

Trabajo Fin de Grado

Caracterización de los errores que afectan al proceso de escaneo en una nanoposicionadora 2D de alto rango de diseño propio.

Characterization of the errors that affect scanning process in a custom-made high-range 2D nanopositioning platform.

Autora

Raquel Orduna Martínez

Directores

José Antonio Albajez García

Lucía Candela Díaz Pérez

Grado en Ingeniería de Tecnologías Industriales

ESCUELA DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

CURSO 2022/2023



RESUMEN

La nanotecnología tiene cada vez más importancia y es más esencial en el mundo de la Ciencia y la Tecnología. Por ello, el Grupo de Ingeniería de Fabricación y Metrología Avanzada (GIFMA) de la Universidad de Zaragoza ha desarrollado una nanoposicionadora de alto rango, llamada NanoPla [1].

La NanoPla es un sistema bidimensional de posicionamiento que alcanza una precisión submicrométrica en un amplio rango de trabajo en los ejes X e Y (50 mm x 50 mm).

En trabajos anteriores se le integró a la plataforma diferentes instrumentos de medida para la caracterización metrológica de superficies a escala submicrométrica (eje Z) en su amplio rango de trabajo, así como un porta muestras piezoeléctrico, el cual permite un posicionamiento más fino (rango de trabajo de $100\text{ }\mu\text{m} \times 100\text{ }\mu\text{m} \times 10\text{ }\mu\text{m}$) para el escaneo de una pieza y se caracterizaron los errores debidos al sensor confocal.

En el presente Trabajo Fin de Grado se analizará experimental y teóricamente, y se corregirán los errores debidos al montaje del sensor confocal en la plataforma móvil de la NanoPla, y la posicionadora piezoeléctrica, la cual está apoyada en tres tornillos micrométricos de nivelación, en la posicionadora 2D de alta precisión (NanoPla).

En primer lugar, se analizará el modelo geométrico del montaje del sensor confocal, la posicionadora piezoeléctrica y los tres tornillos micrométricos en la NanoPla. Antes, será necesario caracterizar los errores que introducen los componentes, como pueden ser la caracterización de errores del nPoint estudiando cómo influye la trayectoria, la digitalización de datos y el fenómeno de la histéresis. También se caracterizarán posibles errores de repetibilidad del tornillo micrométrico motorizado y del acople cinemático del soporte del sensor confocal.

Para ello, se emplearán bloques patrón y otros patrones, además de instrumentos de medida y montajes externos.

Palabras clave: medición, NanoPla, sensor confocal, plataforma móvil, posicionadora lineal, microscopio de variación focal, patrón de contorno, tornillos micrométricos.

ABSTRACT

Nanotechnology is becoming more and more important and essential in the world of Science and Technology. For this reason, the Manufacturing Engineering and Advanced Metrology Group (Grupo de Ingeniería de Fabricación y Metrología Avanzada, GIFMA) of the University of Zaragoza has developed a large working range nanopositioning platform, called NanoPla. The NanoPla is a two-dimensional positioning system that achieves submicrometer precision over a long travel working range (50 mm x 50 mm).

In previous projects, different measuring instruments were integrated into the platform for the metrological characterization of surfaces at a submicron scale (Z axis) in its large working range, as well as a piezoelectric stage, which allows a fine positioning (100 μm x 100 μm x 10 μm working range) for scanning a sample. The errors due to the confocal sensor were characterized.

In this Project, the errors due to the assembly of the confocal sensor and the piezoelectric positioner, which is supported by three micrometric leveling screws, in the high precision 2D positioner (NanoPla) will be analyzed experimentally and theoretically and corrected.

First, the geometric model of the assembly of the confocal sensor, the piezoelectric positioner and the three micrometric screws in the NanoPla will be analyzed. Before, it will be necessary to characterize the errors introduced by the components such as the characterization of nPoint errors, studying how the trajectory, the data digitization and the phenomenon of hysteresis influence. Possible repeatability errors of the motorized micrometer screw and of the kinematic coupling of the confocal sensor support will also be characterized.

For this, pattern blocks and external assemblies will be used.

Keywords: measurement, NanoPla, confocal sensor, moving platform, linear stage, focus-variation microscope, micro-contour standard, micrometer screws.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, agradecer el tiempo y dedicación de mis directores para la realización de este proyecto.

También agradecer a mi familia, amigos y compañeros por su apoyo continuo.

Índice general

RESUMEN	3
ABSTRACT	4
AGRADECIMIENTOS.....	4
Índice general.....	5
Índice de figuras	7
Índice de tablas	8
1. Introducción	9
1.1 Objetivo y justificación	9
1.2 Alcance	12
2. Análisis del diseño de la plataforma	14
2.1 Confocal y soporte	15
2.2 Posicionadora comercial nPoint.....	16
2.3 Sistema de nivelación mediante tornillos micrométricos.....	16
2.4 Modelo cinemático de la plataforma	17
3. Caracterización experimental de los errores que afectan a la medida.....	20
3.1 Caracterización de errores del nPoint.....	20
3.1.1 Comprobación de la planitud del patrón	21
3.1.2 Efecto de la trayectoria en los errores de medición	23
3.1.3 Efecto de la digitalización de datos	26
3.1.4 Efecto de la histéresis.....	27
3.1.5 Obtención del ángulo de inclinación	29
3.2 Caracterización de errores de repetibilidad.....	31
3.2.1 Estudio de repetibilidad del acople cinemático	31
3.2.2 Estudio de repetibilidad del tornillo micrométrico motorizado	36
4. Estudio de la deriva térmica a largo plazo	40
4.1 Estudio sobre un patrón cerámico plano	41
4.2 Ensayo sobre un patrón de contorno.....	43
4.2.1 Ensayo sobre el eje Z	44
4.2.2 Estudio sobre el eje X	46
4.2.3 Estudio sobre el eje Y	48
5. Conclusiones y líneas de trabajo futuras	51
Referencias.....	52
Anexo I: Principales componentes.....	54
Anexo II: Caracterización de errores del nPoint (I)	70

Anexo III: Caracterización de errores del nPoint (II).....	79
Anexo IV: Código Matlab estudio de la deriva térmica y ajuste.....	90
Anexo V: Modelo cinemático de la plataforma.....	93
Anexo VI: Estudio de repetibilidad del tornillo micrométrico motorizado.....	98

Índice de figuras

Figura 1. Niveles de la estructura de la NanoPla. Fuente: [6]	9
Figura 2. Esquema del rango de trabajo de la NanoPla con la estructura de dos etapas. Fuente: [5]	10
Figura 3. NanoPla y principales componentes. Fuente : [1]	11
Figura 4. Sensor confocal y posicionadora piezoeléctrica integrados en la NanoPla.	12
Figura 5. Marco metrológico inferior.	14
Figura 6. Ensamble soporte nPoint.	15
Figura 7. Parte móvil de la plataforma.	15
Figura 8. Confocal y soporte.	16
Figura 9. Acople cinemático.	16
Figura 10. Disposición espacial tornillos micrométricos.	17
Figura 11. Esquematación del ciclo de medida completo de la plataforma NanoPla. Fuente: [6].	17
Figura 12. Microscopio de variación de foco Alicona.	21
Figura 13. Patrón cerámico plano impregnado con vaselina medido con Alicona.	23
Figura 14. Plano puntos aleatorios, Zmot=0mm.	24
Figura 15. Plano puntos aleatorios, Zmot=1mm.	24
Figura 16. Cruz origen, paso de 10 μm , altura nula del tornillo micrométrico motorizado.	25
Figura 17. Cruz origen, paso de 25 μm , altura nula del tornillo micrométrico motorizado.	25
Figura 18. Cruz origen, DAQ, paso de 10 μm	26
Figura 19. Cruz origen, software nPoint, paso de 25 μm	27
Figura 20. Ensayo ida-vuelta-ida, Zmot=0 mm, comenzando por coordenadas negativas.	28
Figura 21. Ensayo ida-vuelta-ida, Zmot=1 mm, comenzando por coordenadas negativas.	28
Figura 22. Sistema flexible del nPoint.	29
Figura 23. Ajuste por mínimos cuadrados eje Y, Zmot=0 mm, paso de 25 μm	30
Figura 24. Ajuste por mínimos cuadrados eje X, Zmot=0mm, paso de 25 μm	30
Figura 25. Croquis comprobación del error debido a la inclinación.	31
Figura 26. Acople cinemático.	32
Figura 27. Ensayo repetibilidad acople cinemático sin lubricante eje Z.	32
Figura 28. Ensayo repetibilidad acople cinemático con lubricante eje Z.	33
Figura 29. Patrón de contorno.	34
Figura 30. Ensayo repetibilidad acople cinemático ejes X e Y.	34
Figura 31. Croquis de estudio de la zona inclinada.	35
Figura 32. Variación lecturas tornillo motorizado frente a la altura impuesta, en 3 ensayos ida y vuelta.	38
Figura 33. Δz medida por el confocal en ensayo: t=24h, nPoint off.	41
Figura 34. Variación de la temperatura en el ensayo: t=24h, nPoint off.	41
Figura 35. Zoom Δz medida al alcanzar el régimen estacionario medidas por el confocal en ensayo: t=24h, nPoint off.	42
Figura 36. Ajuste Zconf con temperatura.	43
Figura 37. Variación de la temperatura en el ensayo: t=24h, nPoint off.	44
Figura 38. Δz medida por el confocal en ensayo: t=24h, nPoint off.	45
Figura 39. Zoom variación de temperaturas.	45
Figura 40. Zoom confocal.	45
Figura 41. Δz medida por el confocal en ensayo: t=24h, nPoint off.	46
Figura 42. Variación de la temperatura en el ensayo: t=24h, nPoint off.	47

Figura 43. Zoom variación de temperaturas.	47
Figura 44. Zoom confocal.	47
Figura 45. Δz medida medidas por el confocal en ensayo: t=24h, nPoint off.	48
Figura 46. Variación de la temperatura en el ensayo: t=24h, nPoint off.	49
Figura 47. Zoom variación de temperaturas.	49
Figura 48. Zoom confocal.	49

Índice de tablas

Tabla 1. Errores de la nanoposicionadora comercial (npoint), Fuente: [5].	20
Tabla 2. Especificaciones de InfiniteFocusSL de Alicona para una magnificación de 10x. Fuente: [9]	22
Tabla 3. Rugosidad media, cuadrática y pico a pico.....	22
Tabla 4. Obtención del ángulo de inclinación.	31
Tabla 5. Lectura del sensor confocal en μm , entre distintas posiciones del tornillo motorizado.	37
Tabla 6. Lectura del sensor confocal en μm , para un desplazamiento en Z menor a 1 mm.	38

1. Introducción

El objeto de este capítulo es servir de introducción a este trabajo. Durante su desarrollo se expondrá el objetivo y justificación y alcance de la presente investigación.

El objetivo y justificación constará de una descripción del marco en el que se desarrolla el objeto del trabajo y contenido del mismo, de modo que sirva para entender por qué se ha planteado este tema para su desarrollo. También se dará evidencia a lo realizado en trabajos anteriores.

En el alcance, se definirá hasta qué punto del objeto se va a trabajar y lo que se quiere alcanzar a lo largo del trabajo.

1.1 Objetivo y justificación

Hoy en día, hay una clara tendencia dentro de los sistemas más modernos de fabricación hacia la producción altamente paralelizada de múltiples pequeñas estructuras sobre grandes sustratos (de hasta varios metros cuadrados) pero que requieren de altos niveles de detalle, incluso por debajo del micrómetro. Así, el control de calidad de estos nuevos elementos requiere del desarrollo de nuevos equipos o técnicas de medición capaces de integrar simultáneamente altas resoluciones y grandes campos de medida, teniendo siempre en cuenta el concepto de la trazabilidad metrológica indispensable dentro de cualquier sistema de garantía de la calidad.

La nanotecnología tiene cada vez más importancia y es más esencial en el mundo de la Ciencia y la Tecnología. Las plataformas de nanoposicionamiento son imprescindibles en aplicaciones tales como máquinas de medición o máquinas-herramientas de nanofabricación. Sin embargo, actualmente no existen plataformas de nanoposicionamiento comerciales con precisión nanométrica con un rango de trabajo grande [2] [3], las cuales son necesarias para aplicaciones como la litografía, y la caracterización de superficies con microscopios ópticos y de escaneo [4]. Por ello, el Grupo de Ingeniería de Fabricación y Metrología Avanzada (GIFMA) de la Universidad de Zaragoza ha desarrollado una nanoposicionadora de alto rango, llamada NanoPla, la cual está diseñada para alcanzar una precisión submicrométrica en su amplio rango de trabajo de 50 mm × 50 mm.

La NanoPla tiene una estructura de tres niveles que consta de una base inferior y otra superior que están fijas, y una plataforma móvil situada en medio, como se puede ver en la Figura 1.

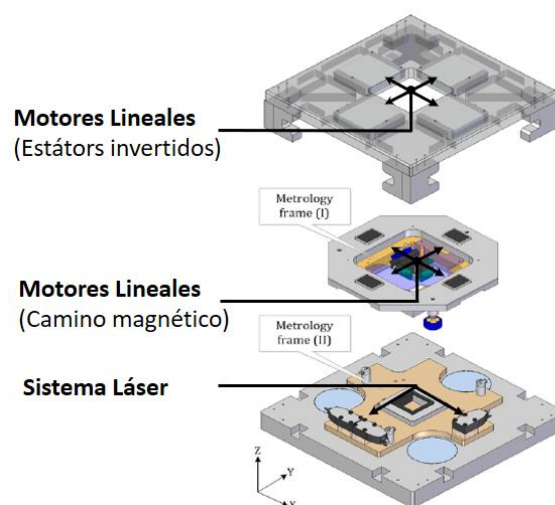


Figura 1. Niveles de la estructura de la NanoPla. Fuente: [6]

La plataforma móvil del sistema levita gracias a tres cojinetes de aire, y cuatro motores lineales Halbach conforman el sistema de actuación. Los estatores de los motores lineales están fijos a la base superior, mientras que los caminos magnéticos están situados en la plataforma móvil. Un sistema bidimensional de interferómetros láser es usado como sensor de posición, los cabezales de los láseres están situados en el marco metrológico de la base inferior, mientras que los espejos planos, con respecto a los que se mide el desplazamiento, están fijos al marco metrológico de la plataforma móvil. Los sistemas interferómetros láser ofrecen una excelente precisión y trazabilidad directa. Además, usar espejos planos como retrorreflectores permite medir el desplazamiento coplanario de dos ejes [1].

La NanoPla presenta una estructura de movimiento de dos etapas. La primera, ya comentada, es la de amplio rango 50 mm x 50 mm que recorre la plataforma móvil. La segunda consiste en un posicionamiento más fino de una posicionadora comercial con actuadores piezoeléctricos. Dicha posicionadora (modelo NPXY100Z10A de la marca nPoint [5]) está diseñada concretamente para llevar a cabo el movimiento de escaneo en aplicaciones metrológicas microscópicas y tiene un rango de trabajo de 100 μm x 100 μm x 10 μm (Figura 2). El catálogo y las especificaciones de la posicionadora se encuentran en el Anexo I: Principales componentes.

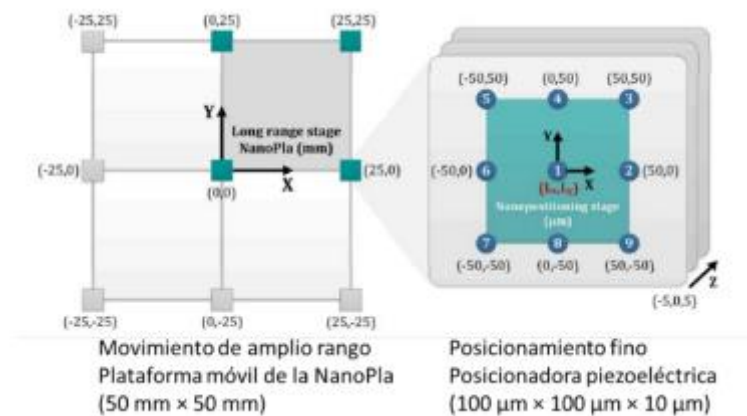


Figura 2. Esquema del rango de trabajo de la NanoPla con la estructura de dos etapas. Fuente: [5]

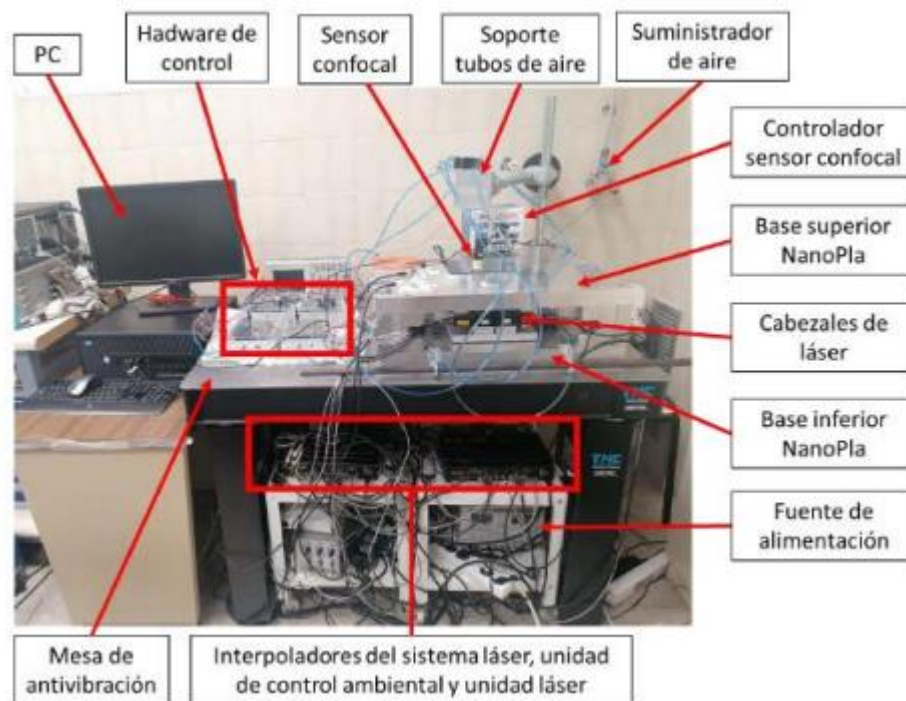


Figura 3. NanoPla y principales componentes. Fuente : [1]

Como ya se ha comentado anteriormente, este primer prototipo de la NanoPla tiene como finalidad la caracterización metrológica de superficies a escala submicrométrica en un rango de trabajo de 50 mm x 50 mm. Para ello se ha integrado en la plataforma móvil un instrumento de medida, un sensor confocal cromático que mide en 1D sin establecer contacto con la pieza a medir, en un rango de 4000 μm y con una resolución de 0,122 μm . Este sensor confocal es el modelo CL4 MG 35 (Figura 3).

En trabajos anteriores se ha desarrollado un sistema de control de posicionamiento de la plataforma móvil que coordina el funcionamiento de los cuatro motores Halbach de la NanoPla e integra el sistema láser bidimensional como sensor para la realimentación de la posición [6]. El programa de control y su interfaz se han desarrollado en Simulink (Matlab). La incertidumbre de posicionamiento ($k=2$) del sistema de control bidimensional resulta ser $\pm 0,5 \mu\text{m}$ en todo el rango de trabajo.

Además, se han diseñado elementos auxiliares con acoples cinemáticos que permiten la integración del sensor confocal en la plataforma móvil de la NanoPla, y la posicionadora piezoeléctrica en el marco metrológico de la base inferior, que a través de un soporte va apoyada sobre tres tornillos micrométricos que permiten su nivelado. En la Figura 4, se observa una imagen del sensor confocal integrado en la NanoPla. Sobre el marco metrológico de la base inferior, se encuentra la posicionadora piezoeléctrica apoyada sobre tres tornillos micrométricos que no se ven en la imagen, ya que están bajo el marco metrológico (Figura 5).

Estos tres tornillos micrométricos permiten nivelar la posicionadora piezoeléctrica, para colocar la superficie de la muestra en el rango de medida.



Figura 4. Sensor confocal y posicionadora piezoeléctrica integrados en la NanoPla.

El objetivo principal del presente proyecto será analizar los errores generales de unos de los componentes integrados en la NanoPla como serían el sensor confocal y su soporte, el tornillo micrométrico motorizado o la posicionadora piezoeléctrica comercial (nPoint). Para ello se realizarán los ensayos convenientes en cada caso para posteriormente poder extraer las conclusiones necesarias.

Para más información acerca de los componentes mencionados, ver Anexo I: Principales componentes.

1.2 Alcance

Dentro de la NanoPla se pueden distinguir dos tipos de movimiento: el movimiento de escaneo y el movimiento de aproximación. En este trabajo únicamente se trabajará mediante el movimiento de escaneo que sería el movimiento de la posicionadora piezoeléctrica comercial (nPoint) mediante un software.

Antes de la caracterización de los errores experimentales, se ha completado el montaje de la NanoPla con sus tres tornillos micrométricos, la nanoposicionadora y el sensor confocal. Una vez completado, se situó la plataforma móvil en el centro del rango mediante el movimiento de los motores lineales; para ello se utilizó el movimiento de aproximación, el cual no volverá a utilizarse en el resto del desarrollo del trabajo dado que se utiliza en un amplio rango de trabajo y en este caso se trabajará en un rango de $100\mu\text{m} \times 100\mu\text{m} \times 10\mu\text{m}$, por lo que será de uso el movimiento de escaneo.

El procedimiento de medida se llevará a cabo de la siguiente manera: El sistema de posicionamiento de la plataforma móvil con cuatro motores lineales realizará el movimiento principal de aproximación en todo el rango de trabajo, situando el instrumento de medida en

las coordenadas introducidas por el usuario. Seguidamente, la plataforma móvil y por tanto el instrumento quedarán estáticos y la posicionadora piezoeléctrica realizará el movimiento de escaneo de la pieza a medir [1].

Para ver cómo afectan las desviaciones angulares a la medida final del sensor confocal, se establecerá un modelo matemático del sistema que permita conocer cómo se propagan las desviaciones geométricas, y cómo afectan al resultado final de la medida.

Por otra parte, al tratarse de un sistema de medida de resolución submicrométrica, será importante analizar otras fuentes de error que puedan ser significativas, como la repetibilidad de los tornillos micrométricos, la de los acoples cinemáticos del sensor confocal al recolocarlos o los errores del nPoint.

Para ello se utilizará un bloque patrón cerámico plano para validar los resultados obtenidos y también un patrón de contorno de carburo de tungsteno, en el que se estudiará su parte plana y su parte inclinada, tanto en la dirección X como en la dirección Y para observar posibles variaciones.

Este patrón cerámico plano se medirá también con un microscopio de variación de foco de Alicona, disponible en el laboratorio de metrología del departamento para poder asegurar su planitud. De esta manera, se podrán analizar los errores de medición de la NanoPla con el confocal integrado.

Se espera que la principal fuente de error en las medidas sea la dilatación térmica de las piezas y de la estructura del propio sistema de medida, por ello se cuenta con un sistema externo de sensores térmicos que permitirá monitorizar la temperatura de los componentes de la NanoPla.

Por tanto, para la realización de este trabajo se requiere el uso de la NanoPla, la posicionadora lineal, el sensor confocal, el microscopio de variación focal Alicona, patrones (de contorno y plano), sensores de temperatura, el software MATLAB-Simulink y el propio software del nPoint.

En primer lugar, se caracterizarán las posibles fuentes de error del nPoint, para posteriormente obtener el ángulo de inclinación a partir de las medidas del sensor confocal y el modelo matemático previamente desarrollado.

También, se caracterizarán los posibles errores debidos a la repetibilidad tanto del acople cinemático del soporte del sensor confocal como del tornillo micrométrico motorizado, para ello se utilizará un patrón cerámico plano. Se realizará en el propio montaje de la plataforma.

Por otro lado, al igual que anteriormente, se van a caracterizar los errores de repetibilidad en el eje X y el eje Y debidos al sensor confocal y su soporte, para ello se utilizará un patrón de contorno, siendo de estudio tanto su parte plana como su parte inclinada.

Para finalizar, se harán 4 ensayos a largo plazo de la deriva térmica, para los que se utilizarán los dos tipos de patrón mencionados anteriormente. En el patrón de contorno, se medirá tanto en la superficie plana como en la inclinada orientado según el eje X y según el eje Y.

2. Análisis del diseño de la plataforma

En este apartado se analizará el diseño de la NanoPla con el objetivo de caracterizar los errores de la misma posteriormente.

El ensamble de los elementos estructurales de la NanoPla que afectan a la medición en la fase de escaneo está formado por: [1]

- Base inferior: esta base está apoyada en la mesa de trabajo y hace de soporte de la plataforma. En ella se apoyan los cabezales del láser y las tres piezas de flexión para el marco metrológico inferior.
- Marco metrológico inferior (Figura 5): su función es soportar la nanoposicionadora piezoeléctrica, los tres cabezales del interferómetro láser (para medir la posición de la plataforma móvil en el plano XY) y las tres sondas capacitivas (para cuantificar desviaciones en el eje Z y rotaciones en torno a los ejes X e Y).

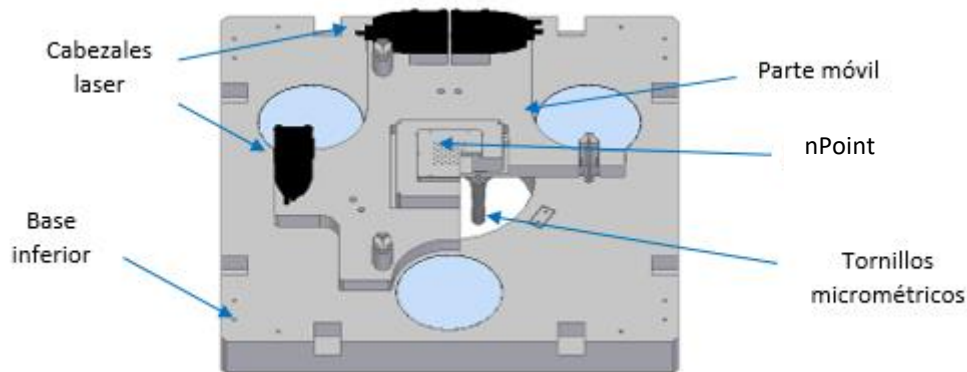


Figura 5. Marco metrológico inferior.

- Nanoposicionadora piezoeléctrica (nPoint): Es una posicionadora comercial y consiste en un sistema bidimensional de posicionamiento que alcanza una precisión submicrométrica en su rango de trabajo de $100\text{ }\mu\text{m} \times 100\text{ }\mu\text{m} \times 10\text{ }\mu\text{m}$.
- Portamuestras: se apoya en la nanoposicionadora piezoeléctrica y sirve para sustentar la muestra a estudiar.
- Tornillos micrométricos (3 unidades: dos manuales y uno motorizado) que permitirán corregir las desviaciones angulares entre el plano XY de la nanoposicionadora piezoeléctrica y de la NanoPla. Los catálogos de los tornillos micrométricos manual y motorizado se encuentran en el Anexo I: Principales componentes.
- Acople tornillos micrométricos (3 unidades): sistema de acople de la nanoposicionadora al marco metrológico inferior de la NanoPla.
- Cojinetes de aire (3 unidades): son los apoyos de la plataforma móvil. En estas piezas entra aire a presión y hace que la plataforma levite sobre la base inferior.
- Plataforma móvil (Figura 7): sirve de base para el marco metrológico superior, incluye el camino magnético de los motores lineales y para las piezas de flexión del marco metrológico superior.

- Marco metrológico superior: su función es soportar los espejos de posicionamiento en los que se reflejan los haces láseres. Sobre él se posicionará el instrumento de medida, utilizando un elemento de acople llamado en el presente trabajo como soporte del sensor.
- Soporte del sensor: esta pieza es la que sujeta al sensor, fue diseñado en trabajos anteriores [1] y se caracteriza por su acople cinemático mediante el cual queda completamente sujeto y se pueden evitar desviaciones en las medidas tras los movimientos de la NanoPla (Figura 8 y 9).
- Sensor confocal: instrumento de medida acoplado en la NanoPla.

En este trabajo se analizará detalladamente el sensor confocal junto su soporte, el nPoint y el sistema de nivelación formado por los 3 tornillos micrométricos, siendo de estudio el tornillo micrométrico motorizado.

Para más información ver Anexo I: Principales componentes.

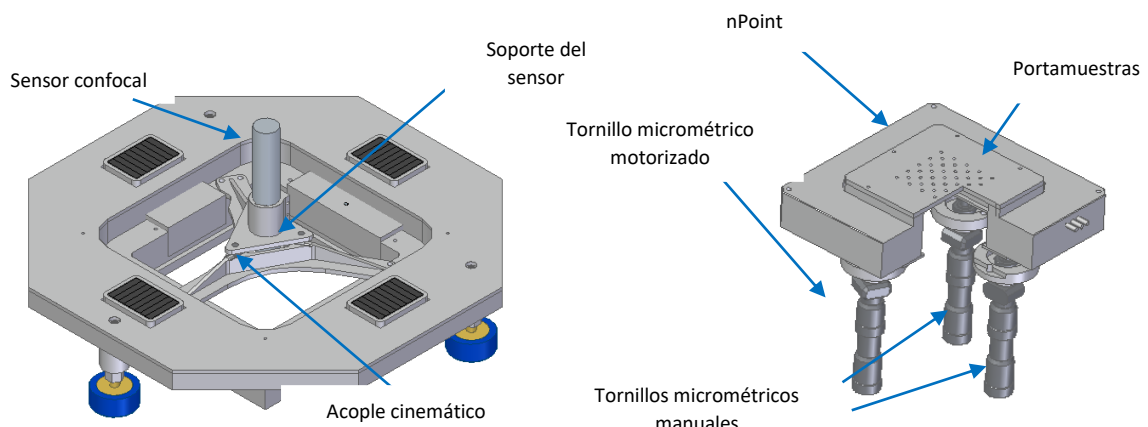


Figura 7. Parte móvil de la plataforma.

Figura 6. Ensamble soporte nPoint.

2.1 Confocal y soporte

Para la realización de los distintos ensayos se utilizará un sensor confocal cromático que mide en 1D sin establecer contacto con la pieza a medir, en un rango de 4000 μm y con una resolución de 0,122 μm . Este sensor confocal es el modelo CL4 MG 35. El principio de funcionamiento del sensor confocal y su catálogo se encuentra en el Anexo I: Principales componentes.

Dicho sensor está integrado a la plataforma mediante un soporte y un adaptador desmontable gracias al uso de tres pares de acoplamientos cinemáticos constituidos por 6 cilindros y 3 esferas, restringiéndose así los seis grados de libertad de forma simétrica.

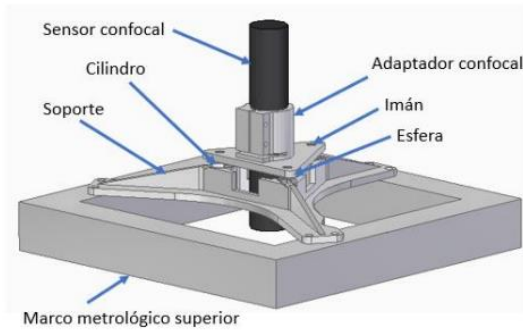


Figura 8. Confocal y soporte.

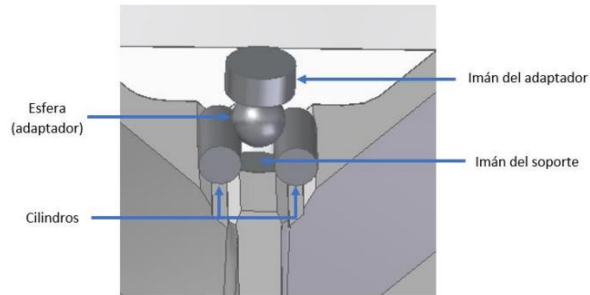


Figura 9. Acople cinemático.

2.2 Posicionadora comercial nPoint

El siguiente componente a estudiar en detalle es el nPoint, una nanoposicionadora comercial integrada a la NanoPla mediante los tres tornillos micrométricos comentados anteriormente, los cuales permiten su ajuste. Ver Anexo I: Principales componentes.

El nPoint está acoplado cinemáticamente a la base inferior de la NanoPla. Dicha nanoposicionadora está diseñada concretamente para llevar a cabo el movimiento de escaneo en aplicaciones metrológicas microscópicas y tiene un rango de trabajo de $100\text{ }\mu\text{m} \times 100\text{ }\mu\text{m} \times 10\text{ }\mu\text{m}$. En este trabajo únicamente se realizarán ensayos mediante el nPoint desplazándonos en los ejes X e Y.

2.3 Sistema de nivelación mediante tornillos micrométricos

Para poder corregir las desviaciones angulares entre el plano XY de la nanoposicionadora (nPoint) y de la NanoPla existe un sistema de acople que requiere de tres tornillos micrométricos (dos manuales y uno motorizado). En los tres tornillos micrométricos el material es acero inoxidable 304 y proporcionan un posicionamiento submicrométrico en un recorrido de 13 mm los manuales y de 10 mm el motorizado. Las características de los tres tornillos micrométricos se encuentran en el Anexo I: Principales componentes.

El movimiento vertical de la nanoposicionadora se debe conseguir a través de los tres tornillos micrométricos mediante la extensión o contracción del vástago. Por ello, la parte de los tornillos micrométricos que está en contacto con la pieza a diseñar es la esfera, situada en la parte superior de los mismos.

En cuanto al micrómetro motorizado, se trata del modelo M-230.10 de la marca PI [7]. Este micrómetro permite un movimiento incremental con una repetibilidad de sólo 100 nm y un desplazamiento en el eje Z de 0 a 10 mm. Es recomendable que la variación de la altura del tornillo micrométrico motorizado no sea muy amplia, por lo que nos desplazaremos en un rango pequeño para asegurar que no se desencaje el acople cinemático del mismo.

Estos micrómetros permanecen inmóviles en el plano XY y se mueven en Z según la extensión o contracción del vástago (Zmot). Para asegurar la repetibilidad en el movimiento del vástago de los tornillos y aprovechando que este desplazamiento se transmite mediante la esfera de dichos tornillos micrométricos, hay un acople cinemático entre las esferas y unos cilindros.

De esta forma, se consigue que los cilindros del acople cinemático hagan de guía para las esferas en el movimiento de extensión/contracción de los micrómetros, el cual provoca la inclinación de la nanoposicionadora.

En la Figura 10 se puede observar la disposición espacial de los tornillos micrométricos (mm), siendo el tornillo micrométrico motorizado el ubicado en la punta del triángulo isósceles.

Zmot sería la distancia en Z a introducir manualmente en el software del tornillo motorizado (PI micromove) para variar su altura.

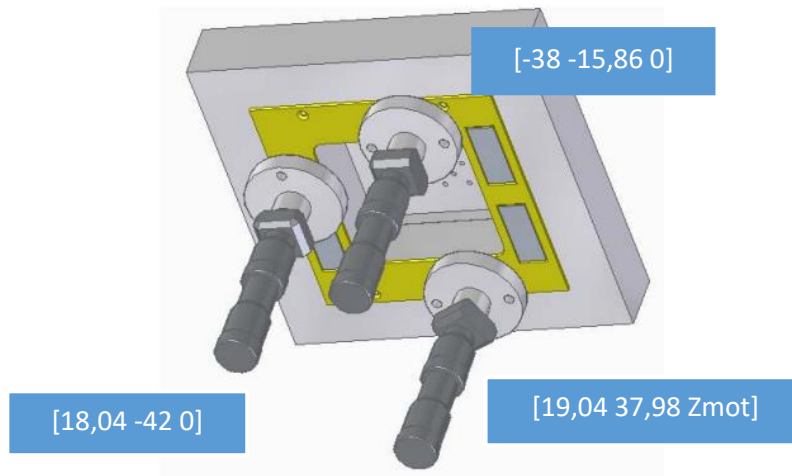


Figura 10. Disposición espacial tornillos micrométricos.

2.4 Modelo cinemático de la plataforma

A diferencia de los modelos clásicos de error matemático en los que se superponen los movimientos lineales de los tres ejes, NanoPla implementa un movimiento en dos etapas, que combina el movimiento plano grueso de la plataforma móvil (largo alcance) y la traslación fina en los ejes X, Y y Z de la etapa piezoeléctrica (rango corto). [8]

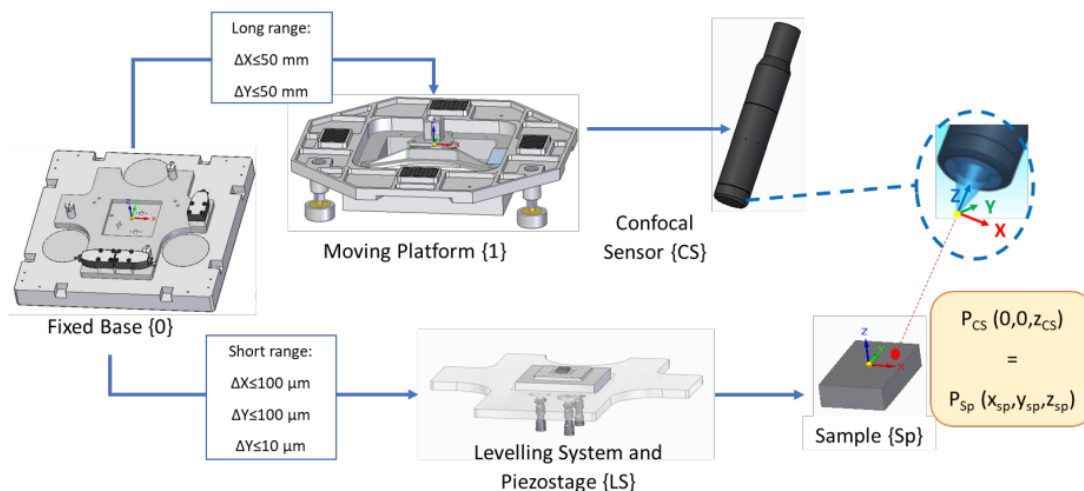


Figura 11. Esquematización del ciclo de medida completo de la plataforma NanoPla. Fuente: [6].

En trabajos anteriores se ha desarrollado el siguiente modelo cinemático de la plataforma [6] :

La Figura 11 muestra el esquema global del bucle de medición del NanoPla, que involucra el marco metrológico (I) y el marco metrológico (II). Hay dos cadenas cinemáticas que comienzan en la base fija {0}. Se trabajará matricialmente, y habrá un cambio de base, ya que existe una parte fija y una móvil y habrá movimiento de rotación y de traslación.

El segundo elemento de la cadena superior es la plataforma móvil {1} que realiza el movimiento aproximado (50 mm × 50 mm) en el plano XY. El instrumento de medición, un sensor confocal en este caso {CS}, se fija a la plataforma móvil a través del soporte.

El segundo elemento de la cadena inferior es el sistema de nivelación y la etapa piezoeléctrica {LS} que se consideran como un conjunto ya que están unidos entre sí por un acoplamiento cinemático. La platina piezoeléctrica proporciona el movimiento fino XYZ (100 μm × 100 μm × 10 μm) a la muestra {Sp} que se coloca en su portamuestras. El final de ambas cadenas es el punto donde el haz del sensor confocal PCS (0, 0, z_{CS}) se cruza con la superficie de la muestra PSp (x_{sp}, y_{sp}, z_{sp}). Estos dos puntos mencionados deben coincidir: P_{CS}=P_{SC}

Dependiendo del camino que se tome a la hora de realizar el ciclo de medida en la NanoPla, se obtienen diferentes ecuaciones [6] cuyo desarrollo se puede encontrar en el Anexo V: Modelo cinemático de la plataforma.

Ahora, lo que se busca es a partir del desplazamiento del nPoint poder encontrar posibles errores angulares o errores de rotación. Dado que el desplazamiento solo será en los ejes X e Y del nPoint, se simplificará el modelo eliminando todo lo que depende del eje Z del nPoint y cualquier movimiento de la plataforma móvil. Obteniéndose lo siguiente:

$$Z_{P_s} = (z_{CS}^{exp} - \varepsilon_{CS}) + (-x^{\{S\}} - \delta_x^{\{S\}}) \cdot \varepsilon_{y,o}^{LS} + (y^{\{S\}} + \delta_y^{\{S\}}) \cdot \varepsilon_{x,o}^{LS} \quad (1)$$

Siendo Z_{P_s} igual a la lectura medida con el sensor confocal (quitando los errores), más el desplazamiento en X multiplicado por la rotación de la posicionadora en Y (inclinación en X), más el desplazamiento en Y multiplicado por la rotación de la posicionadora en X (inclinación en Y).

Para poder corregir los errores angulares del nPoint (nivelarlo), tenemos que despejar $\varepsilon_{x,o}^{LS}$ y $\varepsilon_{y,o}^{LS}$, moviendo el nPoint ($x^{\{S\}}$, $y^{\{S\}}$).

Si se hace el desplazamiento sólo en el eje X del nPoint:

$$\text{Posición inicial: } Z_{P_s}^0 = (z_{CS}^{exp,0} - \varepsilon_{CS}^0) + (-x^{\{S\},0} - \delta_x^{\{S\},0}) \cdot \varepsilon_{y,o}^{LS} \quad (2)$$

$$\text{Posición final: } Z_{P_s}^1 = (z_{CS}^{exp,1} - \varepsilon_{CS}^1) + (-x^{\{S\},1} - \delta_x^{\{S\},1}) \cdot \varepsilon_{y,o}^{LS} \quad (3)$$

Como lo que estamos midiendo es un patrón plano, $Z_{P_s}^0 = Z_{P_s}^1$, entonces:

$$\begin{aligned} (z_{CS}^{exp,0} - \varepsilon_{CS}^0) + (-x^{\{S\},0} - \delta_x^{\{S\},0}) \cdot \varepsilon_{y,o}^{LS} \\ = (z_{CS}^{exp,1} - \varepsilon_{CS}^1) + (-x^{\{S\},1} - \delta_x^{\{S\},1}) \cdot \varepsilon_{y,o}^{LS} \end{aligned} \quad (4)$$

Además, tomando una situación como referencia, se puede suponer que en la posición inicial, $-x^{\{S\},0} - \delta_x^{\{S\},0} = 0$ y $(z_{CS}^{exp,0} - \varepsilon_{CS}^0) = 0$:

$$-(z_{CS}^{exp,1} - \varepsilon_{CS}^1) + (-x^{\{S\},1} - \delta_x^{\{S\},1}) \cdot \varepsilon_{y,o}^{LS} = 0 \quad (5)$$

Si se hace lo mismo para un desplazamiento en el eje Y del nPoint, se obtiene el mismo resultado:

$$-(z_{CS}^{exp,1} - \varepsilon_{CS}^1) + (+y^{\{S\},1} + \delta_y^{\{S\},1}) \cdot \varepsilon_{x,o}^{LS} = 0 \quad (6)$$

Siendo $\varepsilon_{y,o}^{LS}$ la rotación sobre el eje Y, es decir, ángulo entre el eje X y el Xnominal.

Dado que sólo nos desplazamos en el eje X e Y, se supone que en Z no debería haber errores, pero no es así, se verá en los resultados obtenidos experimentalmente (3.1.5 Obtención del ángulo de inclinación).

3. Caracterización experimental de los errores que afectan a la medida

A partir de las medidas del sensor confocal y del modelo matemático previamente desarrollado para conocer las desviaciones angulares, se identificarán y caracterizarán posibles fuentes de error que afectan a la medida final de la NanoPla, para ello se realizarán distintos ensayos.

- Dentro de este apartado se diferenciarán entre tres posibles fuentes de error: error introducido por la posicionadora piezoeléctrica (o nPoint).
- error del sensor confocal junto con el acople cinemático de su soporte.
- error en el montaje de los tres tornillos micrométricos.

Para la caracterización de los errores del nPoint en el eje Z (subsección 3.1) se utilizará el software Matlab-Simulink o el propio software del nPoint, para poder desplazar la posicionadora a partir de ellos. Se realizarán ensayos desplazándonos con trayectorias aleatorias o por los ejes X e Y para así poder obtener un mapa 3D, observar posibles desviaciones y poder obtener el ángulo de inclinación (3.1.5). Para ello se utilizará un patrón cerámico plano.

Se estudiará la repetibilidad del sensor confocal junto con su acople cinemático en los ejes X, Y y Z (3.2.1). Para los dos primeros se utilizará un patrón de contorno de carburo de tungsteno y para el último un patrón cerámico plano.

También, se caracterizará los errores de repetibilidad en el movimiento del sistema de nivelado. Para ello, se estudiará la repetibilidad del tornillo micrométrico motorizado (3.2.2) en un rango pequeño de trabajo, dado que si se aumenta es posible su desencaje.

3.1 Caracterización de errores del nPoint

La plataforma NanoPla consta del modelo de la posicionadora NPXY100Z10A de la marca nPoint, la cual, según el fabricante, tiene un rango de trabajo de $100\ \mu\text{m} \times 100\ \mu\text{m} \times 10\ \mu\text{m}$, un ruido de posicionamiento de 0,5 nm en el plano XY y de 0,1 nm en el plano Z.

Dicha posicionadora se puede controlar mediante una tarjeta conversora analógica-digital (DAQ) o desde el propio software de la misma. Se realizarán los ensayos con ambos sistemas.

Los errores de la posicionadora se encuentran en la siguiente tabla:

Fuente de error	Parte	Descripción	Vector de error	Valor	Distribución de probabilidad	Incertidumbre estándar [nm]
Nanoposicionadora	{N} -{S}	Errores lineales	$l_{error,x}^{[S]}$	0,05%	Uniforme	$\pm 14,4^1$
			$l_{error,y}^{[S]}$			
			$l_{error,z}^{[S]}$	0,5%		$\pm 1,4^1$
		Ruido de posicionamiento	$\phi_x = \phi_y$	0,5 nm	Uniforme	$\pm 0,5$
			ϕ_z	0,1 nm		$\pm 0,1$

Tabla 1. Errores de la nanoposicionadora comercial (nPoint), Fuente: [5].

Todos los ensayos a realizar serán para una posición en Z del tornillo motorizado de 0 o 1 milímetro, ya que también es objeto de estudio si la posición del tornillo micrométrico afecta a los errores de los resultados. Esto puede ser debido a que el acople cinemático de los tornillos no estuviera bien encajado en alguna de las posiciones.

Para una misma posición del tornillo motorizado se pueden observar variaciones en los resultados y en las escalas de las figuras, ya que los ensayos no han sido realizados el mismo día y las condiciones del laboratorio varían.

Para más información acerca de la posicionadora ver Anexo I: Principales componentes.

3.1.1 Comprobación de la planitud del patrón

El microscopio de variación focal InfiniteFocusSL de Alicona (Figura 12) nos va a permitir medir una superficie completa, a diferencia del sensor confocal que solo proporciona la medida de un solo punto.

Su principio de funcionamiento consiste en realizar un movimiento relativo de la muestra con respecto al fotodetector en el eje de medida (eje Z). Las especificaciones de este instrumento se detallan en el Anexo I: Principales componentes.



Figura 12. Microscopio de variación de foco Alicona.

Se analizará el patrón cerámico plano para poder observar posibles irregularidades o defectos que nos pudieran afectar a los resultados obtenidos. El instrumento tras el proceso de escaneo de la muestra en la zona a estudiar genera una nube de puntos 3D.

En primer lugar, se analizó mediante Alicona un patrón cerámico plano y tras su proceso de escaneo no se obtuvo ningún resultado, ya que la rugosidad mínima que puede detectar dicho microscopio es de $0,3\ \mu\text{m}$. Al ser el patrón de cerámica blanca y pulida, el microscopio no fue capaz de tomar ninguna medida.

Esto significa que nos encontramos ante un patrón con una buena planitud. Además, el certificado de calibración de dicho patrón es de grado 0, lo que nos proporciona una precisión muy elevada.

Las características de medida con Alicona (Tabla 2) dependen de los parámetros de medida y de la magnificación de la lente, los rangos que se muestran a continuación son para una lente de magnificación 10x:

Distancia de trabajo	17,5 mm
Área de escaneado	2 mm × 2 mm
Resolución vertical	>100 nm
Resolución lateral	~3 μm
Altura de escaneo	<22 mm
Área máxima de medida	50 mm × 50 mm
Rugosidad mínima de medida (Ra)	0,3 μm

Tabla 2. Especificaciones de InfiniteFocusSL de Alicona para una magnificación de 10x. Fuente: [9]

Para poder analizar y observar bien el patrón se impregnó el mismo con una capa fina de vaselina y se volvió a repetir el proceso de escaneo sobre la muestra obteniendo un dimensionado en tres dimensiones como se observa en la Figura 13.

	Ra (μm)
Anchura 5 μm en X	0,242
Anchura 100 μm en X	0,122
Anchura 100 μm en Y	0,137
Anchura 5 μm en X resolución < 100 nm	0,129

Tabla 3. Rugosidad media, cuadrática y pico a pico.

En la Tabla 3 se muestran los resultados de rugosidades medias obtenidos en diferentes situaciones, dependiendo de la resolución, el número de puntos o la orientación, dado que la rugosidad tiene orientación y se obtienen distintos resultados como se ha podido observar.

También dependiendo del número de puntos analizados (anchura de la línea de puntos analizada con Alicona), se obtienen valores mayores o menores de rugosidad media, a mayor número de puntos o anchura se obtienen rugosidades menores, dado que el resultado obtenido es la media de “las líneas” seleccionadas.

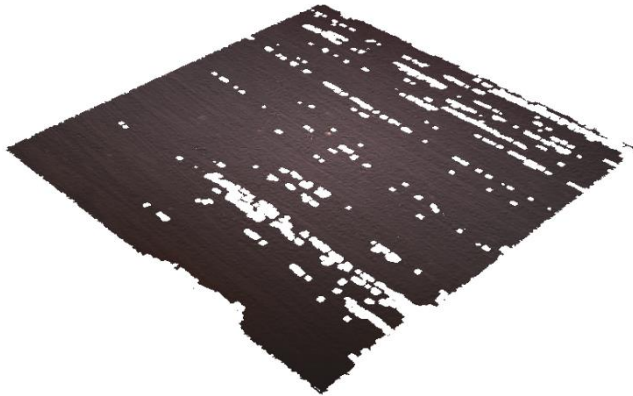


Figura 13. Patrón cerámico plano impregnado con vaselina medido con Alicona.

Para todos los casos analizados en la Tabla 3, se observa una rugosidad media inferior a $0,3 \mu\text{m}$, rugosidad mínima de medida de Alicona, por lo que al trabajar con el patrón de estudio no se introducirán errores por defectos o irregularidades del mismo.

3.1.2 Efecto de la trayectoria en los errores de medición

3.1.2.1 Trayectorias aleatorias

En primer lugar, se realizará un ensayo desplazando la posicionadora (nPoint) por trayectorias aleatorias combinando coordenadas en X e Y para poder crear un plano en Matlab y posteriormente calcular el correspondiente ángulo de inclinación.

Tanto para una altura nula del tornillo micrométrico motorizado ($Z_{\text{mot}} = 0 \text{ mm}$) como para una altura en el tornillo micrométrico motorizado de 1 mm ($Z_{\text{mot}} = 1 \text{ mm}$) no se observa un plano con los valores de los resultados obtenidos, la malla creada tiene forma irregular como se puede observar en las Figura 14 y la Figura 15, obteniéndose valores mayores en el centro de la plataforma respecto de los laterales.

Esto no debería ser así, ya que nos estamos desplazando en las coordenadas X e Y, dejando Z constante, por lo que se debería observar un mismo valor para todos los puntos medidos.

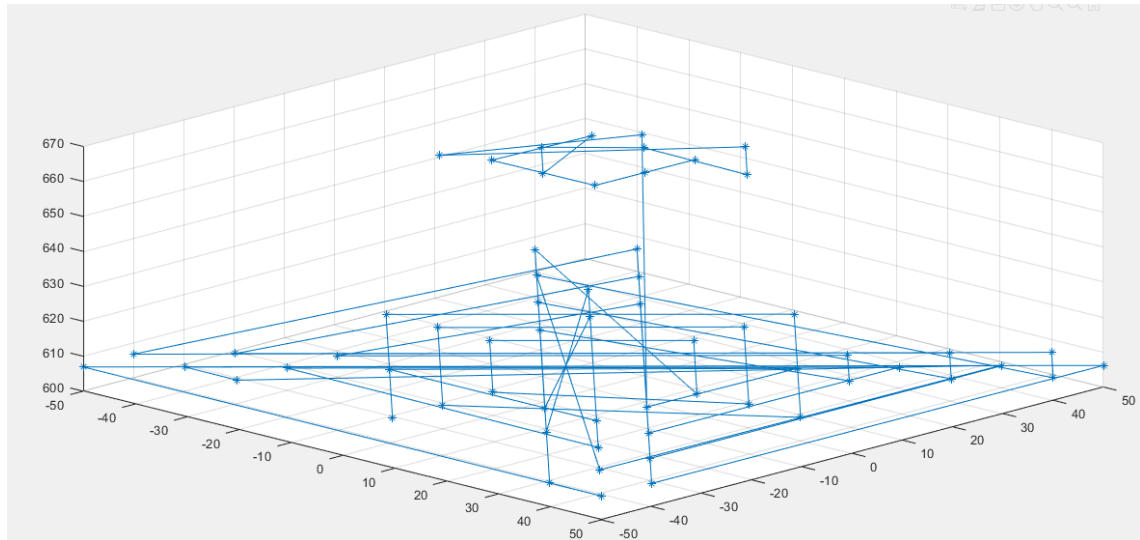


Figura 14. Plano puntos aleatorios, Zmot=0mm.

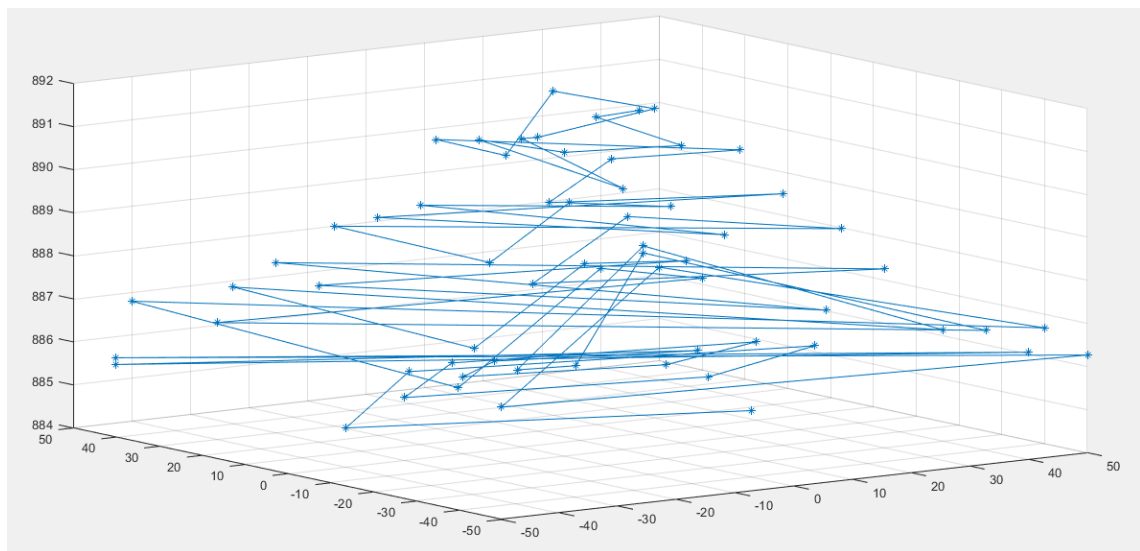


Figura 15. Plano puntos aleatorios, Zmot=1mm.

En las Figuras 14 y 15 se observan desviaciones muy grandes entre resultados, obteniéndose para el primer caso una diferencia de las lecturas del confocal de un orden de magnitud de $40\text{ }\mu\text{m}$, mientras que en el segundo caso es de $6,5\text{ }\mu\text{m}$.

En trabajos anteriores se caracterizaron los errores que podría introducir el sensor confocal obteniéndose un valor máximo de $0,19\text{ }\mu\text{m}$ [1], por lo que se puede descartar que el comportamiento anterior pueda ser debido a los errores causados por el sensor, siendo causados más probablemente por el propio nPoint, por lo que se pueden plantear dos hipótesis:

- 1) El error es debido a la longitud del paso, cuanto menor sea el paso, menor error se encontrará.
- 2) Los movimientos aleatorios del nPoint provocan desviaciones en los resultados, esto puede ser debido a que el nPoint vibra siendo inestable su acople sobre los tornillos micrométricos.

3.1.2.2 Efecto de la variación en la longitud del paso

Para validar lo anteriormente comentado, se van a realizar ensayos de ida y vuelta, es decir, nos desplazaremos por ejemplo en el eje X desde (50, 0) hasta (-50,0) y sin cambiar las condiciones de medida volveremos desde (-50,0) hasta (50,0).

Se comenzará desplazando la posicionadora por los ejes de coordenadas con un paso de 25 μm para observar si el error podría ser debido a la longitud del paso.

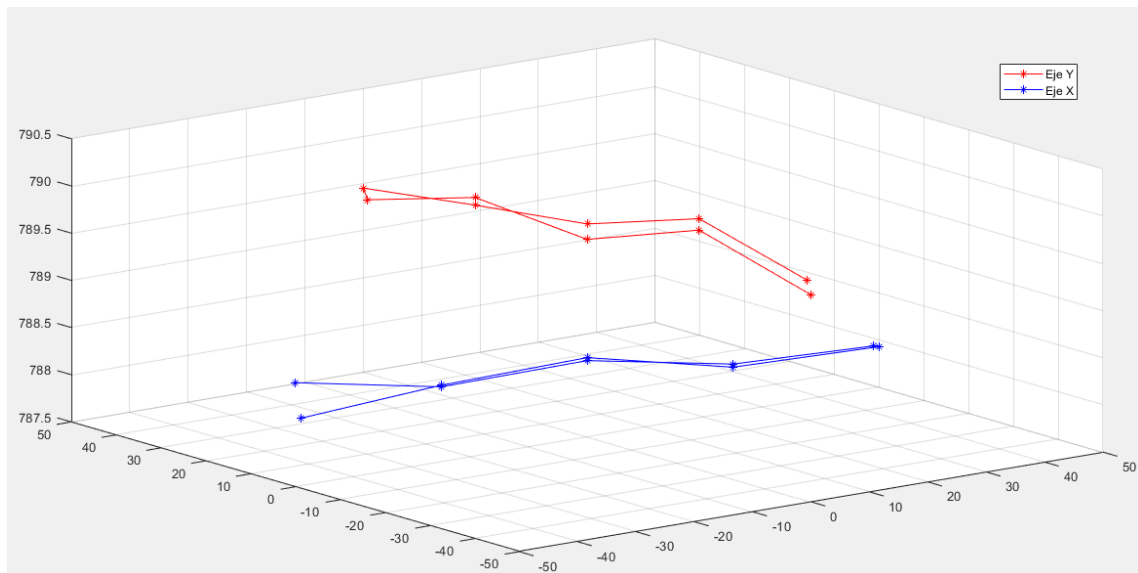


Figura 17. Cruz origen, paso de 25 μm , altura nula del tornillo micrométrico motorizado.

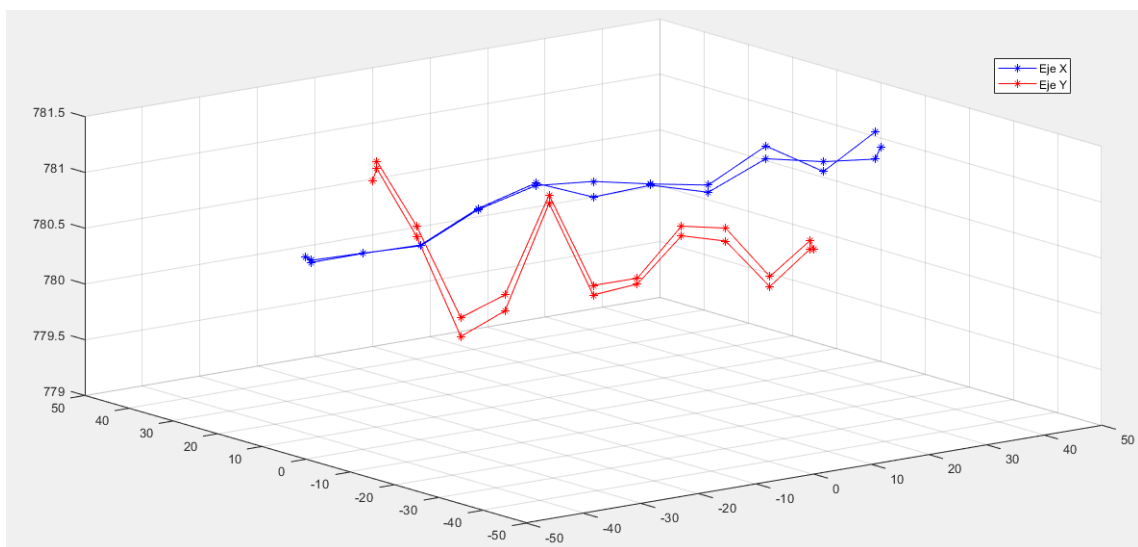


Figura 16. Cruz origen, paso de 10 μm , altura nula del tornillo micrométrico motorizado.

En la Figura 17 se ve una diferencia de 0,673 μm en el eje X y de 1,24 μm en el eje Y, mientras que en la Figura 16 dicha diferencia máxima es de 1,762 μm en el eje Y y 1,1 μm en el eje X.

Las diferencias en un mismo punto entre ensayo de ida y de vuelta pueden ser debidas a la desviación térmica dependiendo del tiempo utilizado para realizar el ensayo.

Se observa que el error entre distintas posiciones de X e Y es mínimo, menor a $1,8 \mu\text{m}$, por lo que la longitud del paso no debería considerarse como una fuente de error.

Cada recta, perteneciente a un eje, sigue una trayectoria distinta. Ambas pasan por la posición central (0,0) pero dependiendo de la trayectoria de cada una de ellas se obtiene un valor en Z diferente para este mismo punto; no se llegan a cortar en el centro de la plataforma dado que la lectura del sensor confocal sale diferente para cada caso.

También, en la Figura 16 se observa una lectura del sensor confocal dentro de un rango de $787,5 \mu\text{m}$ a $789,5 \mu\text{m}$, mientras que en la Figura 17 el rango es de $779 \mu\text{m}$ a $781 \mu\text{m}$ aproximadamente. Esto es debido a que los ensayos fueron realizados en días diferentes y las condiciones de medida cambiaron, como puede ser la temperatura del laboratorio o la recolocación del patrón cerámico.

Para más información ver Anexo II: Caracterización errores del nPoint (I).

3.1.3 Efecto de la digitalización de datos

El movimiento de la nanoposicionadora comercial (nPoint) se puede programar de dos formas: mediante un DAQ o mediante el software propio del nPoint.

Hasta ahora, todos los ensayos habían sido realizados mediante un DAQ externo de National Instruments que recoge la salida analógica del controlador de la posicionadora piezoeléctrica, y la transforma en una señal digital que se extrae en un programa de Simulink en Matlab, lo cual podría ser una fuente de error al hacer la conversión y ser debido a esto la diferencia entre resultados obtenidos.

Realizar la simulación mediante el propio software del nPoint podría minimizar el error debido a que se encuentra directamente conectado al ordenador (USB) y no existe ninguna conversión por medio de hardware externo.

Si se utiliza el propio software del nPoint y comparando los resultados de ambos procedimientos:

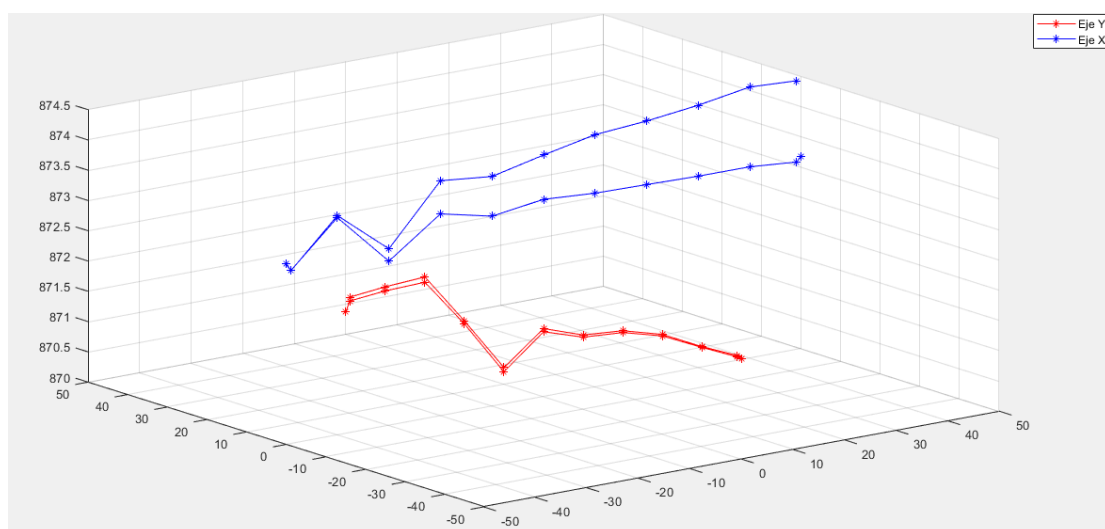


Figura 18. Cruz origen, DAQ, paso de $10 \mu\text{m}$.

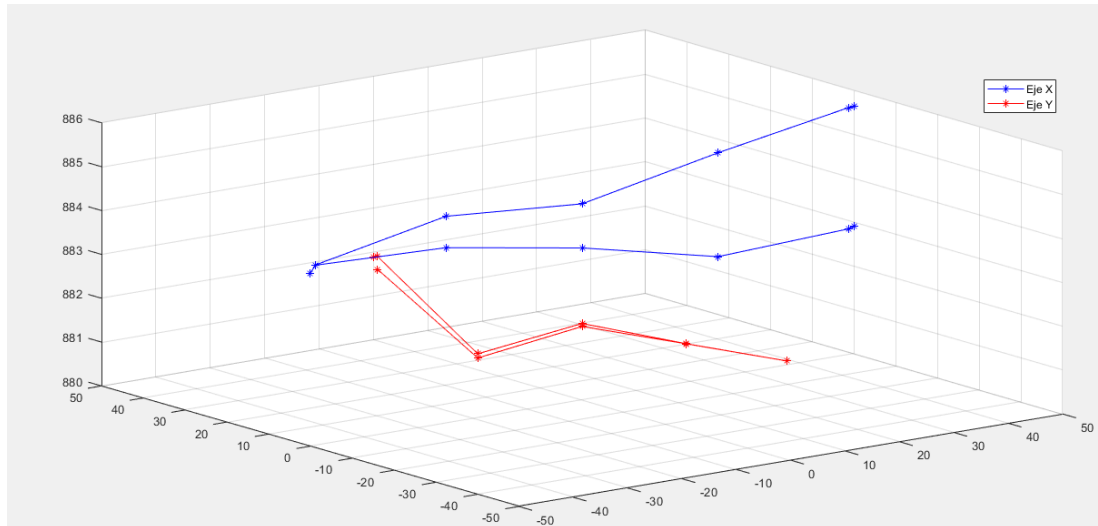


Figura 19. Cruz origen, software nPoint, paso de 25 μm .

Tras realizar los ensayos con el propio software de la posicionadora piezoeléctrica (nPoint) no se aprecia una gran disminución del error cometido respecto a los ensayos realizados con el DAQ, aunque a pesar de ello se continuarán realizando los siguientes ensayos del trabajo con el software de la posicionadora piezoeléctrica y no mediante Simulink.

En cuanto al comportamiento en los ejes, vemos que el Eje Y se comporta mejor que el Eje X, manteniéndose constante a pesar de mostrar un valle característico en el centro de la plataforma apreciable en todos los ensayos realizados durante el trabajo.

El eje Y, entre el ensayo de ida y de vuelta muestra un comportamiento distinto, se aprecia en las figuras anteriores una gran diferencia entre el valor de ida y vuelta en un mismo punto. Se separa exactamente en el extremo positivo de la plataforma, esto podría ser debido al fenómeno de la histéresis, que se va a analizar a continuación.

Para más información consultar Anexo II: Caracterización de errores del nPoint (I).

3.1.4 Efecto de la histéresis

Anteriormente se ha observado un comportamiento característico en el eje X comportándose de diferente manera para cada ensayo realizado, y separándose entre ensayos en el extremo de la parte negativa de la plataforma (-50,0), mientras que el eje Y tiene un comportamiento repetible.

Para verificar que dicha separación entre ensayos de ida y vuelta podría ser debida a la parte de coordenadas negativas de la plataforma, se realizarán ensayos ida-vuelta-ida comenzando por las coordenadas del eje X negativas, es decir, (-50,0).

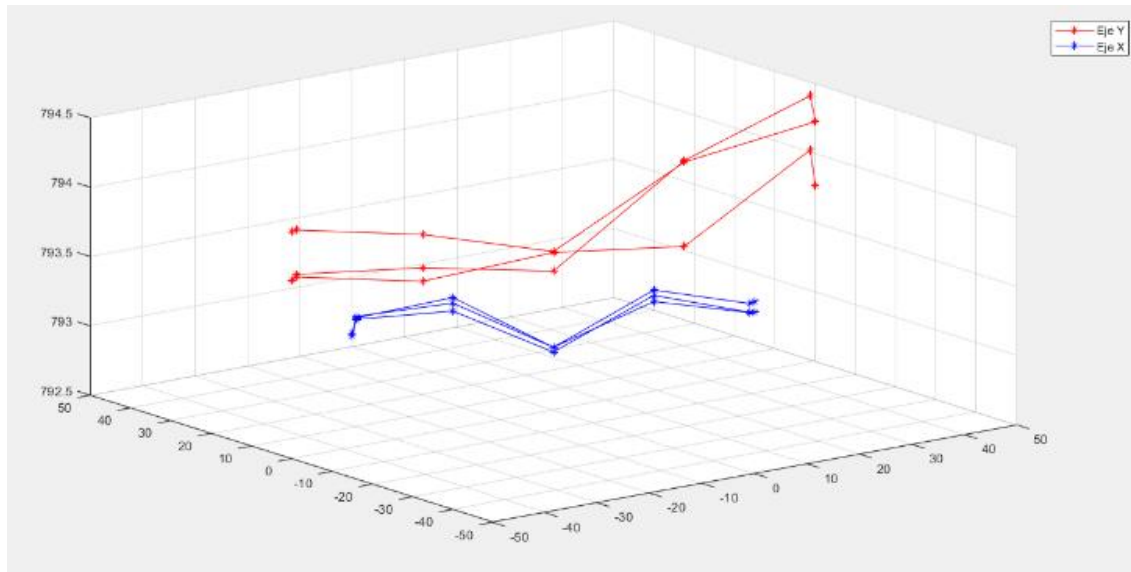


Figura 20. Ensayo ida-vuelta-ida, Zmot=0 mm, comenzando por coordenadas negativas.

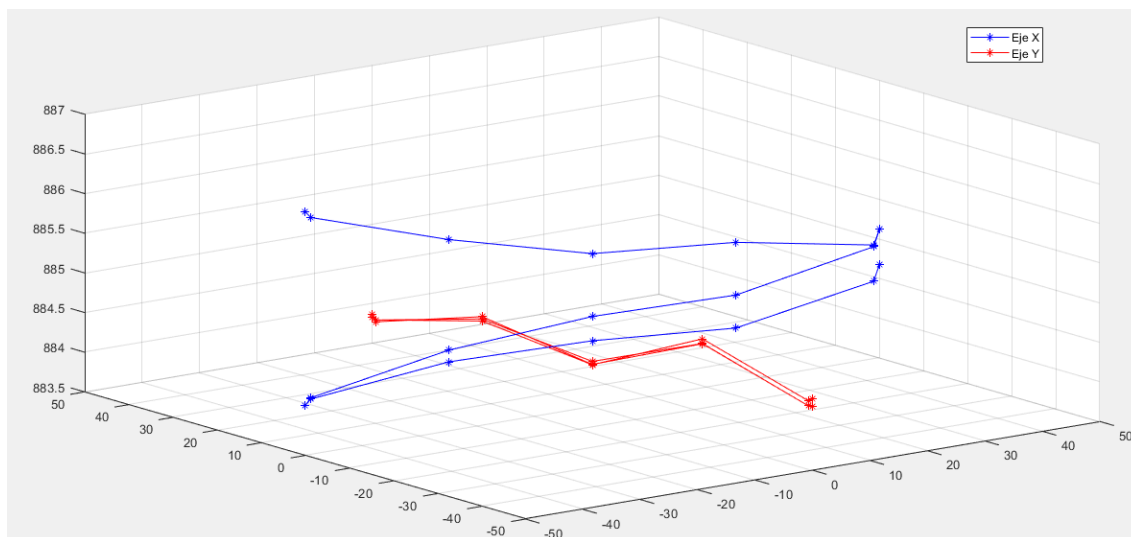


Figura 21. Ensayo ida-vuelta-ida, Zmot=1 mm, comenzando por coordenadas negativas.

Como se observa, el error no es debido a las coordenadas por las que comience el desplazamiento del nPoint, ya que dicho comportamiento en el eje X se sigue produciendo, en este caso en (-50,0) se vuelven a separar los ensayos entre ida, vuelta e ida. Para más información consultar Anexo II: Caracterización de errores del nPoint (I).

Esta diferencia podría ser debida a: la expansión térmica, el fenómeno de la histéresis, error de medida del sensor confocal o al diseño interno del sistema flexible de la posicionadora eléctrica.

Se puede descartar el error debido a la expansión térmica, ya que el error máximo que se podría introducir debido al cambio de temperatura sería de $1 \mu\text{m}/\text{m}$. Por otro lado, el error debido a la resolución del sensor confocal es de $0,4 \mu\text{m}$ y se aprecian errores mayores, por lo que también se puede descartar [9].

El error podría ser debido al fenómeno de la histéresis o al montaje del sistema flexible que permite el movimiento del nPoint.

Se puede observar un diseño común basado en sistemas flexibles en posicionadoras piezoeléctricas de dos dimensiones en la Figura 22, donde se ve su distribución anti simétrica entre ejes de los actuadores piezoeléctricos (piezo stack), habiendo dos en un eje y uno en el otro, esa podría ser la razón del distinto comportamiento del eje Y entre ensayos.

La función del actuador piezoeléctrico es la de motorizar etapas y montajes de posicionamiento fino para aplicaciones que requieren una precisión excepcional, etapas y pasos pequeños en secuencias y estabilidad de instalación.

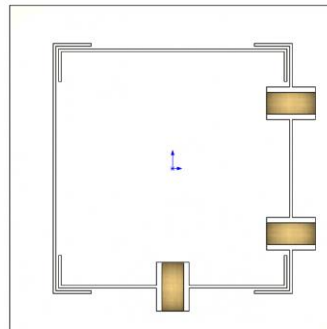


Figura 22. Sistema flexible del nPoint.

3.1.5 Obtención del ángulo de inclinación

Las medidas realizadas se ven afectadas por los errores de posicionamiento del nPoint y a su vez por los errores de lectura del sensor confocal, por lo que es esperable que haya variaciones en los ángulos obtenidos al hacer varias medidas de un mismo plano en un mismo eje.

Una vez caracterizados los errores que pueden afectar al proceso de medida mediante el desplazamiento del nPoint, y tras haber definido un modelo matemático en el subcapítulo 2.3 para conocer cómo afectan las desviaciones geométricas del montaje de la posicionadora y del sensor confocal a la medida final, se calculará el ángulo de inclinación o rotación a partir de los ensayos realizados desplazando el nPoint por diferentes trayectorias.

Como se ha comentado anteriormente, la nanoposicionadora está integrada en la base inferior de la NanoPla mediante otro sistema de acople diseñado y tres tornillos micrométricos que permitían su ajuste, dos manuales y uno motorizado. Dado el sistema de nivelación de la plataforma mediante ellos, cabe destacar que la inclinación de la plataforma en este caso está controlada por el tornillo micrométrico motorizado.

Este tornillo tiene una altura controlable dentro de un rango de 0 a 10 mm, a la que me he referido como Zmot. Al aumentar esta altura, el tornillo micrométrico se eleva, por lo que el plano formado por los tres tornillos micrométricos quedaría inclinado al moverse sólo uno de los tres tornillos. Por ello, la inclinación de la posicionadora piezoeléctrica depende de la altura del micrómetro motorizado.

Para ello se realizará un ajuste por mínimos cuadrados (recta regresión lineal) para ver como varía la inclinación de la plataforma dependiendo de en qué eje y en qué posición nos encontremos (X, Y).

En este apartado, se calculará el ángulo de inclinación o rotación respecto del eje X y el eje Y para diferentes ensayos. Se realizarán ensayos de ida y vuelta desplazándonos linealmente a lo largo de la plataforma, después, se obtendrá el ángulo de inclinación a partir de un ajuste por mínimos cuadrados en Matlab, para poder establecer con precisión la desviación de la plataforma (Figura 23 y Figura 24).

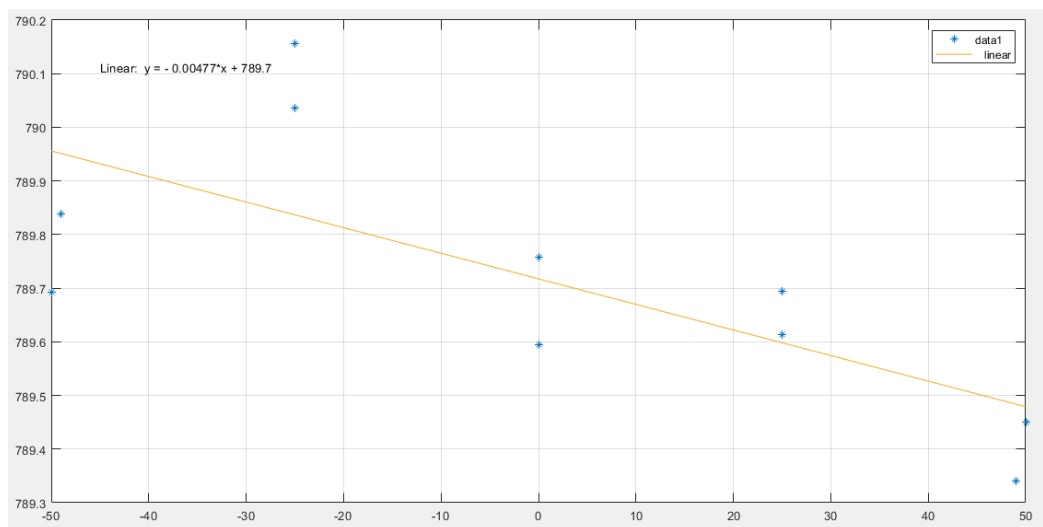


Figura 23. Ajuste por mínimos cuadrados eje Y, $Z_{mot}=0$ mm, paso de $25\text{ }\mu\text{m}$.

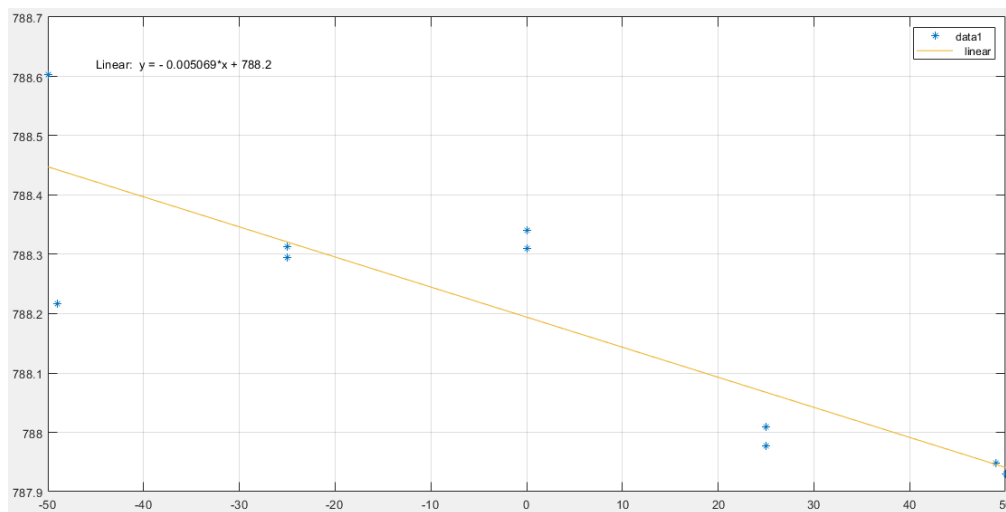


Figura 24. Ajuste por mínimos cuadrados eje X, $Z_{mot}=0$ mm, paso de $25\text{ }\mu\text{m}$.

	θ (°)	θ (rad)
Diagonal	-0,335	-0,005
X=-25	-0,368	-0,006
X=0	-0,273	-0,004
Y=-25	-0,154	-0,002
Y=0	-0,290	-0,005

Tabla 4. Obtención del ángulo de inclinación.

Promediando los ángulos obtenidos mediante el ajuste por mínimos cuadrados se obtiene un ángulo de $0,284^\circ$. A partir de este valor se calculará el error medio que pueden introducir las desviaciones al desplazar el nPoint dentro de un rango de $\pm 50 \mu m$, tomando como referencia el punto central del rango.

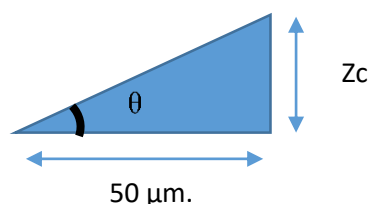


Figura 25. Croquis comprobación del error debido a la inclinación.

$$\operatorname{tg}(0,2843) \cdot \pm 50 \mu m = \pm 0,248 \mu m < 1 \mu m$$

Se obtiene un error mínimo, de $\pm 0,248 \mu m$, por lo que se podría decir que los ángulos no afectan significativamente a los resultados.

Para más información sobre el ángulo de inclinación dado para cada una de las trayectorias ensayadas consultar el Anexo III: Caracterización de errores del nPoint (II).

3.2 Caracterización de errores de repetibilidad

En este apartado se analizará la repetibilidad de la colocación del sensor confocal mediante el acople cinemático de su soporte y también del tornillo micrométrico motorizado. Se hará un estudio de la repetibilidad inicial existente y si fuera necesario, tras su análisis se propondrían unas mejoras.

El estudio de repetibilidad del tornillo motorizado y del acople cinemático del sensor confocal con su soporte se realizará en el eje Z utilizándose el patrón cerámico plano. Además, para el acople cinemático del sensor también se realizará en los ejes X e Y; se utilizará un patrón de contorno de tungsteno siendo objeto de estudio la zona inclinada.

3.2.1 Estudio de repetibilidad del acople cinemático

Para poder montar el adaptador del sensor confocal de forma repetible, es decir, minimizando los errores por recolocación, se hace uso de un acoplamiento cinemático. Dicho acople está constituido por 6 cilindros y 3 esferas, restringiéndose así los seis grados de libertad de forma simétrica (Figura 26).

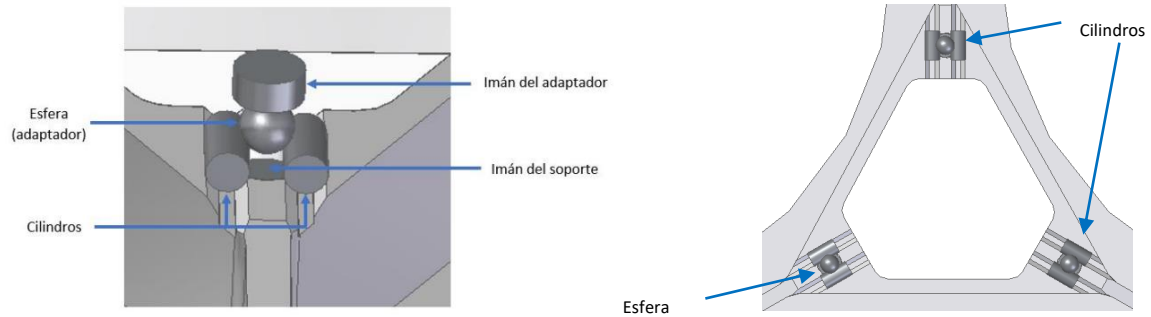


Figura 26. Acople cinemático.

Para dar constancia de dicha repetibilidad y minimización de errores se han realizado distintos ensayos en los que se sacaba y recolocaba el adaptador junto con el sensor confocal.

3.2.1.1 Ensayo repetibilidad sensor confocal en el eje Z

En primer lugar, se estudiará la repetibilidad del acople cinemático de acople del soporte del sensor confocal en el eje Z, para ello utilizaremos un patrón cerámico plano y el propio sensor confocal junto su soporte. La plataforma y los tornillos micrométricos permanecerán estáticos durante estos ensayos.

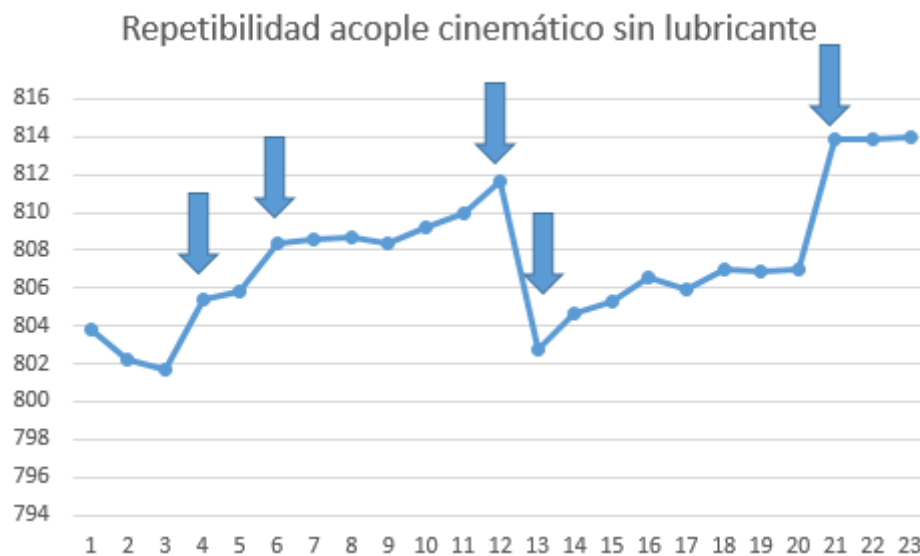


Figura 27. Ensayo repetibilidad acople cinemático sin lubricante eje Z.

Se ha seguido un procedimiento idéntico a la hora de realizar cada ensayo. Con la posicionadora estática y el sensor confocal encendido, se tomaba una medición de partida. Tras ello, desacoplaba la parte del soporte que sujeta el sensor confocal y seguidamente se volvía a colocar en la misma posición que se encontraba anteriormente para volver a tomar una medida con el sensor.

Se ha observado que si cuesta volver a acoplar (el sistema no encaja a la primera) aumenta el valor de la lectura del sensor confocal respecto de la anterior. Para todos los ensayos realizados el sensor se ha colocado de forma idéntica, encajando las 3 esferas a la vez, por lo que la

diferencia entre los resultados obtenidos no es debida a encajar cada vez primero una de las partes del adaptador.

Las flechas de la Figura 27 indican los puntos en los que el acople ha sido forzado hasta encontrar su posición, por ello se muestran desviaciones en las lecturas del confocal respecto de los puntos anteriores.

Dado el acople cinemático comentado anteriormente constituido por 3 esferas y 6 cilindros para restringir los grados de libertad, se realizará el mismo ensayo realizado en el punto anterior tras haber impregnado las esferas y cilindros con un poco de lubricante para asegurar que la variación de la lectura del confocal tras el acople no es debido a un problema de fricción.

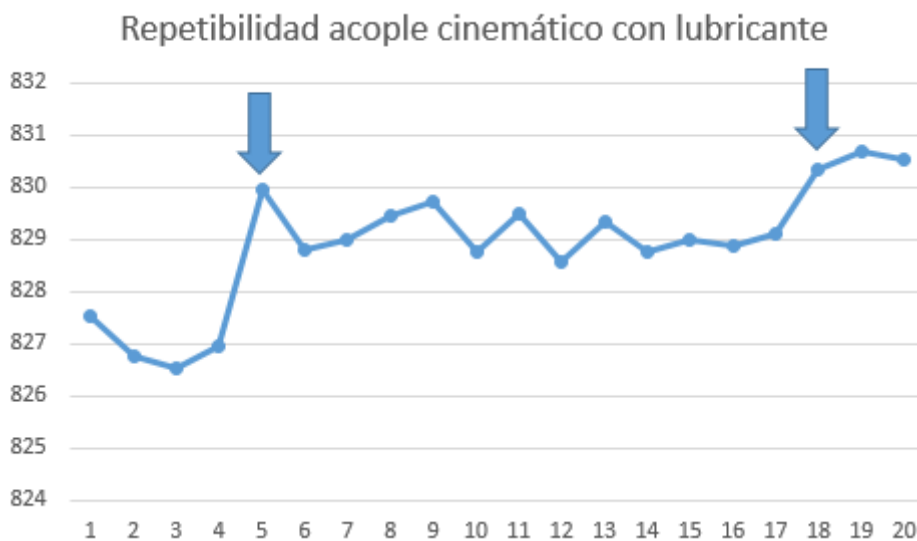


Figura 28. Ensayo repetibilidad acople cinemático con lubricante eje Z.

Como muestra la Figura 28, hay más repetibilidad respecto del ensayo anterior a pesar de seguir aumentado el valor de la lectura del sensor confocal si el soporte no encaja directamente, aunque en este caso el error cometido es menor.

3.2.1.2 Ensayo repetibilidad sensor confocal en el eje X y en el eje Y

Para estudiar la repetibilidad en los ejes X e Y, se procederá de la misma forma que en el caso anterior pero ahora se utilizará un patrón de contorno (Figura 29 y Anexo I: Principales componentes) y se realizará la medición sobre la parte inclinada. Se cambiará la orientación del patrón dependiendo de si se estudia el eje X o el eje Y.



Figura 29. Patrón de contorno.

Como se ha visto anteriormente que en los resultados obtenidos tras aplicar lubricante a los acoplamientos cinemáticos hay menos error que en las superficies secas, se continuarán realizando los ensayos con el mismo.

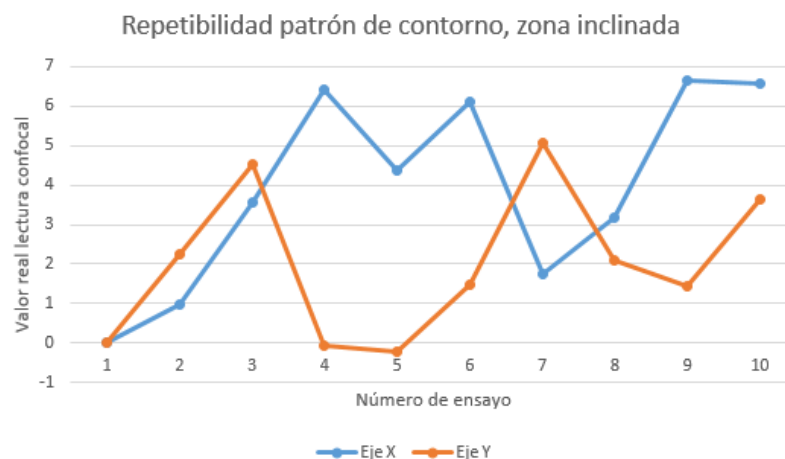


Figura 30. Ensayo repetibilidad acople cinemático ejes X e Y.

Cabe destacar que a las variaciones de las lecturas del sensor confocal de los ensayos de repetibilidad del acople cinemático en X e Y se suma la falta de repetibilidad en Z (previamente calculada), por eso se propone restar la media de las variaciones obtenidas en los ensayos en Z a las variaciones obtenidas en los ensayos en X o Y.

En este caso, a diferencia del ensayo anterior en el eje Z (3.2.1.1), en la Figura 30 se observa la repetibilidad para los ejes X e Y, pero con su valor real, es decir, se ha tomado como referencia la primera lectura obtenida y a partir de ella se ha obtenido el valor real restándole esta a cada uno de los siguientes resultados. La razón de la obtención de resultados negativos es que los resultados en ensayos superiores han sido de mayor valor que el tomado como referencia.

Dado que el sensor confocal solamente mide un punto sobre la coordenada Z, se ha seleccionado este patrón de contorno con una zona con 15° de inclinación para poder calcular mediante trigonometría, relacionando el ángulo del patrón y la lectura en Z del sensor confocal en la zona inclinada, el valor de desviación del eje X y del eje Y.

La desviación en el eje X causada por falta de repetibilidad en X se calculará como:

$$\operatorname{tg} \theta \cdot \sigma_x = \sigma_{z,x}$$

Siendo θ el ángulo de inclinación del patrón de contorno, 15°; $\sigma_{z,x}$ la variación en Z causada por la falta de repetibilidad en X y σ_x la falta de repetibilidad en el eje X.

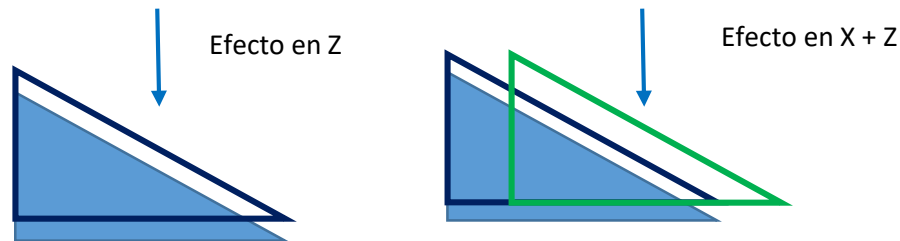


Figura 31. Croquis de estudio patrón de contorno.

$$\sigma_{z,total} = \sqrt{\sigma_{z,z}^2 + \sigma_{z,x}^2}$$

$$\sigma_{z,total}^2 = 1,189^2 + 2,478^2 = 7,554 \mu m.$$

$$\sigma_{z,x} = \sqrt{\sigma_{z,total}^2 - \sigma_{z,z}^2}$$

$$\sigma_{z,x} = \sqrt{7,554 - 1,189^2} = 2,477 \mu m.$$

Siendo $\sigma_{z,total}$ la repetibilidad total observada en el eje Z, $\sigma_{z,z}$ la variación en Z causada por la falta de repetibilidad en Z y $\sigma_{z,x}$ la variación en Z causada por la falta de repetibilidad en X.

$$\sigma_x = \frac{2,477}{\operatorname{tg} 15} = 9,245 \mu m.$$

De esta forma, se puede obtener la falta de repetibilidad en el eje X (σ_x) con relaciones trigonométricas sabiendo que el ángulo de inclinación del patrón es de 15°.

De la misma forma, para el eje Y:

$$\sigma_{z,total} = \sqrt{\sigma_{z,z}^2 + \sigma_{z,y}^2}$$

$$\sigma_{z,total}^2 = 1,189^2 + 1,899^2 = 5,019 \mu m.$$

$$\sigma_{z,y} = \sqrt{\sigma_{z,total}^2 - \sigma_{z,z}^2}$$

$$\sigma_{z,y} = \sqrt{5,019 - 1,189^2} = 1,899 \mu m.$$

Siendo $\sigma_{z,total}$ la repetibilidad total observada en el eje Z, $\sigma_{z,z}$ la variación en Z causada por la falta de repetibilidad en Z y $\sigma_{z,y}$ la variación en Z causada por la falta de repetibilidad en Y.

$$\sigma_y = \frac{1,899}{\tan 15} = 7,087 \mu m.$$

Como en el caso anterior, mediante el ángulo del patrón se obtiene la falta de repetibilidad en el eje Y (σ_y).

Comparando los resultados se observa un comportamiento mucho más repetible en la zona plana (Figura 28) con un valor real máximo de 4,172 μm , que en la zona inclinada orientando según los ejes X e Y con valores de hasta 6,64 μm y 5,31 μm respectivamente (Figura 30).

3.2.2 Estudio de repetibilidad del tornillo micrométrico motorizado

Como se ha explicado anteriormente, la posicionadora del estudio consta de tres tornillos micrométricos, dos de ajuste manual y uno motorizado que permitirán corregir las desviaciones angulares entre el plano XY de la nanoposicionadora piezoeléctrica y de la NanoPla.

Cabe recordar que los tornillos micrométricos están fijados al marco metrológico inferior a través de sus acoples. Por ello, estos micrómetros permanecen inmóviles en el plano XY y se mueven en Z según la extensión o contracción del vástago. En los tres tornillos micrométricos el material es acero inoxidable 304, las demás especificaciones se pueden encontrar en el Anexo I: principales componentes.

Para estudiar la repetibilidad del tornillo micrométrico motorizado se realizarán 10 ensayos alternando dos posiciones distintas del mismo.

En este caso realizaremos los ensayos para $Z_{mot}=0$ mm y $Z_{mot}=1$ mm, siendo Z_{mot} la distancia en Z que se desplazaría verticalmente el tornillo micrométrico motorizado.

También se realizará lo mismo para una posición del tornillo motorizado de 1 mm y 2 mm y también para una posición 2 mm y 3 mm, así se mostrará hasta qué altura en Z del tornillo micrométrico motorizado existe dicha repetibilidad.

Zmot 0 (μm)	Zmot 1 (μm)	Zmot 1 (μm)	Zmot 2 (μm)	Zmot 2 (μm)	Zmot 3 (μm)
804,647	888,193	908,386	1282,757	1292,093	1650,084
804,681	888,169	902,975	1275,715	1276,312	1648,124
804,617	888,215	902,890	1274,436	1276,128	1647,794
804,525	888,183	902,954	1275,607	1275,867	1648,319
804,494	888,211	902,828	1276,024	1275,648	1648,323
804,295	888,172	902,667	1276,566	1275,495	1647,868
804,357	888,088	902,487	1276,837	1275,357	1647,239
804,195	888,118	902,280	1276,756	1275,220	1646,652
804,186	888,106	902,093	1277,178	1275,133	1646,276
804,276	888,141	901,973	1277,164	1275,100	1646,088

Tabla 5. Lectura del sensor confocal en μm , entre distintas posiciones del tornillo motorizado.

Según los resultados obtenidos, al aumentar el tornillo motorizado de 0 a 1mm existe una diferencia entre lecturas del sensor confocal de 84 μm aproximadamente, mientras que al aumentar de 1 a 2 mm y de 2 a 3 mm la diferencia es de 372 μm (Tabla 5).

Esta elevación en Z (372 μm) es coherente con la geometría de los tres tornillos micrométricos y con lo que se esperaba tener, al aumentar una distancia en el micrómetro motorizado (por ejemplo, de 1 a 2 mm) se debería obtener la misma diferencia que al elevar el micrómetro esa misma distancia, pero en otros puntos (por ejemplo, de 2 a 3 mm), cosa que se cumple.

Para más información ver Anexo VI: Estudio de repetibilidad del tornillo micrométrico motorizado.

Se observa repetibilidad en los resultados en todos los ensayos anteriores, con una diferencia menor a 1 μm . En cambio, la primera lectura del sensor confocal es mayor respecto a las siguientes, esto podría ser debido a un problema de histéresis.

La menor diferencia respecto de los demás ensayos entre la altura del tornillo motorizado en 0 y 1 mm podría ser debido a una mala referenciación del tornillo micrométrico. Por ello, se han realizado ensayos en un rango menor desde la referencia (Zmot = 0 mm) escogida para ver como varía la lectura del sensor confocal.

Mencionar que la lectura del sensor confocal para una altura de 1 mm del tornillo motorizado en el primer caso es de 888 μm mientras que en el segundo de 902 μm , esto es debido a que los ensayos fueron realizados en días diferentes, por lo que había otras condiciones en el laboratorio.

$Z_{mot} 0$ (μm)	$Z_{mot} 0,75$ (μm)	$Z_{mot} 0$ (μm)	$Z_{mot} 0,5$ (μm)
850,117	850,109	849,575	849,575
850,111	850,108	849,574	849,574
850,108	850,104	849,574	849,573
850,104	850,099	849,573	849,573
850,102	850,097	849,573	849,573

Tabla 6. Lectura del sensor confocal en μm , para un desplazamiento en Z menor a 1 mm.

Al desplazar el tornillo micrométrico entre una altura de 0 mm a 0,5 mm y de 0 mm a 0,75 mm se observa una diferencia prácticamente nula entre los valores obtenidos (Tabla 6).

La diferencia entre resultados es debida a que, a pesar de haber un desplazamiento de 1mm, el desplazamiento real es de 0,25 mm, obteniéndose un valor de 84 μm .

Por otro lado, entre $Z_{mot}=1$ mm y $Z_{mot}=2$ mm, y entre $Z_{mot}=2$ mm y $Z_{mot}=3$ mm, al ser un desplazamiento real de 1mm, la diferencia en ambos casos es aproximadamente de 373 μm .

También se realizaron 3 ensayos sucesivos de ida y vuelta por el tornillo motorizado, para comprobar si la no repetibilidad entre el primer valor obtenido para cada altura del tornillo motorizado es debida a la histéresis y se observó que sí.

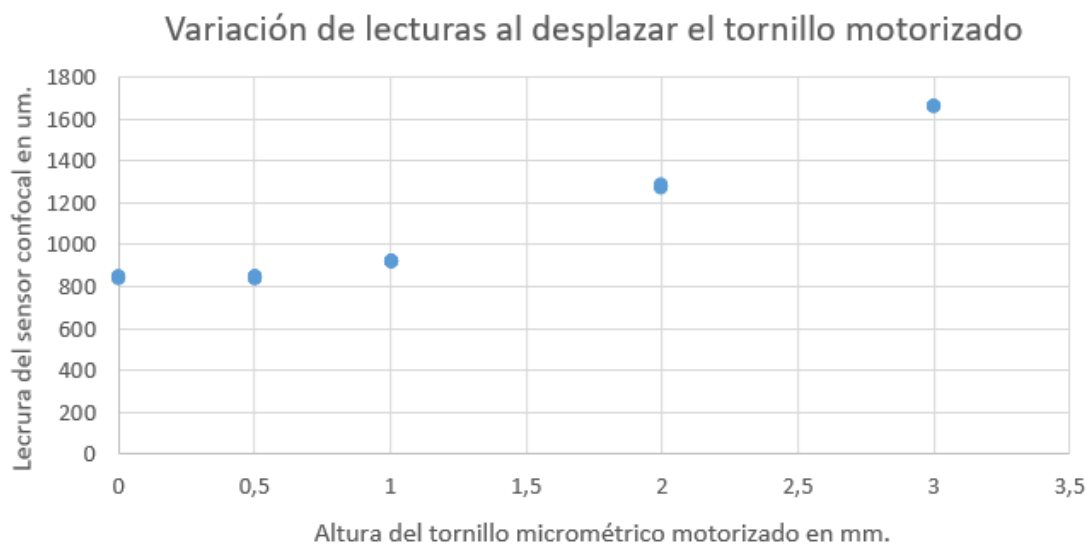


Figura 32. Variación lecturas tornillo motorizado frente a la altura impuesta, en 3 ensayos ida y vuelta.

En la Figura 32 se observa que la diferencia entre valores al aumentar la altura del tornillo micrométrico cada vez es mayor, esto es debido a que a su vez se está inclinando la muestra al desplazar solamente el tornillo micrométrico motorizado. Es decir, el aumento de la altura del tornillo micrométrico motorizado es lineal, al aumentar esta aumenta la lectura del sensor confocal. Esto no sucede para alturas del micrómetro entre 0 y 1 mm observado (Tabla 6) y

comentado anteriormente; debido a una mala referenciación del tornillo, al aumentar la altura en estos valores no hay apenas variación.

Para más información consultar Anexo VI: Estudio de repetibilidad del tornillo micrométrico motorizado.

4. Estudio de la deriva térmica a largo plazo

En este apartado se resumen las principales evidencias del efecto de la temperatura. Se va a estudiar cómo afecta la variación de la temperatura del laboratorio a la expansión de la NanoPla y sus componentes. Estos cambios de temperatura provocan dilataciones térmicas y errores de medida, por ello se analizará la variación en Z que causa la temperatura sobre un patrón cerámico plano.

También se observará el comportamiento ante la deriva térmica de un patrón de contorno de carburo de tungsteno, tanto en su zona plana como en su zona inclinada para una orientación alineada con el eje X y con el eje Y.

Debemos tener en cuenta que las diferencias obtenidas en los resultados pueden ser debidas a la expansión térmica de todos los componentes de la NanoPla. Sólo se observan desplazamientos relativos entre ambos, pero se tienen desplazamientos y dilataciones diferentes para cada uno de ellos.

Con el objetivo de conocer cómo afecta la temperatura a las mediciones, se realizará un ensayo en el cual se mide el mismo punto durante 24h, de esta forma se analizará como varía el error de posición del sensor confocal.

Por otro lado, el estudio de la dilatación térmica en la plataforma se hará a partir de las temperaturas proporcionadas por 4 galgas que se deberán colocar estratégicamente en la parte superior de la plataforma enfocando al sensor confocal (M0, Tª aire interior), sobre el nPoint (M1), en el soporte del sensor confocal (M2) y en los cojinetes de aire o air bearings (M3).

Para analizar estos datos, primero se introducen a MATLAB (código en Anexo IV). Posteriormente se grafica la distancia medida por el confocal, así como cada una de las temperaturas a lo largo del tiempo.

4.1 Estudio sobre un patrón cerámico plano

A continuación, se muestran las gráficas del error de posición medido por el confocal en este ensayo, así como las temperaturas.

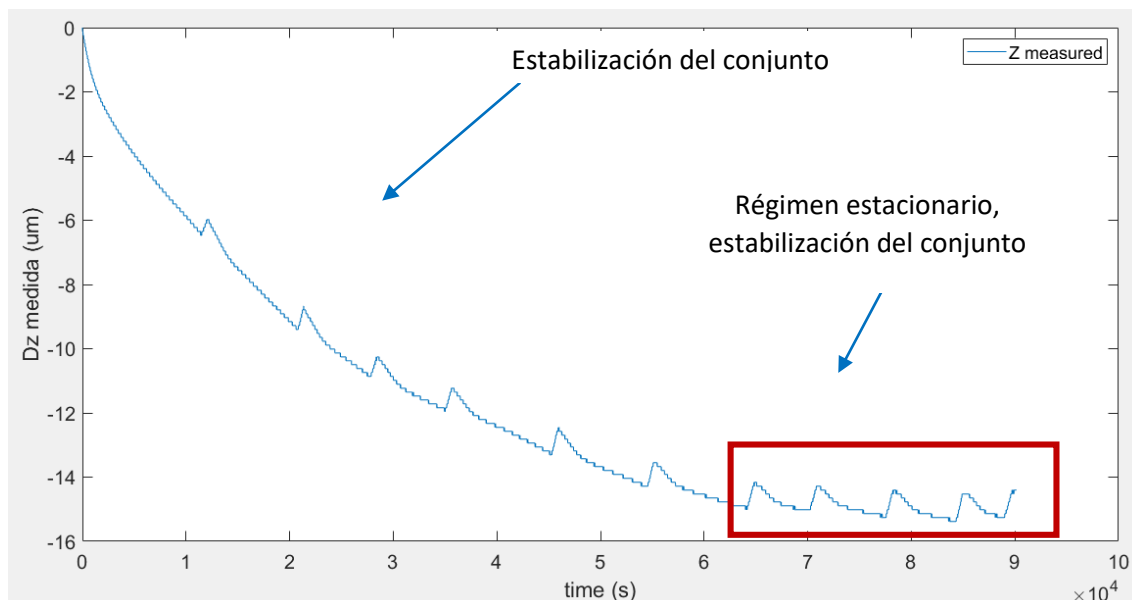


Figura 33. Δz medida por el confocal en ensayo: $t=24h$, $nPoint$ off.

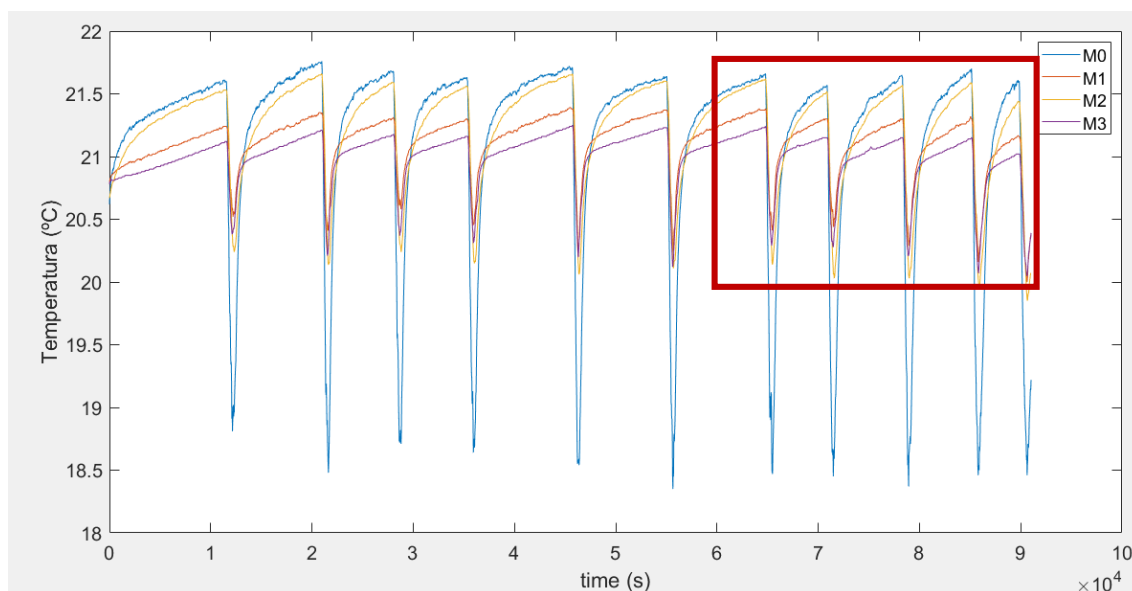


Figura 34. Variación de la temperatura en el ensayo: $t=24h$, $nPoint$ off.

En este ensayo se observa como las temperaturas sufren picos repetidos a lo largo del tiempo. Esto se debe a que los ensayos se realizan en el Laboratorio de Metrología, donde la temperatura está controlada, de forma que, si la temperatura sube, se enciende el aire acondicionado y estos cambios bruscos quedan registrados en la Figura 34. También se observa como varía la temperatura cíclicamente en cada una de las galgas durante el ensayo, a diferencia del error de posición en la lectura del sensor confocal, Figura 33, que era exponencial.

Sin tener en cuenta la T^a del aire interior (M0) vemos que la variación térmica en las galgas (en contacto con metal) es de 1°C .

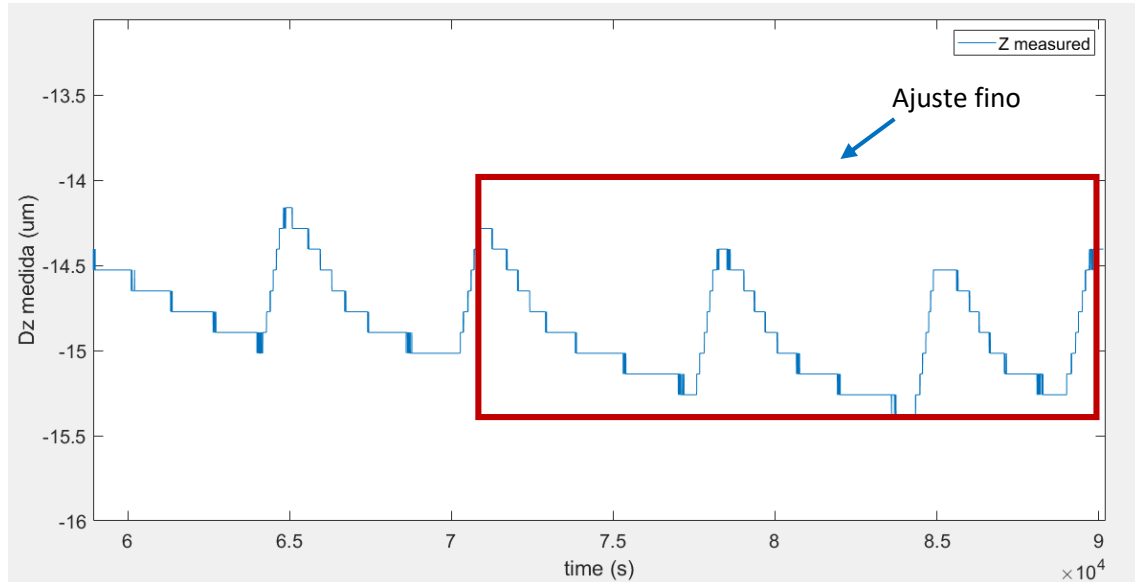


Figura 35. Zoom Δz medida al alcanzar el régimen estacionario medidas por el confocal en ensayo: $t=24h$, $nPoint$ off.

En la Figura 33 se observa cómo, durante las primeras horas del ensayo, la lectura del confocal cae exponencialmente, esto es debido al acercamiento relativo entre la muestra y el sensor provocada por la dilatación diferencial de los diversos componentes. Esta estabilización del conjunto (Figura 35) ya se había observado en trabajos anteriores [1], pero esta vez mediante el uso de un soporte externo.

Conforme pasa el tiempo esta distancia va disminuyendo mientras se va estabilizando el conjunto de la plataforma con el confocal incluido hasta llegar a un punto en el que se mantiene constante (a partir de $6 \cdot 10^4$ s), justo en ese punto se considera que el sistema ha alcanzado el régimen estacionario.

Dentro del régimen estacionario la diferencia máxima en los resultados obtenidos debida a la deriva térmica es de $0,885 \mu\text{m}$, lo que se considera un error aceptable, ya que en trabajos anteriores [1] se realizó el mismo estudio de la deriva térmica a largo plazo en un soporte externo, obteniendo resultados similares. En dicho estudio [1] la muestra y el sistema de medida estaban cubiertos con una urna para comprobar si ésta aislaba térmicamente y poder disminuir el efecto de la temperatura y a su vez el error de medida. Se obtuvo un error máximo en Z de $0,73 \mu\text{m}$ y una diferencia de temperaturas de $1,11^\circ\text{C}$; similares a los actualmente obtenidos: $0,885 \mu\text{m}$ y $1,1^\circ\text{C}$ (medido con la galga M3, situada en los cojinetes de aire o air bearings).

A continuación, se hará un ajuste lineal de la temperatura para poder superponer esta sobre los resultados obtenidos con el sensor confocal una vez se ha estabilizado el sistema y ha alcanzado su régimen permanente.

La línea azul indica los valores de las lecturas obtenidas con el sensor confocal, mientras que la roja se ha obtenido de la siguiente manera:

$$\Delta L = \Delta T \cdot \alpha \cdot L$$

Siendo ΔT el incremento de temperaturas de M1, galga colocada sobre el nPoint, tomando el primer resultado como referencia de temperatura; α , el coeficiente de expansión térmica del material, Aluminio; y L , la longitud estimada para realizar el ajuste, en este caso 42,5 mm.

Para realizar el ajuste se han tenido en cuenta los 3 últimos picos dentro del régimen estacionario (Figura 35). La amplitud entre picos del ajuste y entre los de la lectura del sensor confocal es de 0,977 μm y 0,987 μm respectivamente (Figura 36).

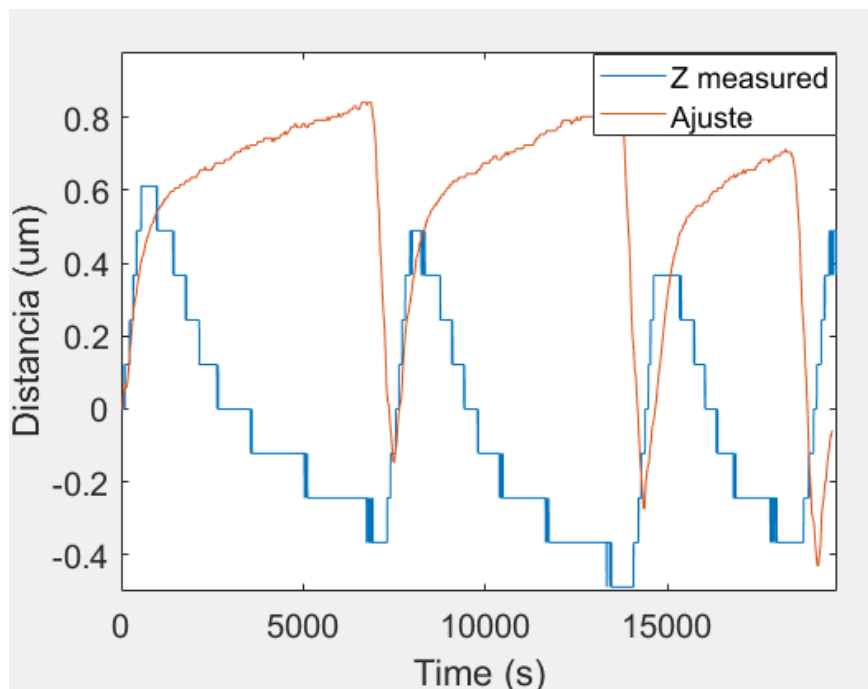


Figura 36. Ajuste Zconf con temperatura.

4.2 Ensayo sobre un patrón de contorno

Anteriormente se ha observado como afectaba el fenómeno de la deriva térmica sobre un patrón cerámico plano, pero únicamente se estudió como sería la dilatación del mismo en el eje Z.

El sensor confocal mide sobre un punto fijo en la superficie, por lo que no es posible a partir de una superficie totalmente plana estudiar cómo afectaría este fenómeno sobre los ejes X e Y, no se podría observar desplazamientos ni dilataciones. Por ello, se ha seleccionado un patrón de contorno con varias zonas, siendo las de interés la zona totalmente plana y la zona inclinada. Ver Anexo I: Principales componentes.

Mediante la inclinación de la rampa podremos observar posibles variaciones en el eje X y en el eje Y, ya que la lectura del sensor confocal variará y siendo conocida la inclinación del patrón se podrá determinar el error debido al efecto de la temperatura en estos dos ejes.

4.2.1 Ensayo sobre el eje Z

En el apartado 4.1 se ha realizado un ensayo de la deriva térmica a largo plazo sobre una superficie cerámica plana, aquí se volverá a realizar lo mismo pero esta vez un patrón de Tungsteno. El fin de repetir el mismo ensayo sobre el eje Z es poder obtener las dilataciones producidas en X y en Y mediante las lecturas del sensor confocal en Z y el ángulo de inclinación del patrón, siendo la variación de altura en Z la diferencia entre el valor obtenido con el confocal sobre el patrón de contorno en la zona plana menos el valor obtenido en la zona inclinada según su orientación (X o Y). Ver Figura 31.

Se observa un comportamiento distinto ante la temperatura que el patrón anterior. En primer lugar, en cuanto a la distancia medida mediante el sensor confocal anteriormente se observaba una gráfica exponencial (Figura 33) con un periodo de estabilización antes de llegar al régimen estacionario, mientras que ahora, Figura 38, se observa un comportamiento mucho más irregular, con una variación máxima en la distancia medida con el sensor confocal de $0,732\text{ }\mu\text{m}$ (Figura 40).

También se puede ver que los picos debidos a la variación de la temperatura en la Figura 37 coinciden con los picos en la lectura del sensor confocal, Figura 38. La zona más estable en ambos casos es entre $3,89 \cdot 10^4\text{ s}$ y $7,73 \cdot 10^4\text{ s}$.

En la Figura 37 vemos que el comportamiento de la temperatura también es distinto respecto del caso anterior, cuyo comportamiento era cíclico, mientras que ahora únicamente se pueden ver 4 picos diferenciados habiendo una diferencia máxima de temperaturas de $0,81^\circ\text{C}$, Figura 39, calculada con el valor máximo entre picos de la galga M3, colocada sobre los cojinetes de aire o air bearings. La diferencia entre los resultados de temperaturas (Figura 34 y Figura 37) es debido a los cambios de temperatura externa y a cómo actúa el aire acondicionado para la climatización del laboratorio.

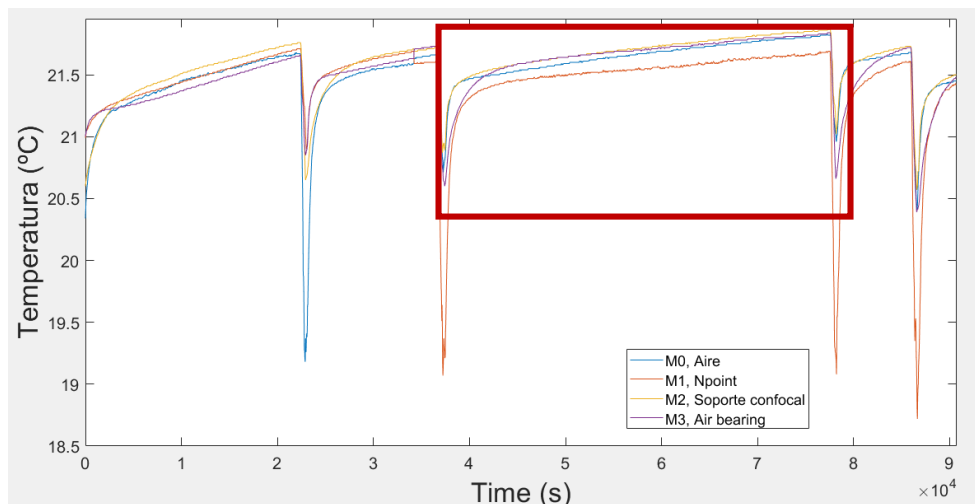


Figura 37. Variación de la temperatura en el ensayo: $t=24\text{h}$, nPoint off.

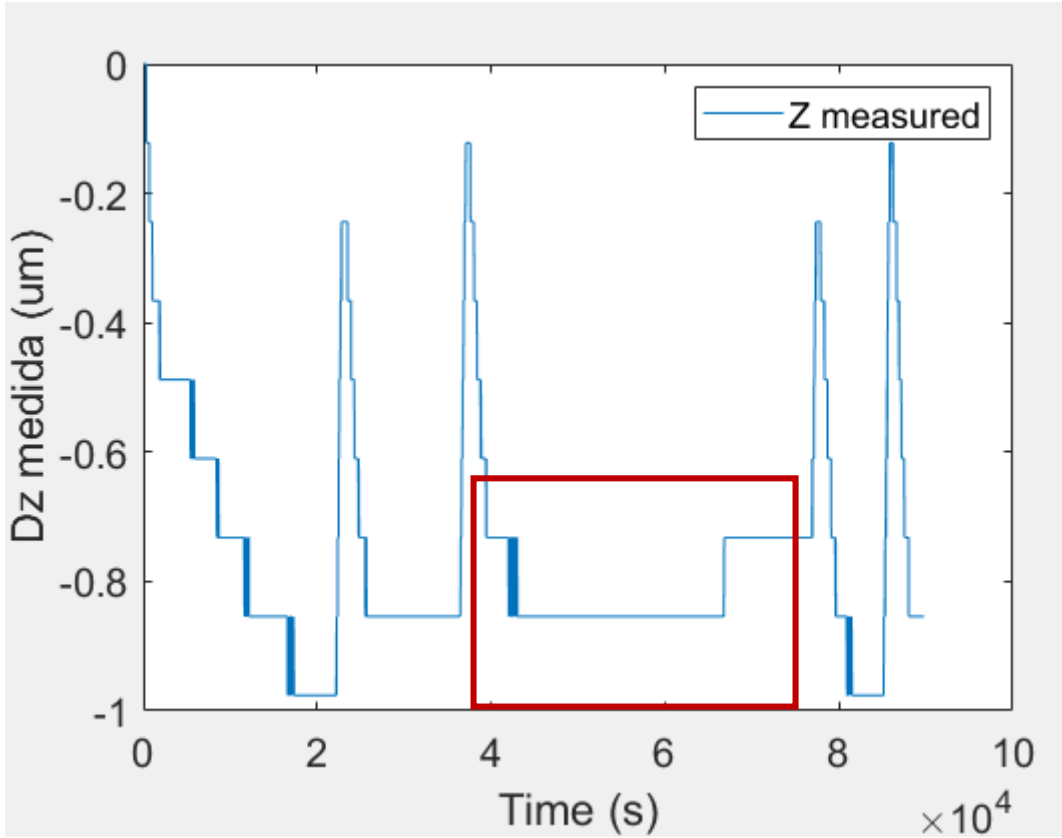


Figura 38. Δz medida por el confocal en ensayo: $t=24h$, nPoint off.

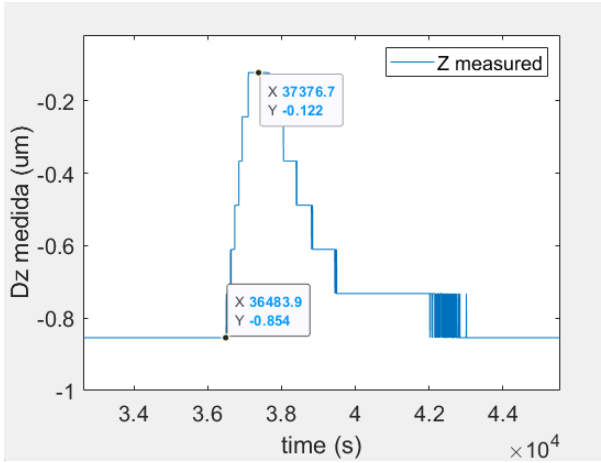


Figura 40. Zoom confocal.

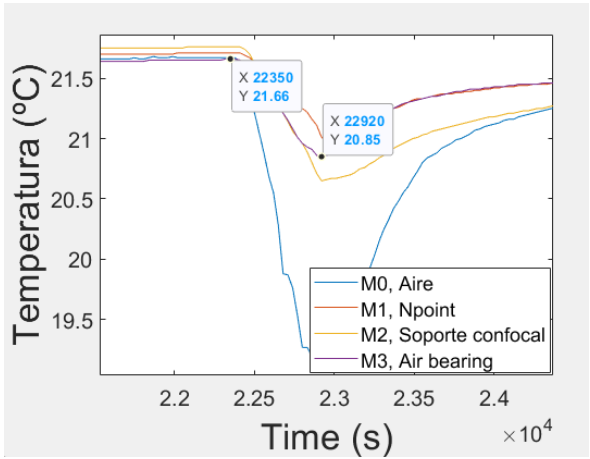


Figura 39. Zoom variación de temperaturas.

4.2.2 Estudio sobre el eje X

Para estudiar el efecto de la deriva térmica sobre el eje X se procederá de manera análoga que, en puntos anteriores, pero esta vez el punto del sensor confocal medirá sobre una superficie con una inclinación de 15° y orientada según el eje X.

Como se ha comentado anteriormente, mediante el sensor confocal y una superficie plana sólo se podrían observar desplazamientos y dilataciones en el eje Z. Al introducir una inclinación se podrá obtener dicho desplazamiento tanto en el eje X como en el eje Y mediante relaciones trigonométricas:

$$\operatorname{tg} \theta \cdot d = \Delta z$$

Siendo θ el ángulo de inclinación del patrón de contorno, 15°; d la dilatación o desplazamiento en el eje a estudiar y Δz la variación entre lecturas del sensor confocal entre la zona plana del patrón y la inclinada. La variación en Z debida al desplazamiento en X estará acoplada a la propia dilatación en Z, por eso se ha realizado el ensayo anterior en la zona plana del patrón (4.2.1).

La variación entre lecturas del sensor confocal ha sido calculada restando la diferencia máxima de lecturas en un pico del ensayo sobre la zona plana del patrón (Figura 40) a la diferencia máxima entre dos picos del ensayo sobre la zona inclinada orientada según el eje X (Figura 44).

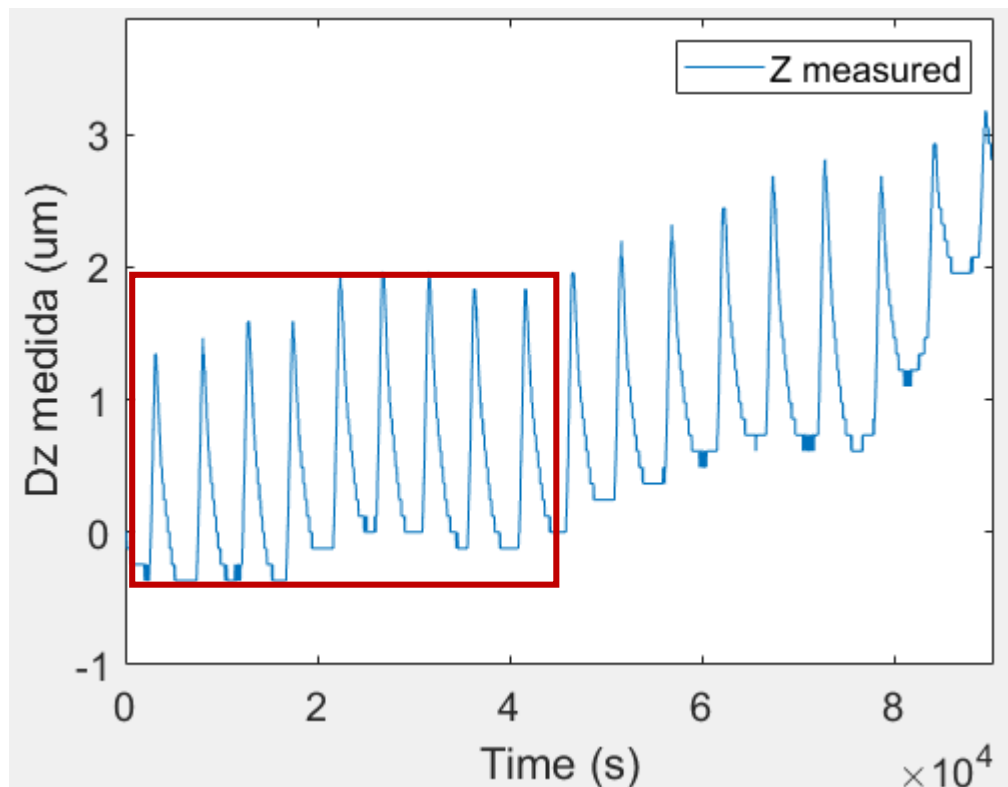


Figura 41. Δz medida por el confocal en ensayo: $t=24h$, $nPoint$ off.

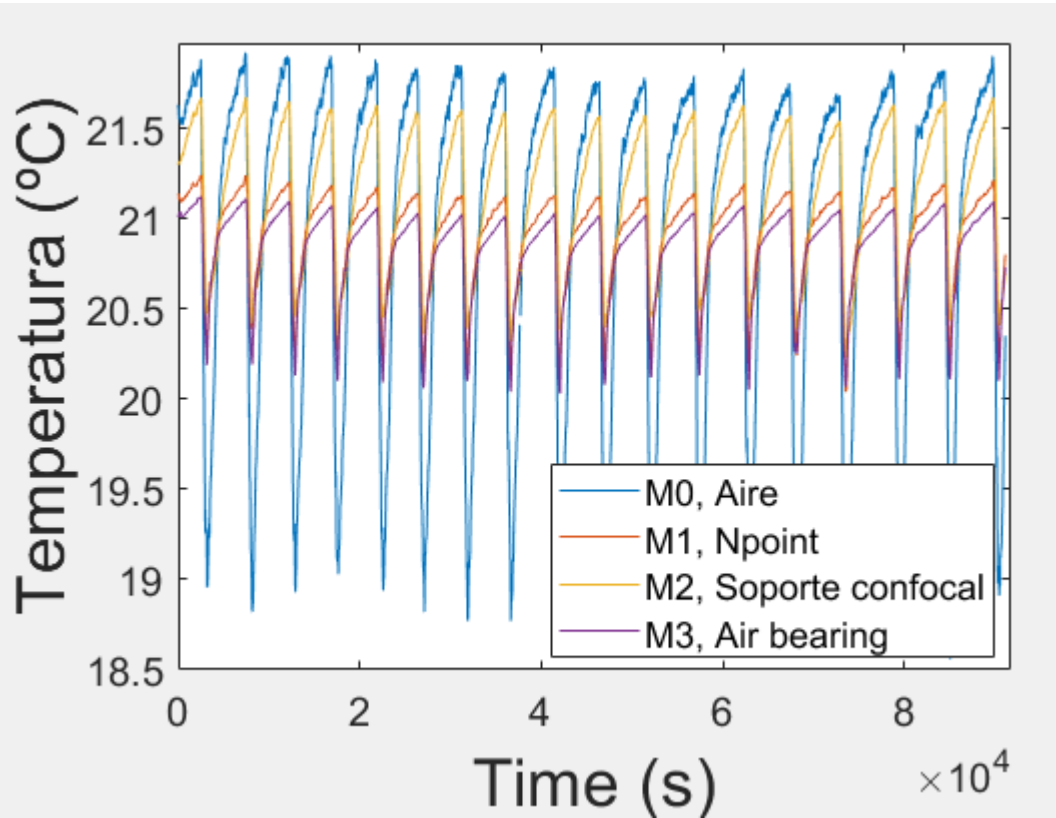


Figura 42. Variación de la temperatura en el ensayo: t=24h, nPoint off.

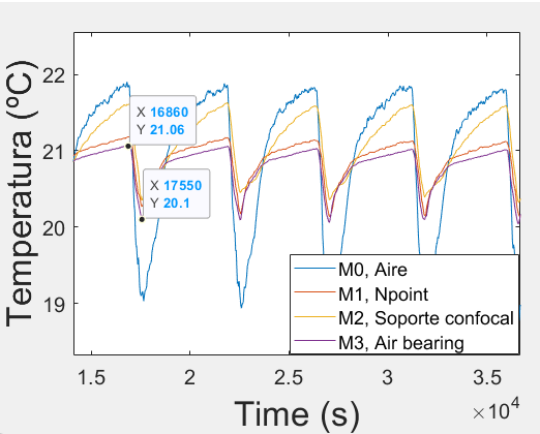


Figura 43. Zoom variación de temperaturas.

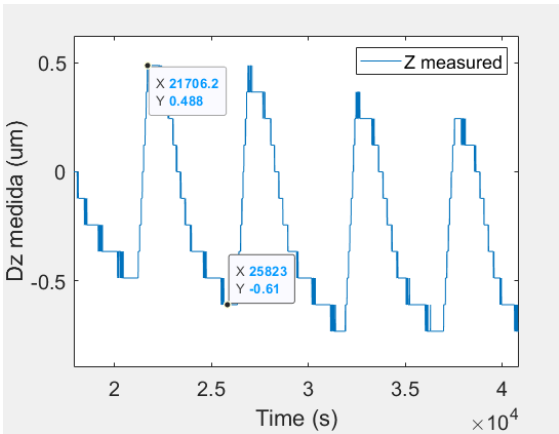


Figura 44. Zoom confocal.

En este caso la gráfica de la temperatura (Figura 42) vuelve a ser cíclica y se obtiene una diferencia máxima de temperaturas de 0,96 °C (Figura 43), similar a la de la Figura 39.

Por otro lado, en la Figura 44 vemos una diferencia máxima entre lecturas del sensor confocal de 1,098 µm, mayor a la obtenida anteriormente en la Figura 40, de 0,732 µm.

A partir de estos dos últimos valores se puede calcular el incremento de altura en Z, para a partir de él, en este caso obtener la dilatación en el eje Y.

$$\Delta z = 1,098\mu\text{m} - 0,732\mu\text{m} = 0,366\mu\text{m}$$

$$d = \frac{0,366}{\text{tg } 15} = 1,369\mu\text{m}$$

4.2.3 Estudio sobre el eje Y

Para estudiar el comportamiento de la deriva térmica orientando el patrón según el eje Y, se procederá de forma análoga al apartado 4.2.3 Estudio sobre el eje X.

A partir de la lectura del sensor en el estudio sobre el eje Z y la de este punto, se calculará la diferencia entre ambas y se obtendrá mediante relaciones trigonométricas la dilatación experimentada en Y.

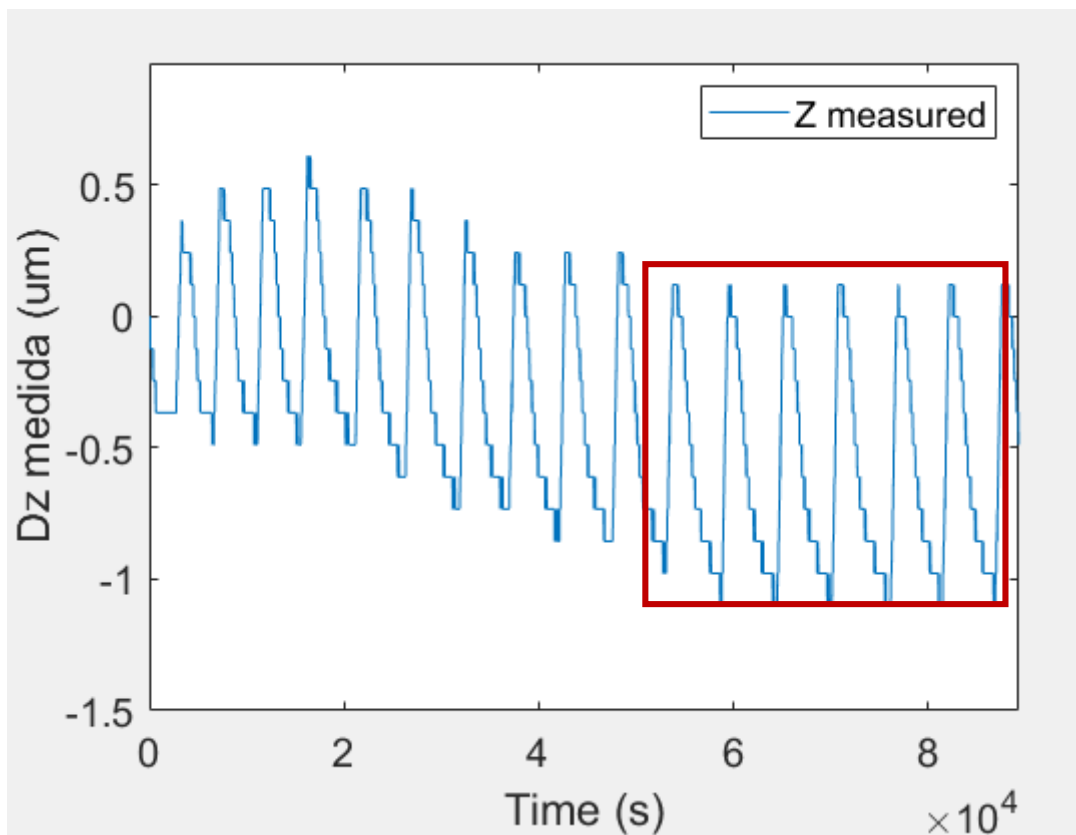


Figura 45. Δz medida medidas por el confocal en ensayo: $t=24h$, $nPoint$ off.

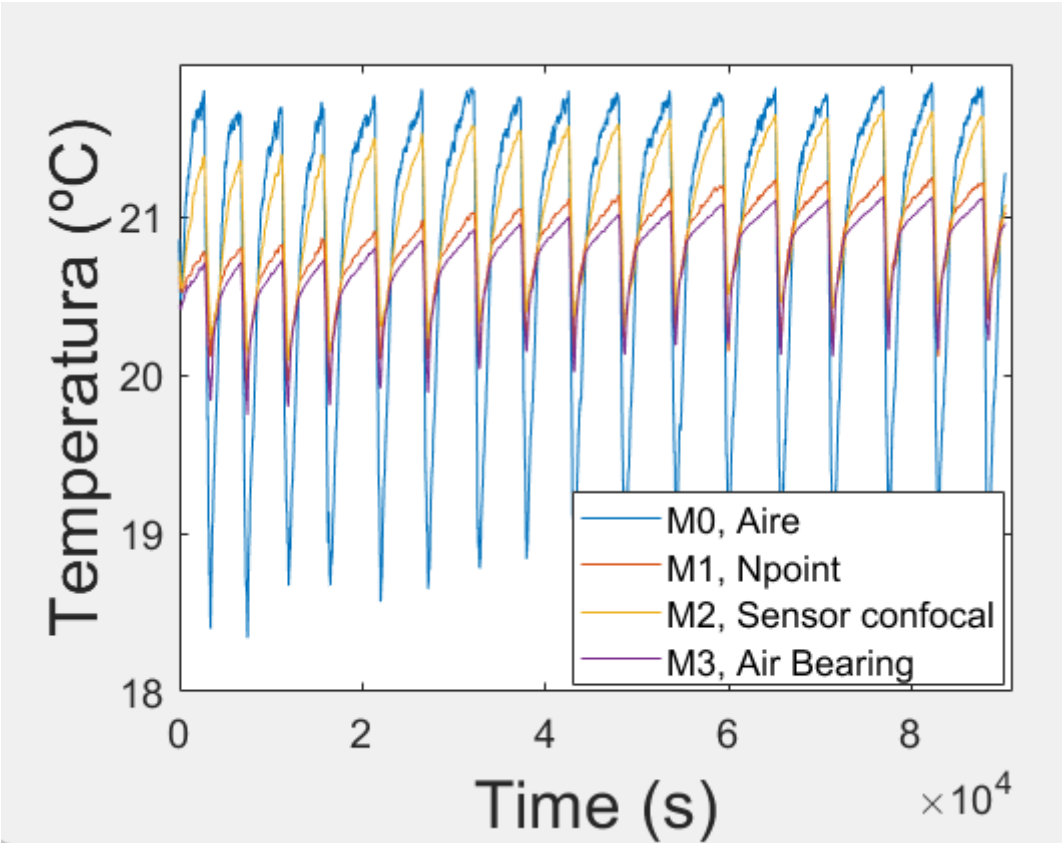


Figura 46. Variación de la temperatura en el ensayo: t=24h, nPoint off.

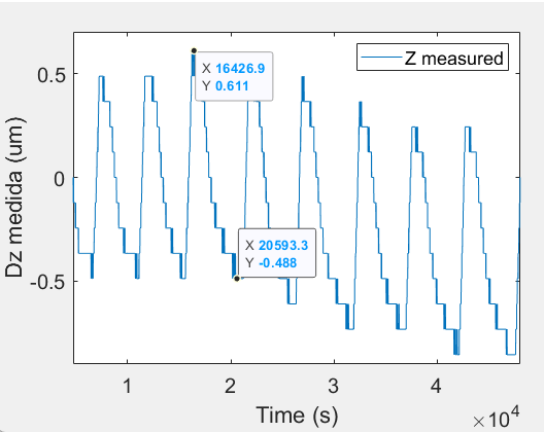


Figura 48. Zoom confocal.

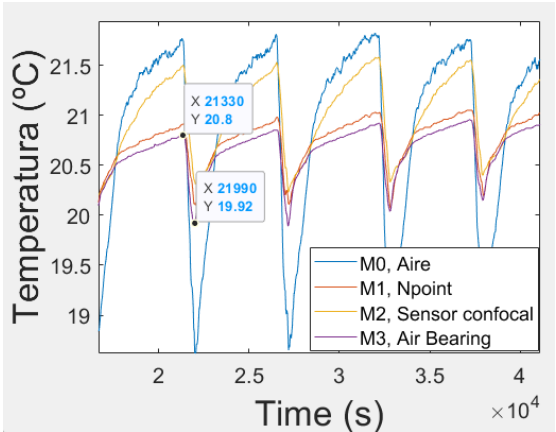


Figura 47. Zoom variación de temperaturas.

Al analizar la distancia medida máxima entre dos picos con el sensor confocal en la zona inclinada del patrón de contorno se obtiene un incremento de 1,099 μm (Figura 47) cuando dicho patrón se encuentra orientado según el eje Y. Este es igual al obtenido al estar el patrón

orientado según la dirección del eje X (Figura 44). Se observa que al a partir de $5 \cdot 10^4$ s se estabiliza el sistema (Figura 45).

Por otro lado, el incremento de temperatura máximo obtenido en el ensayo tomado en la galga M3, situada sobre los cojinetes de aire, es de $0,88^\circ\text{C}$ (Figura 47), de la misma magnitud que las diferencias obtenidas en los puntos 4.2.1 y 4.2.2.

Como en el caso anterior, se calculará la dilatación o desplazamiento debido al efecto de la deriva térmica en el eje Y:

$$\Delta z = 1,099\mu\text{m} - 0,732\mu\text{m} = 0,367\mu\text{m}$$

Siendo $0,732\mu\text{m}$ la diferencia máxima obtenido en el ensayo en la zona plana (4.2.1)

$$d = \frac{0,367}{\text{tg } 15} = 1,365\mu\text{m}$$

Como se puede observar, la dilatación sufrida en el eje Y, $1,365\mu\text{m}$, es prácticamente igual a la calculada en el apartado 4.2.2 para el eje X con un valor de $1,369\mu\text{m}$. A pesar, de haber observado comportamientos diferentes en cada eje de la NanoPla, que las dilataciones sean similares en ellos tienen sentido debido a que los ensayos de la deriva térmica se han realizado estáticamente, además de por el diseño simétrico de la plataforma.

5. Conclusiones y líneas de trabajo futuras

En este trabajo se presenta la caracterización de los errores generales del sensor confocal integrado en la NanoPla junto su soporte, del tornillo micrométrico motorizado y la posicionadora piezoeléctrica comercial (nPoint). Además del comportamiento del sistema ante la deriva térmica a largo plazo.

Durante su desarrollo únicamente se ha utilizado el movimiento de escaneo de la NanoPla, que sería el movimiento de la posicionadora piezoeléctrica comercial mencionada. A través de este movimiento se han caracterizado los errores del nPoint.

Se ha observado que las trayectorias llevadas a cabo tienen influencia sobre los resultados, dando lugar a desviaciones muy grandes, las cuales no son debidas a la longitud del paso al desplazar el nPoint, si no a vibraciones producidas haciendo inestable su acople sobre los tornillos micrométricos. Por otro lado, se vio que la digitalización de los datos no afectaba en los resultados.

También se ha visto que los ejes tenían comportamientos diferentes, destacando el del eje X, en el que se observaba una falta de repetibilidad en el extremo de su rango de trabajo, lo cual podría ser debido al flexible que permite el movimiento del nPoint, debido a su distribución anti simétrica entre ejes.

Varios ensayos fueron realizados para distintas posiciones del micrómetro motorizado, se quería saber si la posición del tornillo micrométrico afectaba, ya que podía ser que el acople cinemático no estuviera bien encajado en alguna de las posiciones, cosa que se descartó y se comprobó que al aumentar esta altura del tornillo aumentaba el ángulo de inclinación de la plataforma.

Por otro lado, se estudió la repetibilidad del acople cinemático del soporte del confocal, observando que este es más repetible en el eje Z que en los ejes X e Y y se propusieron mejoras.

Se observó el comportamiento de la NanoPla ante la deriva térmica a largo plazo, de lo que se puede concluir que la temperatura no introduce grandes errores en los resultados, con un error máximo en Z de $0,885\ \mu\text{m}$ y una variación de temperatura entre picos de $1,1^\circ\text{C}$, similar a lo obtenido en trabajos anteriores.

También se estudió el sistema de nivelación de la plataforma mediante 3 tornillos micrométricos. Se realizaron estudios de repetibilidad del tornillo motorizado observándose una mala referenciación del mismo y que este sufría de histéresis.

Como trabajo futuro se propone una correcta referenciación del tornillo micrométrico motorizado comentado anteriormente. Además, tras la caracterización de errores experimentales de la NanoPla se han encontrado pequeñas desviaciones angulares que podrían llegar a afectar a los resultados, por lo que se propone también la nivelación de la plataforma mediante el sistema de los tres tornillos micrométricos.

Otra vía más de trabajo futuro sería el estudio de repetibilidad del micrómetro motorizado con el patrón de contorno en los ejes X e Y y la medición de este patrón con el microscopio de variación focal Alicona u otro instrumento de medida con el fin de comparar los resultados y analizar los errores de medición de la NanoPla en estos dos ejes.

Referencias

- [1] L. Muro Fraguas, «Optimización del procedimiento de medida de un sensor confocal integrado en una nanoposicionadora de alto rango,» Trabajo Fin de Mater, Universidad de Zaragoza, Zaragoza, 2021.
- [2] A. Blasubramanian, M. Jun, R. DeVor y S. Kapoor, «A submicron multiaxis positioning stage for micro- and nanoscale manufacturing porecesses,» Journal of Manufacturing Science and Engineering, vol. 130, nº 3, p.031112, 2008.
- [3] S. Poyet y B. Ducourtieux, «Development of a metrological atomic force microscope with minimized Abbe error and diferential interferometer-based real-time position control,» Measurement Science and Technology, vol. 22, nº 9, p.094010, 2011.
- [4] E. Manske, G. Jäger, T. Hausotte y R. Füßl, «Recent developments and challenges of nanopositioning and technology,» Measuring Science Technology, vol. 23, p.74001-74010, 2012.
- [5] npoint, «<https://npoint.com/>,» 2020. [En línea].
- [6] L. Díaz Pérez, M. Torralba, J. Albajez y J. Yagüe, «2D Positioning Control System for the Planar Motion of a Nanopositioning Platform,» Aplied Sciences, vol.9, nº 22, p. 4860, 2019.
- [7] ««M-230 High-Resolution Linear Actuator with DC Motor,» Physik Instrumente (PI) GmbH,» [En línea].
- [8] L. Díaz Pérez, M. Torralba, J. Albáñez García y J. Yagüe Fabra, «Uncertainty budget of a large-range nanopositioning».
- [9] L. C. Díaz Pérez, «Práctica 3: Modelado y análisis de sistema de medición. Asignatura Ingeniería de precisión y fabricación aditiva.,» Universidad de Zaragoza, Zaragoza.
- [10] «Lasertex,» [En línea]. Available: <https://lasertex.eu/soporte/documentacion/tipos-de-errores/>.
- [11] D.-1. L. D. M. Heads., « <https://www.newport.com/p/DM-13L>,» MSK Newport, 2021. [En línea].

Anexo I

Principales componentes

Índice

Índice de figuras	56
1. Bloques patrón	57
2. Tornillos micrométricos	60
3. Sensor confocal	63
4. Microscopio de variación de foco de Alicona	65
5. Nanoposicionadora comercial de la marca nPoint	67
Referencias.....	69

Índice de figuras

Figura 1. Patrón cerámico plano.	57
Figura 2. Certificado de calibración patrón cerámico plano.	57
Figura 3. Patrón de contorno KN15 de Tungsteno.	58
Figura 4. Tornillo micrométrico manual DM-13L. Fuente: [1].	60
Figura 5. Especificaciones tornillo micrométrico manual DM-13L. Fuente: [1].	60
Figura 6. Dimensiones tornillo micrométrico manual DM-13L. Fuente: [1].	61
Figura 7. Tornillo micrométrico motorizado M-230.10 PI. Fuente: [2].	61
Figura 8. Dimensiones tornillo micrométrico motorizado M-230 PI. Fuente: [2].	61
Figura 9. Especificaciones tornillo micrométrico motorizado (I). Fuente: [2].	62
Figura 10. Especificaciones tornillo micrométrico motorizado (II). Fuente: [2].	62
Figura 11. Luz monocromática en el sensor confocal. Fuente: [3]	63
Figura 12. Esquema de un sensor confocal cromático. Fuente: [3]	63
Figura 13. Errores del sensor confocal. Fuente: [4].	64
Figura 14. Sensor CL4-MG35 y fibra óptica. Fuente: [3]	64
Figura 15. Panel principal del controlador CCS-Optima+. Fuente: [3]	64
Figura 16. Características sensor confocal. Fuente: Manual del fabricante.	65
Figura 17. InfiniteFocusSL de Alicona.	65
Figura 18. Principio de funcionamiento microscopio Alicona. Fuente: Manual del fabricante.	66
Figura 19. Especificaciones microscopio Alicona. Fuente: Manual del fabricante.	66
Figura 20. Errores de la posicionadora comercial nPoint. Fuente: [5].	67
Figura 21. Especificaciones posicionadora comercial nPoint. Fuente: [5].	67
Figura 22. Dimensiones posicionadora comercial nPoint.	68

1. Bloques patrón

Para el desarrollo del trabajo se han utilizado dos bloques patrón diferentes, un patrón cerámico plano y un patrón de contorno de Tungsteno.

El patrón cerámico plano de 1 mm de espesor ha sido utilizado para realizar todos los ensayos del trabajo, incluidos los de caracterización de errores del nPoint. Con este patrón se han caracterizado posibles errores experimentales en el eje Z.

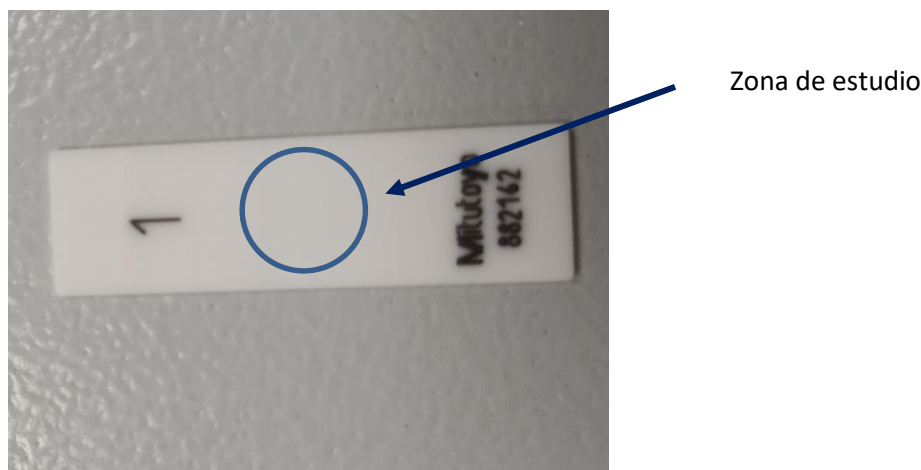


Figura 1. Patrón cerámico plano.

Este patrón ha sido validado según su planitud con el microscopio de variación de foco de Alicona.

A continuación, se muestran los datos del certificado de calibración del bloque patrón cerámico:

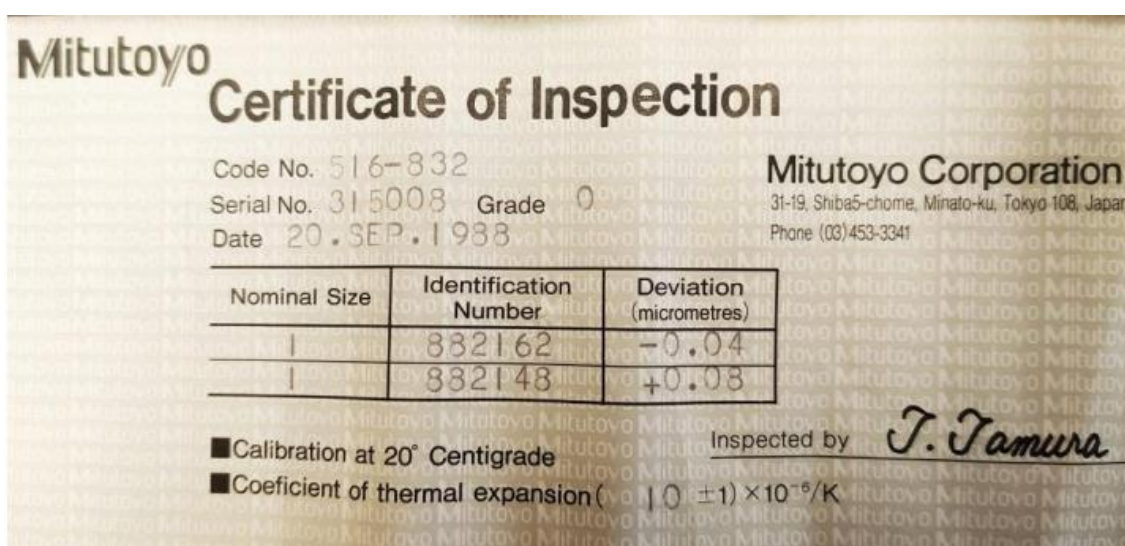


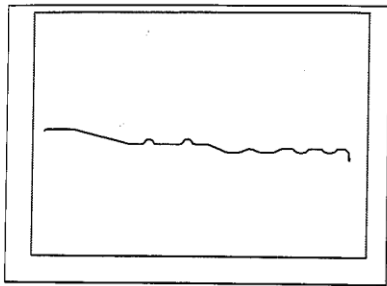
Figura 2. Certificado de calibración patrón cerámico plano.

El segundo patrón, ha sido utilizado únicamente en los ensayos estáticos, es decir, en el ensayo de repetibilidad del sensor confocal y su acople cinemático y en los ensayos de deriva térmica. Ha sido analizado en dos de sus superficies: superficie plana y superficie inclinada. Además, para la superficie inclinada ha sido estudiado según la orientación del eje X y según la orientación del eje Y.

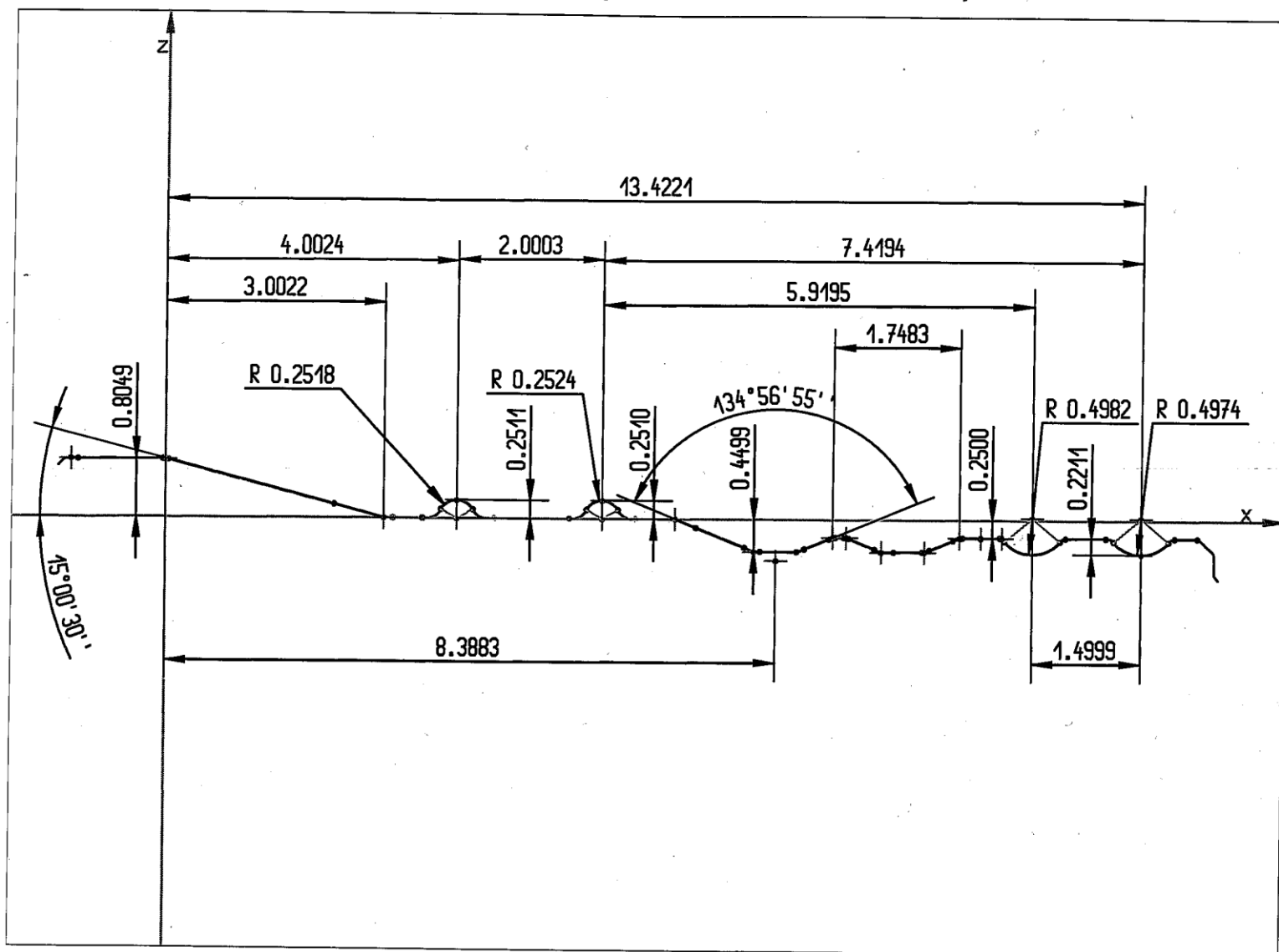


Figura 3. Patrón de contorno KN15 de Tungsteno.

A continuación, se adjunta el certificado de calibración del patrón de contorno de Tungsteno:



Werks-Kalibrierschein (Proprietary Calibration Certificate)



Gegenstand (Object)
 Typ (Type)
 Serien Nr. (Serial No.)
 Prüfgerät (Checking device)
 Anschluß an nationale Normale (Traceability to national standard)
 Datum (Date of calibration)

Micro contour standard
 KN15
 S.Nr.: 2000518
 ConturoMatic TS-X #11511
 KN180_021632 S.Nr.:0597027
 17.10.2018

Prüfer (Inspector)

David Rösch

Die Kalibrierung erfolgte durch Vergleich mit Bezugsnormale, die in einer innerhalb der European cooperation for Accreditation (EA)akkreditierten Kalibrierstelle kalibriert wurden und damit rückgeführt sind auf die nationalen Normale, mit denen die Physikalisch-technische Bundesanstalt (PTB) die physikalischen Einheiten in Übereinstimmung mit dem Internationalen Einheitensystem- (SI) darstellt.

The calibration is performed by comparison with reference standards or standard measuring equipment which are calibrated by a Calibration laboratory accredited within the European cooperation for Accreditation (EA) and thus traceable to the national measurement standards maintained by the Physikalisch- Technische Bundesanstalt (PTB) for the realisation of the physical units according to the International system of Units (SI).
 Längenmaße in mm

bcn Qualites, S.L.

Avda. Gran Via, 806 - 08013 BARCELONA
 Tel. 93 231 94 00 - Fax 93 265 67 83
 Mail: info@qualites.net
 www.qualites.net

ConturoMatic Software-Version 1.1.0.283

2. Tornillos micrométricos

La NanoPla consta de 3 tornillos micrométricos, dos manuales y uno motorizado.

Los tornillos motorizados manuales se pusieron en su mínima posición antes de comenzar con el trabajo ya que estos no iban a ser utilizados y debían estar como referencia (0), mientras que el tornillo micrométrico motorizado ha sido estudiado con más detalle observando principalmente la repetibilidad del mismo.

Los micrómetros manuales son el modelo DM-13L de la marca micro-control del grupo Newport [1]. Estos proporcionan un posicionamiento submicrométrico en un recorrido de 13 mm. El diseño incorpora un micrómetro estándar con un micrómetro de alta resolución. El micrómetro estándar tiene una sensibilidad de 1 μm ; mientras que el micrómetro de alta resolución permite un posicionamiento ultrafino en 0,2 mm de recorrido, con una sensibilidad de 0,1 μm . Además, ambos recorridos (tanto el fino como el grueso) se pueden bloquear con una sola tuerca que asegura la posición con un desplazamiento insignificante durante el bloqueo.



Figura 4. Tornillo micrométrico manual DM-13L. Fuente: [1].

– Specifications

Type	Differential Micrometer	Fine Travel	0.2 mm
Travel Range	13.0 mm	Graduations, Fine	0.5 μm
Drive Type	Knob	Sensitivity	0.1 μm
Graduations	10 μm	Lock	Side Lock
Axial Load Capacity	49 N		

Figura 5. Especificaciones tornillo micrométrico manual DM-13L. Fuente: [1]

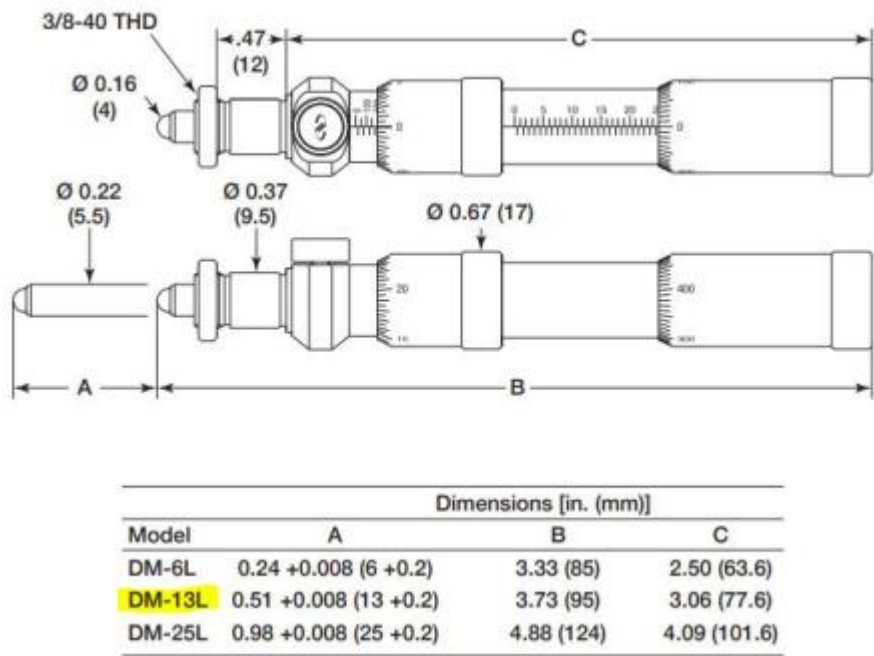


Figura 6. Dimensiones tornillo micrométrico manual DM-13L. Fuente: [1].

En cuanto al tornillo micrométrico motorizado, se trata del modelo M-230.10 de la marca PI [2]. Este micrómetro permite un movimiento incremental con una repetibilidad de sólo 100 nm.



Figura 7. Tornillo micrométrico motorizado M-230.10 PI. Fuente: [2]

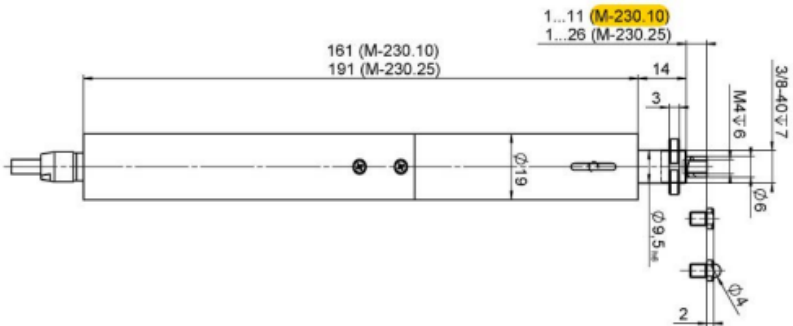


Figura 8. Dimensiones tornillo micrométrico motorizado M-230 PI. Fuente: [2].

A continuación, en las Figuras 9 y 10 se muestran las especificaciones del tornillo micrométrico motorizado:

Motion and positioning	M-230.10 / M-230.25	Unit	Tolerance
Travel range	10 / 25	mm	
Integrated sensor	Rotary encoder		
Sensor resolution	2048	Cts./rev.	
Design resolution	0.0046	μm	typ.
Minimum incremental motion	0.05	μm	typ.
Backlash	2	μm	typ.
Unidirectional repeatability	±0.1	μm	typ.
Velocity	0.8	mm/s	max.
Reference switch repeatability	1	μm	typ.

Mechanical properties	M-230.10 / M-230.25	Unit	Tolerance
Drive screw	Leadscrew		
Thread pitch	0.4	mm	
Gear ratio	42.92063:1		
Motor resolution	-	steps/rev.	
Push/pull force	70	N	max.
Permissible lateral force	30 / 20	N	max.

Figura 9. Especificaciones tornillo micrométrico motorizado (I). Fuente: [2].

Drive properties	M-230.10 / M-230.25	Unit	Tolerance
Motor type	DC gear motor		
Operating voltage	0 to ±12	V	
Motor power	1.78	W	nominal
Reference and limit switches	Hall effect		

Miscellaneous	M-230.10 / M-230.25	Unit	Tolerance
Operating temperature range	-20 to 65	°C	
Material	Anodized aluminum, chrome steel, brass		
Mass	0.3 / 0.35	kg	±5 %
Cable length	0.5	m	±10 mm
Connector	D-sub 15 (m), incl. encoder driver		
Recommended controllers/drivers	C-863 C-884		

Figura 10. Especificaciones tornillo micrométrico motorizado (II). Fuente: [2].

3. Sensor confocal

El sensor confocal utilizado es un sensor cromático [3]. Su principio de funcionamiento es el siguiente: la luz blanca del haz se descompone en los diferentes colores que la componen, de forma que cada luz monocromática tiene una longitud de onda y un plano focal distinto. Los planos focales se encuentran alineados y perpendiculares al eje de medida. El fotodetector recibe la luz reflejada en uno de los planos focales de los distintos colores, dependiendo de la posición de la muestra, como se ve en la Figura 11.

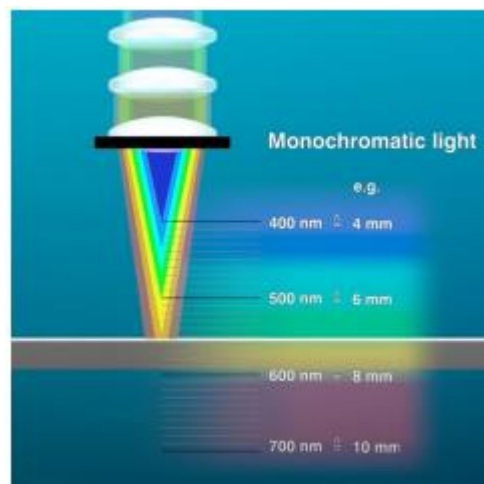


Figura 11. Luz monocromática en el sensor confocal. Fuente: [3]

En este caso, el fotodetector es un espectrómetro capaz de analizar el espectro de frecuencias, de manera que puede identificar a qué luz cromática pertenece el plano focal en el que se sitúa la muestra y así conocer su posición (Figura 12).

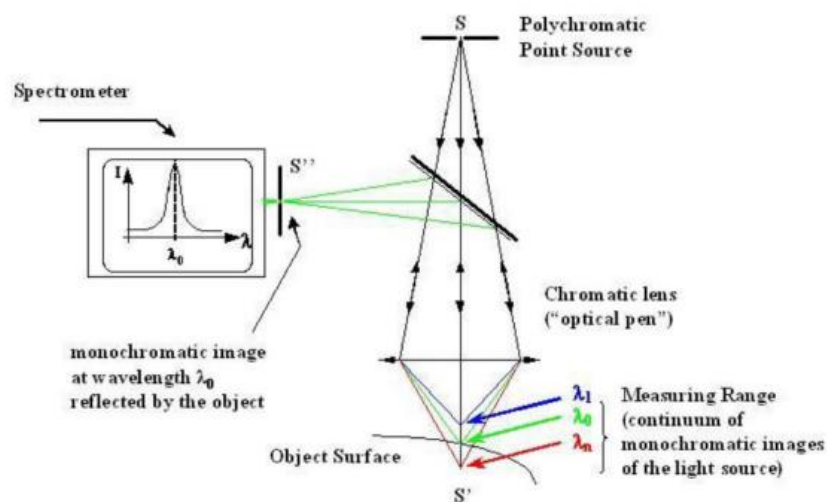


Figura 12. Esquema de un sensor confocal cromático. Fuente: [3]

Fuente de error	Parte	Descripción	Vector de error	Valor [nm]	Distribución de probabilidad	Incertidumbre estándar [nm]
Sensor confocal	{SC} - {1}	Ruido estático	$\delta_{P3,n}^{[c]}$	$\pm 99^1$	Uniforme	$\pm 99,0$
		Resolución	$\delta_{P3,r}^{[c]}$	122	Uniforme	$\pm 70,4$
		Errores lineales	$\delta_{P3,l}^{[c]}$	190	Uniforme	$\pm 109,7$

¹ Este valor se ha obtenido mediante el cálculo de RMSD (Root Mean Square Deviation) del sensor confocal.

Figura 13. Errores del sensor confocal. Fuente: [4].

El sensor confocal cromático seleccionado es el modelo CL4 MG 35. Este sensor mide en 1D sin establecer contacto con la pieza a medir, en un rango de 4000 μm con una resolución de 0,122 μm . La dimensión que va a medir el sensor es la componente Z (altura) de la muestra que se encuentre sobre el portamuestras. Los errores del sensor confocal se muestran resumidos en la Figura 13.

En las Figuras 14 y 15 se observan los principales componentes del sensor confocal, mientras que en la Figura 16 sus principales características:



Figura 14. Sensor CL4-MG35 y fibra óptica. Fuente: [3]

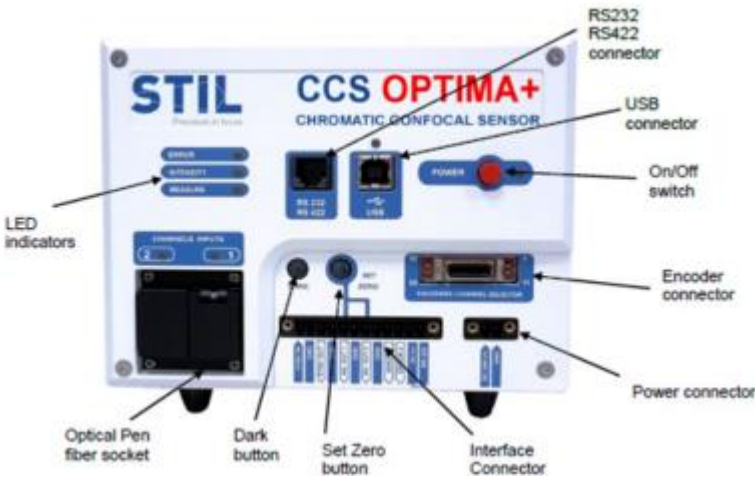


Figura 15. Panel principal del controlador CCS-Optima+. Fuente: [3]

CL-MG Line Specifications for CCS Optima+ Controller																
Model		CL0 ⁽¹³⁾		CL1		CL2		CL3		CL4		CL5		CL6		
Measuring range ⁽¹⁾	µm	100		150		400		1300		4000		12000		24000		
Working distance ⁽²⁾	mm	2.69		3.35		10.8		12.0		16.2		25.9		21.5		
Max. sample slope ⁽³⁾	deg	±42°		±42.5°		±28°		±25°		±21°		±14°		±8.5°		
Reference plate ⁽⁴⁾	-	No		No		Yes		Yes		Yes		Yes		No		
Axial model ⁽⁵⁾	-	Standard Optional														
Radial model ⁽⁵⁾	-															
Magnifier model		MG 210	MG 140	MG 210	MG 140	MG 210	MG 140	MG 70	MG 140	MG 70	MG 35	MG 20	MG 35	MG 20	MG 35	MG 20
NUMERICAL APERTURE																
Beginning of M.R.	-	0.76	0.76	0.72	0.72	0.47	0.47	0.47	0.43	0.43	0.35	0.35	0.25	0.25	0.19	0.19
Mid-range	-	0.75	0.75	0.71	0.71	0.46	0.46	0.46	0.41	0.41	0.33	0.33	0.21	0.21	0.14	0.14
End of M.R.	-	0.75	0.75	0.71	0.71	0.46	0.46	0.46	0.41	0.41	0.32	0.32	0.20	0.20	0.12	0.12
LATERAL (XY) PROPERTIES																
Spot size ⁽¹²⁾																
Beginning of MR	µm	1.6	2.0	2.4	3.2	3.5	4.6	8.1	6.0	10.8	10.7	17.6	19.6	32.8	18.6	30.5
Center of MR	µm	1.8	2.2	2.7	3.5	4.0	5.2	8.8	6.8	11.9	12.3	19.9	24.3	40.0	26.8	43.0
End of MR	µm	1.9	2.4	3.0	3.8	4.4	5.7	9.3	7.4	12.6	13.4	21.3	27.2	44.2	32.7	51.4
Lateral resolution ⁽⁶⁾	µm	1.1	1.0	1.1	1.3	1.7	1.8	3.7	2.6	4.5	4.6	7.0	11	14	11	18
PHOTOMETRIC EFFICIENCY ⁽⁷⁾																
Collected energy (relative)		0.5	1.7	3.3	10	2.8	7.9	41	10	57	25	91	33	100	9.8	43
MECHANICAL INTERFACE																
Length ⁽⁸⁾	mm	263.6	229	253.1	217.1	243.3	208.9	176.1	205.9	176.1	145.5	131.7	145.5	131.7	167.6	151.8
Diameter	mm	27	27	27	27	27	27	27	27	27	27	27	27	27	27	27
Weight ⁽⁹⁾	g	227	192	268	195	248	190	189	215	214	155	140	175	160	195	180

Figura 16. Características sensor confocal. Fuente: Manual del fabricante.

4. Microscopio de variación de foco de Alicona

El instrumento InfiniteFocusSL de Alicona del laboratorio de metrología y que utilizaremos (Figura 17) es un microscopio óptico de variación de foco que permite medir formas, acabados y superficies con microestructuras. A diferencia del sensor confocal, para ser medido en este instrumento, la muestra tiene que tener una rugosidad mínima [3].



Figura 17. InfiniteFocusSL de Alicona.

El área de escaneo en cada medida es de 2 mm × 2 mm, este procesamiento se lleva a cabo en los ensayos de medición de los escalones del patrón de contorno debido a la anchura de estos.

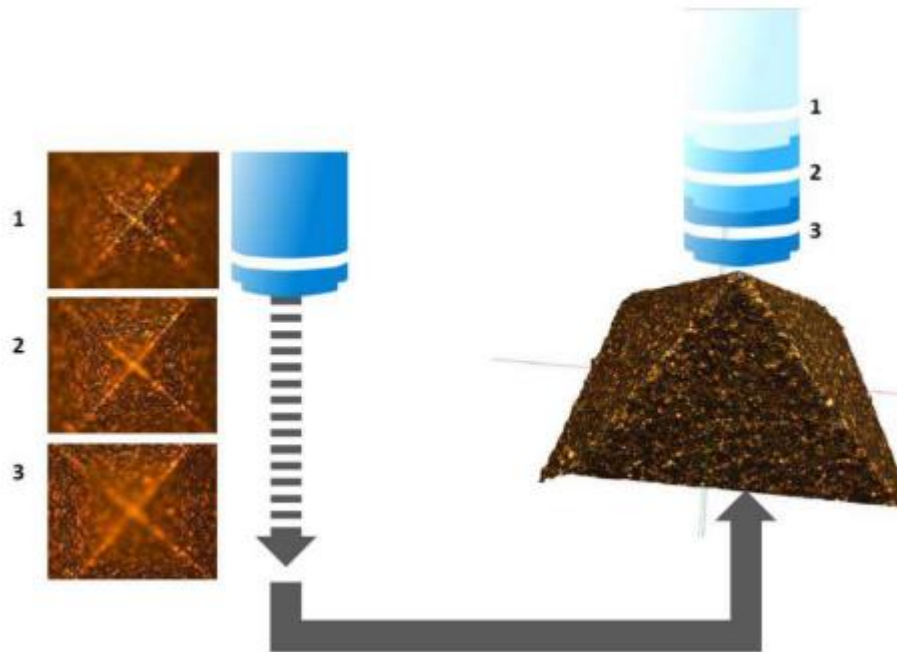


Figura 18. Principio de funcionamiento microscopio Alicona. Fuente: Manual del fabricante.

Las características de medida con Alicona dependen de los parámetros de medida y de la magnificación de la lente, los rangos que se muestran a continuación son para una lente de magnificación 10x, que es la que usaremos:

Distancia de trabajo	17,5 mm
Área de escaneado	2 mm × 2 mm
Resolución vertical	>100 nm
Resolución lateral	~3 µm
Altura de escaneo	<22 mm
Área máxima de medida	50 mm × 50 mm
Rugosidad mínima de medida (Ra)	0,3 µm

Figura 19. Especificaciones microscopio Alicona. Fuente: Manual del fabricante.

5. Nanoposicionadora comercial de la marca nPoint

El modelo de la posicionadora es NPXY100Z10A de la marca nPoint. Tiene un rango de trabajo de 100 μm × 100 μm × 10 μm, un ruido de posicionamiento de 0,5nm en el plano XY y de 0,1nm en el plano Z [4] [5].

A continuación, se muestran los errores de la posicionadora (Figura 20) y sus especificaciones (Figura 21):

Parte	Descripción	Vector de error	Valor	Distribución de probabilidad	Incertidumbre estándar [nm]
nPoint - muestra	Errores lineales	$l_{error,x}^{[S]}$	0,05%	Uniforme	$\pm 14,4^1$
		$l_{error,y}^{[S]}$			
		$l_{error,z}^{[S]}$	0,5%		$\pm 1,4^1$
	Ruido de posicionamiento	$\phi_x = \phi_y$	0,5 nm	Uniforme	$\pm 0,5$
		ϕ_z	0,1 nm		$\pm 0,1$

¹ Depende de la posición. Valor mostrado para la posición X= 50 μm; Y= 50 μm; Z= 5 μm de la etapa del piezo (escenario más desfavorable).

Figura 20. Errores de la posicionadora comercial nPoint. Fuente: [5].

Specifications

Range (μm)	100 x 100 x 10
Footprint (mm)	140 x 140 x 30
Aperture (mm)	68 x 68
Material	Aluminum
Max Load (kg)	1

The NPXY100Z10A is a closed-loop XYZ nanopositioner with 100μm x 100μm x 10μm range of motion. It has the highest resonant frequency available in the market for products of similar function. Its large aperture allows for easy integration with optical microscopes or any application that requires easy sample access.

	XY	Z
Position Noise (nm)	0.5	0.1
Small Signal Settling Time (ms/1μm step)	15	7
Resonant Frequency (Hz, unloaded, typical)	600	1600
Linearity Error (%)	0.05	0.5
Hysteresis (% , typical)	0.05	0.5
Part Number	3715128	

Application Examples

- Near-Field Scanning Optical Microscopy
- Scanning Probe Microscopy
- Optical Microscopy
- Lithography
- Nanometer-scale Manipulation
- Metrology
- Optical Fiber Alignment

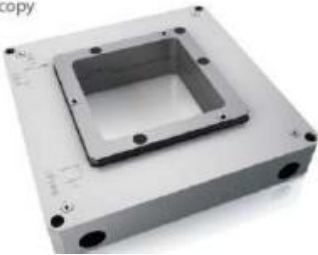


Figura 21. Especificaciones posicionadora comercial nPoint. Fuente: [5].

Installation

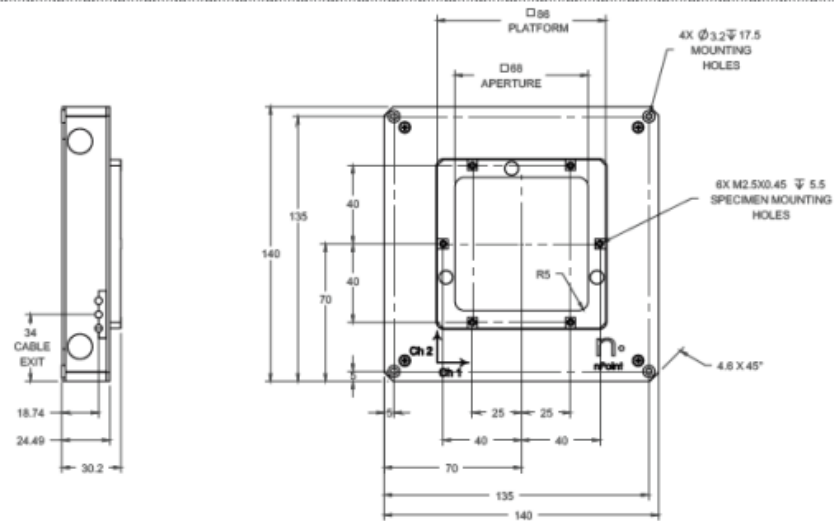


Figura 22. Dimensiones posicionadora comercial nPoint.

Referencias

- [1] D.-1. L. D. M. Heads., « <https://www.newport.com/p/DM-13L>,» MSK Newport, 2021. [En línea].
- [2] ««M-230 High-Resolution Linear Actuator with DC Motor,» Physik Instrumente (PI) GmbH,» [En línea].
- [3] L. C. Díaz Pérez, «Práctica 3: Modelado y análisis de sistema de medición. Ingeniería de precisión y fabricación aditiva,» Universidad de Zaragoza, Zaragoza.
- [4] L. Muro Fraguas, «Optimización del procedimiento de medida de un sensor confocal integrado en una nanoposicionadora de alto rango,» Trabajo Fin de Master, Universidad de Zaragoza, Zaragoza, 2021.
- [5] npoint, «<https://npoint.com/>,» 2020. [En línea].

Anexo II

Caracterización de errores del nPoint (I)

Índice

1. Efecto de la longitud del paso en los errores de posicionamiento del nPoint	72
2. Efecto en la digitalización de los datos	75

Índice de figuras

Figura 1. Cruz origen de coordenadas, Zmot=0 mm, paso de 25 μm	72
Figura 2. Cruz origen de coordenadas, Zmot=0 mm, paso de 10 μm	72
Figura 3. Cruz origen de coordenadas, Zmot=1 mm, paso 10 μm	73
Figura 4. Ensayo diagonal, Zmot=0 mm, paso de 10 μm	73
Figura 5. X=-25, Y variable, Zmot=0 mm, paso de 10 μm	73
Figura 6. X=25, Y variable, Zmot=0 mm, paso de 10 μm	74
Figura 7. Y=-25, X variable, Zmot=0 mm, paso de 10 μm	74
Figura 8. Cruz origen, Zmot=0 mm, paso 25 μm , software nPoint.	75
Figura 9. Cruz origen, Zmot=1 mm, paso 25 μm , software nPoint (I).....	75
Figura 10. Cruz origen, Zmot=1 mm, paso de 25 μm , software nPoint (II).....	76
Figura 11. Cruz en (Y,25) y (25, Y), Zmot=0 mm, paso de 25 μm , software nPoint.	76
Figura 12. X=25, Y variable, Zmot=0 mm, paso de 25 μm , software nPoint.....	76
Figura 13. Diagonal, paso de 25 μm , software nPoint	76
Figura 14. Ensayos diagonales, Zmot=0 mm, paso de 25 μm , software nPoint.	76

1. Efecto de la longitud del paso en los errores de posicionamiento del nPoint

Para poder caracterizar los errores del nPoint se hicieron diferentes ensayos de ida y vuelta, es decir, partiendo de un extremo de la plataforma se desplazaba el nPoint hasta el extremo opuesto y una vez allí se volvía de nuevo al extremo de comienzo para poder observar posibles variaciones en un mismo punto, además de estudiar el fenómeno de la histéresis debido al comportamiento de cada eje.

Estos ensayos se hicieron para un paso de 10 o 25 μm , una altura del tornillo micrométrico motorizado (Zmot) de 0 o 1 mm y siempre desplazando el nPoint sobre un único eje dejando el otro constante, salvo en las diagonales de la plataforma.

La razón de realizar las simulaciones en dos posiciones distintas del tornillo motorizado (0 mm y 1 mm) era para poder saber si la posición del tornillo micrométrico afectaba en los errores de los resultados, viéndose que esta no afecta ya que se obtienen resultados similares en ambos casos.

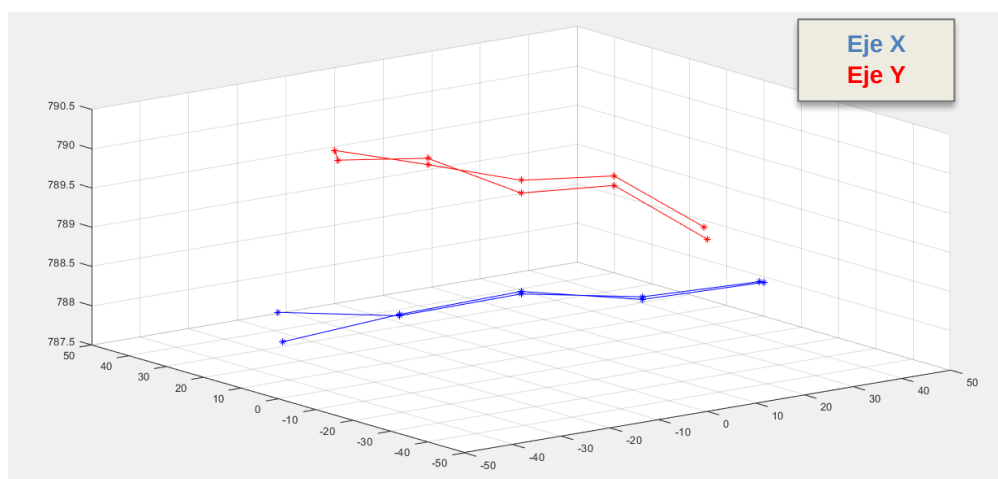


Figura 1. Cruz origen de coordenadas, Zmot=0 mm, paso de 25 μm .

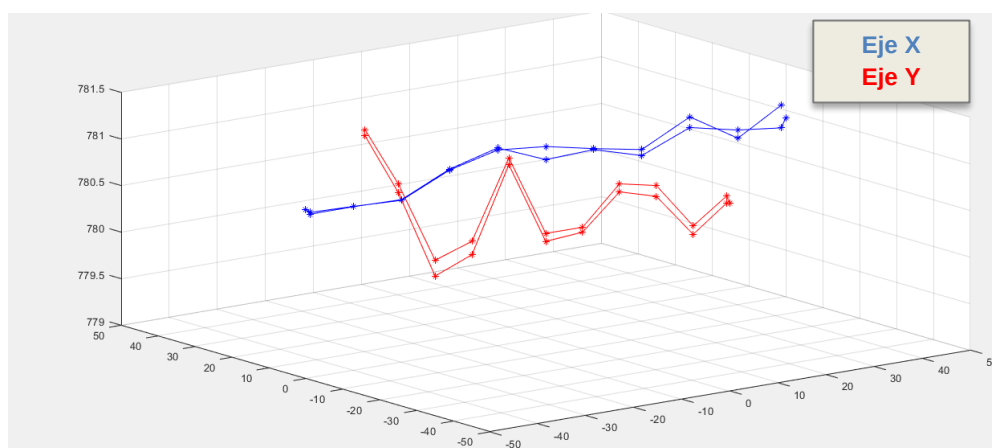


Figura 2. Cruz origen de coordenadas, Zmot=0 mm, paso de 10 μm .

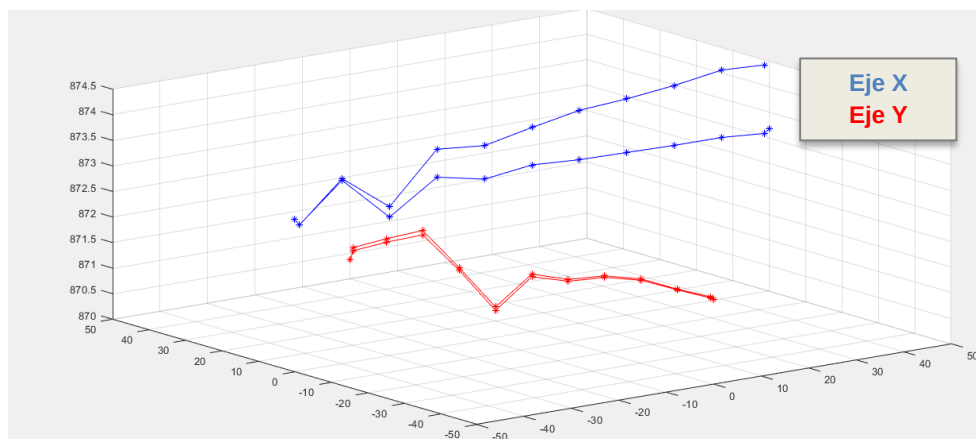


Figura 3. Cruz origen de coordenadas, $Z_{mot}=1 \text{ mm}$, paso de $10 \mu\text{m}$.

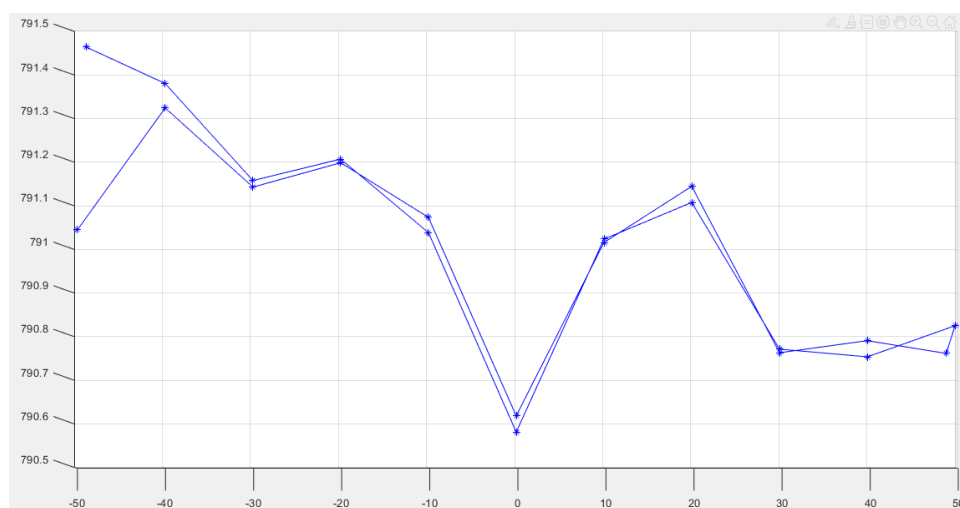


Figura 4. Ensayo diagonal, $Z_{mot}=0 \text{ mm}$, paso $10 \mu\text{m}$.

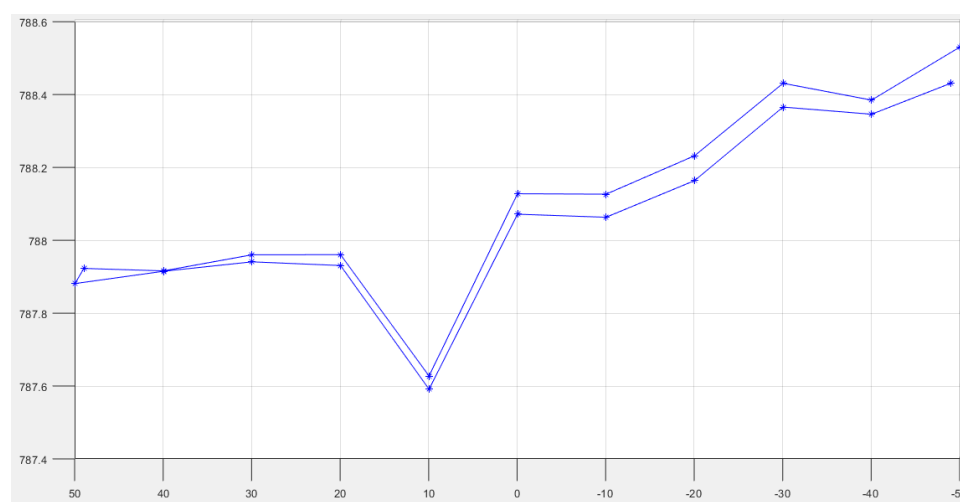


Figura 5. $X=-25$, Y variable, $Z_{mot}=0 \text{ mm}$, paso de $10 \mu\text{m}$.

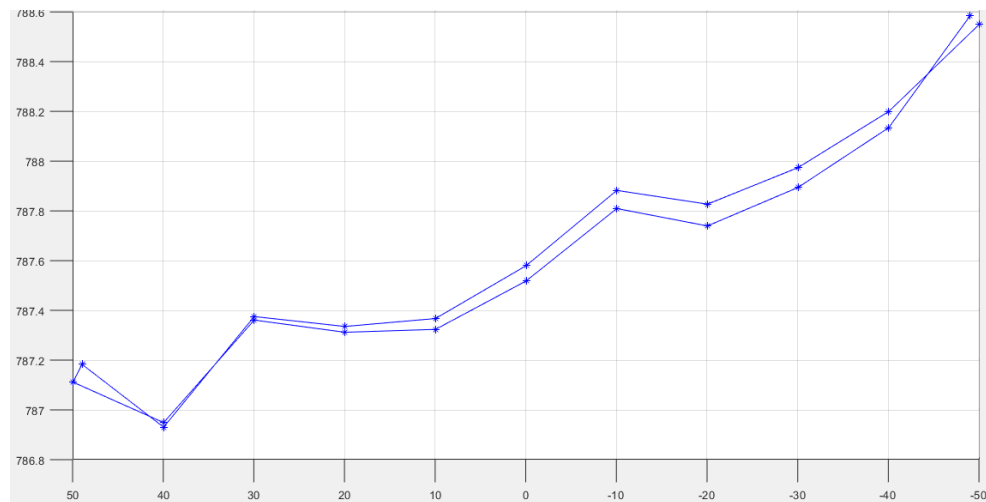


Figura 6. X=25, Y variable, Zmot=0 mm, paso de 10 μm.

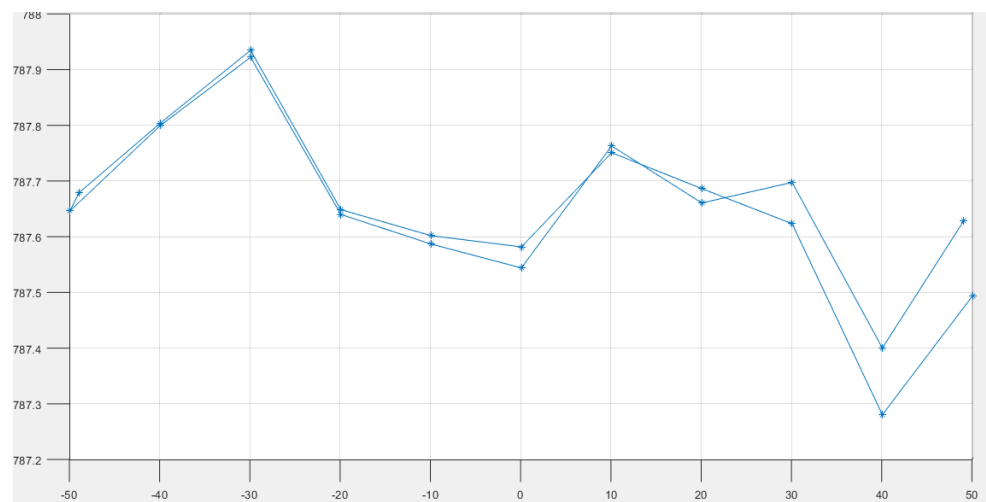


Figura 7. Y=-25, X variable, Zmot=0 mm, paso de 10 μm.

Tras el análisis de los resultados obtenidos en las figuras anteriores, se puede concluir que la longitud del paso no debería tomarse como una fuente de error ya que el máximo error cometido es inferior a 1,8 μm para ambas longitudes de paso.

2. Efecto en la digitalización de los datos

Hasta aquí, todos los ensayos fueron realizados mediante un convertidor analógico digital (DAQ) programado mediante Matlab y Simulink.

Al observar desviaciones entre los resultados obtenidos, fueron realizados los siguientes ensayos mediante el propio software del nPoint, que se conecta directamente mediante un USB al ordenador por lo que no hay conversión como en el caso anterior que puede intervenir en los resultados.

El objetivo de los siguientes ensayos es poder observar si los errores cometidos podían ser debidos a la conversión analógica digital a al realizar las simulaciones mediante el software Simulink.

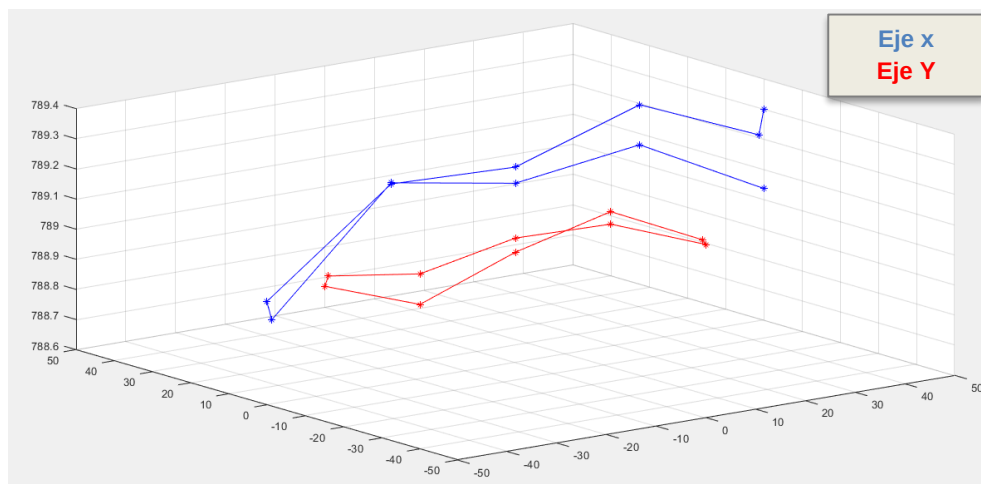


Figura 8. Cruz origen, Zmot=0 mm, paso 25 μ m, software nPoint.

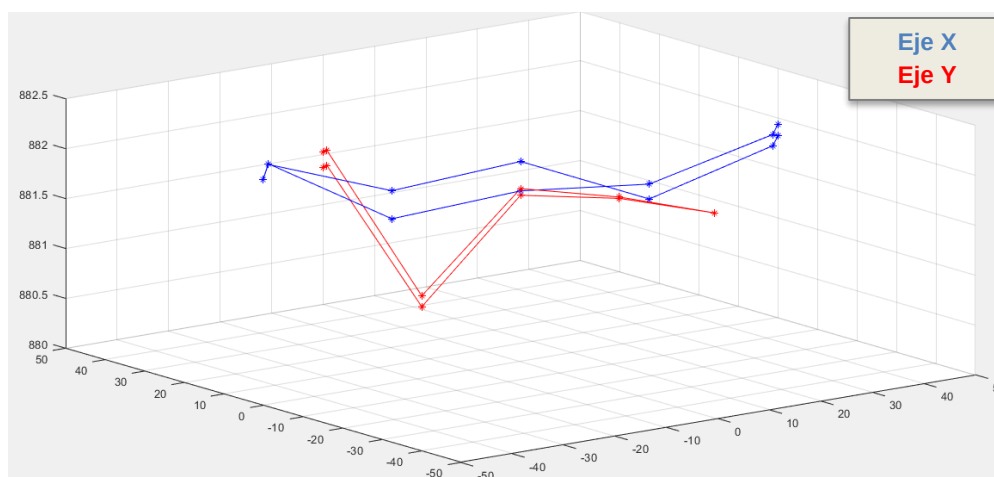


Figura 9. Cruz origen, Zmot=1 mm, paso 25 μ m, software nPoint (I).

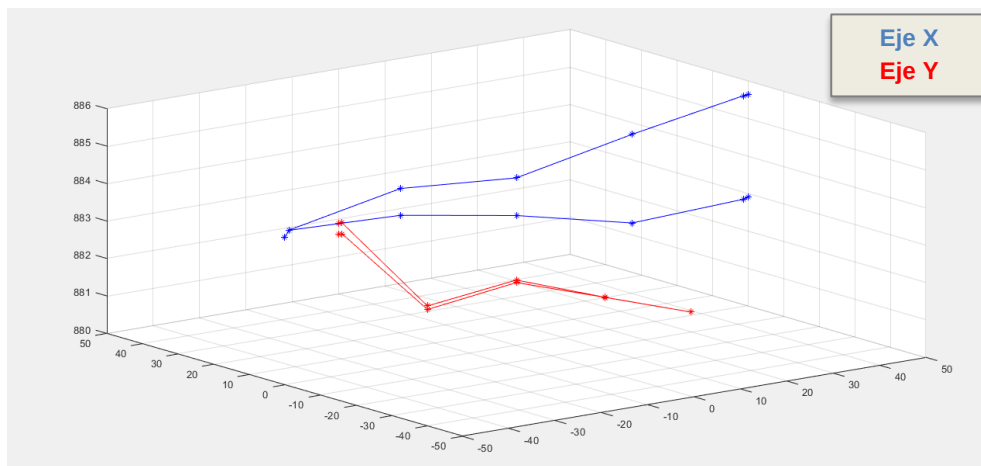


Figura 10. Cruz origen, $Z_{mot}=1\text{ mm}$, paso de $25\text{ }\mu\text{m}$, software nPoint (II).

La diferencia entre la Figura 9 y la Figura 10 es que, para la primera tras haber ensayado el Eje X, se ha pasado directamente a analizar el otro eje, es decir desde (50,0) se ha pasado a (0,50), mientras que en la figura segunda antes de comenzar la trayectoria del segundo eje en (0,50) se ha pasado por el origen de coordenadas (0,0) a pesar de no haber tomado medida.

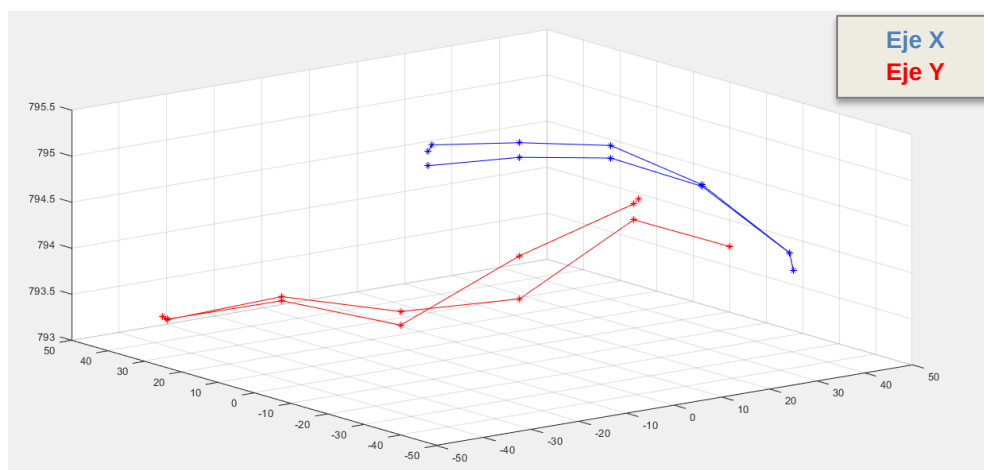


Figura 11. Cruz en (Y,25) y (25, Y), $Z_{mot}=0\text{ mm}$, paso de $25\text{ }\mu\text{m}$, software nPoint.

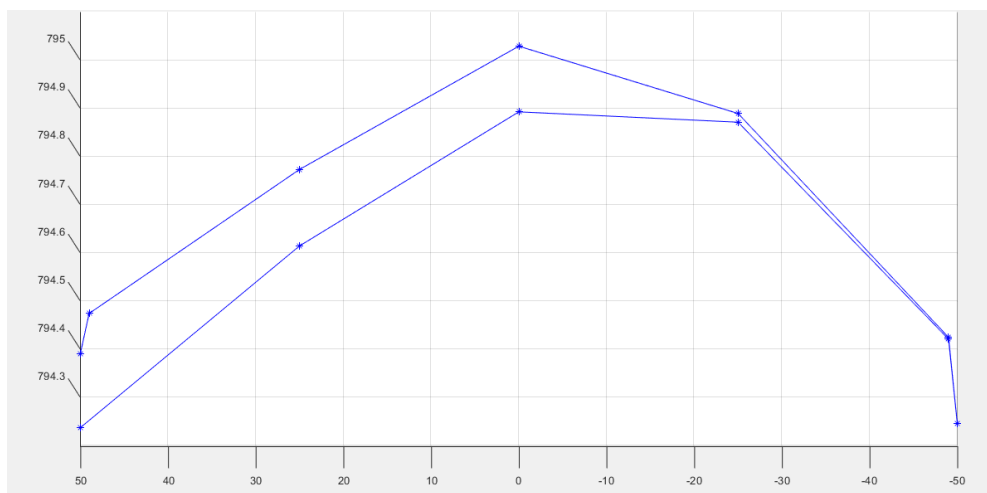


Figura 12. $X=25$, Y variable, $Z_{mot}=0$ mm, paso de $25\ \mu\text{m}$, software nPoint.

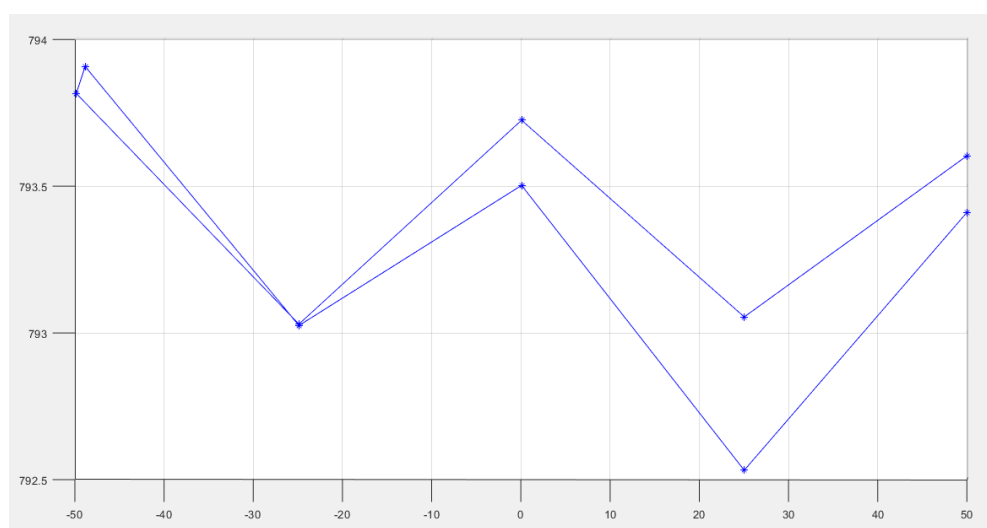


Figura 13. Diagonal, paso de $25\ \mu\text{m}$, software nPoint.

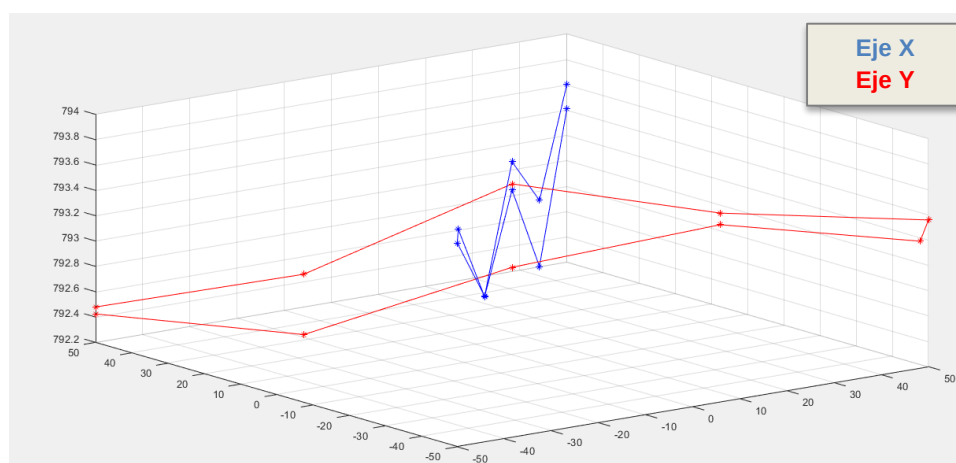


Figura 14. Ensayos diagonales, $Z_{mot}=0$ mm, paso de $25\ \mu\text{m}$, software nPoint

Tras realizar los ensayos con el propio software de la posicionadora piezoeléctrica (nPoint) no se aprecia una gran disminución del error cometido respecto a los ensayos realizados con el DAQ, a pesar de ello se continuarán realizando los siguientes ensayos del trabajo con el software de la posicionadora piezoeléctrica y no mediante Simulink.

Anexo III

Caracterización de errores del nPoint (II)

Índice de figuras

Figura 1. Eje X, paso de 25 μm .	81
Figura 2. Eje Y, paso de 25 μm .	82
Figura 3. Diagonal, paso de 10 μm .	82
Figura 4. X=-25, paso de 10 μm .	83
Figura 5. X=25, paso de 10 μm .	83
Figura 6. Y=-25, paso de 10 μm .	84
Figura 7. Eje Y, paso de 25 μm .	84
Figura 8. Eje X, paso de 25 μm .	85
Figura 9. X=25, paso de 10 μm .	86
Figura 10. X=-25, paso de 10 μm .	86
Figura 11. Eje Y, paso de 25 μm .	87
Figura 12. Y=-25, paso de 10 μm .	87
Figura 13. Eje X, paso de 25 μm .	88
Figura 14. Diagonal, paso de 10 μm .	88

Índice de tablas

Tabla 1. Obtención ángulo de inclinación (I).	85
Tabla 2. Obtención ángulo de inclinación (II).	89

Obtención del ángulo de inclinación

En este Anexo se encuentran los ensayos serán realizados con el propio software del nPoint para una posición del tornillo micrométrico motorizado de 0 mm, a partir de los cuales se hará una aproximación por mínimos cuadrados en cada recta obtenida en el desplazamiento del nPoint, de esta forma se podrá obtener el ángulo de inclinación tanto en X como en Y para cada una de las trayectorias (eje X y eje Y) mediante la pendiente dada en la ecuación de la recta.

$$y = m \cdot x + n$$

$$\operatorname{tg} \theta = m$$

Las medidas realizadas se ven afectadas por los errores de posicionamiento del nPoint y los errores de lectura del sensor confocal, por lo que es esperable que haya variaciones en los ángulos obtenidos al hacer varias medidas de un mismo plano en un mismo eje.

A partir de las lecturas del sensor para cada trayectoria del nPoint se va a realizar un ajuste por mínimos cuadrados, de esta forma se verán las variaciones de ángulo comentadas anteriormente.

A continuación, se muestran los resultados del ajuste por mínimos cuadrados realizados haciendo la media entre dos puntos a ensayar (el del ensayo de ida y el del ensayo de vuelta) de una misma trayectoria:

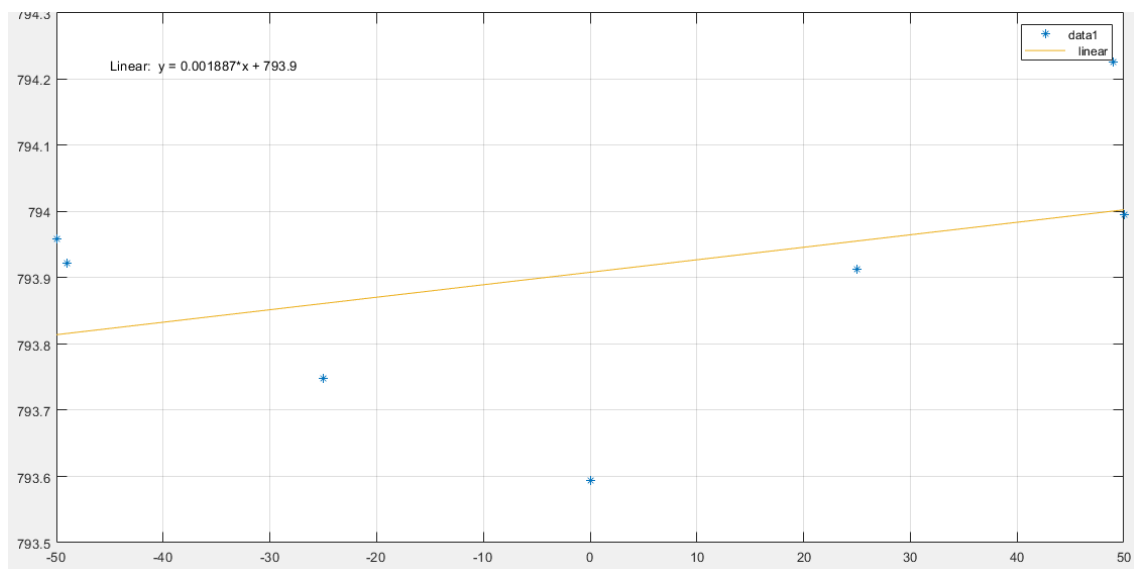


Figura 1. Eje X, paso de 25 μm.

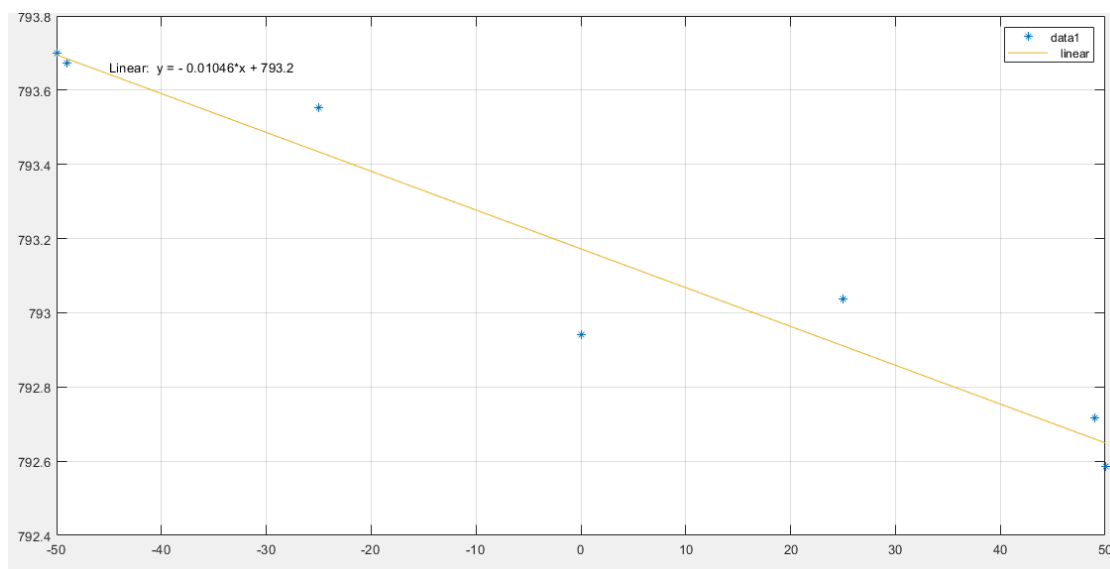


Figura 2. Eje Y, paso de 25 μm .

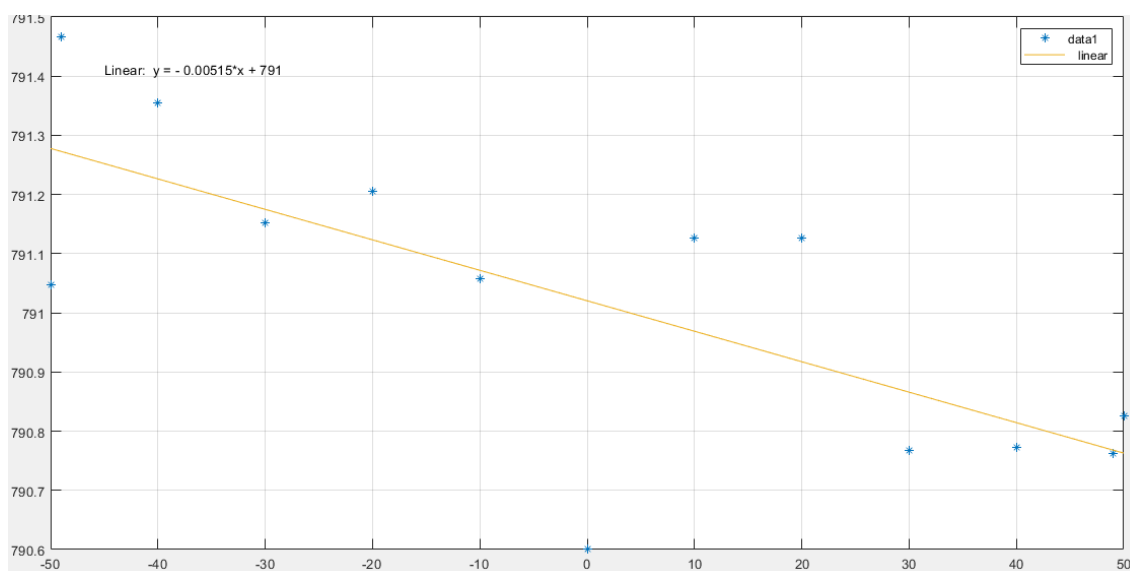


Figura 3. Diagonal, paso de 10 μm .

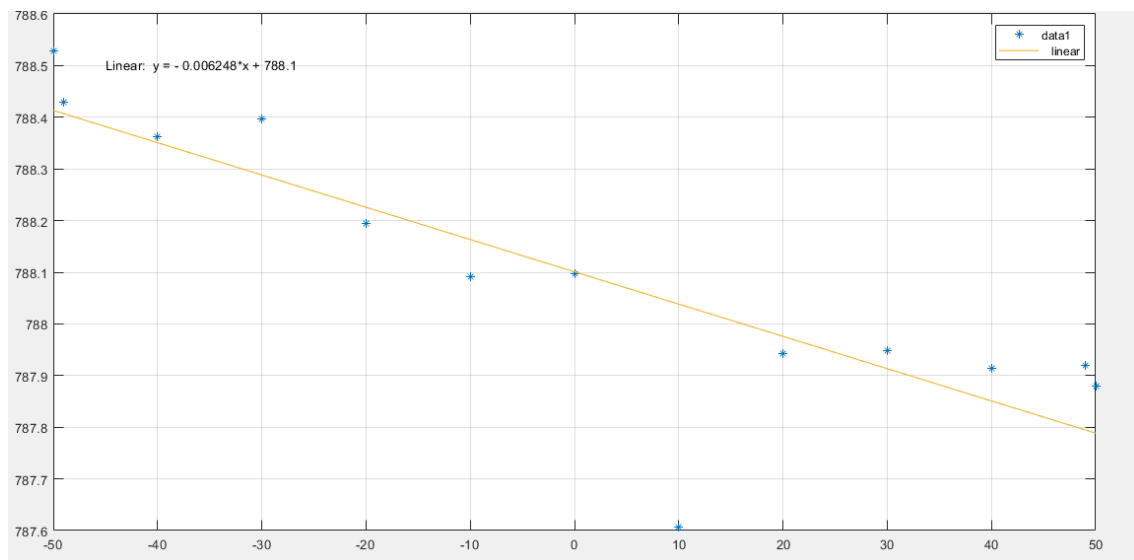


Figura 4. $X=-25$, paso de $10 \mu\text{m}$.

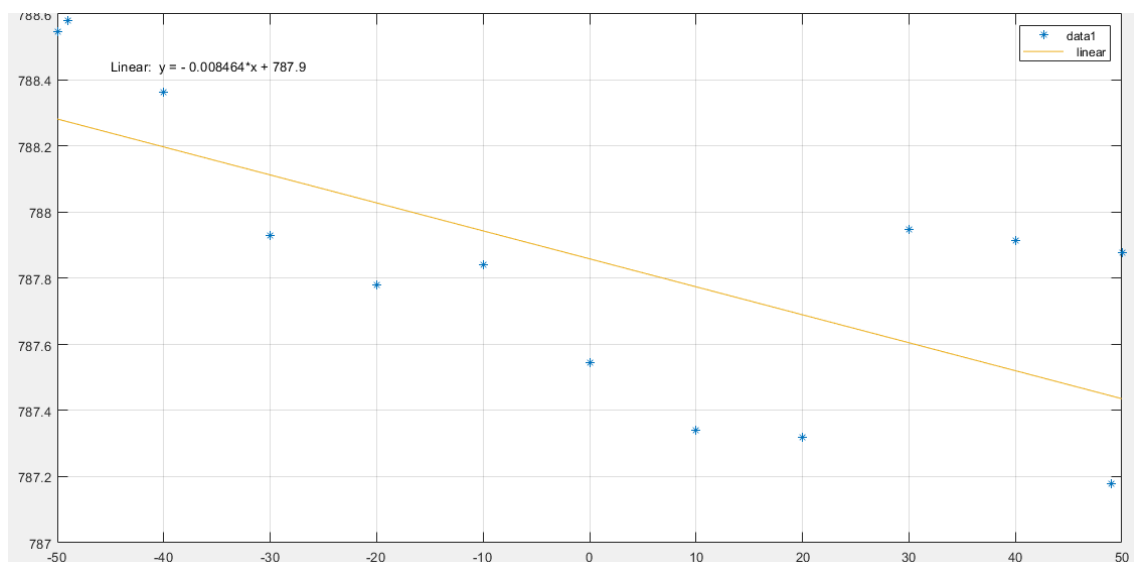


Figura 5. $X=25$, paso de $10 \mu\text{m}$.

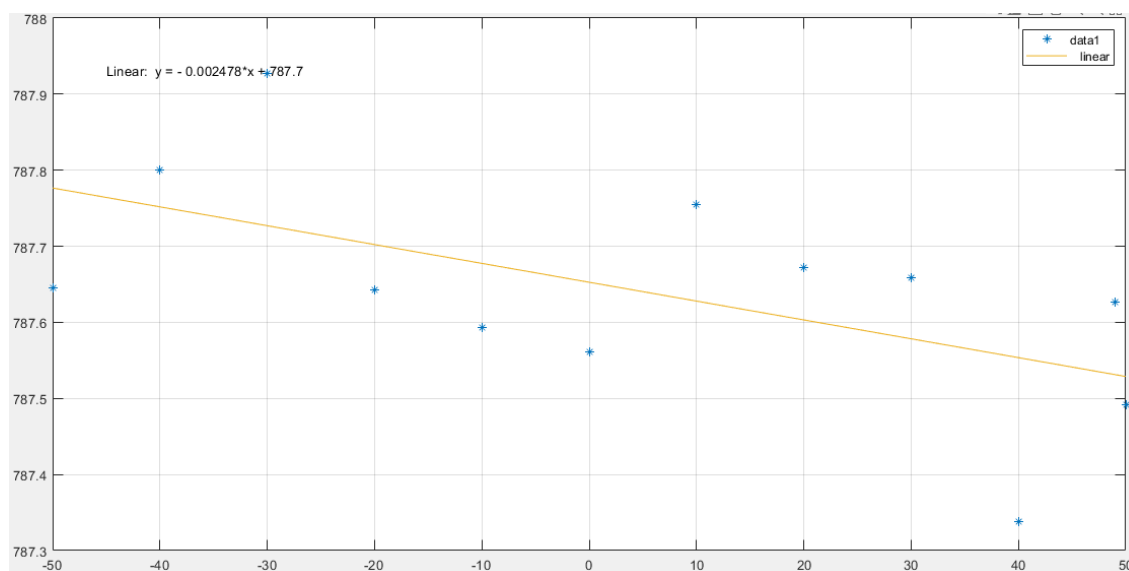


Figura 6. Y=-25, paso de 10 μm .

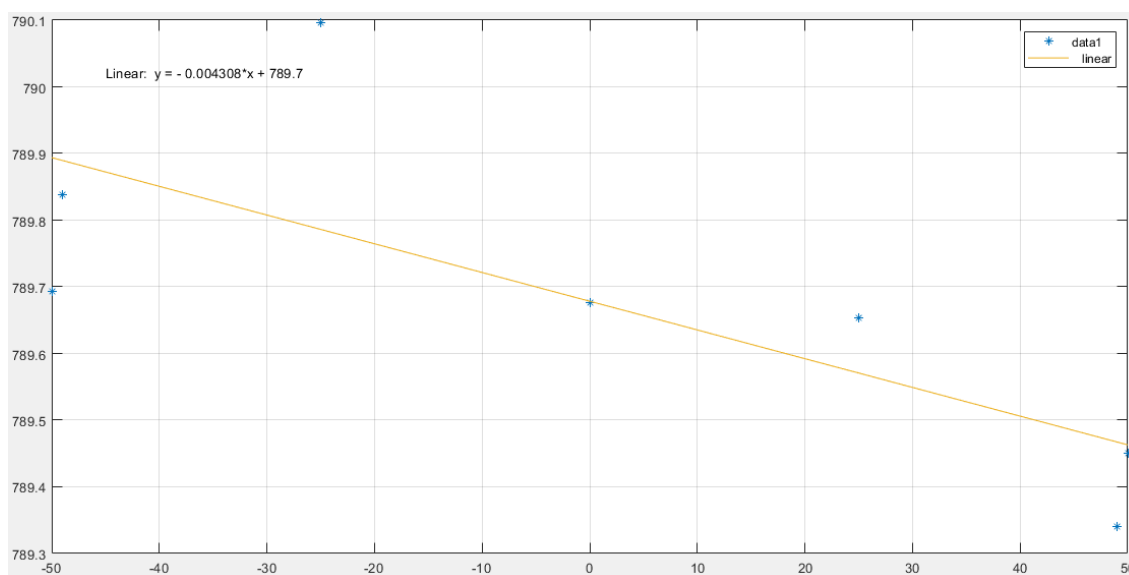


Figura 7. Eje Y, paso de 25 μm .

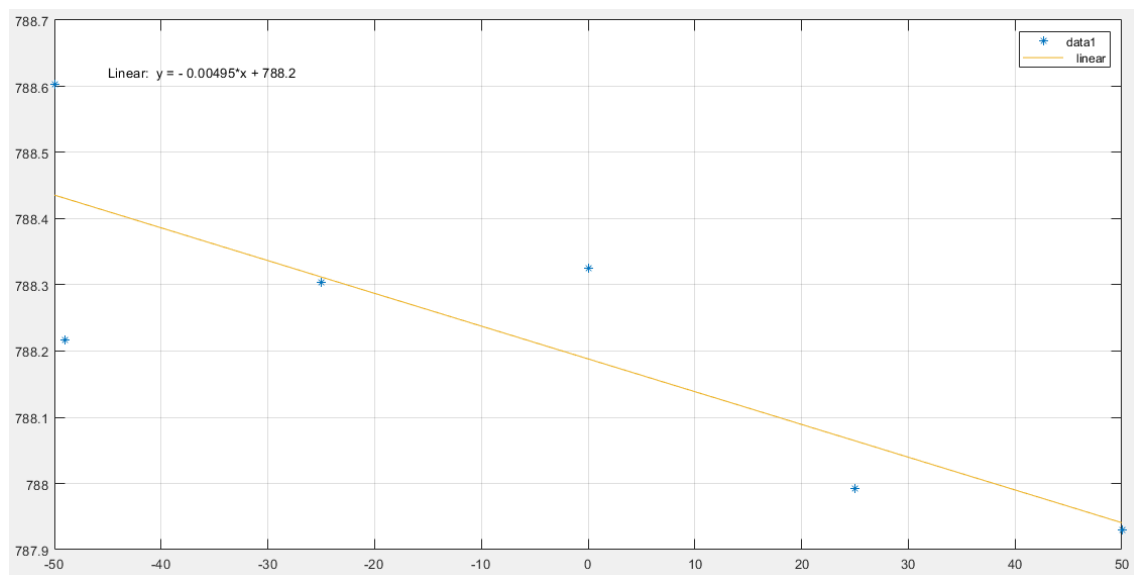


Figura 8. Eje X, paso de 25 μm .

	θ ($^\circ$)	θ (rad)
Eje X , paso 10 μm	-0,108	-0,001
Eje X , paso 25 μm	-0,283	-0,004
Eje Y , paso 10 μm	-0,599	-0,010
Eje Y , paso 25 μm	-0,246	-0,004
Diagonal	-0,295	-0,005
X=-25	-0,357	-0,006
Y=-25	-0,141	-0,002
X=25	-0,484	-0,008

Tabla 1. Obtención ángulo de inclinación (I).

Si se procede de la misma manera, pero esta vez sin hacer el promedio entre los puntos ensayados, obteniéndose lo siguiente:

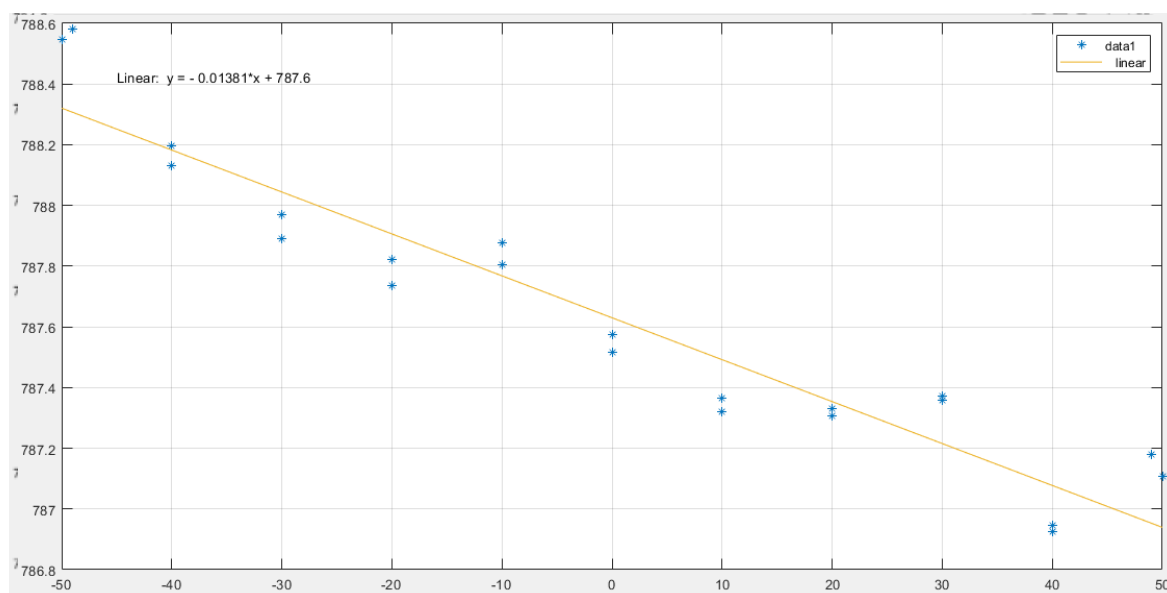


Figura 9. $X=25$, paso de $10 \mu\text{m}$.

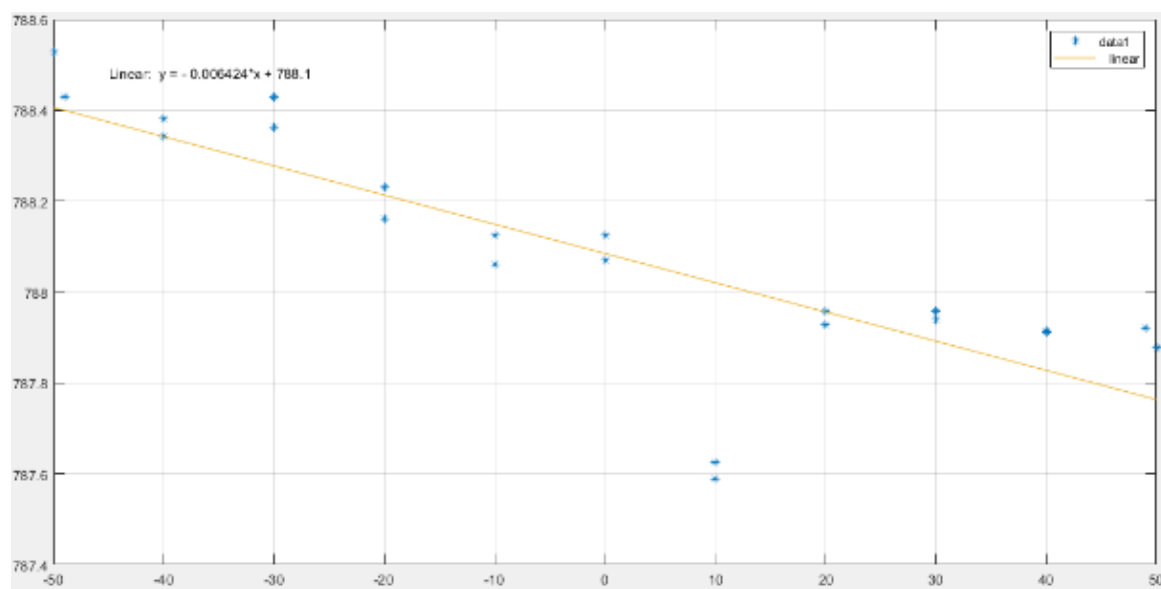


Figura 10. $X=-25$, paso de $10 \mu\text{m}$.

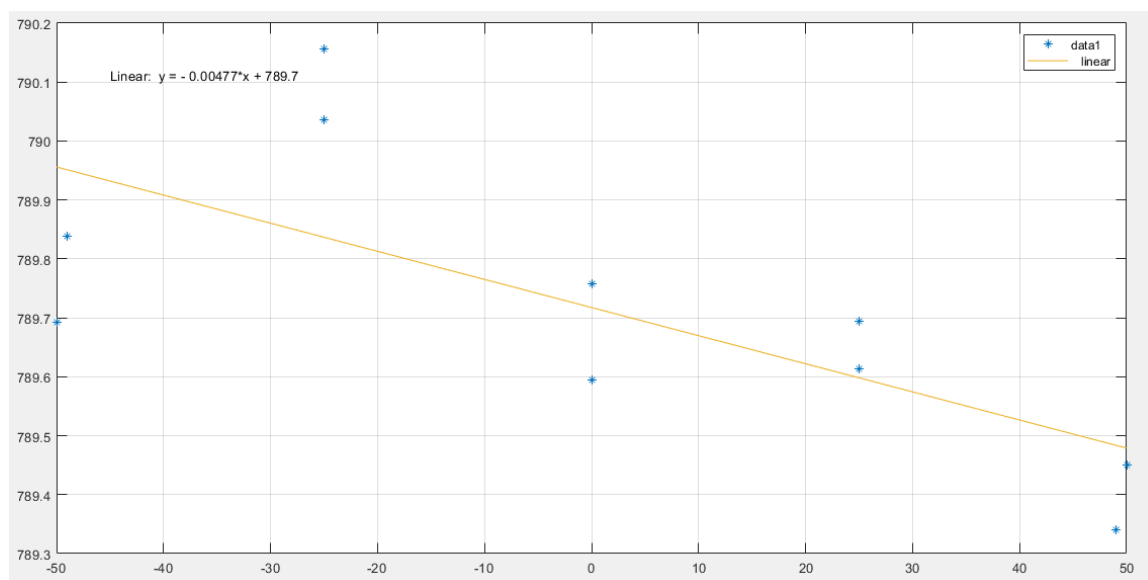


Figura 11. Eje Y, paso de 25 μm .

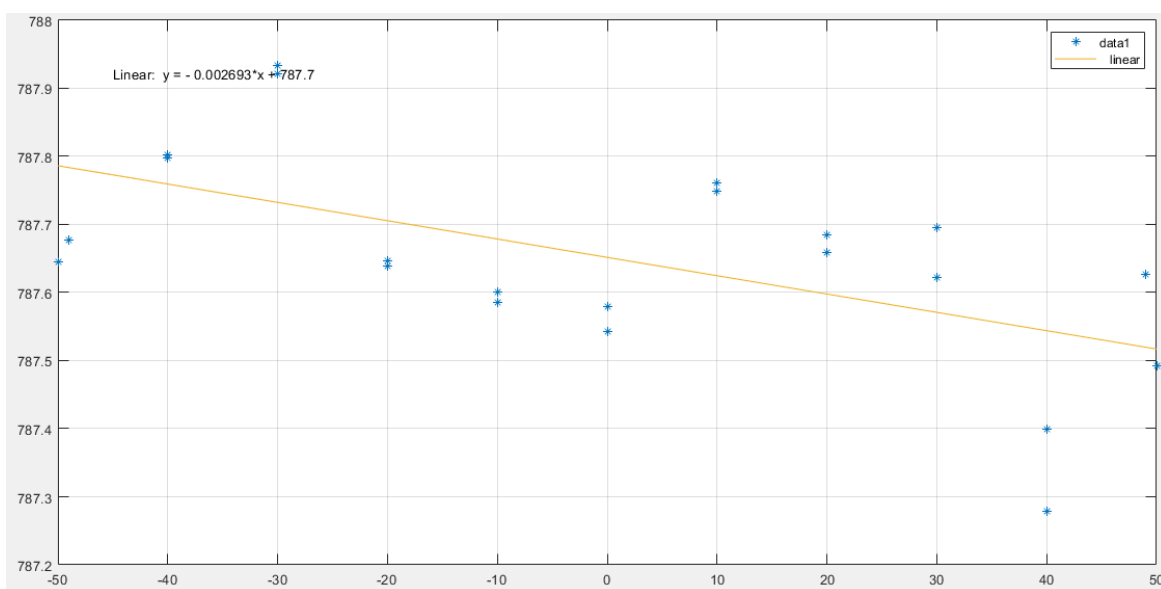


Figura 12. Y=-25, paso de 10 μm .

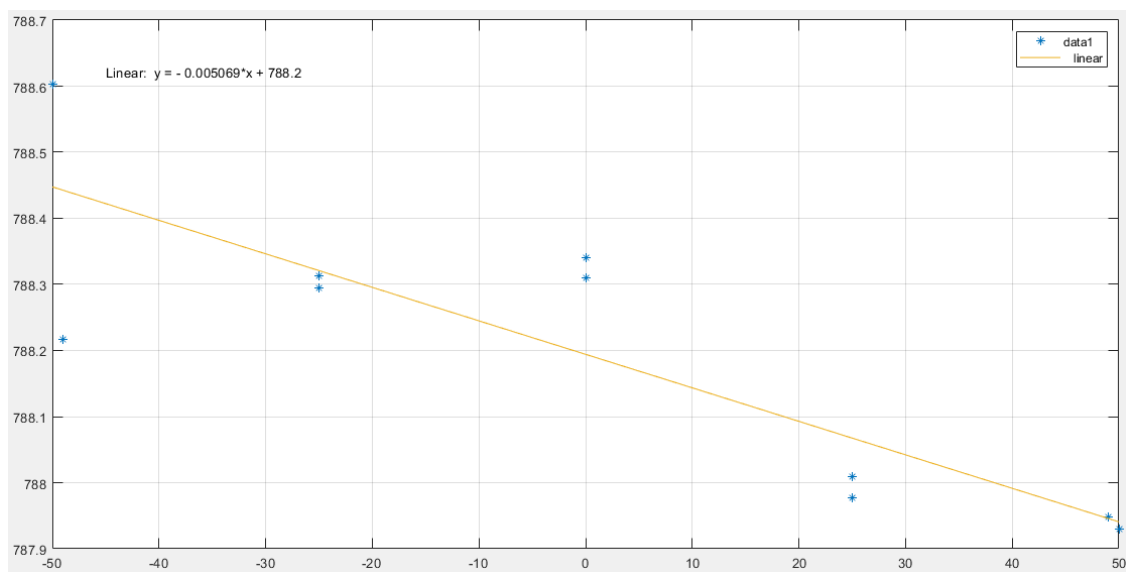


Figura 13. Eje X, paso de 25 μm .

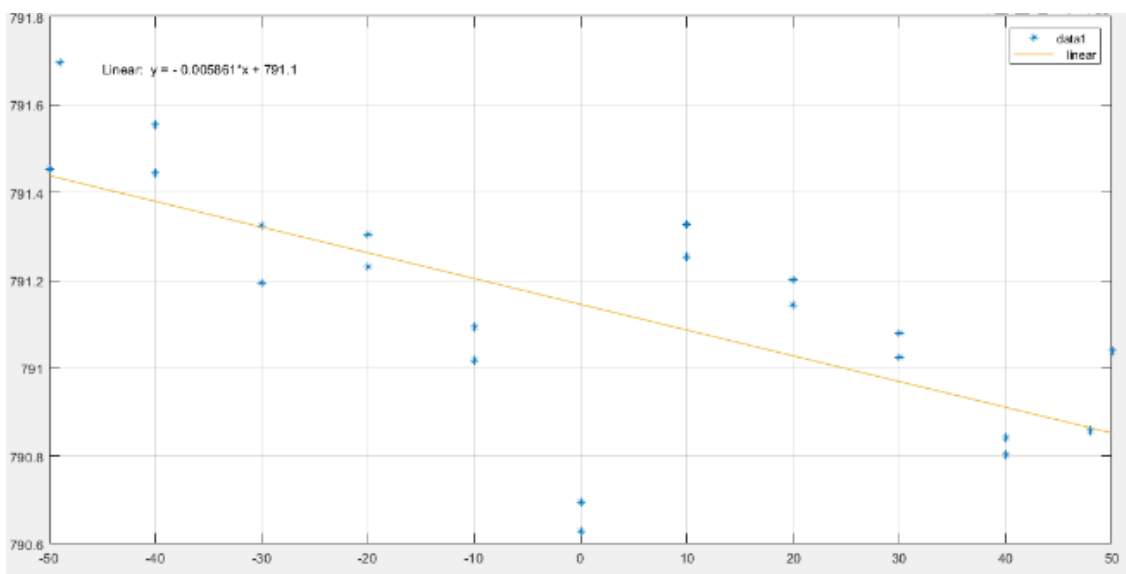


Figura 14. Diagonal, paso de 10 μm .

	θ (°)	θ (rad)
Diagonal	-0,335	-0,005
X=-25	-0,368	-0,006
Eje Y	-0,273	-0,004
X=25	-0,791	-0,013
Y=-25	-0,154	-0,002
Eje X	-0,290	-0,005

Tabla 2. Obtención ángulo de inclinación (II).

Para todos los ensayos anteriores se ha obtenido un ángulo promedio de $[0, 309^\circ]$. Por geometría se comprueba si afectará significativamente a los resultados:

$$tg\theta \cdot \pm 50 \mu m = Z_{c,error}$$

Siendo el desplazamiento máximo de $50 \mu m$, dado que la referencia se toma en el centro por lo que el desplazamiento máximo desde la referencia será de $\pm 50 \mu m$ y $\theta [0, 309^\circ]$:

$$tg (0,309) \cdot \pm 50 \mu m = 0,269 < 1 \mu m.$$

Por lo que, como ya se había observado anteriormente, los errores experimentales debidos a la inclinación de la plataforma pueden ser despreciados, ya que estos no afectan significativamente.

Anexo IV

Código Matlab estudio de la deriva térmica y ajuste

```
%Importo los datos y los almaceno
load Puntofijo_av9999_f250Hz_305_conf.txt;
load Puntofijo_30segundos_conT.txt;

z=Puntofijo_av9999_f250Hz_305_conf(:,1)-Puntofijo_av9999_f250Hz_305_conf(1,1);
%Valor del sensor confocal
I=Puntofijo_av9999_f250Hz_305_conf(:,2); %Intensidad
TM0=Puntofijo_30segundos_conT(:,1); %Aire
TM1=Puntofijo_30segundos_conT(:,2); %Galga colocada sobre el nPoint
TM2=Puntofijo_30segundos_conT(:,3); %Galga colocada sobre el soporte del sensor
confocal
TM3=Puntofijo_30segundos_conT(:,4); %Galga colocada debajo de los cojinetes de
aire o Air bearings
tconf=0:3.1:(length(z)-1)*3.1;
tgalgas=0:30:(length(TM0)-1)*30;

alfa=23*1e-6 ;% Coeficiente de expansión térmica del Aluminio
format long

zT=(TM1-TM1(1))*alfa *42500 μm.;% [μm] Ajuste, en este caso se modifica el fichero
de temperaturas para quedarnos sólo en la zona del régimen permanente, estable

% Represento las medidas sin ninguna modificación
figure;
plot(tconf,z);
hold on
plot(tgalgas,zT);
hold off
xlabel('time (s)','FontSize', 25)
ylabel('Dz medida (um)','FontSize', 25)
set(gca,'FontSize',15)
legend('Z measured')

figure;
plot(tconf,I);
xlabel('time (s)','FontSize', 25)
ylabel('Intensity (%)','FontSize', 25)
set(gca,'FontSize',15)
legend('Intensity')

figure;
plot(tgalgas,TM0);
hold on
plot(tgalgas,TM1);
hold on
plot(tgalgas,TM2);
hold on
plot(tgalgas,TM3);
hold off

xlabel('time (s)','FontSize', 25)
ylabel('Temperatura (°C)','FontSize', 25)
set(gca,'FontSize',15)
legend('M0', 'M1', 'M2', 'M3')

end
```

Para cada estudio de la deriva térmica realizado se ha utilizado un código como el anterior, pero cargando los datos correspondientes a cada ensayo.

En este caso, se ha realizado el estudio de la deriva térmica durante 24 horas de un patrón cerámico plano. Se han obtenido valores tanto de variación de temperatura como de variación de la lectura del sensor confocal para una media de 9999 valores con una frecuencia de 250 Hz y obteniendo un valor cada 30 segundos.

También se ha realizado un ajuste lineal de la temperatura para poder superponer esta sobre los resultados obtenidos con el sensor confocal una vez se ha estabilizado el sistema y ha alcanzado su régimen permanente, mediante la siguiente ecuación:

$$\Delta L = \Delta T \cdot \alpha \cdot L$$

Siendo ΔT el incremento de temperaturas de M1, galga colocada sobre el nPoint, tomando el primer resultado como referencia de temperatura; α , el coeficiente de expansión térmica del material, Aluminio; y L , la longitud estimada para realizar el ajuste, en este caso 42,5 mm.

Anexo V

Modelo cinemático de la plataforma

Modelo cinemático de la plataforma

A diferencia de los modelos clásicos de error matemático en los que se superponen los movimientos lineales de los tres ejes, NanoPla implementa un movimiento en dos etapas, que combina el movimiento plano grueso de la plataforma móvil (largo alcance) y la traslación fina (o escaneo) en los ejes X, Y y Z, en la posicionadora piezoeléctrica o nPoint (corto rango).

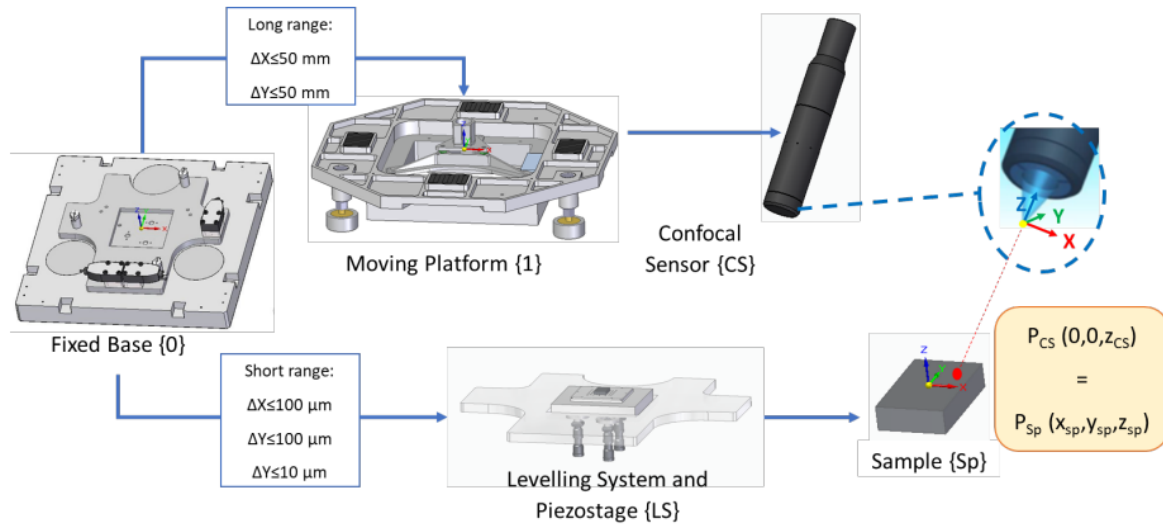


Figura 1. Esquemmatización del bucle de medida completo de la NanoPla. Fuente: [1]

La Figura 1 muestra el esquema global del bucle de medición del NanoPla, que involucra el marco metrológico (I) y el marco metrológico (II). Hay dos cadenas cinemáticas que comienzan en la base fija {0}. Se trabajará matricialmente, y habrá un cambio de base, ya que existe una parte fija y una móvil y habrá movimiento de rotación y de traslación [1].

Se obtienen diferentes ecuaciones dependiendo del camino que se tome:

Ecuaciones del camino de arriba:

$$P_1 = R_1^{CS} \cdot P_{CS} + T_1^{CS} \quad (1)$$

$$P_0 = R_0^1 \cdot P_1 + T_0^1 \quad (2)$$

Ecuaciones del camino de abajo:

$$P_{LS} = R_{LS}^{Sp} \cdot P_{Sp} + T_{LS}^{Sp} \quad (3)$$

$$P_0 = R_0^{LS} \cdot P_{LS} + T_0^{LS} \quad (4)$$

Donde P_i es el punto analizado representado según el sistema $\{i\}$, R_i^j es la matriz de rotación de sistemas $\{i\}$ a $\{j\}$; y T_i^j es el vector de traslación entre los orígenes $\{i\}$ y $\{j\}$. Considerando que, P_{Sp} y P_{ps} son coincidentes, se pueden expresar en el sistema de referencia de coordenadas común $\{0\}$, y se puede obtener la Ecuación de continuidad (5), uniendo los dos caminos y despejando P_{Sp} :

$$P_{Sp} = [R_{LS}^{Sp}]^{-1} \cdot \left[[R_0^{LS}]^{-1} \cdot [R_0^1 \cdot (R_1^{CS} \cdot P_{SC} + T_1^{CS}) + T_0^1 - T_0^{LS}] - T_{LS}^{Sp} \right] \quad (5)$$

Simplificando:

$$P_{Sp} = [R_0^{LS}]^{-1} \cdot [R_0^1 \cdot (R_1^{CS} \cdot P_{CS} + T_1^{CS}) + T_0^1 - T_0^{LS}] \quad (6)$$

Descomponiendo el vector en los tres ejes, y eliminando los términos constantes, se obtiene la Ecuación (7) para el eje X, y la Ecuación (8) para el eje Z. La ecuación para el eje Y se omite porque es simétrica al eje X.

Señalar que el sistema de nivelación y las compensaciones piezoeléctricas (x_0^{LS} , y_0^{LS} , z_0^{LS}) han sido cancelados por ser términos constantes.

A partir de la ecuación (6) se obtiene matricial y vectorialmente X y Z ($X=Y$).

$$\begin{aligned}
X_{P_s} = & \left(x^{\{1\}} + \delta_x^{\{1\}} \right) - \left(x^{\{S\}} + \delta_x^{\{S\}} \right) + \left(z_{CS}^{exp} - \varepsilon_{CS} \right) \\
& \cdot \left(\left(\varepsilon_{y,o}^{CS} - \varepsilon_{y,o}^{LS} \right) + \varepsilon_z^{\{1\}} \cdot \left(\varepsilon_{x,o}^{CS} + \varepsilon_{y,o}^{CS} \cdot \varepsilon_{z,o}^{LS} \right) + \varepsilon_y^{\{1\}} \cdot \left(1 + \varepsilon_{y,o}^{CS} \cdot \varepsilon_{y,o}^{LS} \right) - \varepsilon_{x,o}^{CS} \cdot \varepsilon_{z,o}^{LS} \right. \\
& \left. + \varepsilon_x^{\{1\}} \cdot \left(\varepsilon_{x,o}^{CS} \cdot \varepsilon_{y,o}^{LS} - \varepsilon_{z,o}^{LS} \right) \right) + z_o^{CS} \cdot \left(\varepsilon_y^{\{1\}} - \varepsilon_x^{\{1\}} \cdot \varepsilon_{z,o}^{LS} - \varepsilon_{y,o}^{LS} \right) \\
& + \left(y^{\{1\}} + \delta_y^{\{1\}} - x^{\{1\}} \cdot \alpha_{yx}^{\{1\}} - y^{\{S\}} - \delta_y^{\{S\}} \right) \cdot \varepsilon_{z,o}^{LS} \\
& - \left(\delta_z^{\{1\}} - x^{\{1\}} \cdot \alpha_{zx}^{\{1\}} - y^{\{1\}} \cdot \alpha_{zy}^{\{1\}} - z^{\{S\}} - \delta_z^{\{S\}} \right) \cdot \varepsilon_{y,o}^{LS}
\end{aligned} \tag{7}$$

$$\begin{aligned}
Z_{P_S} = & (z_{CS}^{exp} - \varepsilon_{CS}) + (\delta_z^{\{1\}} - x^{\{1\}} \cdot \alpha_{zx}^{\{1\}} - y^{\{1\}} \cdot \alpha_{zy}^{\{1\}}) - (z^{\{S\}} + \delta_z^{\{S\}}) + (z_{CS}^{exp} - \varepsilon_{CS}) \\
& \cdot (\varepsilon_{y,o}^{CS} \cdot \varepsilon_{y,o}^{LS} + \varepsilon_{x,o}^{LS} \cdot \varepsilon_{x,o}^{CS} + \varepsilon_z^{\{1\}} \cdot (\varepsilon_{x,o}^{CS} \cdot \varepsilon_{y,o}^{LS} - \varepsilon_{y,o}^{CS} \cdot \varepsilon_{x,o}^{LS}) + \varepsilon_x^{\{1\}} \cdot (\varepsilon_{x,o}^{LS} - \varepsilon_{x,o}^{CS}) \\
& + \varepsilon_y^{\{1\}} \cdot (\varepsilon_{y,o}^{LS} - \varepsilon_{y,o}^{CS})) + z_o^{CS} \cdot (\varepsilon_y^{\{1\}} \cdot \varepsilon_{y,o}^{LS} + \varepsilon_x^{\{1\}} \cdot \varepsilon_{x,o}^{LS}) \\
& + (x^{\{1\}} + \delta_x^{\{1\}} - x^{\{S\}} - \delta_x^{\{S\}}) \cdot \varepsilon_{y,o}^{LS} - (y^{\{1\}} + \delta_y^{\{1\}} - x^{\{1\}} \cdot \alpha_{yx}^{\{1\}} - y^{\{S\}} - \delta_y^{\{S\}}) \\
& \cdot \varepsilon_{x,o}^{LS}
\end{aligned} \tag{8}$$

En trabajos anteriores se desarrolló el modelo cinemático de la plataforma junto con sus ecuaciones ((1) a (8)) [2].

Ahora, lo que se busca es a partir del desplazamiento del nPoint poder encontrar posibles errores angulares o errores de rotación. Dado que el desplazamiento solo será en los ejes X e Y del nPoint, se simplificará el modelo eliminando todo lo que dependía anteriormente del eje Z del nPoint y cualquier movimiento de la plataforma móvil.

En primer lugar, trabajaremos con un patrón plano en el que Z_{P_s} es constante, así que trabajamos en esa coordenada. Se dejará la plataforma móvil fija y únicamente se desplazará el nPoint. Se elimina todo lo que depende de la coordenada Z y a su vez los ángulos ya que se supone que son ángulos pequeños.

$$Z_{P_S} = (Z_{CS}^{exp} - \varepsilon_{CS}) + \left(\delta_z^{\{1\}} \cdot x^{\{1\}} \cdot \alpha_{zx}^{\{1\}} \cdot y^{\{1\}} \cdot \alpha_{zy}^{\{1\}} \right) - (Z^{\{S\}} + \delta_z^{\{S\}}) + (Z_{CS}^{exp} - \varepsilon_{CS}) \cdot \left(\varepsilon_{y,\theta}^{CS} \cdot \varepsilon_{x,\theta}^{LS} + \varepsilon_{x,\theta}^{LS} \cdot \varepsilon_{x,\theta}^{CS} + \varepsilon_{x,\theta}^{CS} \cdot \varepsilon_z^{\{1\}} \cdot (\varepsilon_{x,\theta}^{CS} \cdot \varepsilon_{y,\theta}^{LS} - \varepsilon_{y,\theta}^{CS} \cdot \varepsilon_{x,\theta}^{LS}) + \varepsilon_x^{\{1\}} \cdot (\varepsilon_{x,\theta}^{LS} \cdot \varepsilon_{x,\theta}^{CS} - \varepsilon_{x,\theta}^{CS} \cdot \varepsilon_{y,\theta}^{LS}) + \varepsilon_y^{\{1\}} \cdot (\varepsilon_{y,\theta}^{LS} \cdot \varepsilon_{y,\theta}^{CS} - \varepsilon_{y,\theta}^{CS} \cdot \varepsilon_{x,\theta}^{LS}) \right) + Z_0^{CS}.$$

$$\left(\epsilon_y^{\{1\}} \cdot \epsilon_{y,o}^{LS} + \epsilon_x^{\{1\}} \cdot \epsilon_{x,o}^{LS} \right) + \left(x^{\{1\}} + \delta_x^{\{1\}} - x^{\{S\}} - \delta_x^{\{S\}} \right) \cdot \epsilon_{y,o}^{LS} - \left(y^{\{1\}} + \delta_y^{\{1\}} - x^{\{1\}} \cdot \alpha_{yx}^{\{1\}} - y^{\{S\}} - \delta_y^{\{S\}} \right) \cdot \epsilon_{x,o}^{LS} \quad (9)$$

Obteniéndose lo siguiente:

$$Z_{P_s} = (z_{CS}^{exp} - \epsilon_{CS}) + (-x^{\{S\}} - \delta_x^{\{S\}}) \cdot \epsilon_{y,o}^{LS} + (y^{\{S\}} + \delta_y^{\{S\}}) \cdot \epsilon_{x,o}^{LS} \quad (10)$$

Siendo Z_{P_s} igual a la lectura medida con el sensor confocal (quitando los errores), más el desplazamiento en X multiplicado por la rotación de la posicionadora en Y (inclinación en X), más el desplazamiento en Y multiplicado por la rotación de la posicionadora en X (inclinación en Y).

Como se ha dicho anteriormente, los tanto como los desplazamientos en Z del nPoint como los movimientos de la plataforma móvil son cancelados, por lo que se obtendrán dos ecuaciones, una dependiendo del eje X (13) y otra del Y (14).

Para poder corregir los errores angulares del nPoint (nivelarlo), tenemos que despejar $\epsilon_{x,o}^{LS}$ y $\epsilon_{y,o}^{LS}$, moviendo el nPoint ($x^{\{S\}}$, $y^{\{S\}}$).

Si se hace el desplazamiento sólo en el eje X del nPoint:

$$\text{Posición inicial: } Z_{P_s}^0 = (z_{CS}^{exp,0} - \epsilon_{CS}^0) + (-x^{\{S\},0} - \delta_x^{\{S\},0}) \cdot \epsilon_{y,o}^{LS} \quad (11)$$

$$\text{Posición final: } Z_{P_s}^1 = (z_{CS}^{exp,1} - \epsilon_{CS}^1) + (-x^{\{S\},1} - \delta_x^{\{S\},1}) \cdot \epsilon_{y,o}^{LS} \quad (12)$$

Como lo que estamos midiendo es un patrón plano, $Z_{P_s}^0 = Z_{P_s}^1$, entonces:

$$(z_{CS}^{exp,0} - \epsilon_{CS}^0) + (-x^{\{S\},0} - \delta_x^{\{S\},0}) \cdot \epsilon_{y,o}^{LS} = (z_{CS}^{exp,1} - \epsilon_{CS}^1) + (-x^{\{S\},1} - \delta_x^{\{S\},1}) \cdot \epsilon_{y,o}^{LS} \quad (13)$$

Además, tomando una situación como referencia, se puede suponer que en la posición inicial, $-x^{\{S\},0} - \delta_x^{\{S\},0} = 0$ y $(z_{CS}^{exp,0} - \epsilon_{CS}^0) = 0$:

$$-(z_{CS}^{exp,1} - \epsilon_{CS}^1) + (-x^{\{S\},1} - \delta_x^{\{S\},1}) \cdot \epsilon_{y,o}^{LS} = 0 \quad (13)$$

Si se hace lo mismo para un desplazamiento en el eje Y del nPoint, se obtiene el mismo resultado:

$$-(z_{CS}^{exp,1} - \epsilon_{CS}^1) + (+y^{\{S\},1} + \delta_y^{\{S\},1}) \cdot \epsilon_{x,o}^{LS} = 0 \quad (14)$$

Siendo $\epsilon_{y,o}^{LS}$ la rotación sobre el eje Y, es decir, ángulo entre el eje X y el Xnominal.

Dado que sólo nos desplazamos en el eje X e Y, se supone que en Z no debería haber errores, pero no es así, se aprecia en los resultados obtenidos experimentalmente (3.1.5 Obtención del ángulo de inclinación).

Índice de figuras

Figura 1. Esquematización del bucle de medida completo de la NanoPla.	94
--	----

Referencias

- [1] L. Díaz Pérez, M. Torralba, J. Albáñez García y J. Yagüe Fabra, «Uncertainty budget of a large-range nanopositioning».
- [2] L. Díaz Pérez, M. Torralba, J. Albáñez García y J. Yagüe, «2D Positioning Control System for the Planar Motion of a Nanopositioning Platform,» *Applied Sciences*, vol.9, nº 22, p. 4860, 2019.

Anexo VI

Estudio de repetibilidad del tornillo micrométrico motorizado

Índice de tablas

Tabla 1. Repetibilidad para $Z_{mot}=0$ mm y $Z_{mot}=0,5$ mm.	100
Tabla 2. Repetibilidad para $Z_{mot}=0$ mm y $Z_{mot}=0,75$ mm.	100
Tabla 3. Repetibilidad $Z_{mot}=1$ mm y $Z_{mot}=2$ mm.	100
Tabla 4. Repetibilidad $Z_{mot}=2$ mm y $Z_{mot}=3$ mm.	100
Tabla 5. Repetibilidad en escalera ordenada según la altura del micrómetro.	101
Tabla 6. Repetibilidad en escalera.	101

Índice de figuras

Figura 1. Variación de lecturas en el confocal.	101
--	-----

Estudio de repetibilidad del tornillo micrométrico motorizado

En el presente anexo se adjuntan los resultados tras los ensayos de repetibilidad del tornillo micrométrico para distintas posiciones, dentro de un rango pequeño, para evitar el desencaje del mismo.

El procedimiento para llevar a cabo el ensayo es el siguiente: El tornillo micrométrico se encuentra en una posición dada. Mediante el software PI micromover se introduce la posición a la que se quiere desplazar el vástago del tornillo para poder tomar la medida necesaria. Una vez en esa posición se toma la medida mediante el sensor confocal, y tras ello se vuelve a la posición de partida para volver a tomar esa misma lectura.

En las Tablas 1 y 2 se muestran los ensayos de repetibilidad para una posición del micrómetro motorizado de 0, 0,5 y 0,75 mm, observándose una nula variación entre las lecturas del sensor confocal al aumentar o disminuir esta distancia.

Zmot	Zc (μm)
0	849,575
0,5	849,575
0	849,574
0,5	849,574
0	849,574
0,5	849,573
0	849,573
0,5	849,573
0	849,573
0,5	849,573

Tabla 1. Repetibilidad para Zmot= 0 mm y Zmot= 0,5 mm.

Zmot	Zc (μm)
0	850,117
0,75	850,109
0	850,111
0,75	850,108
0	850,108
0,75	850,104
0	850,104
0,75	850,099
0	850,102
0,75	850,097

Tabla 2. Repetibilidad para Zmot=0 mm y Zmot=0,75 mm.

A continuación, en las Tablas 3 y 4 se observa variación entre las lecturas del sensor, dado que el vástago del micrómetro se desplaza en un mayor rango, superior a 1 mm.

Zmot 1 (μm)	Zmot 2(μm)	Diferencia(μm)
908,386	1282,757	374,371
902,976	1275,716	372,740
902,891	1274,437	371,546
902,955	1275,608	372,653
902,829	1276,025	373,196
902,668	1276,567	373,899
902,487	1276,838	374,351
902,281	1276,756	374,475
902,094	1277,179	375,085
901,974	1277,165	375,191

Tabla 4. Repetibilidad Zmot=1 mm y Zmot =2 mm.

Zmot 2 (μm)	Zmot 3 (μm)	Diferencia (μm)
1292,094	1650,084	357,991
1276,313	1648,125	371,812
1276,128	1647,795	371,666
1275,868	1648,319	372,452
1275,648	1648,323	372,675
1275,495	1647,868	372,373
1275,357	1647,240	371,882
1275,221	1646,652	371,431
1275,133	1646,277	371,144
1275,101	1646,089	370,988

Tabla 3. Repetibilidad Zmot 2=mm y Zmot=3 mm.

A pesar del primer valor de cada tabla, se observa una clara repetibilidad en estas posiciones del tornillo motorizado, siendo dando en ambos casos una diferencia de $372 \pm 2\mu\text{m}$, sin tener en cuenta el primer valor de cada serie.

Esta elevación en Z ($372 \pm 2\mu\text{m}$) es coherente con la geometría de los tres tornillos micrométricos y con lo que se esperaba tener, al aumentar una distancia en el micrómetro motorizado (por ejemplo, de 1 a 2 mm) se debería obtener la misma diferencia que al elevar el micrómetro esa misma distancia, pero en otros puntos (por ejemplo, de 2 a 3mm), cosa que se cumple como se observa en las Tablas 3 y 4.

Zmot	Zc (μm)
0	850,098
0,5	850,094
1	924,367
2	1296,149
3	1668,999
2	1282,633
1	922,410
0,5	851,475
0	851,168
0,5	851,032
1	923,990
2	1281,54
3	1666,820
2	1281,862
1	922,158
0,5	851,624
0	851,471
0,5	851,285
1	923,419
2	1280,761
3	1665,081
2	1281,426
1	921,709
0,5	851,747
0	851,586

Tabla 6. Repetibilidad en escalera.

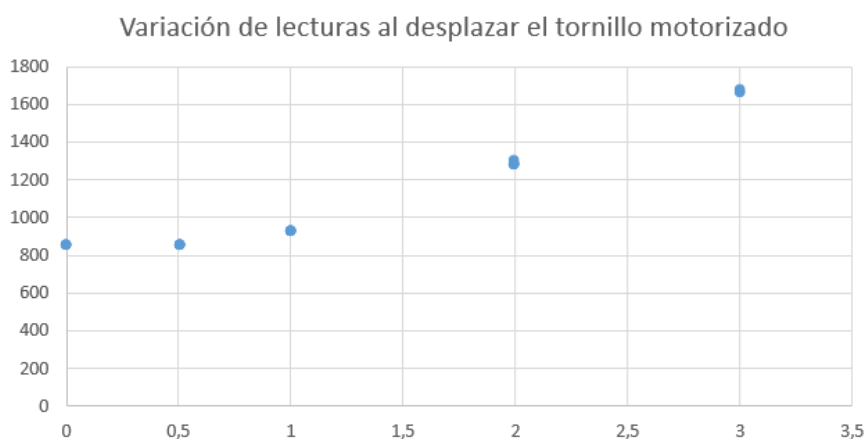


Figura 1. Variación de lecturas en el confocal.

Zmot 0	Zmot 0,5	Zmot1	Zmot2	Zmot3
850,093	850,094	924,367	1296,149	1668,999
851,168	851,475	922,410	1282,633	1666,820
851,471	851,032	923,990	1281,549	1665,081
851,586	851,624	922,158	1281,862	
	851,285	923,419	1280,761	
	851,747	921,709	1281,426	

Tabla 5. Repetibilidad en escalera ordenada según la altura del micrómetro [μm].

En las Tablas 5 y 6 se pueden observar los resultados obtenidos tras la realización de 3 ensayos sucesivos de ida y vuelta para diferentes posiciones del tornillo motorizado (ver secuencia en Tabla 6). A partir de ellos se pudo observar que el primer dato de cada ensayo sigue siendo diferente, a pesar de ello, el resto de medidas en ese mismo punto tras las sucesivas pasadas se encuentran dentro del rango habitual, por lo que se puede confirmar que ese primer valor es debido al fenómeno de la histéresis.

Es decir, el primer valor medido no depende sólo de la posición que se quiere desplazar el micrómetro y la lectura del sensor en ese punto, también tienen influencia los valores medidos previamente, por eso, el primer valor de ensayo es diferente.

