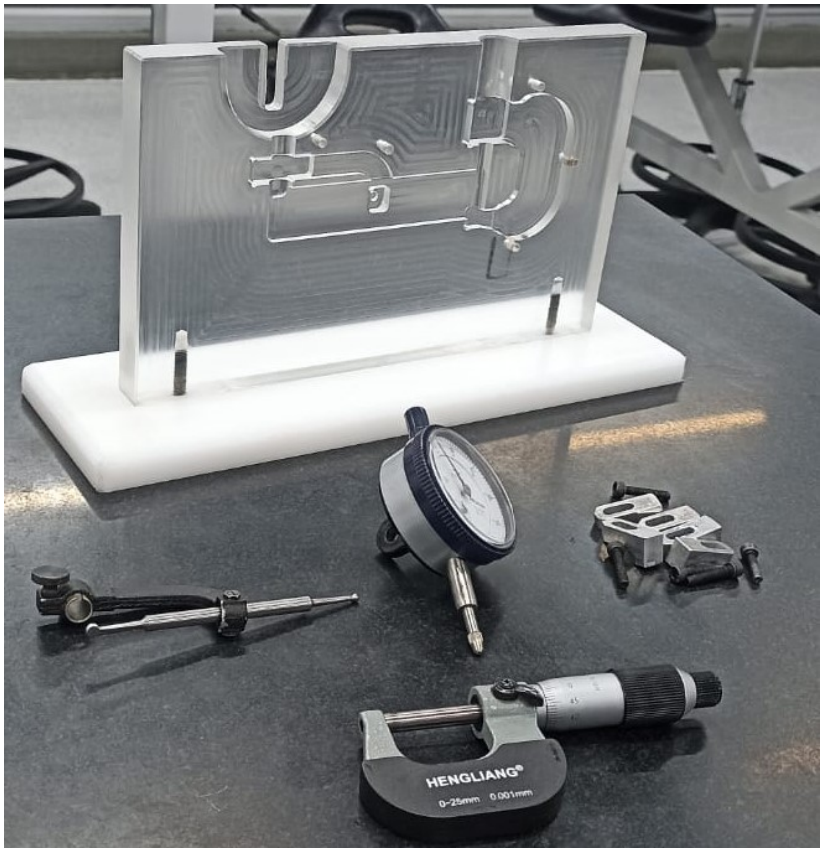


Figura 24: Elementos del Dispositivo

9.1. Objetivo de las pruebas experimentales

Las pruebas experimentales tienen como finalidad determinar el comportamiento metrológico del dispositivo desarrollado y establecer su capacidad para realizar la verificación de comparadores de carátula con resolución de $0,01$ mm.

Para alcanzar este propósito se establece una metodología experimental basada en la aplicación de desplazamientos conocidos mediante el micrómetro patrón y el registro simultáneo de las indicaciones obtenidas en el comparador de carátula.

Para cada grupo de medición se realizan repeticiones bajo condiciones equivalentes, con el propósito de verificar los resultados y evaluar los siguientes parámetros:

- Exactitud.
- Precisión.
- Error de Histéresis.
- Repetibilidad.
- Reproducibilidad.
- Error de intervalo local.

Estos parámetros permiten realizar una evaluación cuantitativa del comportamiento del dispositivo y determinar si los resultados obtenidos son adecuados para el propósito de verificación planteado en la investigación.

9.2. Condiciones y configuración experimental

Las pruebas experimentales se realizaron utilizando el dispositivo metrológico construido y descrito en el capítulo anterior. El sistema está constituido principalmente por una base estructural, un micrómetro patrón, un comparador de carátula, elementos de fijación y un mecanismo de transmisión mediante palanca.

El micrómetro se instaló sobre la base mediante el sistema de fijación desarrollado específicamente para el dispositivo, procurando mantener estable su posición durante todo el proceso experimental. De igual manera, el comparador de carátula se instaló mediante el sistema de soporte ajustable, permitiendo posicionar su palpador en contacto con el mecanismo transmisor.

Antes de iniciar las mediciones se verificó el correcto funcionamiento mecánico del sistema, la ausencia de interferencias y la estabilidad de los elementos de fijación. También se realizó el ajuste de la posición relativa entre el micrómetro y el comparador, procurando reducir los efectos asociados a la desalineación geométrica.

9.2.1. Instrumentos y elementos utilizados

Para el desarrollo de las pruebas experimentales se utilizaron los elementos principales mostrados en el Cuadro 5

Cuadro 5: Instrumentos y elementos empleados durante las pruebas experimentales

Elemento	**Característica**
Micrómetro patrón	Resolución de $0,001$ mm Rango $0 - 25$ mm
Comparador de carátula	Resolución de $0,01$ mm Rango $0 - 10$ mm
Dispositivo de transmisión	Palanca mecánica Starrett 670B
Estructura	Base acrílica mecanizada
Sistema de fijación	Elementos de sujeción ajustables
Registro de datos	Hoja de cálculo

El empleo de un micrómetro con una resolución diez veces menor que la del comparador permite utilizar una referencia con mayor capacidad de discriminación durante el proceso de verificación.

9.3. Preparación del sistema de medición

Antes de iniciar la toma de datos se realizó la preparación del sistema de medición. Esta etapa tuvo como finalidad establecer condiciones iniciales estables y reducir posibles fuentes de error asociadas al montaje.

El procedimiento de preparación comprendió las siguientes actividades:

1. Limpieza de las superficies de contacto.
2. Inspección visual del micrómetro y del comparador de carátula.
3. Instalación correcta del casquillo de reducción de 3/8" a 8 mm
4. Verificación de la correcta fijación de los instrumentos.
5. Verificación del contacto entre el mecanismo de transmisión y los elementos de medición.
6. Ajuste de la posición del comparador.
7. Verificación del desplazamiento libre de la palanca.
8. Ajuste de la condición inicial del comparador.

Durante esta etapa también se verificó que no existieran interferencias mecánicas, holguras apreciables o desplazamientos involuntarios que pudieran afectar las mediciones.

9.4. Alineación del sistema

La alineación constituye una de las condiciones fundamentales para garantizar la confiabilidad de las mediciones realizadas mediante el dispositivo.

Se verificó la posición relativa entre el eje de desplazamiento del micrómetro, el mecanismo de transmisión y el eje de actuación del comparador de carátula. El objetivo fue reducir los errores geométricos derivados de una posición inadecuada de los elementos.

En el caso de la palanca transmisora de movimiento, simplemente se debe instalar sobre la base acrílica previamente mecanizada, seguidamente, se debe fijar con los elementos de sujeción, brida y tornillos, ajustando solo un cuarto de vuelta después de ser aproximados los tornillos.

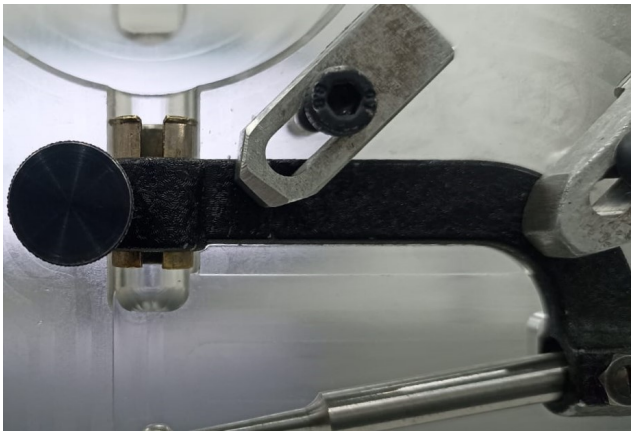


Figura 25: Posición final palanca transmisora

La correcta alineación permite que el desplazamiento producido por el micrómetro sea transmitido de manera controlada hacia el palpador del comparador. Una desalineación puede generar componentes de desplazamiento diferentes de los esperados y afectar la correspondencia entre el valor aplicado y la indicación obtenida.

Adicionalmente, debido a que el sistema emplea una palanca como mecanismo de transmisión, se debe considerar que la geometría de contacto puede variar durante el recorrido. Por esta razón, la posición angular de la palanca y la ubicación de los puntos de contacto constituyen variables relevantes durante el análisis de los resultados experimentales.

9.5. Procedimiento experimental

El procedimiento utilizado para la toma de datos se desarrolló siguiendo una secuencia controlada con el propósito de garantizar condiciones equivalentes entre las diferentes mediciones.

9.5.1. Posición inicial

La posición inicial de todos los elementos son fundamentales para el desarrollo de la toma de datos, una vez instalado el comparador de carátula, se estableció la posición inicial del sistema. En esta condición se verificó el contacto entre el mecanismo de transmisión y el palpador del comparador, evitando ejercer una carga adicional que pudiera alterar la posición inicial.



Figura 26: Posición inicial del micrómetro

Para el micrómetro la posición inicial y el cero relativo establecido para la toma de datos es 15 mm, esto con fin de que se garantice un recorrido completo del comparador de carátula el cual tiene un recorrido máximo de 10 mm, los 5 mm restantes son para despreciar el diámetro de la esfera de la palanca transmisora, la cual, hace contacto el husillo del micrómetro. Después de instalar la posición inicial del micrómetro, se debe aplicar el freno o seguro del mismo, esto con el fin, de garantizar que nuestro cero relativo no sea afectado mientras se instala el comparador

Posteriormente se debe realizar el ajuste y registro de la condición inicial del comparador la cual será 0 mm, como se puede observar a continuación:



Figura 27: Posición inicial del comparador

Para este procedimiento, se debe tener mucho tacto y pulso sobre el dispositivo, ya que es un elemento bastante sensible al movimiento y llegar a 0 mm puede ser algo complejo.

9.5.2. Metodología de captura de datos

El desplazamiento de referencia se generó mediante el movimiento controlado del husillo del micrómetro. Para cada punto seleccionado se obtiene mediante el giro del micrómetro en sentido horario hasta alcanzar el valor definido



Figura 28: Ajuste y lectura de medida en el micrómetro

Para establecer una condición inicial uniforme durante el desarrollo de los ensayos, y teniendo en cuenta las características de montaje y la facilidad de operación del dispositivo, se definió como punto de referencia inicial la posición de **15 mm en el micrómetro patrón**, correspondiendo esta posición a la indicación de **0 mm en el comparador de carátula**. A partir de esta condición, el micrómetro se giró en sentido horario, generando un desplazamiento progresivo de su husillo. De esta manera, al alcanzar la posición de **14 mm en el micrómetro**, el comparador debe indicar un desplazamiento de **1 mm**. Posteriormente, el mismo procedimiento se aplicó de forma progresiva a los demás puntos de medición, estableciendo la correspondencia entre las posiciones del micrómetro y las indicaciones esperadas en el comparador, tal como se presenta en el Cuadro 6

Cuadro 6: Puntos establecidos para la toma de datos

Micrómetro Patrón mm	**Comparador mm**
14	1
12	3
11,8	3,2
11,6	3,4
11,4	3,6
11,2	3,8
11	4
8	7
6	9

Los puntos para la toma de datos, se propusieron con el fin de garantizar que el comparador se verificara en todo su rango, adicional a esto, en un intervalo especifico para poder evaluar el error local del mismo.
Una vez alcanzada la posición correspondiente, se registró la medida arrojada en el comparador, en el formato que se estableció inicialmente de manera manual, la indicación mostrada por el comparador de carátula, como se muestra a continuación



Figura 29: Lectura y registro de medida arrojada por el comparador

El procedimiento se repitió para los diferentes puntos establecidos dentro del rango de trabajo seleccionado, por dos operarios diferentes los cuales se identificaran de la siguiente manera:

- **Operario A** - Juan Camilo Amado
- **Operario B** - Richard David Romero

Así mismo, se realizaron procesos de verificación para dos comparadores de carátula de la misma marca y resolución, pero diferente referencia, como se puede ver a continuación:



Figura 30: Comparador #1 Mitutoyo Ref. JTR 417



Figura 31: Comparador #2 Mitutoyo Ref FRK 479

Con el propósito de obtener información suficiente para evaluar el comportamiento del comparador de carátula y analizar los diferentes parámetros metrológicos establecidos, se realizaron un total de **once ensayos experimentales** en diferentes fechas. Durante estas pruebas participaron los operadores designados para el desarrollo del estudio y se utilizaron los comparadores seleccionados para el proceso de verificación. La realización de los ensayos en distintas condiciones de operación permitió disponer de diferentes series de medición para el posterior análisis de parámetros como la precisión, la repetibilidad y la reproducibilidad. En el Cuadro 7 se presenta la información general correspondiente a cada ensayo, incluyendo su número de identificación, el operador responsable, la fecha de realización y el comparador utilizado.

Cuadro 7: Información general de los nueve ensayos realizados

N.º de ensayo	**Código del ensayo**	**Operario**	**Fecha**	**Comparador utilizado**
1	1A	Camilo Amado	04/08/2026	Comparador #1
2	2A	Richard Romero	05/08/2026	Comparador #1
3	3A	Richard Romero	05/08/2026	Comparador #1
4	4A	Camilo Amado	11/08/2026	Comparador #1
5	5A	Richard Romero	11/08/2026	Comparador #1
6	6A	Camilo Amado	12/08/2026	Comparador #1
7	7A	Richard Romero	12/08/2026	Comparador #1
8	1B	Richard Romero	14/08/2026	Comparador #2
9	2B	Camilo Amado	14/08/2026	Comparador #2
10	3B	Camilo Amado	24/08/2026	Comparador #2
11	4B	Richard Romero	24/08/2026	Comparador #2

9.5.3. Mediciones en sentido ascendente y descendente

Con el propósito de evaluar el comportamiento del sistema en ambos sentidos de desplazamiento, se realizaron mediciones durante el movimiento ascendente y posteriormente durante el movimiento descendente, los cuales se distribuyeron de la siguiente manera:

- **Ascendente** - Medición 1 y 3
- **Descendente** - Medición 2 y 4

La referencia del movimiento ascendente y descendente es con respecto al palpador del comparador de carátula, ya que es el instrumento que se está verificando.

9.6. Registro de los datos experimentales

Los datos obtenidos durante las pruebas se organizaron de manera que permitieran realizar una comparación directa entre el valor de referencia generado por el micrómetro y la indicación obtenida por el comparador de carátula.

El Cuadro 8 presenta el formato utilizado para el registro de las mediciones arrojadas por el comparador de carátula.

Cuadro 8: Registro de los datos experimentales

Formato - Toma de mediciones: Verificador de comparadores de carátula			
Fecha:		**N° de prueba:**	
Operario:			
Temp. inicial (°C):		**Lugar de la toma:**	
Temp. final (°C):			

N°	**Valor Nominal (mm)**	**Medición 1**	**Medición 2**	**Medición 3**	**Medición 4**
1	1,0	–	–	–	–
2	3,0	–	–	–	–
3	3,2	–	–	–	–
4	3,4	–	–	–	–
5	3,6	–	–	–	–
6	3,8	–	–	–	–
7	4,0	–	–	–	–
8	7,0	–	–	–	–
9	9,0	–	–	–	–

Los valores definitivos de este Cuadro corresponden a las mediciones obtenidas experimentalmente durante la evaluación del dispositivo.

9.7. Estudio para la verificación del comparador

En esta sección se desarrolla el estudio experimental realizado para verificar el comportamiento del comparador de carátula mediante el dispositivo metrológico. Para ello, se analizan las mediciones obtenidas al comparar las indicaciones del instrumento con los desplazamientos establecidos por el micrómetro de referencia. A partir de estos resultados se determinan los principales parámetros de evaluación metrológica, con el propósito de establecer el desempeño, la confiabilidad y el cumplimiento del comparador bajo las condiciones de verificación establecidas.

El estudio que se presenta a continuación, tiene como criterio principal la resolución del comparador a verificar, la cual es de $0,01$ mm, a partir de ésta, se podrán comparar los resultados obtenidos en los ensayos propuestos y realizar los análisis correspondientes.

9.7.1. Valor Promedio

Para cada punto se determinó el valor medio de las indicaciones del comparador mediante la expresión:

$$\overline{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} x_i \tag{1}$$

donde $\overline{x}$ corresponde al valor medio de las indicaciones, x_i representa cada una de las mediciones realizadas y n corresponde al número de repeticiones.

Los valores promedios obtenidos por ensayo son los siguientes:

Operario A

Cuadro 9: Promedio Operario A, comparador #1

Comparador Ref JTR 417			
Valor nominal	**Prom. Ensayo 1A (mm)**	**Prom. Ensayo 4A (mm)**	**Prom. Ensayo 6A (mm)**
1,0	1,014	1,022	1,019
3,0	3,039	3,046	3,157
3,2	3,240	3,242	3,241
3,4	3,439	3,445	3,442
3,6	3,631	3,636	3,633
3,8	3,833	3,840	3,839
4,0	4,037	4,041	4,040
7,0	7,028	7,034	7,032
9,0	9,032	9,037	9,028

Cuadro 10: Promedio Operario A, comparador #2

Comparador Ref FRK 479		
Valor nominal	**Prom. Ensayo 2B (mm)**	**Prom. Ensayo 3B (mm)**
1,0	1,030	1,032
3,0	3,053	3,044
3,2	3,264	3,258
3,4	3,464	3,458
3,6	3,662	3,657
3,8	3,859	3,856
4,0	4,067	4,060
7,0	7,092	7,083
9,0	9,081	9,072

Operario B

Cuadro 11: Promedio Operario B, comparador #1

Comparador Ref JTR 417				
Valor nominal	**Prom. Ensayo 2A (mm)**	**Prom. Ensayo 3A (mm)**	**Prom. Ensayo 5A (mm)**	**Prom. Ensayo 7A (mm)**
1,0	1,014	1,015	1,020	1,019
3,0	3,037	3,036	3,042	3,040
3,2	3,237	3,240	3,242	3,241
3,4	3,436	3,442	3,443	3,438
3,6	3,632	3,631	3,639	3,632
3,8	3,830	3,833	3,836	3,837
4,0	4,040	4,034	4,040	4,040
7,0	7,025	7,031	7,034	7,032
9,0	9,031	9,032	9,036	9,042

Cuadro 12: Promedio Operario B, comparador #2

Comparador Ref FRK 479		
Valor nominal	**Prom. Ensayo 1B (mm)**	**Prom. Ensayo 4B (mm)**
1,0	1,034	1,029
3,0	3,054	3,043
3,2	3,271	3,262
3,4	3,468	3,459
3,6	3,664	3,653
3,8	3,863	3,852
4,0	4,069	4,057
7,0	7,087	7,079
9,0	9,084	9,072

9.7.2. Evaluación de la exactitud

La exactitud del sistema se evaluó mediante la comparación entre el desplazamiento de referencia generado por el micrómetro y la indicación obtenida por el comparador de carátula tomando como representativo de las lecturas el promedio.

El error de indicación se determinó mediante:

$$E_i = \overline{x} - x_p \tag{2}$$

donde E_i corresponde al error de indicación, $\overline{x}$ es el valor promedio por cada fila calculado anteriormente y x_p corresponde al valor nominal suministrado en el Cuadro 6.

Un valor positivo de E_i indica que el comparador presenta una indicación superior al valor de referencia, mientras que un valor negativo indica una indicación inferior.

El error absoluto se expresa como:

$$E_{abs} = |E_i| \tag{3}$$

El error máximo obtenido durante el ensayo se determina mediante:

$$E_{\text{máx}} = \text{máx}\left(|E_i|\right) \tag{4}$$

Este parámetro permite identificar el punto de medición en el cual se presenta la mayor diferencia entre la indicación del comparador y el valor de referencia.

Cuadro 13: Proceso para el calculo del error de medición

Ejemplo detallado del calculo						
x_p	x_i	x_i	x_i	x_i	$\overline{x} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} x_i$ donde n=4	$E_i = (\overline{x} - x_p)$ *1000
Valor nominal (mm)	**Medición 1 (mm)**	**Medición 2 (mm)**	**Medición 3 (mm)**	**Medición 4 (mm)**	**Promedio (mm)**	**Erro de medición (μm)**
1,0	1,000	1,027	1,002	1,025	1,014	13,5
3,0	3,025	3,052	3,025	3,052	3,039	38,5
3,2	3,230	3,250	3,230	3,250	3,240	40,0
3,4	3,427	3,450	3,427	3,452	3,439	39,0
3,6	3,620	3,640	3,625	3,640	3,631	31,3
3,8	3,820	3,850	3,815	3,847	3,833	33,0
4,0	4,022	4,047	4,027	4,050	4,037	36,5
7,0	7,012	7,042	7,015	7,042	7,028	27,8
9,0	9,017	9,047	9,017	9,047	9,032	32,0

- **Resultados del error de indicación**

  A continuación se presentan los errores de indicación por cada ensayo en μm :

  Operario A

Cuadro 14: Error de medición operario A, comparador #1

Comparador Ref JTR 417			
Valor nominal	**Error Ensayo 1A (μm)**	**Error Ensayo 4A (μm)**	**Error Ensayo 6A (μm)**
1,0	13,50	21,50	19,00
3,0	38,50	46,00	40,25
3,2	40,00	41,75	41,00
3,4	39,00	44,50	42,00
3,6	31,25	36,25	33,25
3,8	33,00	39,75	39,25
4,0	36,50	41,00	40,25
7,0	27,75	33,50	31,50
9,0	32,00	37,25	27,75
$E_{\text{máx}}$	40,00	46,00	42,00

Cuadro 15: Error de medición Operario A, comparador #2

Comparador Ref FRK 479		
Valor nominal	**Error Ensayo 2B (μm)**	**Error Ensayo 3B (μm)**
1,0	29,50	31,75
3,0	53,00	43,50
3,2	64,25	57,75
3,4	63,50	58,00
3,6	62,25	56,50
3,8	59,00	56,00
4,0	66,75	59,50
7,0	91,75	83,00
9,0	81,00	72,25
$E_{\text{máx}}$	91,75	83,00

Operario B

Cuadro 16: Error de medición Operario B, comparador #1

Comparador Ref JTR 417				
Valor nominal	**Error Ensayo 2A (μm)**	**Error Ensayo 3A (μm)**	**Error Ensayo 5A (μm)**	**Error Ensayo 7A (μm)**
1,0	13,50	15,25	19,75	19,00
3,0	36,50	35,75	41,75	39,75
3,2	36,75	39,75	42,00	41,25
3,4	36,00	41,50	42,50	38,00
3,6	31,50	31,25	38,50	32,25
3,8	29,75	33,00	36,00	37,25
4,0	40,00	34,00	39,75	40,00
7,0	24,75	30,75	33,50	31,50
9,0	30,75	32,00	36,00	41,50
$E_{\text{máx}}$	40,00	41,50	42,50	41,50

Cuadro 17: Error de medición Operario B, comparador #2

Comparador Ref FRK 479		
Valor nominal	**Error Ensayo 1B (μm)**	**Error Ensayo 4B (μm)**
1,0	34,25	29,25
3,0	54,25	42,75
3,2	71,25	61,50
3,4	68,00	58,50
3,6	63,75	52,50
3,8	63,00	51,75
4,0	68,50	57,25
7,0	87,25	79,25
9,0	83,50	71,50
$E_{\text{máx}}$	87,25	79,25

Este valor permite expresar la magnitud del error en relación con el desplazamiento de referencia aplicado.

- **Análisis de resultados de exactitud**

De acuerdo con los valores tabulados, se observa un comportamiento sistemático, entendido como una desviación predecible y constante de las mediciones respecto al valor de referencia debido a causas atribuibles al instrumento, en la evaluación de la exactitud de ambos instrumentos:

- **Signo del error:** En todos los puntos y ensayos analizados, el error de indicación E_i resulta positivo ($E_i > 0$). Esto demuestra un sesgo constante hacia la sobreestimación del desplazamiento real de referencia.

- **Comparativa entre instrumentos:** El comparador Ref JTR 417 (Comparador #1) ofrece mayor exactitud, con errores máximos que oscilan entre $40,00\,\mu$m y $46,00\,\mu$m. Por su parte, el comparador Ref FRK 479 (Comparador #2) registra desviaciones considerablemente más elevadas, alcanzando un $E_{\text{máx}}$ de $91,75\,\mu$m para el Operario A y $87,25\,\mu$m para el Operario B.
- **Tendencia del error:** Mientras que en el Comparador #1 los mayores errores de indicación se concentran en el intervalo de $3,0\,$mm a $3,4\,$mm (Puntos 2 a 4), en el Comparador #2 se aprecia un incremento progresivo del error a medida que aumenta la carrera del palpador, registrando las mayores desviaciones en los desplazamientos nominales de $7\,$mm y $9\,$mm (Puntos 8 y 9).
- **Consistencia entre operarios:** La magnitud de los errores se mantiene estable entre las mediciones del Operario A y del Operario B para cada equipo, lo cual indica una baja influencia del operario sobre la exactitud y confirma que la desviación proviene de los componentes mecánicos del instrumento de medición.

9.7.3. Evaluación de la precisión

Para determinar la precisión de las mediciones realizadas en cada punto de verificación, se consideraron las cuatro mediciones obtenidas para un mismo valor nominal. Para cada fila se identificó el valor máximo y el valor mínimo registrado, calculándose posteriormente la diferencia entre ambos. Esta diferencia permite determinar el rango de dispersión de las mediciones y evaluar la consistencia de las indicaciones obtenidas durante las repeticiones del ensayo. El cálculo se realizó mediante la siguiente expresión:

$$P_i = x_{i\,\text{máx}} - x_{i\,\text{mín}} \tag{5}$$

donde P_i corresponde al rango de las mediciones o dispersión obtenida en el punto i, $x_{i\,\text{máx}}$ representa el mayor valor registrado y $x_{i\,\text{mín}}$ el menor valor registrado entre las mediciones realizadas en dicho punto. Un valor reducido de P_i indica una menor dispersión entre las mediciones y, por tanto, una mayor consistencia o precisión del instrumento en ese punto de verificación.

Cuadro 18: Proceso para el calculo de la precisión

Ejemplo detallado del calculo							
x_p	x_i	x_i	x_i	x_i	$x_{i\,\text{máx}}$	$x_{i\,\text{mín}}$	$P_i = (x_{i\,\text{máx}} - x_{i\,\text{mín}})$ *1000
Valor nominal (mm)	**Medición 1 (mm)**	**Medición 2 (mm)**	**Medición 3 (mm)**	**Medición 4 (mm)**	**Mayor Valor (mm)**	**Menor valor (mm)**	**Precisión (μm)**
1,0	1,000	1,027	1,002	1,025	1,027	1,000	27
3,0	3,025	3,052	3,025	3,052	3,052	3,025	27
3,2	3,230	3,250	3,230	3,250	3,250	3,230	20
3,4	3,427	3,450	3,427	3,452	3,452	3,427	25
3,6	3,620	3,640	3,625	3,640	3,640	3,620	20
3,8	3,820	3,850	3,815	3,847	3,850	3,815	35
4,0	4,022	4,047	4,027	4,050	4,050	4,022	28
7,0	7,012	7,042	7,015	7,042	7,042	7,012	30
9,0	9,017	9,047	9,017	9,047	9,047	9,017	30

- **Resultados del intervalo de precisión**

  A continuación se detalla la precisión por cada fila expresada en μm:

  Operario A

Cuadro 19: Intervalo de precisión operario A, comparador #1

Comparador Ref JTR 417			
Valor nominal	**Precisión Ensayo 1A (μm)**	**Precisión Ensayo 4A (μm)**	**Precisión Ensayo 6A (μm)**
1,0	27,0	25,0	15,0
3,0	27,0	12,0	25,0
3,2	20,0	18,0	18,0
3,4	25,0	15,0	20,0
3,6	20,0	20,0	20,0
3,8	35,0	25,0	23,0
4,0	28,0	22,0	18,0
7,0	30,0	33,0	30,0
9,0	30,0	40,0	30,0
$P_{\text{máx}}$	35,0	40,0	30,0

Cuadro 20: Intervalo de precisión Operario A, comparador #2

Comparador Ref FRK 479		
Valor nominal	**precisión Ensayo 2B (μm)**	**precisión Ensayo 3B (μm)**
1,0	25,0	25,0
3,0	40,0	23,0
3,2	13,0	13,0
3,4	23,0	17,0
3,6	10,0	10,0
3,8	7,0	15,0
4,0	18,0	15,0
7,0	28,0	25,0
9,0	22,0	28,0
$H_{\text{máx}}$	40,0	28,0

Cuadro 21: Intervalo de precisión Operario B, comparador #1

Comparador Ref JTR 417				
Valor nominal	**precisión Ensayo 2A (μm)**	**precisión Ensayo 3A (μm)**	**precisión Ensayo 5A (μm)**	**precisión Ensayo 7A (μm)**
1,0	23,0	30,0	23,0	15,0
3,0	10,0	20,0	15,0	25,0
3,2	23,0	20,0	20,0	15,0
3,4	18,0	30,0	20,0	20,0
3,6	30,0	20,0	20,0	23,0
3,8	25,0	25,0	20,0	23,0
4,0	20,0	17,0	22,0	20,0
7,0	28,0	30,0	32,0	38,0
9,0	30,0	30,0	32,0	38,0
$P_{\text{máx}}$	30,0	30,0	32,0	38,0

Cuadro 22: Intervalo de precisión Operario B, comparador #2

Comparador Ref FRK 479		
Valor nominal	**precisión Ensayo 1B (μm)**	**precisión Ensayo 4B (μm)**
1,0	30,0	20,0
3,0	32,0	20,0
3,2	20,0	12,0
3,4	25,0	17,0
3,6	20,0	10,0
3,8	5,0	7,0
4,0	27,0	17,0
7,0	23,0	25,0
9,0	30,0	22,0
$P_{\text{máx}}$	32,0	25,0

- **Análisis de resultados de precisión**

  A partir de los valores de dispersión o rango de medición (P_i) tabulados, se extraen las siguientes observaciones clave referentes a la precisión y repetibilidad del sistema:

  - **Rango general de dispersión:** La variabilidad de las mediciones en un mismo punto de prueba se concentra de manera general en el rango de $10,0\,\mu$m a $35,0\,\mu$m, lo que evidencia un comportamiento estable en la repetibilidad de la indicación para ambos comparadores.
  - **Comportamiento por instrumento:**
    - En el Comparador Ref JTR 417 (Comparador #1), el rango máximo de dispersión ($P_{\text{máx}}$) oscila entre $30,0\,\mu$m y $40,0\,\mu$m.
    - En el Comparador Ref FRK 479 (Comparador #2), se observan zonas de muy baja dispersión en desplazamientos intermedios (llegando a $P_i = 5,0\,\mu$m en el Punto 6 para el Operario B), aunque registra un $P_{\text{máx}}$ de $40,0\,\mu$m en el Punto 2 para el Operario A.
  - **Influencia del operario:** La magnitud de la dispersión y los puntos de máxima variabilidad muestran un comportamiento coherente entre las evaluaciones del Operario A y del Operario B. Esto indica que la repetibilidad del proceso de medición depende fundamentalmente de las holguras mecánicas y rozamiento propio de los comparadores de carátula más que del factor humano.

9.7.4. Evaluación de la histéresis

La histéresis se evaluó comparando las indicaciones obtenidas en un mismo punto de medición durante los desplazamientos de subida y bajada.

El error de histéresis se calculó mediante:

$$H = x_{\text{subida}} - x_{\text{bajada}} \tag{6}$$

donde x_{subida} corresponde a la indicación promedio obtenida durante el desplazamiento ascendente (Medición 1 y 3) y x_{bajada} corresponde a la indicación promedio obtenida durante el desplazamiento descendente (Medición 2 y 4).

El valor absoluto de la histéresis se determina mediante:

$$H_{abs} = |H| \tag{7}$$

Un valor reducido de histéresis indica una menor diferencia entre las indicaciones obtenidas en ambos sentidos de movimiento.

Cuadro 23: Proceso para el calculo de error por histéresis

Ejemplo detallado del calculo							
x_p	x_i	x_i	x_i	x_i	x_{subida}	x_{bajada}	$H = (\lvert x_{\text{subida}} - x_{\text{bajada}} \rvert) * 1000$
Valor nominal (mm)	**Medición 1 (mm)**	**Medición 2 (mm)**	**Medición 3 (mm)**	**Medición 4 (mm)**	**Prom. mediciones 1 y 3 (mm)**	**Prom. mediciones 2 y 4 (mm)**	**Histéresis (μm)**
1,0	1,000	1,027	1,002	1,025	1,001	1,026	25,0
3,0	3,025	3,052	3,025	3,052	3,025	3,052	27,0
3,2	3,230	3,250	3,230	3,250	3,230	3,250	20,0
3,4	3,427	3,450	3,427	3,452	3,427	3,451	24,0
3,6	3,620	3,640	3,625	3,640	3,623	3,640	17,5
3,8	3,820	3,850	3,815	3,847	3,818	3,849	31,0
4,0	4,022	4,047	4,027	4,050	4,025	4,049	24,0
7,0	7,012	7,042	7,015	7,042	7,014	7,042	28,5
9,0	9,017	9,047	9,017	9,047	9,017	9,047	30,0

- **Resultados de histéresis**

  Los resultados del calculo del error de histéresis presente en la realización de cada ensayo tomando las mediciones en ambos sentidos se organizarán en los siguientes cuadros y se expresa en μm:

Operario A

Cuadro 24: Error histéresis operario A, comparador #1

Comparador Ref JTR 417			
Valor nominal	**Histéresis Ensayo 1A (μm)**	**Histéresis Ensayo 4A (μm)**	**Histéresis Ensayo 6A (μm)**
1,0	25,0	19,0	14,0
3,0	27,0	10,0	23,5
3,2	20,0	16,5	15,0
3,4	24,0	15,0	20,0
3,6	17,5	17,5	17,5
3,8	31,0	22,5	21,5
4,0	24,0	17,0	16,5
7,0	28,5	30,0	29,0
9,0	30,0	37,5	23,5
$H_{\text{máx}}$	31,0	37,5	29,0

Cuadro 25: Error de histéresis Operario A, comparador #2

Comparador Ref FRK 479		
Valor nominal	**Histéresis Ensayo 2B (μm)**	**Histéresis Ensayo 3B (μm)**
1,0	25,0	23,5
3,0	29,0	20,0
3,2	11,5	11,5
3,4	20,0	16,0
3,6	7,5	6,0
3,8	6,0	10,0
4,0	16,5	15,0
7,0	26,5	24,0
9,0	22,0	25,5
$H_{\text{máx}}$	29,0	25,5

Operario B

Cuadro 26: Error de histéresis Operario B, comparador #1

Comparador Ref JTR 417				
Valor nominal	**Histéresis Ensayo 2A (μm)**	**Histéresis Ensayo 3A (μm)**	**Histéresis Ensayo 5A (μm)**	**Histéresis Ensayo 7A (μm)**
1,0	20,0	21,5	17,5	14,0
3,0	9,0	17,5	13,5	22,5
3,2	16,5	17,5	15,0	7,5
3,4	15,0	26,0	15,0	16,0
3,6	26,0	17,5	15,0	20,5
3,8	22,5	19,0	15,0	20,5
4,0	20,0	16,0	19,5	20,0
7,0	22,5	27,5	27,0	34,0
9,0	27,5	30,0	30,0	24,0
$H_{\text{máx}}$	27,5	30,0	30,0	34,0

Cuadro 27: Error de histéresis Operario B, comparador #2

Comparador Ref FRK 479		
Valor nominal	**Histéresis Ensayo 1B (μm)**	**Histéresis Ensayo 4B (μm)**
1,0	26,5	18,5
3,0	23,5	18,5
3,2	17,5	11,0
3,4	21,0	17,0
3,6	12,5	5,0
3,8	4,0	3,5
4,0	25,0	14,5
7,0	15,5	21,5
9,0	25,0	21,0
$H_{\text{máx}}$	26,5	21,5

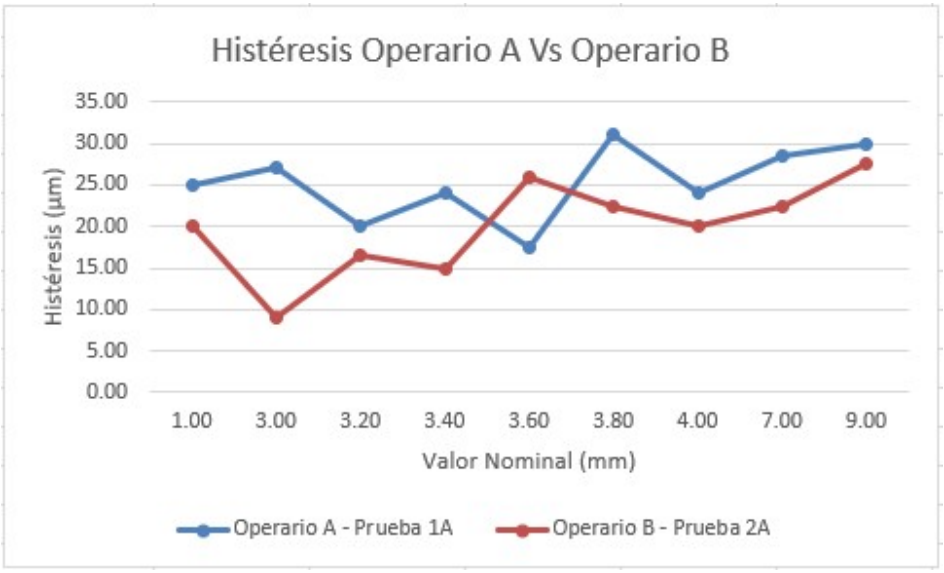


Figura 32: Histéresis Operario A Vs Operario B Comparador #1

En la Figura 32 se presenta el comportamiento del error de histéresis en μm obtenido mediante el Comparador #1, contrastando los resultados del Operario A (Prueba 1A) y el Operario B (Prueba 2A) a lo largo de los diferentes valores nominales. Esta comparación permite evaluar la variación del error de histéresis atribuible al factor humano bajo las mismas condiciones del primer instrumento, observándose la tendencia y magnitud de la desviación en las mediciones realizadas por ambos operadores.

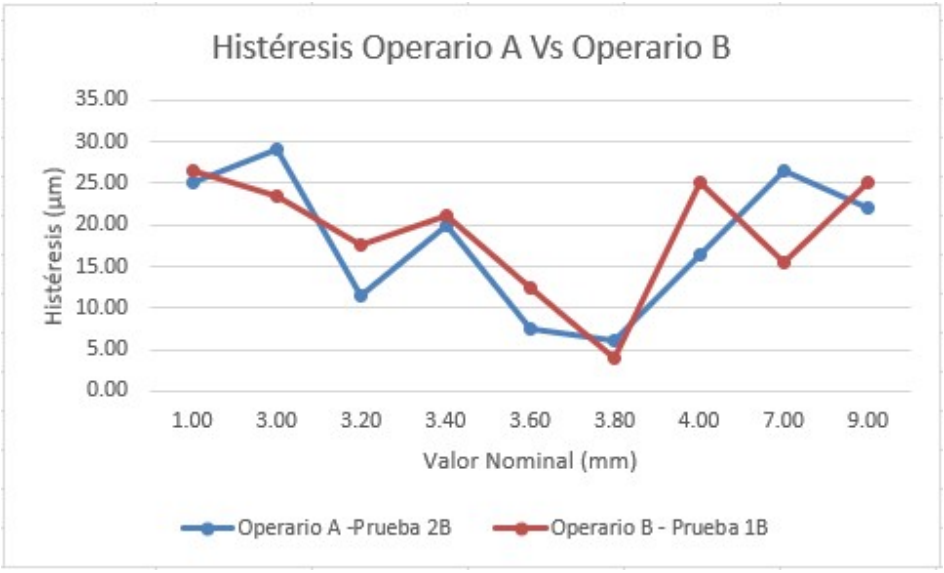


Figura 33: Histéresis Operario A Vs Operario B Comparador #2

Por su parte, en la Figura 33 se grafican los resultados del error de histéresis en μm correspondientes al Comparador #2, donde se comparan los datos obtenidos por el

Operario A (Prueba 2B) y el Operario B (Prueba 1B) respecto a cada valor nominal. La gráfica permite analizar la respuesta del segundo instrumento en términos de histéresis y la reproducibilidad entre operarios para este dispositivo específico.

La presencia de diferencias entre las mediciones de subida y bajada puede estar asociada con fenómenos de error geométrico propias del mecanismo del dispositivo.

- **Análisis de los resultados de histéresis**

  A partir de las mediciones realizadas por los operarios A y B en ambos instrumentos de medición, se destacan los siguientes aspectos:

  - **Comportamiento general y magnitudes:** El error de histéresis promedio global para el comparador Ref. JTR 417 fue de 20,80 μm, alcanzando su valor máximo de 37,50 μm en el Ensayo 4A (Operario A, punto nominal de 9,0 mm). Por su parte, el comparador Ref. FRK 479 presentó un error medio menor, equivalente a 18,58 μm, con un valor máximo de 29,00 μm registrado en el Ensayo 2B (Operario A, punto nominal de 3,0 mm).
  - **Tendencia según el recorrido del comparador de carátula:** En el comparador JTR 417 se evidencia un incremento progresivo del error de histéresis hacia el final de la carrera útil del instrumento, registrándose los valores promedio más altos en los puntos de 7,0 mm (28,36 μm) y 9,0 mm (28,93 μm). En contraste, el comparador FRK 479 muestra sus menores valores de histéresis en el rango intermedio entre 3,6 mm y 3,8 mm (alcanzando un mínimo de 4,00 μm en el Ensayo 1B).
  - **Comparativa de desempeño entre comparadores de carátula:** Al comparar ambos dispositivos, el modelo Ref. FRK 479 demostró un comportamiento global más estable, manteniendo una histéresis media menor (18,58 μm) y una menor dispersión entre ensayos que el modelo Ref. JTR 417 (20,80 μm). Esto convierte al comparador FRK 479 en una alternativa preferible para mediciones en rangos intermedios (3,2 mm a 4,0 mm), mientras que el JTR 417 requiere un factor de corrección por histéresis más riguroso al superar los 7,0 mm de carrera.
  - **Análisis gráfico del comportamiento por ensayo:** En la **Figura 32** (Comparador JTR 417), se evidencia que la histéresis se mantiene elevada a lo largo de todo el rango de medición, mostrando una tendencia claramente ascendente hacia el final de la carrera ($7,0$ a $9,0$ mm) y una ligera separación entre el Operario A y B. Por su parte, la **Figura 33** (Comparador FRK 479) revela un comportamiento convergente y consistente entre ambos operarios, caracterizado por un mínimo acentuado de histéresis en la zona central de medición ($3,2$ a $3,8$ mm) antes de incrementarse nuevamente en los extremos.

9.7.5. Evaluación de repetibilidad

La repetibilidad se evaluó a partir de las mediciones repetidas realizadas en cada punto de verificación, manteniendo las mismas condiciones de medición y el mismo procedimiento experimental. Debido a que en el análisis de precisión se determinó previamente el rango de dispersión de cada grupo de mediciones mediante la diferencia entre el valor máximo y el valor mínimo, estos resultados se utilizaron como base para evaluar la repetibilidad del comparador. De esta manera, no fue necesario realizar un nuevo cálculo para cada punto, sino analizar el comportamiento de los rangos obtenidos y determinar la variación presentada entre las mediciones repetidas.

A partir de los rangos de dispersión determinados para cada punto de medición, se observa el comportamiento de las indicaciones obtenidas durante las repeticiones del ensayo. Los valores calculados permiten identificar los puntos en los cuales se presentó una mayor o menor variación entre las mediciones. Los puntos con menores rangos evidencian una mayor estabilidad de las indicaciones, mientras que aquellos con rangos superiores presentan una mayor dispersión. En consecuencia, los resultados obtenidos en el análisis de precisión permiten valorar directamente la repetibilidad del comparador bajo las condiciones de medición establecidas.

Cuadro 28: Proceso para el calculo de la repetibilidad

Ejemplo detallado del calculo							
x_p	x_i	x_i	x_i	x_i	$x_{i\,\text{máx}}$	$x_{i\,\text{mín}}$	$P_i = (x_{i\,\text{máx}} - x_{i\,\text{mín}})$ *1000
Valor nominal (mm)	**Medición 1 (mm)**	**Medición 2 (mm)**	**Medición 3 (mm)**	**Medición 4 (mm)**	**Mayor Valor (mm)**	**Menor valor (mm)**	**Repetibilidad (μm)**
1,0	1,000	1,027	1,002	1,025	1,027	1,000	27
3,0	3,025	3,052	3,025	3,052	3,052	3,025	27
3,2	3,230	3,250	3,230	3,250	3,250	3,230	20
3,4	3,427	3,450	3,427	3,452	3,452	3,427	25
3,6	3,620	3,640	3,625	3,640	3,640	3,620	20
3,8	3,820	3,850	3,815	3,847	3,850	3,815	35
4,0	4,022	4,047	4,027	4,050	4,050	4,022	28
7,0	7,012	7,042	7,015	7,042	7,042	7,012	30
9,0	9,017	9,047	9,017	9,047	9,047	9,017	30

- **Resultados de repetibilidad**

Cuadro 29: Resultados de repetibilidad obtenidos en las pruebas 02 y 03

Operario	**Richard David Romero Ballén**				
Fecha de prueba	**5/08/2026**				
N.º de Prueba	**Valor Nominal (mm)**	**Repetibilidad (μm)**	**N.º de Prueba**	**Valor Nominal (mm)**	**Repetibilidad (μm)**
02	1	25	03	1	32
	3	42		3	47
	3,2	50		3,2	50
	3,4	45		3,4	57
	3,6	47		3,6	40
	3,8	42		3,8	45
	4	50		4	42
	7	40		7	47
	9	47		9	47

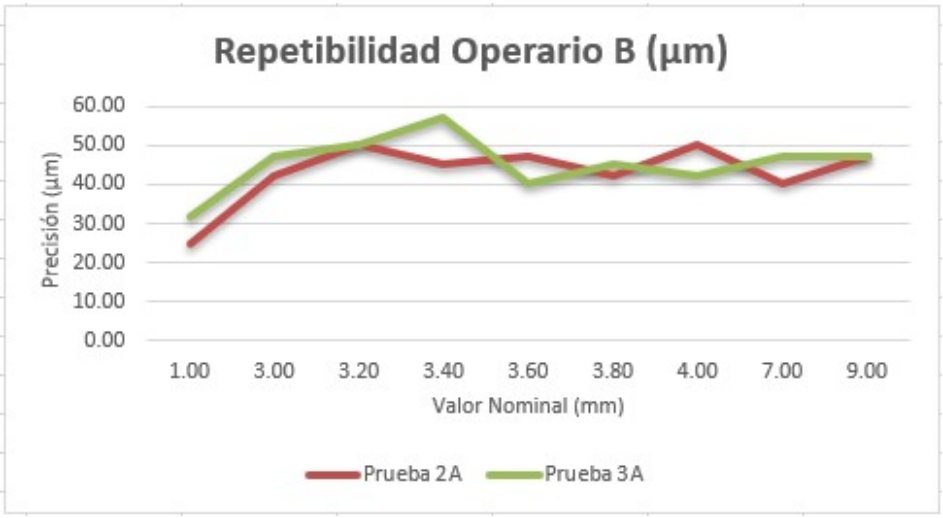


Figura 34: Gráfica Repetibilidad Operario B

Para evaluar la repetibilidad del instrumento de medición, en la Figura 34 se grafican los valores de precisión en μm correspondientes a las **Pruebas 2A y 3A** en función de los valores nominales en mm. Ambos ensayos fueron realizados por el mismo operario (Operario B) durante el mismo día de evaluación, permitiendo observar gráficamente el comportamiento, la homogeneidad y la dispersión del equipo bajo las mismas condiciones operativas.

- **Análisis de los resultados de repetibilidad**

  A partir de la evaluación de los rangos de dispersión obtenidos por el Operario B en las pruebas 02 y 03, se destacan las siguientes observaciones:

  - **Comportamiento general y niveles de dispersión:** La repetibilidad del instrumento osciló entre un valor mínimo de $25\,\mu$m y un máximo de $57\,\mu$m. En la mayor parte del recorrido útil (a partir de $x_p = 3{,}0\,$mm), la variación mantenida por el operario fluctuó en una banda de dispersión constante cercana a los $45\,\mu$m.
  - **Puntos de mayor y menor estabilidad:** La mayor estabilidad y repetibilidad de la indicación se presentó en el punto inicial de 1,0 mm, donde se obtuvieron los menores rangos de variación ($25\,\mu$m en la Prueba 02 y $32\,\mu$m en la Prueba 03). Por el contrario, la zona con mayor dispersión de lecturas se concentró entre los 3,2 mm y 4,0 mm, alcanzando el nivel crítico de dispersión en $x_p = 3{,}4\,$mm ($57\,\mu$m).
  - **Consistencia en el patrón de medición:** Como se aprecia en la **Figura 34**, la superposición y paralelismo entre las curvas de la Prueba 2A y la Prueba 3A demuestran una elevada consonancia. Esto confirma que la dispersión observada responde a un comportamiento metrológico reproducible del sistema de medición y no a errores aleatorios significativos durante la ejecución de las repeticiones.

9.7.6. Evaluación de reproducibilidad

La reproducibilidad se evaluó a partir de la comparación de los resultados obtenidos en los diferentes ensayos realizados bajo condiciones de medición diferenciadas. Para este análisis se utilizaron los resultados previamente obtenidos en los ensayos, evitando repetir los cálculos individuales de dispersión realizados en el análisis de precisión. La comparación entre los resultados permite identificar las variaciones existentes entre las diferentes series de mediciones y determinar la estabilidad del comportamiento del comparador cuando se modifican las condiciones bajo las cuales se desarrolla el proceso de verificación.

Los resultados obtenidos en los diferentes ensayos fueron comparados para determinar la variación existente entre las distintas series de medición. El rango de reproducibilidad permite identificar la diferencia máxima presentada entre los resultados obtenidos bajo las condiciones evaluadas. Valores reducidos de este rango indican una menor variación entre los ensayos y, por tanto, una mayor estabilidad del proceso de verificación frente a los cambios en las condiciones de medición. Por el contrario, valores elevados evidencian una mayor influencia de las condiciones del ensayo sobre los resultados obtenidos.

A partir de los resultados obtenidos se puede establecer el grado de estabilidad del dispositivo y del comparador durante las diferentes series de medición. La evaluación de la reproducibilidad complementa el análisis de repetibilidad, ya que mientras esta última permite determinar la variación entre mediciones realizadas bajo condiciones equivalentes, la reproducibilidad permite valorar la variación producida cuando se presentan cambios en las condiciones de medición.

Cuadro 30: Proceso para el calculo de la reproducibilidad

Ejemplo detallado del calculo							
x_p	x_i	x_i	x_i	x_i	$x_{i\,\text{máx}}$	$x_{i\,\text{mín}}$	$P_i = (x_{i\,\text{máx}} - x_{i\,\text{mín}})$ *1000
Valor nominal (mm)	**Medición 1 (mm)**	**Medición 2 (mm)**	**Medición 3 (mm)**	**Medición 4 (mm)**	**Mayor Valor (mm)**	**Menor valor (mm)**	**Reproducibilidad (μm)**
1,0	1,000	1,027	1,002	1,025	1,027	1,000	27
3,0	3,025	3,052	3,025	3,052	3,052	3,025	27
3,2	3,230	3,250	3,230	3,250	3,250	3,230	20
3,4	3,427	3,450	3,427	3,452	3,452	3,427	25
3,6	3,620	3,640	3,625	3,640	3,640	3,620	20
3,8	3,820	3,850	3,815	3,847	3,850	3,815	35
4,0	4,022	4,047	4,027	4,050	4,050	4,022	28
7,0	7,012	7,042	7,015	7,042	7,042	7,012	30
9,0	9,017	9,047	9,017	9,047	9,047	9,017	30

- **Resultados de reproducibilidad**

  Para la evaluación experimental de la reproducibilidad se establecieron tres condiciones de comparación, con el propósito de identificar la influencia de diferentes factores sobre los resultados obtenidos. En la primera condición se compararán los resultados obtenidos por el **mismo operador en diferentes fechas**, permitiendo analizar la variación asociada al momento en que se realiza el ensayo. En la segunda condición se mantendrá la **misma fecha de medición, pero se cambiará el operador**, con el fin de evaluar la influencia del factor humano sobre los resultados. Finalmente, en la tercera condición se combinarán ambas variaciones, realizando las mediciones en **diferentes fechas y con diferentes operadores**, permitiendo evaluar de manera conjunta la influencia de ambos factores sobre la reproducibilidad del proceso de verificación.

  - **Reproducibilidad entre diferentes fechas con el mismo operador**

Cuadro 31: Evaluación de la reproducibilidad para el mismo operador en diferentes fechas

Operario	**Richard David Romero Ballén**				
Fecha de prueba	**5/08/2026**		**Fecha de prueba**	**11/08/2026**	
N.º de prueba	**Valor nominal (mm)**	**Máx. de precisión (μm)**	**N.º de prueba**	**Valor nominal (mm)**	**Máx. de precisión (μm)**
02	1	25	05	1	30
	3	42		3	50
	3,2	50		3,2	52
	3,4	45		3,4	50
	3,6	47		3,6	50
	3,8	42		3,8	47
	4	50		4	52
	7	40		7	52
	9	47		9	52

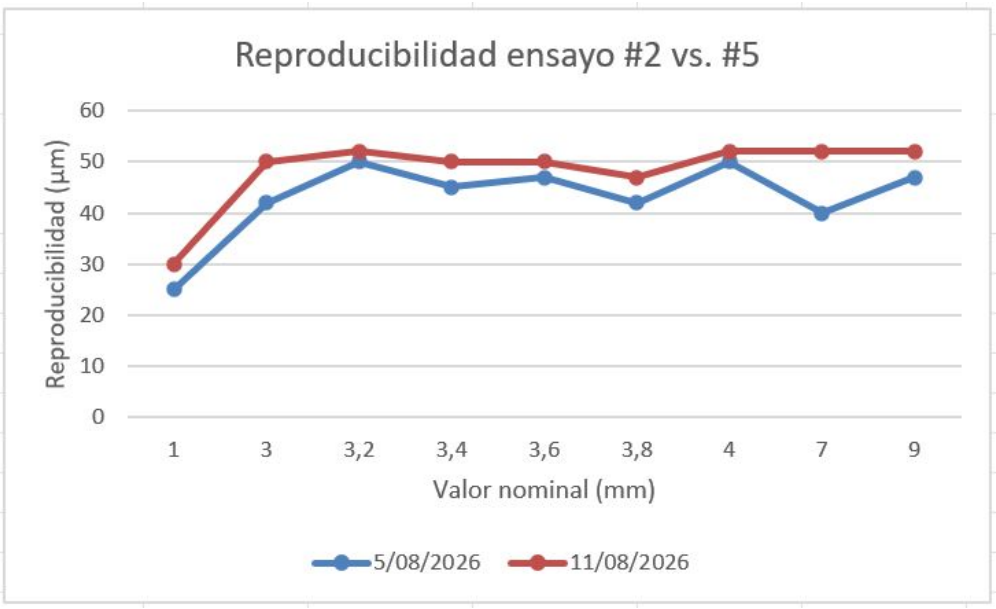


Figura 35: Reproducibilidad ensayo #2 Vs. #5

- **Reproducibilidad entre diferentes operadores en una misma fecha**

Cuadro 32: Resultados de precisión obtenidos por diferentes operadores en una misma fecha

Fecha	**12/08/2026**				
Operario	**Camilo**		**Operario**	**Richard**	
N.º de Prueba	**Valor Nominal (mm)**	**Máx. de Precisión (μm)**	**N.º de Prueba**	**Valor Nominal (mm)**	**Máx. de Precisión (μm)**
06	1	27	07	1	27
	3	52		3	52
	3,2	50		3,2	50
	3,4	52		3,4	50
	3,6	42		3,6	45
	3,8	50		3,8	50
	4	50		4	50
	7	47		7	50
	9	42		9	55

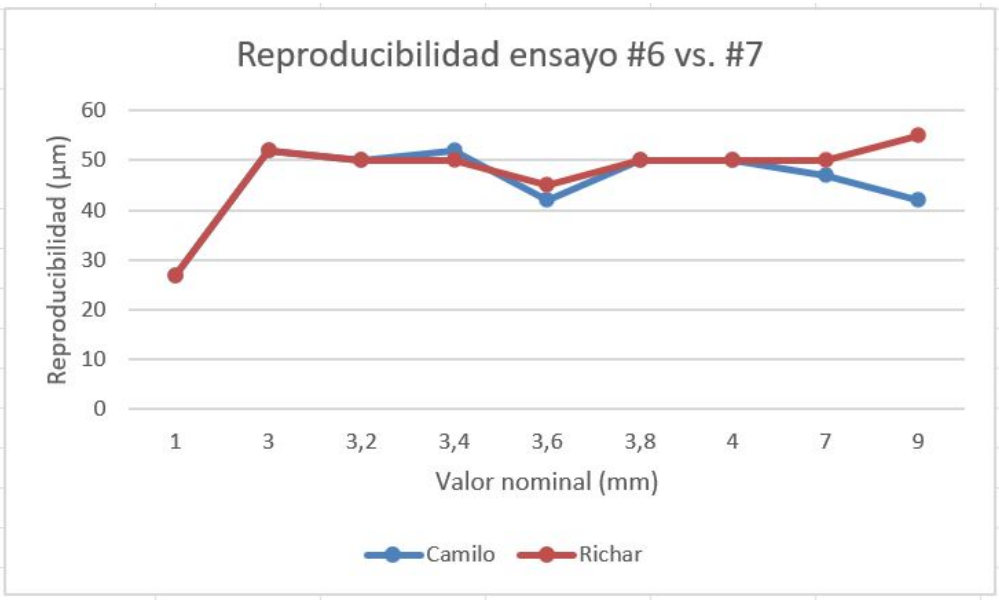


Figura 36: Reproducibilidad ensayo #6 Vs. #7

- **Reproducibilidad entre diferentes fechas y operadores**

Cuadro 33: Resultados de precisión obtenidos por diferentes operadores en diferentes fechas

Operario	**Richard**		**Operario**	**Camilo**	
Fecha	**5/08/2026**		**Fecha**	**11/08/2026**	
N.º de Prueba	**Valor Nominal (mm)**	**Máx. de Precisión (μm)**	**N.º de Prueba**	**Valor Nominal (mm)**	**Máx. de Precisión (μm)**
03	1	32	04	1	37
	3	47		3	52
	3,2	50		3,2	50
	3,4	57		3,4	52
	3,6	40		3,6	45
	3,8	45		3,8	52
	4	42		4	52
	7	47		7	50
	9	47		9	57

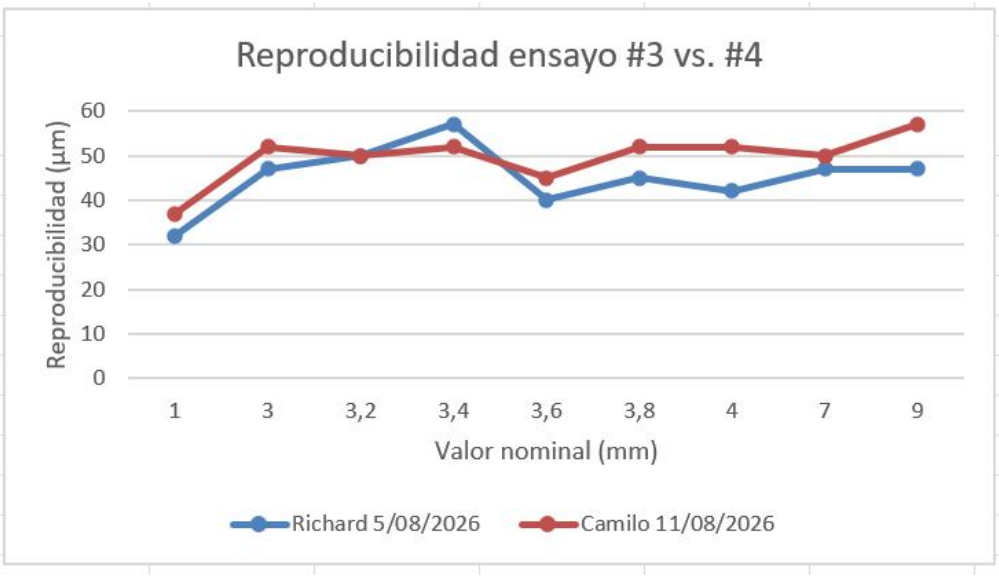


Figura 37: Reproducibilidad ensayo #3 Vs. #4

- **Análisis de los resultados de reproducibilidad**

  A partir de la evaluación de los tres escenarios planteados, se presentan los siguientes hallazgos:

  - **Influencia de la fecha de ensayo (Condición 1):** Como se observa en la **Figura 35** (Ensayos #2 vs. #5), el cambio de fecha generó un incremento sistemático

en la dispersión máxima de la medición, desplazando la curva hacia arriba en un rango aproximado de 5 μm a 12 μm para un mismo operario. Esto señala que variaciones en el montaje inicial del dispositivo o cambios en las condiciones ambientales del laboratorio influyen sensiblemente en los resultados.

- **Influencia del factor humano (Condición 2):** De la **Figura 36** (Ensayos #6 vs. #7) se concluye que la variabilidad introducida por diferentes operarios en una misma jornada es casi nula entre 1,0 mm y 4,0 mm, presentándose una leve discrepancia únicamente al final de la carrera (13 μm a 9,0 mm). Esto demuestra una alta estandarización en la técnica de toma de lectura entre los operadores.
- **Efecto combinado y estabilidad global (Condición 3):** El análisis conjunto de la **Figura 37** (Ensayos #3 vs. #4) ratifica que la reproducibilidad global está dominada por las condiciones de la sesión de prueba más que por la habilidad del operario, manteniéndose los máximos de dispersión acotados dentro del intervalo de 32 μm a 57 μm.

9.7.7. Evaluación de intervalos locales

El error de intervalo local se evaluó considerando el conjunto de mediciones comprendido entre los valores nominales de **3,0 mm** y **4,0 mm**, con el propósito de analizar la variación del error del comparador dentro de este intervalo específico de medición. Para su determinación se utilizaron los errores obtenidos a partir del promedio de las mediciones realizadas en cada punto, identificando el mayor y el menor error registrado dentro del intervalo. El error de intervalo local se calculó mediante la diferencia entre ambos valores, de acuerdo con la expresión:

$$E_i = \overline{x} - x_p \tag{8}$$

Cuadro 34: Proceso para el calculo del error de medición en el intervalo local

Ejemplo detallado del calculo						
x_p	x_i	x_i	x_i	x_i	$\overline{x} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} x_i$ donde n=4	$E_i = (\overline{x} - x_p)$ *1000
Valor nominal (mm)	**Medición 1 (mm)**	**Medición 2 (mm)**	**Medición 3 (mm)**	**Medición 4 (mm)**	**Promedio (mm)**	**Erro de medición en intervalo local (μm)**
3,0	3,025	3,052	3,025	3,052	3,039	38,5
3,2	3,230	3,250	3,230	3,250	3,240	40,0
3,4	3,427	3,450	3,427	3,452	3,439	39,0
3,6	3,620	3,640	3,625	3,640	3,631	31,3
3,8	3,820	3,850	3,815	3,847	3,833	33,0
4,0	4,022	4,047	4,027	4,050	4,037	36,5

- **Resultados del error de indicación en el intervalo local**

A continuación se presentan los errores de indicación por cada ensayo para el intervalo local, que comprende las mediciones tomadas de los valores nominales entre **3,0 mm** y **4,0 mm** en μm :

Operario A

Cuadro 35: Error de medición en el intervalo local operario A, comparador #1

Comparador Ref JTR 417			
Valor nominal	**Error local Ensayo 1A (μm)**	**Error local Ensayo 4A (μm)**	**Error local Ensayo 6A (μm)**
3,0	38,50	46,00	40,25
3,2	40,00	41,75	41,00
3,4	39,00	44,50	42,00
3,6	31,25	36,25	33,25
3,8	33,00	39,75	39,25
4,0	36,50	41,00	40,25
$E_{\text{máx}}$	40,00	46,00	42,00

Cuadro 36: Error de medición en el intervalo local Operario A, comparador #2

Comparador Ref FRK 479		
Valor nominal	**Error local Ensayo 2B (μm)**	**Error local Ensayo 3B (μm)**
3,0	53,00	43,50
3,2	64,25	57,75
3,4	63,50	58,00
3,6	62,25	56,50
3,8	59,00	56,00
4,0	66,75	59,50
$E_{\text{máx}}$	66,75	59,50

Operario B

Cuadro 37: Error de medición en el intervalo local Operario B, comparador #1

Comparador Ref JTR 417				
Valor nominal	**Error local Ensayo 2A (μm)**	**Error local Ensayo 3A (μm)**	**Error local Ensayo 5A (μm)**	**Error local Ensayo 7A (μm)**
3,0	36,50	35,75	41,75	39,75
3,2	36,75	39,75	42,00	41,25
3,4	36,00	41,50	42,50	38,00
3,6	31,50	31,25	38,50	32,25
3,8	29,75	33,00	36,00	37,25
4,0	40,00	34,00	39,75	40,00
$E_{\text{máx}}$	40,00	41,50	42,50	41,25

Cuadro 38: Error de medición en el intervalo local Operario B, comparador #2

Comparador Ref FRK 479		
Valor nominal	**Error local Ensayo 1B (μm)**	**Error local Ensayo 4B (μm)**
3,0	54,25	42,75
3,2	71,25	61,50
3,4	68,00	58,50
3,6	63,75	52,50
3,8	63,00	51,75
4,0	68,50	57,25
$E_{\text{máx}}$	71,25	61,50

- **Análisis de los resultados del error en el intervalo local**

  A partir de la evaluación de la franja de trabajo comprendida entre los puntos nominales de 3,0 mm y 4,0 mm, se destacan las siguientes conclusiones metrológicas:

- **Desempeño y magnitud del error por instrumento:** El comparador Ref. JTR 417 demostró una mayor exactitud en este intervalo restringido, registrando errores de indicación máximos ($E_{\text{máx}}$) que no superaron los 46,00 μm (Ensayo 4A). Por su parte, el comparador Ref. FRK 479 exhibió un error de indicación local sensiblemente mayor, alcanzando valores máximos de 66,75 μm (Ensayo 2B) y 71,25 μm (Ensayo 1B).
- **Comportamiento característico dentro del rango ($3,0$ a $4,0$ mm):** En la referencia JTR 417 se observa un comportamiento uniforme en el que el error disminuye hacia la zona media del intervalo, registrando sus valores mínimos en las cotas de 3,6 mm y 3,8 mm ($\approx 30\,\mu$m). En contraste, el modelo FRK 479 muestra un incremento abrupto del error al ingresar al intervalo (pasando de 53,00 μm en 3,0 mm a más de 64 μm en 3,2 mm), manteniéndose elevado en todo el tramo.
- **Repetibilidad entre operadores:** La variación en el error local introducida por el cambio de operador resultó mínima para ambos instrumentos. Para la Ref. JTR 417, las diferencias inter-operador no excedieron los 4,5 μm en puntos homólogos, mientras que para la Ref. FRK 479 se mantuvo una geometría de curva idéntica entre los Ensayos 2B y 1B, confirmando que el perfil del error deviene del estado mecánico de los husillos/engranajes del instrumento en dicha zona y no de la manipulación.

9.8. Fuentes de error considerado

Durante el desarrollo de las pruebas experimentales se consideraron diferentes fuentes potenciales de error que pueden influir en los resultados obtenidos.

Entre las principales fuentes identificadas se encuentran:

- Error Sistemático o Geométrico
- Error asociado al certificado de calibración

9.8.1. Análisis geométrico del mecanismo de transmisión

Debido a que el dispositivo transforma el desplazamiento lineal del husillo del micrómetro en un movimiento angular de la palanca del comparador, el extremo de la palanca no describe una trayectoria lineal, sino un arco de circunferencia. Por esta razón, el desplazamiento lineal aplicado por el micrómetro puede considerarse geométricamente como la longitud de una cuerda, mientras que el desplazamiento real asociado al movimiento de la palanca corresponde a la longitud del arco.
Para determinar la corrección geométrica se considera como radio de giro la distancia entre el centro de rotación de la palanca y el centro de la esfera de contacto, cuyo valor se obtuvo usando el calibrador vernier midiendo la distancia completa de la palanca y dividiéndola entre 2, dicho valor es:

$$R = 50,80 \text{ mm} \tag{9}$$

Si x representa el desplazamiento lineal aplicado por el micrómetro, el ángulo central asociado al movimiento de la palanca se obtiene a partir de la geometría de un triángulo isósceles representado en la imagen 38:

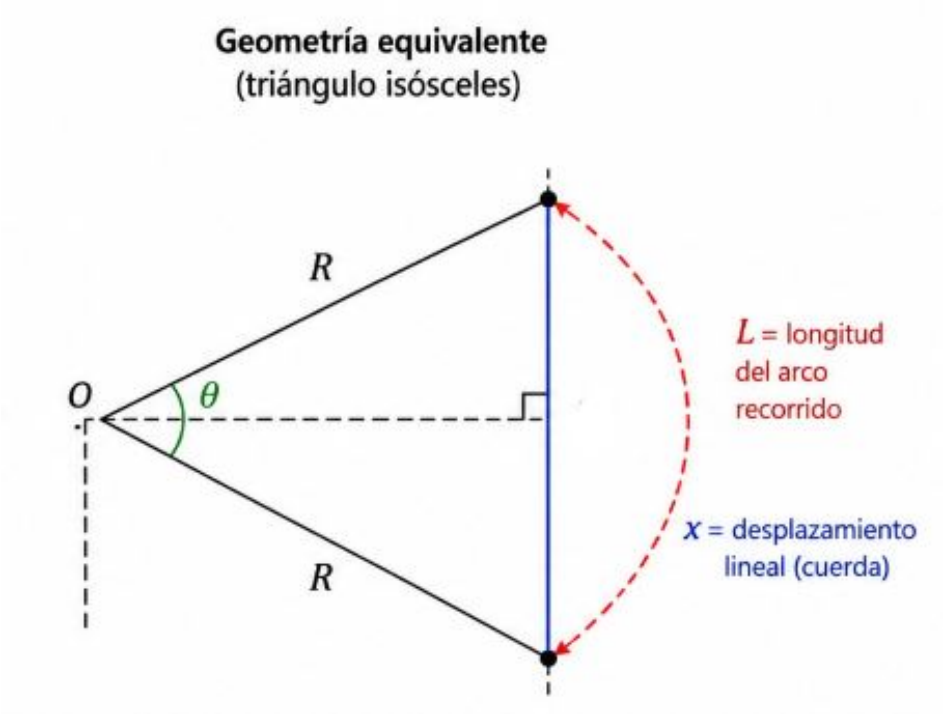


Figura 38: Representación geométrica

Sustituyendo la expresión del ángulo, se obtiene la ecuación general empleada para determinar la corrección geométrica en cada punto de medición. Su origen se fundamenta en la relación entre el ángulo central θ y la longitud del arco L trazado por la palanca.
A partir de la geometría del triángulo isósceles definido por el radio de giro R y el desplazamiento lineal x (que actúa como la cuerda del arco), la mitad del ángulo central cumple con:

$$\sin\left(\frac{\theta(x)}{2}\right) = \frac{x/2}{R} = \frac{x}{2R} \tag{10}$$

Despejando el ángulo central en radianes, se tiene:

$$\theta(x) = 2\arcsin\left(\frac{x}{2R}\right) \tag{11}$$

Dado que la longitud del arco circular descrito por el extremo del palpador está dada por la definición del arco en radianes $L(x) = R \cdot \theta(x)$, al reemplazar el ángulo se obtiene:

$$L(x) = 2R\arcsin\left(\frac{x}{2R}\right) \tag{12}$$

Finalmente, considerando que el error geométrico $E_g(x)$ es la diferencia entre el recorrido angular efectivo ($L(x)$) y la aproximación lineal aplicada por el micrómetro (x), se deduce la expresión final:

$$\boxed{E_g(x) = L(x) - x = 2R \arcsin\left(\frac{x}{2R}\right) - x} \tag{13}$$

donde θ debe expresarse posteriormente en radianes para el cálculo de la longitud del arco. La longitud del arco recorrido por el extremo de la palanca se determina mediante:

$$L(x) = R\theta(x) \tag{14}$$

Por consiguiente, la corrección geométrica del mecanismo se define como la diferencia entre la longitud del arco y el desplazamiento lineal aplicado:

$$E_g(x) = L(x) - x \tag{15}$$

Sustituyendo la expresión del ángulo, se obtiene la ecuación general empleada para determinar la corrección geométrica en cada punto de medición:

$$\boxed{E_g(x) = 2R \arcsin\left(\frac{x}{2R}\right) - x} \tag{16}$$

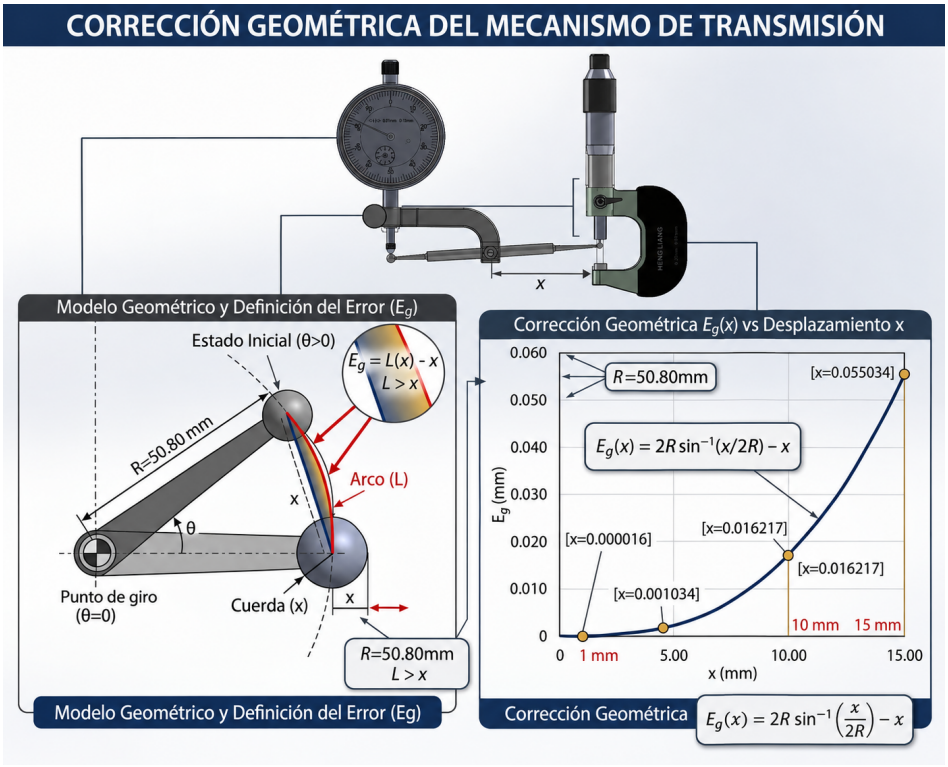


Figura 39: Análisis error geométrico

Esta corrección no corresponde a una constante única para todo el intervalo de medición, debido a que su magnitud depende del desplazamiento x. Por lo tanto, para cada posición de medición se determina individualmente el valor de E_g.
Para el presente dispositivo, con $R = 50,80$ mm, los valores calculados para diferentes posiciones del intervalo de medición se presentan en el Cuadro 39.
Esta consideración resulta fundamental para interpretar correctamente los resultados experimentales y evitar atribuir al comparador errores que puedan ser originados por el dispositivo de verificación.

Cuadro 39: Corrección geométrica del mecanismo para diferentes desplazamientos.

x **(mm)**	θ **(grados)**	L **(mm)**	E_g **(mm)**
1,00	1,1279	1,000016	0,000016
3,00	3,3841	3,000436	0,000436
3,20	3,6098	3,200529	0,000529
3,40	3,8355	3,400635	0,000635
3,60	4,0612	3,600754	0,000754
3,80	4,2869	3,800887	0,000887
4,00	4,5126	4,001034	0,001034
7,00	7,9013	7,005550	0,005550
9,00	10,1641	9,011812	0,011812

Los resultados muestran que la corrección geométrica aumenta de manera no lineal con el desplazamiento. Para desplazamientos pequeños, la diferencia entre la longitud del arco y la cuerda es prácticamente despreciable; sin embargo, a medida que aumenta el recorrido del husillo, dicha diferencia adquiere mayor relevancia. Por ejemplo, para un desplazamiento de $4,00$ mm se obtiene una corrección geométrica de aproximadamente $0,001034$ mm, mientras que para $9,00$ mm la corrección alcanza aproximadamente $0,011812$ mm.
Estos resultados evidencian que el efecto geométrico debe ser considerado en el procesamiento de los datos experimentales, especialmente debido a que el valor de la corrección puede superar la resolución de $0,01$ mm del comparador objeto de verificación.

9.8.2. Causal asociado al certificado de calibración

El micrómetro patrón utilizado como referencia durante la verificación cuenta con un certificado de calibración, en el cual se establecen los valores de error e incertidumbre asociados a su proceso de calibración. Aunque el instrumento presenta una resolución de 0,001 mm, los resultados obtenidos mediante este instrumento pueden estar afectados por la incertidumbre declarada en su certificado. Por esta razón, este factor se considera como una fuente de error relevante y será tenido en cuenta dentro del análisis de los resultados, incorporando los valores establecidos en el certificado de calibración del micrómetro patrón como parte de la evaluación de la incertidumbre del proceso de verificación.

9.8.3. Otros causales posibles

- **Causal asociado a la temperatura**

  Durante la realización de los ensayos se registró la temperatura al inicio y al final de cada prueba con el propósito de identificar posibles variaciones que pudieran afectar el comportamiento del micrómetro patrón utilizado como referencia. Los resultados obtenidos evidenciaron que las condiciones térmicas se mantuvieron relativamente estables durante el desarrollo de las pruebas. Por ejemplo, en uno de los ensayos se registró una temperatura inicial de 19,1 °C y una temperatura final de 19,3 °C, correspondiente a una variación de únicamente 0,2 °C. Este comportamiento permitió verificar que no se presentaron cambios significativos de temperatura durante el tiempo de ejecución de los ensayos.

  Aunque la temperatura puede producir variaciones dimensionales en los instrumentos de medición, de acuerdo con la relación de expansión térmica $\Delta L = \alpha L \Delta T$, la reducida variación térmica registrada durante las pruebas permite considerar que su influencia sobre los desplazamientos generados por el micrómetro fue mínima. Por esta razón, y teniendo en cuenta la estabilidad de las condiciones registradas durante los ensayos, el efecto asociado a la temperatura fue descartado como una causa significativa de error en los resultados obtenidos, debido a que su posible contribución se considera despreciable frente a las variaciones evaluadas experimentalmente.

- **Error de paralaje**

  El error de paralaje corresponde a una desviación que puede producirse durante la lectura de la escala del comparador de carátula cuando el observador no se encuentra correctamente alineado con el plano de indicación, generando un desplazamiento aparente de la aguja respecto a las graduaciones. Con el fin de minimizar la influencia de este factor, durante la realización de los ensayos se procuró que el operador se ubicara directamente frente al dispositivo y mantuviera una posición de observación lo más perpendicular posible al plano de la carátula. Esta condición permitió disminuir significativamente los posibles errores asociados a la posición del observador, por lo que la influencia del paralaje se consideró despreciable dentro de las condiciones establecidas para el desarrollo de las pruebas y, en consecuencia, no se tuvo en cuenta como una causa significativa de error en los resultados obtenidos.

9.9. Evaluación de la incertidumbre de medición

La incertidumbre de medición constituye un elemento fundamental para evaluar la confiabilidad de los resultados obtenidos mediante el dispositivo.

Para el presente estudio se consideran las contribuciones asociadas a la repetibilidad de las mediciones y a las características metrológicas del micrómetro utilizado como patrón.

9.9.1. Incertidumbre tipo A

La precisión del sistema se evaluó a partir de la dispersión existente entre las mediciones repetidas realizadas bajo condiciones equivalentes.

Para el calculo de la incertidumbre tipo A en necesario el calculo de la desviación estándar experimental mediante:

$$s = \sqrt{\frac{\sum (x - \overline{x})^2}{n - 1}} \tag{17}$$

donde s corresponde a la desviación estándar, x representa cada medición, $\overline{x}$ corresponde al valor medio y n es el número de mediciones realizadas.

Un valor reducido de la desviación estándar indica una menor dispersión de las mediciones y, por tanto, una mayor repetibilidad del sistema bajo las condiciones evaluadas.

Para un conjunto de n mediciones, la incertidumbre estándar tipo A se calcula mediante:

$$u_A = \frac{s}{\sqrt{n}} \tag{18}$$

donde s corresponde a la desviación estándar experimental y n representa el número de mediciones realizadas.

Esta contribución representa la variabilidad estadística asociada al proceso de medición bajo las condiciones experimentales establecidas.

Cuadro 40: Resultados de las mediciones, desviación estándar e incertidumbre tipo A

					$s = \sqrt{\frac{\sum(x-\overline{x})^2}{n-1}}$	$u_A = \frac{s}{\sqrt{n}}$
Valor Nominal (mm)	**Medición 1 (mm)**	**Medición 2 (mm)**	**Medición 3 (mm)**	**Medición 4 (mm)**	**Desviación estándar (mm)**	**Incertidumbre tipo A (μm)**
1	1	1,027	1,002	1,025	0,01448	7,24
3	3,025	3,052	3,025	3,052	0,01559	7,79
3,2	3,23	3,25	3,23	3,25	0,01155	5,77
3,4	3,427	3,45	3,427	3,452	0,01388	6,94
3,6	3,62	3,64	3,625	3,64	0,01031	5,15
3,8	3,82	3,85	3,815	3,847	0,01806	9,03
4	4,022	4,047	4,027	4,05	0,01406	7,03
7	7,012	7,042	7,015	7,042	0,01650	8,25
9	9,017	9,047	9,017	9,047	0,01732	8,66

9.9.2. Incertidumbre tipo B

La incertidumbre tipo B corresponde a aquellas contribuciones que no se obtienen directamente mediante el análisis estadístico de las repeticiones, sino a partir de información disponible sobre los instrumentos, certificados de calibración, resolución y otras fuentes de incertidumbre.

- **Incertidumbres asociadas a la resolución del instrumento**

  La incertidumbre tipo B asociada a la resolución representa la incertidumbre debida a la mínima división o resolución del instrumento de medición.

  En el caso de los instrumentos metrológicos utilizados en el dispositivo, al ser análogos su tipo de distribución es rectangular, por lo tanto su modelo matemático es el siguiente:

$$U_B = \frac{A}{2 * \sqrt{6}} \tag{19}$$

  Donde A corresponde a la resolución del instrumento, es decir 0,01 mm para el comparador y 0,001 mm para el micrómetro patrón.

Cuadro 41: Incertidumbres tipo B por resolución

Incertidumbre tipo B (μm) (Comparador)	**Incertidumbre tipo B (μm) (Micrómetro)**
2,041	0,204

- **Incertidumbre asociada a el certificado de calibración**

  Una de las principales contribuciones de tipo B corresponde a la incertidumbre asociada al micrómetro patrón, la cual debe ser tomada directamente del certificado de calibración correspondiente.

  Cuando el certificado de calibración proporciona una incertidumbre expandida U asociada a un factor de cobertura k, la incertidumbre estándar se determina mediante:

$$u_B = \frac{U}{k} \tag{20}$$

  El valor utilizado para U y el factor de cobertura k deberán corresponder a los valores consignados en el certificado de calibración del micrómetro utilizado durante las pruebas el cual se toma como $k = 2$.

Cuadro 42: Incertidumbres tipo B por certificado de calibración

	U	$u_B = \frac{U}{k}$
Valor nominal (mm)	**Incertidumbre U (μm)**	**Incertidumbre tipo B x certificado de calibración (μm)**
1,0	0,60	0,3
3,0	0,81	0,405
3,2	0,81	0,405
3,4	0,81	0,405
3,6	0,81	0,405
3,8	0,81	0,405
4,0	0,59	0,295
7,0	0,59	0,295
9,0	0,81	0,405

9.9.3. Incertidumbre combinada

Cuando las contribuciones de incertidumbre consideradas son independientes, la incertidumbre combinada se determina mediante:

$$u_c = \sqrt{u_A^2 + u_B^2} \tag{21}$$

donde u_c corresponde a la incertidumbre estándar combinada.

En caso de incluirse contribuciones adicionales, la expresión deberá ampliarse considerando cada una de las fuentes de incertidumbre relevantes.
La identificación de estas fuentes permite establecer una relación entre las diferencias observadas experimentalmente y las características físicas del dispositivo.

- **Análisis del error de incertidumbre**

  Los resultados obtenidos permiten identificar el comportamiento de las diferentes contribuciones de incertidumbre durante las pruebas experimentales. La incertidumbre tipo A, obtenida a partir de las mediciones repetidas, presentó valores entre $5,15\,\mu$m y $9,03\,\mu$m. El menor valor se obtuvo en el punto de $3,6$ mm, mientras que el mayor correspondió al punto de $3,8$ mm. Esto indica que la dispersión de las mediciones fue reducida en relación con la resolución del comparador de $0,01$ mm, aunque se presentó una mayor variabilidad alrededor del punto de $3,8$ mm. Los resultados muestran, en general, un comportamiento estable del sistema durante las repeticiones realizadas.

  En cuanto a la incertidumbre tipo B, la principal contribución corresponde a la resolución del comparador de carátula, con un valor de $2,041\,\mu$m, mientras que la contribución asociada a la resolución del micrómetro es de $0,204\,\mu$m. La contribución proveniente del certificado de calibración del micrómetro se encuentra entre $0,295\,\mu$m y $0,405\,\mu$m dependiendo del punto de medición. Debido a estos valores, la incertidumbre tipo B presenta una magnitud considerablemente menor que la incertidumbre tipo A obtenida experimentalmente. Esto indica que, para las condiciones evaluadas, la variabilidad de las mediciones repetidas constituye la principal contribución a la incertidumbre del proceso.

  Al combinar las contribuciones tipo A y tipo B mediante la suma cuadrática, se obtiene una incertidumbre combinada que varía aproximadamente entre $5,56\,\mu$m y $9,27\,\mu$m. El valor máximo corresponde al punto de $3,8$ mm, comportamiento que coincide con el mayor valor de incertidumbre tipo A obtenido en este punto.

  Los resultados muestran que la contribución tipo A domina la incertidumbre total del proceso, mientras que las contribuciones tipo B tienen una influencia menor. Esto permite establecer que las principales oportunidades de mejora del dispositivo no se encuentran en la resolución de los instrumentos utilizados, sino en la reducción de la dispersión asociada al proceso experimental y a las condiciones mecánicas de operación del dispositivo.

9.9.4. Regla de decisión

Para establecer la conformidad de las mediciones se definió como regla de decisión un límite equivalente a cinco veces la resolución del instrumento verificado. Debido a que el comparador de carátula utilizado posee una resolución de $0,01$ mm, el límite de decisión se determina mediante:

$$L = 5 \times R \tag{22}$$

donde R corresponde a la resolución del instrumento.

Por tanto:

$$L = 5 \times 0{,}01 \text{ mm} = 0,05 \text{ mm} = 50\,\mu\text{m} \tag{23}$$

En consecuencia, se establece un límite de decisión de $\pm 50\,\mu$m para la evaluación del error de indicación.

El resultado se considera **conforme** cuando el error de indicación, considerando la incertidumbre expandida asociada al resultado, permanece dentro del límite establecido. Para efectos de la evaluación se adopta el siguiente criterio:

$$|E_i| + U \leq 50\,\mu\text{m} \tag{24}$$

Si se cumple esta condición, existe evidencia suficiente para considerar que el resultado se encuentra dentro del límite de decisión establecido. En caso contrario, el resultado no cumple el criterio de aceptación definido para el proceso de verificación.

Esta regla permite incorporar la incertidumbre de medición en la decisión de conformidad y evita evaluar el resultado únicamente a partir del valor puntual del error.

9.10. Criterios de evaluación

La evaluación del dispositivo se realizará considerando conjuntamente los parámetros de precisión, exactitud y confiabilidad.

La precisión será evaluada mediante la dispersión de las mediciones repetidas, utilizando la desviación estándar y el rango como indicadores de repetibilidad.

La exactitud será evaluada mediante el error de indicación y el error máximo obtenido durante el ensayo.

La confiabilidad será evaluada considerando la estabilidad de los resultados, la histéresis y la incertidumbre asociada al proceso de medición.

El cumplimiento del dispositivo no deberá determinarse únicamente a partir de la resolución nominal del comparador. La resolución de $0,01$ mm corresponde a la capacidad de lectura del

instrumento, mientras que la aceptación metrológica debe relacionarse con el error máximo permisible correspondiente al instrumento y al procedimiento de verificación aplicado.

Por esta razón, los resultados experimentales deberán compararse con la regla de decisión definida para el comparador de carátula objeto de estudio.
El criterio de evaluación, del dispositivo verificado, tendrá en cuenta las evaluaciones de los errores anteriormente descritos, así como, la incertidumbre final de los errores y el error geométrico del mecanismo de transmisión.

9.11. Discusión de resultados

Los resultados obtenidos mediante las pruebas experimentales permiten establecer el comportamiento real del dispositivo metrológico construido y determinar su capacidad para realizar procesos de verificación de comparadores de carátula.

El análisis de la precisión permite determinar la capacidad del sistema para producir resultados consistentes bajo condiciones equivalentes de medición. Una baja dispersión entre las mediciones repetidas representa un comportamiento favorable en términos de repetibilidad.

Por otra parte, el análisis de exactitud permite establecer la diferencia existente entre el valor de referencia generado por el micrómetro y la indicación obtenida por el comparador.

La comparación entre las mediciones de subida y bajada permite identificar posibles efectos de histéresis. La presencia de diferencias entre ambos sentidos de desplazamiento puede estar relacionada tanto con el comportamiento interno del comparador como con las características mecánicas del dispositivo de transmisión.

Finalmente, la estimación de la incertidumbre permite establecer un intervalo asociado al resultado de medición y proporciona un elemento adicional para determinar la confiabilidad del proceso. Ver Cuadro 43.

Cuadro 43: Resultados de mediciones, errores calculados y error corregido.

Val. Nom. (mm)	**Med. 1 (mm)**	**Med. 2 (mm)**	**Med. 3 (mm)**	**Med. 4 (mm)**	**Prom. (mm)**	**Error (μm)**	**Err. Mic. (μm)**	**Err. Geom. (μm)**	**Err. Corr. (μm)**
1	1	1,027	1,002	1,025	1,0135	13,5	0,30	0,016	13,184
3	3,025	3,052	3,025	3,052	3,0385	38,5	0,44	0,436	37,624
3,2	3,23	3,25	3,23	3,25	3,24	40	0,44	0,529	39,031
3,4	3,427	3,45	3,427	3,452	3,439	39	0,44	0,635	37,925
3,6	3,62	3,64	3,625	3,64	3,63125	31,25	0,44	0,754	30,056
3,8	3,82	3,85	3,815	3,847	3,833	33	0,44	0,887	31,673
4	4,022	4,047	4,027	4,05	4,0365	36,5	0,09	1,034	35,376
7	7,012	7,042	7,015	7,042	7,02775	27,75	0,03	5,550	22,170
9	9,017	9,047	9,017	9,047	9,032	32	0,61	11,812	19,578

Es importante considerar que el error observado durante la verificación corresponde al comportamiento combinado del sistema de medición. Por lo tanto, la interpretación de los resultados debe tener en cuenta tanto las características del comparador como las posibles contribuciones introducidas por el dispositivo.

En particular, la transmisión mediante palanca puede introducir una contribución geométrica debido al cambio de posición angular durante el recorrido. Este efecto deberá ser cuantificado y, si resulta significativo respecto a la resolución del comparador, deberá considerarse en la corrección de los resultados.

10. ELABORACIÓN DEL MANUAL DE USO DEL DISPOSITIVO METROLÓGICO

En este capítulo se presenta la elaboración del manual de uso del dispositivo metrológico desarrollado para la verificación de comparadores de carátula. El manual tiene como finalidad proporcionar una guía clara y ordenada para la correcta instalación, operación y utilización del dispositivo, permitiendo que el procedimiento de verificación pueda ser realizado de manera segura y reproducible. Asimismo, se incluyen recomendaciones relacionadas con el mantenimiento, almacenamiento y posibles mejoras del dispositivo, con el propósito de facilitar su implementación y prolongar su vida útil.

10.1. Información general

Identificación del dispositivo

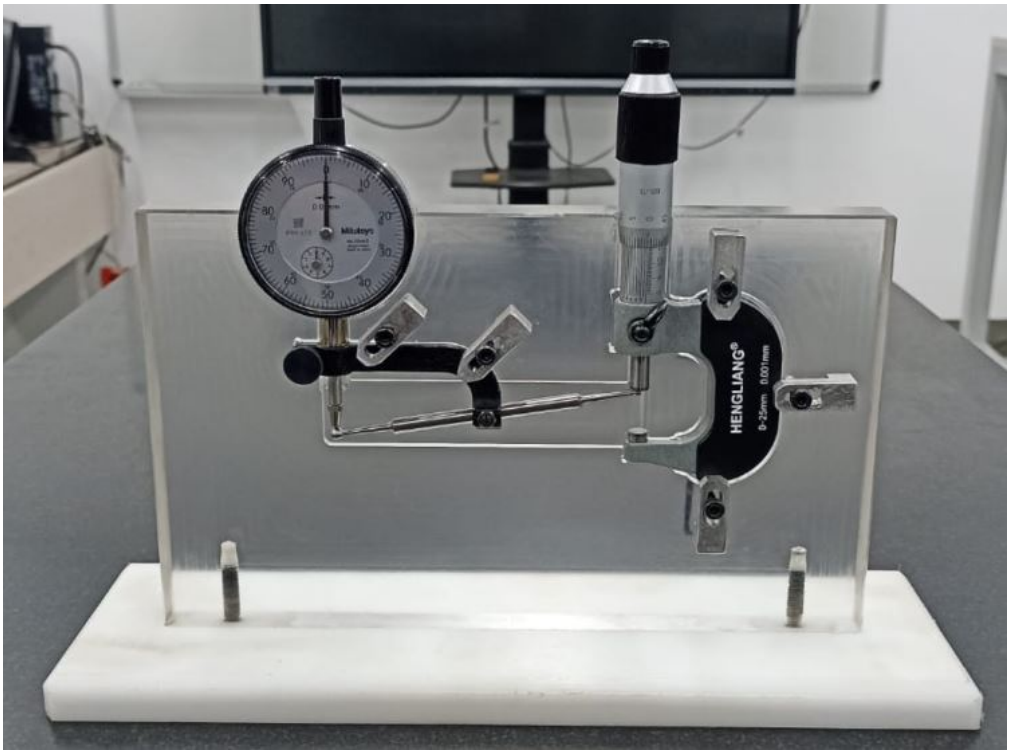


Figura 40: Verificador de comparadores de carátula

El dispositivo metrológico desarrollado consiste en un sistema mecánico destinado a facilitar el proceso de verificación de comparadores de carátula. Su configuración permite mantener el instrumento bajo prueba en una posición estable y adecuada para realizar mediciones controladas. El conjunto está conformado por una estructura de soporte, elementos de fijación y un sistema de accionamiento que permite realizar el procedimiento de verificación de manera ordenada y reproducible.

- **Nombre del dispositivo:** Verificador de comparadores de carátula.
- **Versión del dispositivo:** 01.
- **Fecha de fabricacion:**
- **Fabricante o responsable:**

Aplicación

El dispositivo está destinado principalmente a actividades de metrología dimensional, control de calidad y mantenimiento de instrumentos de medición. Su utilización permite realizar verificaciones periódicas de comparadores de carátula en entornos donde se requiera comprobar su comportamiento antes de emplearlos en procesos de medición. Asimismo, puede ser utilizado como herramienta de apoyo en laboratorios de metrología, talleres de mecanizado y espacios de formación técnica, siempre que se respeten las condiciones de operación y los criterios de aceptación establecidos.

Caracteristicas principales

Cuadro 44: Caracteristicas principales del dispositivo

Característica	**Especificación**
Instrumento bajo prueba	Comparador de carátula
Resolución del comparador	0,01 mm
Instrumento de referencia	Micrómetro patrón
Resolución de micrometro	0,001 mm
Tipo de operación	Manual
Principio de medición	Comparativo

Componentes principales del dispositivo.

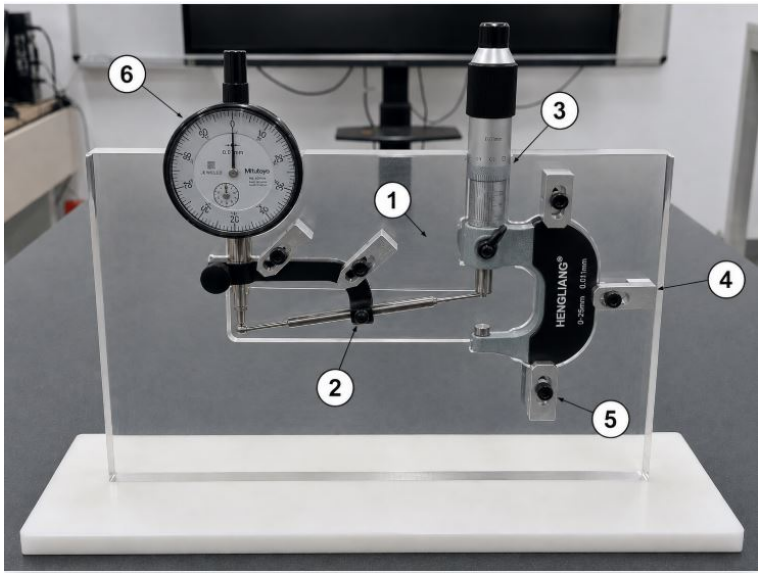


Figura 41: Componentes del dispositivo

Cuadro 45: componentes del dispositivo

N.º	Componente
1	Base
2	Palanca transmisora
3	Micrómetro patrón
4	Elementos de fijación
5	Tornillería
6	Comparador de carátula

10.2. Especificaciones técnicas

Las especificaciones técnicas del dispositivo metrológico permiten identificar sus principales características constructivas, dimensionales y funcionales, así como los instrumentos empleados durante el proceso de verificación. Estas características establecen los parámetros generales de operación del dispositivo y permiten definir las condiciones necesarias para obtener resultados confiables durante la verificación de comparadores de carátula.

Características generales

Cuadro 46: Características generales del dispositivo

Característica	Especificación
Nombre	Verificador de comparadores de carátula
Tipo de dispositivo	Sistema mecánico de verificación
Aplicación	Metrología dimensional
Método de verificación	Comparativo
Tipo de operación	Manual
Instrumento bajo prueba	Comparador de carátula
Resolución del comparador	0,01 mm
Instrumento patrón	Micrómetro
Resolución del micrómetro patrón	0,001 mm
Principio de operación	Generación y transmisión de desplazamientos controlados
Estructura principal	Placa de soporte y base (Aclilico)
Elementos de fijación	Bridas en aluminio

Características dimensionales

Cuadro 47: Dimensiones del dispositivo

Parámetro	Valor
longitud total	250 ± 0,50 mm
Ancho total	41,35 ± 0,50 mm
Altura total	555 ± 0,50 mm
Espesor de la base	20 ± 0,50 mm
Espesor de la placa soporte	12,7 ± 0,50 mm
Rango de desplazamiento utilizado	9,00 mm
Masa aproximada	≈ 800 g

10.3. Condiciones de operación

Para garantizar un funcionamiento adecuado del dispositivo y obtener resultados confiables durante la verificación de los comparadores de carátula, se deben cumplir determinadas condiciones antes y durante el procedimiento de medición. Estas condiciones están relacionadas principalmente con el estado del dispositivo, la estabilidad del área de trabajo, la limpieza de las superficies de contacto, la correcta instalación de los instrumentos y las condiciones necesarias para evitar factores externos que puedan afectar las indicaciones obtenidas.

Cuadro 48: Condiciones de operación

Parámetro	**Condición recomendada**
Superficie de trabajo	Plana, estable y rígida
Fijación	Los componentes deben estar correctamente asegurados
Estado del dispositivo	Limpio y libre de daños
Estado del patrón	Calibrado y en condiciones adecuadas
Estado del comparador	Limpio y en condiciones optimas de funcionamiento
Vibraciones	Se deben evitar golpes o vibraciones durante la toma de datos
Temperatura	Temperatuta ambiente
Posición del dispositivo	Estable
Contacto entre elementos	Correctamente alineado
Manipulación	Manual y sin aplicación de fuerzas excesivas

El cumplimiento de estas condiciones debe verificarse antes de iniciar cada proceso de medición. En caso de identificar alguna condición que pueda afectar la estabilidad del sistema o la confiabilidad de las lecturas, se deberá corregir antes de continuar con el procedimiento de verificación.

10.4. Inspección previa al uso

Antes de iniciar el procedimiento de verificación, se debe realizar una inspección general del dispositivo metrológico y de los instrumentos que intervienen en la medición. Esta inspección tiene como finalidad identificar posibles condiciones que puedan afectar el funcionamiento del sistema o alterar los resultados obtenidos. El operador deberá comprobar el estado físico de los componentes, la correcta fijación de los elementos, la libertad de movimiento del mecanismo transmisor y las condiciones de los instrumentos de referencia y bajo prueba.

Cuadro 49: Aspectos a inspeccionar

N.º	**Aspecto por verificar**	**Criterio de inspección**
1	Estado general del dispositivo	Verificar que la estructura no presente daños, deformaciones, grietas o deterioro visible.
2	Base y placa de soporte	Comprobar que se encuentren firmemente unidas y que proporcionen estabilidad al conjunto.
3	Elementos de fijación	Verificar que las bridas y demás elementos de sujeción se encuentren correctamente instalados y ajustados.
4	Tornillería	Comprobar que los tornillos se encuentren correctamente ajustados y que no presenten daños visibles.
5	Palanca transmisora	Comprobar que pueda realizar su movimiento de manera libre y continua, sin interferencias o atascamientos.
6	Puntos de contacto	Verificar que las superficies de contacto entre el micrómetro, la palanca y el comparador estén limpias y correctamente posicionadas.
7	Micrómetro patrón	Comprobar su estado físico, funcionamiento adecuado y condición metrológica vigente.
8	Comparador de carátula	Verificar que el instrumento no presente daños visibles y que su mecanismo de indicación responda adecuadamente al desplazamiento.
9	Alineación	Comprobar que el micrómetro, la palanca transmisora y el palpador del comparador se encuentren correctamente alineados.
10	Movimiento del sistema	Realizar un desplazamiento inicial para comprobar que el mecanismo responda correctamente y no presente interferencias.

Una vez finalizada la inspección, y siempre que no se identifiquen anomalías que puedan afectar el procedimiento, se podrá continuar con el montaje y puesta en funcionamiento del dispositivo. Si se detecta algún elemento suelto, deteriorado, desalineado o con funcionamiento irregular, se deberá corregir la condición identificada antes de iniciar la toma de mediciones.

10.5. Montaje del dispositivo

El montaje del dispositivo metrológico debe realizarse de manera ordenada, asegurando que cada uno de sus componentes quede correctamente instalado antes de iniciar el proceso de verificación. La correcta disposición y fijación de los elementos permite garantizar la estabilidad del conjunto y una adecuada transmisión del desplazamiento generado por el micrómetro

hacia el comparador de carátula. Para facilitar la operación, el montaje se realiza mediante una secuencia de pasos que permite verificar progresivamente la posición y fijación de cada componente.

10.5.1. Instalación de la base sobre la superficie de trabajo

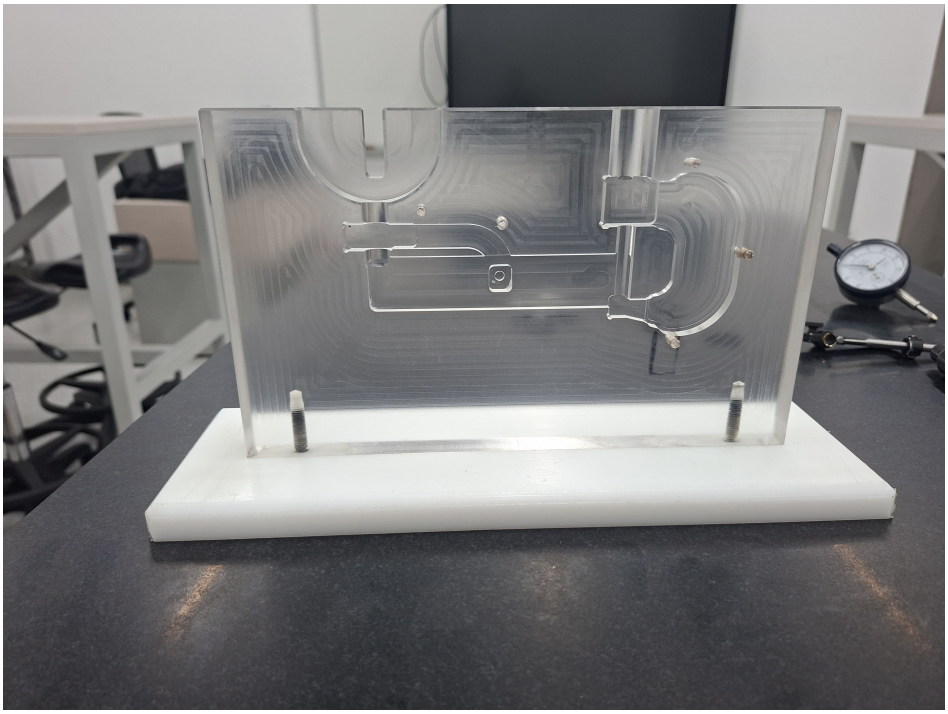


Figura 42: Ubicación de la base en lugar de trabajo

Ubicar el dispositivo sobre una superficie de trabajo plana, estable y libre de elementos que puedan interferir con su posicionamiento. La base debe permanecer completamente apoyada durante todo el procedimiento, evitando movimientos o desplazamientos que puedan modificar la posición de los instrumentos.

10.5.2. Instalación del micrómetro patrón

Para el ajuste de los tornillos M4 x 0.7 mm se debe utilizar utilizar una llave Allen, Bristol ó hexagonal como se muestra en la 43 y después de hacer tope en la brida de sujeción, se le dará solo un cuarto de vuelta.



Figura 43: Instalación del micrómetro patrón

Luego entonces, se debe Colocar el micrómetro patrón en el sistema de fijación destinado para este instrumento, asegurando que permanezca firmemente sujeto y que su eje de desplazamiento se encuentre orientado hacia la palanca transmisora. El micrómetro debe quedar correctamente posicionado para permitir que el movimiento de su husillo sea transmitido al mecanismo sin interferencias.

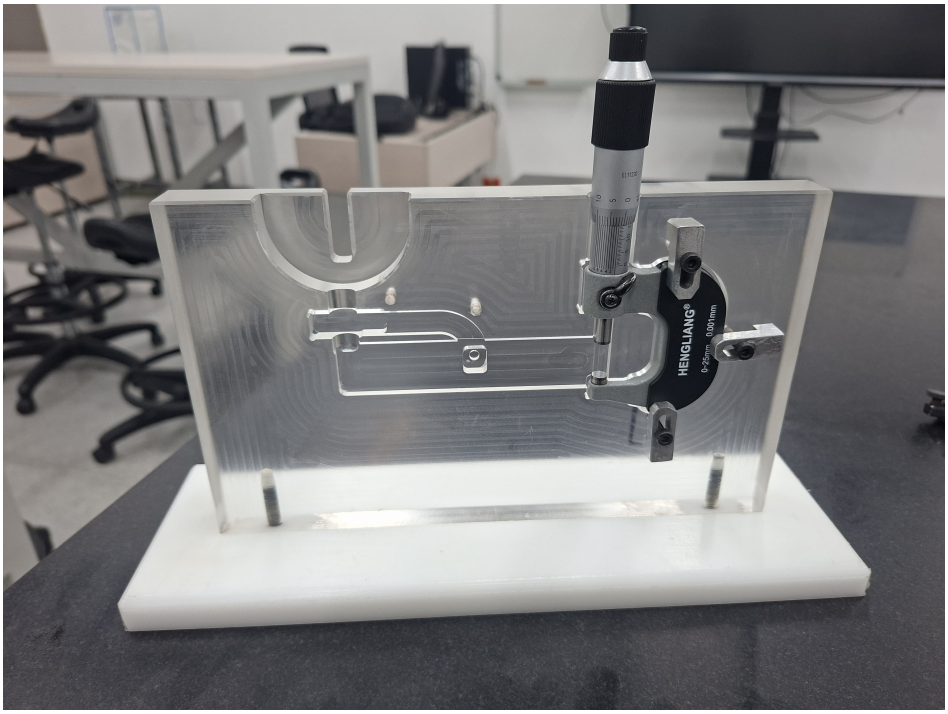


Figura 44: Instalación del micrómetro patrón

10.5.3. Instalación de la palanca de transmisión

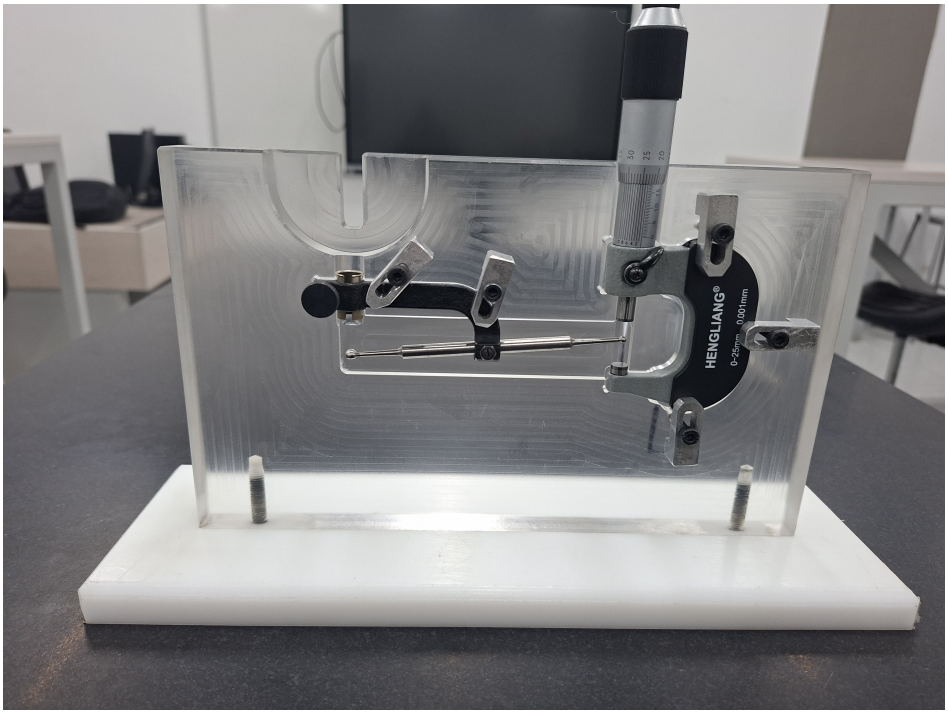


Figura 45: Instalación de la palanca transmisora

La instalación de la palanca transmisora se realiza ubicándola entre el micrómetro patrón y el comparador de carátula, de manera que permita transmitir el desplazamiento generado por el micrómetro hacia el vástago del comparador. Una vez posicionada, la palanca debe fijarse en el punto de apoyo correspondiente mediante los elementos de sujeción del dispositivo, verificando que quede correctamente alineada y con libertad para realizar su movimiento. Finalmente, se debe comprobar que exista un contacto adecuado entre los puntos de transmisión y que el desplazamiento de la palanca se produzca sin interferencias, asegurando la correcta transferencia del movimiento durante el proceso de verificación.

10.5.4. Instalación del comparador de carátula

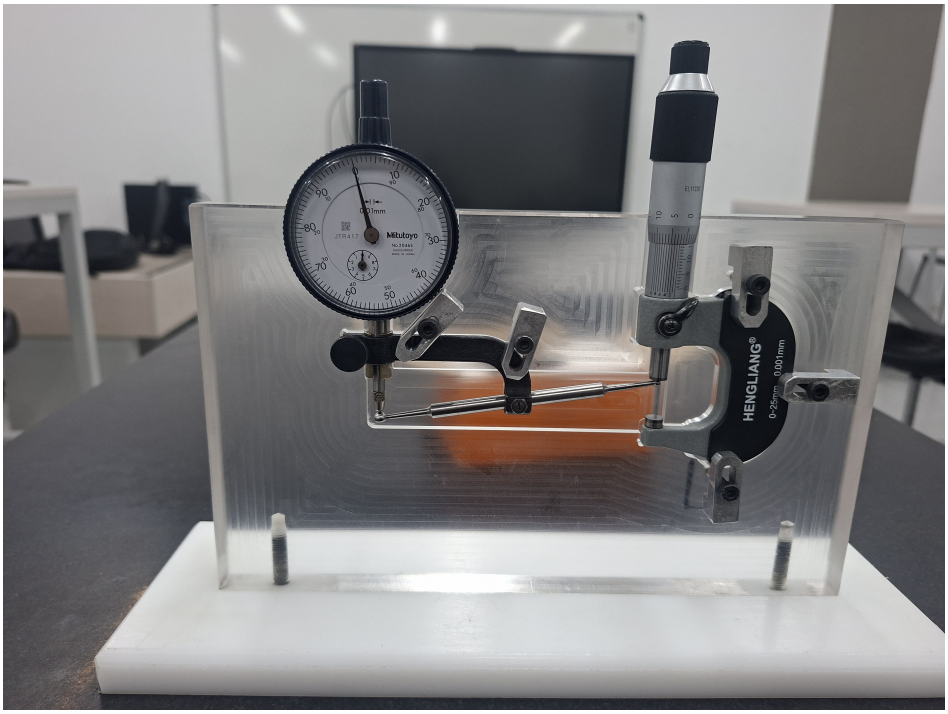


Figura 46: Instalación del comparador de carátula

Instalar el comparador de carátula en el elemento de fijación correspondiente y ajustar los elementos de sujeción hasta obtener una posición estable. El instrumento debe quedar ubicado de manera que su palpador tenga contacto adecuado con la palanca transmisora, permitiendo que el desplazamiento generado por el micrómetro sea transmitido al mecanismo de indicación.

10.5.5. Ajuste de los elementos de fijación

Una vez instalados el micrómetro y el comparador de carátula, verificar y ajustar los elementos de fijación del conjunto. El ajuste no debe ser excesivo, con tan solo un cuarto de giro después de hacer tope para cada tornillo es suficiente para evitar movimientos durante la medición, no se deben aplicar fuerzas excesivas que puedan generar deformaciones o alterar la posición de los componentes.

10.5.6. Comprobación del montaje

Finalizado el montaje, realizar un desplazamiento inicial de baja magnitud mediante el micrómetro y observar la respuesta del comparador de carátula. El movimiento debe producirse de manera continua y la indicación del comparador debe responder al desplazamiento aplicado. Si se presentan movimientos irregulares, interferencias o pérdida de contacto entre los componentes, se deberá detener el procedimiento y revisar nuevamente el montaje.

10.6. Puesta en funcionamiento

Una vez finalizado el montaje del dispositivo metrológico, se debe realizar una preparación inicial antes de comenzar la toma de mediciones. Esta etapa permite comprobar que los instrumentos se encuentran correctamente posicionados, establecer la condición inicial del sistema y garantizar que el desplazamiento generado por el micrómetro sea transmitido adecuadamente al comparador de carátula.

10.6.1. Comprobación del desplazamiento

Accionar el micrómetro de manera gradual para generar un pequeño desplazamiento inicial y observar la respuesta del comparador de carátula. La indicación debe variar de manera continua y acorde con el movimiento aplicado. Durante esta comprobación se debe verificar que la palanca transmisora se desplace libremente y que no se presenten interferencias, pérdidas de contacto o movimientos irregulares.

10.6.2. Posicionamiento inicial del micrómetro



Figura 47: Posicionamiento inicial del micrómetro

Colocar el micrómetro en la posición inicial definida para el procedimiento de verificación. El desplazamiento inicial debe establecerse de acuerdo con el primer punto de medición seleccionado, procurando que exista suficiente recorrido disponible para realizar posteriormente el desplazamiento en el sentido establecido.

10.6.3. Puesta a cero del comparador



Figura 48: Puesta a cero del comparador

Una vez establecida la posición inicial, realizar el ajuste del comparador de carátula hasta establecer la indicación inicial definida para el procedimiento. Esta condición debe registrarse antes de iniciar la aplicación de los desplazamientos de referencia.

10.6.4. Preparación para la toma de datos

Una vez comprobado el correcto funcionamiento del conjunto, el dispositivo se encuentra dispuesto para iniciar el procedimiento de verificación. Antes de comenzar, el operador deberá disponer del formato de registro de mediciones suministrado junto con el dispositivo, en el cual se consignarán los valores obtenidos durante el procedimiento. La toma de datos deberá realizarse de acuerdo con los puntos de medición y las condiciones establecidas en el procedimiento de verificación.

10.7. Procedimiento de verificación

Una vez realizado el montaje y comprobado el correcto funcionamiento del dispositivo, se procede con la verificación del comparador de carátula. El procedimiento consiste en aplicar desplazamientos controlados mediante el micrómetro patrón y registrar las indicaciones obtenidas en el comparador para los diferentes puntos de medición establecidos. Las mediciones deben realizarse de manera gradual y siguiendo la secuencia definida en el formato de registro suministrado.

10.7.1. Aplicación del desplazamiento

Accionar el micrómetro de manera gradual hasta alcanzar el primer punto de medición establecido. El desplazamiento debe realizarse de forma controlada, evitando movimientos bruscos que puedan generar variaciones en la indicación del comparador. Una vez alcanzado el punto correspondiente, se debe permitir que el sistema se estabilice antes de realizar el registro de los valores.

10.7.2. Verificación en sentido ascendente

Realizar el recorrido de medición incrementando progresivamente el desplazamiento del micrómetro hasta completar los puntos establecidos para la prueba. En cada posición se debe registrar la indicación correspondiente del comparador de carátula, manteniendo las mismas condiciones de montaje y operación durante todo el recorrido.

10.7.3. Verificación en sentido descendente

Una vez completado el recorrido ascendente, realizar el desplazamiento en sentido contrario, reduciendo progresivamente la posición establecida en el micrómetro. Registrar nuevamente las indicaciones del comparador en los puntos de medición correspondientes. Este procedimiento permite obtener los datos necesarios para evaluar el comportamiento del instrumento durante el retorno y determinar la diferencia entre las indicaciones obtenidas en ambos sentidos.

10.7.4. Repetición de las mediciones

Repetir el procedimiento de medición de acuerdo con el número de repeticiones establecido para la prueba. Cada repetición debe realizarse bajo las mismas condiciones de montaje y operación, con el propósito de obtener un conjunto de datos que permita evaluar la estabilidad y repetibilidad de las indicaciones del comparador.

10.7.5. Finalización del procedimiento

Una vez completados los puntos de medición y las repeticiones establecidas, verificar que el formato de registro contenga la totalidad de los valores obtenidos. Posteriormente, se debe tener un adecuado almacenamiento del dispositivo, donde, el micrómetro no haga contacto con la palanca de transmisión y ejerciendo fuerza sobre le comparador, luego de esto, se

podrá proceder al análisis de los resultados para determinar los errores asociados al proceso de verificación.

11. Conclusiones

A partir del desarrollo, construcción y evaluación experimental del dispositivo metrológico para la verificación de comparadores de carátula, se presentan las siguientes conclusiones:

1. **Desarrollo y funcionalidad del dispositivo metrológico:** Se logró diseñar y construir exitosamente un dispositivo metrológico funcional, compacto y de bajo costo, utilizando como patrón de referencia un micrómetro con resolución de $0,001$ mm calibrado por un laboratorio acreditado por la ONAC. La estructura diseñada garantizó la estabilidad requerida para transmitir con fidelidad los desplazamientos lineales al palpador del comparador bajo verificación.

2. **Análisis del error geométrico (Numeral 9.8):** El análisis metrológico detallado en el numeral 9.8 evidenció la incidencia directa de los errores geométricos y de alineación (como el error de coseno y la variación en la trayectoria angular de la palanca transmisora de movimiento) sobre las lecturas del comparador. Se demostró que garantizar una estricta co-axialidad y paralelismo entre el husillo del micrómetro, la palanca y el palpador es fundamental para mitigar desviaciones sistemáticas durante la transferencia de movimiento.

3. **Exactitud y comportamiento metrológico de los instrumentos:** Las pruebas experimentales permitieron evaluar la exactitud y repetibilidad de dos comparadores de carátula de resolución $0,01$ mm. Se identificó un comportamiento sistemático de sobreestimación del desplazamiento real ($E_i > 0$) en ambos equipos, registrándose un error máximo de $46,00$ μm para el Comparador #1 y de $91,75$ μm para el Comparador #2, lo que confirma la imperiosa necesidad de realizar verificaciones metrológicas periódicas en entornos de producción.

4. **Reproducibilidad y factibilidad industrial:** Los ensayos ejecutados por diferentes operarios demostraron una alta coherencia en las mediciones obtenidas, confirmando que la variabilidad observada proviene del comportamiento mecánico del instrumento evaluado y no del operador. Esto ratifica la viabilidad técnica del dispositivo desarrollado como una solución accesible, práctica y de bajo costo para talleres y PYMES que carecen de acceso continuo a laboratorios de calibración certificados.

5. **Manual de uso:** La elaboración del manual de uso permitió establecer de manera organizada el procedimiento para la implementación y operación del dispositivo de verificación, incluyendo la instalación de sus elementos, la preparación del sistema, la colocación del comparador y el desarrollo del proceso de medición. Este documento constituye una herramienta de apoyo para garantizar que el dispositivo sea utilizado bajo condiciones adecuadas y de manera uniforme por los diferentes operadores. Asimismo, la documentación de su funcionamiento y configuración proporciona una base para futuras modificaciones, ajustes o mejoras del sistema. Con ello, se considera cumplido el objetivo específico orientado a elaborar un manual de uso que facilite la implementación y futuras mejoras del dispositivo.

12. Referencias

[1] Chen, T., Li, S., & Wu, H. (2022). A novel robot calibration method with plane constraint based on dial indicator. arXiv. https://arxiv.org/abs/2203.XXXXX

[2] Huang, H.-C., Chang, W.-C., Liou, H.-C., & Lui, P. K.-W. (2015). Uncertainty evaluation of the calibration of dial indicator calibrators by laser interferometer. NCSLI Measure Journal, 10(2), 25–30.

[3] Kajánek, P., Kopáčik, A., Kyrinovič, P., Erdélyi, J., Marčiš, M., y Fraštia, M. (2024). Metrology of short-length measurers: Development of a comparator for calibration based on image processing and interferometric measurements. Sensors, 24(5), 1573. https://doi.org/10.3390/s24051573

[4] Kobayoshi, T., & Hang Chui, C. (2005). The positioning influence of dial gauges on their calibration results. Measurement, 38(3), 223–230. https://doi.org/10.1016/j.measurement.2005.02.003

[5] Kučera, Ľ., Patin, B., Gajdošík, T., Palenčár, R., Palenčár, J., y Ujlaky, M. (2020). Application of metrological approaches in the design of calibration equipment for verification of measuring devices. Measurement Science Review, 20(5), 230–235. https://doi.org/10.2478/msr-2020-0028

[6] Schaude, J., & Hausotte, T. (2024). Uncertainty-based determination of recalibration intervals. International Journal of Metrology and Quality Engineering, 15, 2. https://doi.org/10.1051/ijmqe/2023017

[7] Stepień, K., Świderski, J., & Makiela, W. (2025). The importance of measurement uncertainty in gauge block calibration and compliance assessment. Metrology and Measurement Systems. Advance online publication.

[8] Autor desconocido. (2021). Design and validation of a prototype to calibrate the pressure variable in tonometry. DYNA, 88(218), 185–193.

[9] Measurement Journal. (2024). A novel method to calibrate standard angle gauge blocks. Measurement. Elsevier.

[10] Vurcon. (2024, 3 de abril). ¿Qué es y cómo funciona un centro mecanizado CNC? Vurcon. https://www.vurcon.com/blogs/noticias/que-es-y-como-funciona-un-centro-mecanizado-cnc

[11] GstarCAD. (s.f.). CAD/CAM: What is CAD/CAM software? GstarCAD. https://www.gstarcad.net/support/cad-cam-what-is-cad-cam-software?id=787

[12] Mitutoyo. (s. f.). Calibrador de relojes UDT-2 – 170-102-12. Mitutoyo Loja Oficial. Recuperado el 1 de octubre de 2026, de https://www.mitutoyo.com.br/calibrador-de-relogios-udt-2-170-102-12.html

[13] Mitutoyo. (s. f.). Calibrador de relojes 521-103. Mitutoyo Loja Oficial. Recuperado el 1 de octubre de 2026, de https://www.mitutoyo.com.br/calibrador-de-relogios-521-103.html

[14] Mitutoyo. (s. f.). Calibrador de reloj i-Checker 170-402. Mitutoyo Loja Oficial. Recuperado el 1 de octubre de 2026, de https://www.mitutoyo.com.br/calibrador-de-relogio-i-checker-170-402.html