



## Trabajo Fin de Máster

Diseño e integración de instrumentos metrológicos  
en una nanoposicionadora 2D de alto rango

Design and integration of metrological instruments  
in a high-range 2D nanopositioning platform

Autora

Laura Muro Fraguas

Directores

José Antonio Albajez García  
Lucía Candela Díaz Pérez

Máster en Ingeniería Mecánica

ESCUELA DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA  
2021



## RESUMEN

La nanotecnología cada vez tiene 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 nanopositionadora de alto rango, llamada NanoPla. La NanoPla es un sistema bidimensional de posicionamiento que alcanza una precisión submicrométrica en un amplio rango de trabajo (50 mm x 50 mm). A la plataforma se le pueden integrar instrumentos de medida para la caracterización metrológica de superficies a escala submicrométrica (eje Z) en su amplio rango de trabajo, así como un portamuestras piezoelectrico, el cual permite un posicionamiento más fino (rango de trabajo de 100 µm × 100 µm × 10 µm) para el escaneo de una pieza.

El presente proyecto consiste en el diseño, fabricación e integración de un utilaje que permita integrar en la plataforma móvil de la NanoPla dos instrumentos de medida: un sensor confocal y un encoder táctil. Además, el proyecto también se centra en diseñar, fabricar e integrar un soporte para el portamuestras piezoelectrico. Para garantizar la precisión de los diseños, estos se analizarán desde un punto de vista térmico y estático. Así mismo se establecerá un modelo matemático del sistema que permita corregir los errores de montaje.

**Palabras clave:** sensor confocal, sensor táctil, nanopositionadora, modelo cinemático.

## 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). The platform can be integrated with measuring instruments for the metrological characterization of surfaces at a submicron scale (Z axis) in its large working range, as well as a piezoelectric sample holder, which allows a fine positioning (100 µm × 100 µm × 10 µm working range) for scanning a sample.

This project consists of the design, manufacture and integration of a support that allows two measurement instruments to be integrated into the moving platform of the NanoPla: a confocal sensor and a tactile encoder. In addition, the project also focuses on designing, manufacturing and integrating a support for the piezoelectric sample holder. To ensure the accuracy of the designs, they will be analysed from a thermal and static point of view. Likewise, a mathematical model of the system will be elaborated that allows correcting the assembly errors.

**Keywords:** confocal sensor, tactile sensor, nanopositioning-device, simulations, mathematical measurement model.

## Índice general

1. Introducción .....	6
1.1. Objetivo y justificación .....	6
1.2. Alcance .....	8
2. Análisis del diseño de la NanoPla.....	9
2.1. Componentes de la NanoPla que afectan a la medición del diseño del sensor .....	9
2.2. Simulaciones de los elementos estructurales simplificados.....	11
3. Diseños del soporte y adaptadores de los sensores .....	14
3.1. Consideraciones y diseños.....	14
3.2. Validación de los diseños finales del soporte-adaptador-sensor.....	18
4. Diseño del acople cinemático de la nanoposicionadora con la NanoPla.....	23
4.1. Consideraciones para el diseño y diseño del acople .....	24
4.2. Validación del diseño del soporte de la nanoposicionadora .....	28
5. Análisis y corrección de errores geométricos.....	30
5.1. Análisis del modelo de la NanoPla .....	30
5.2. Análisis del modelo del soporte externo .....	42
6. Conclusiones y líneas de trabajo futuras.....	49
Bibliografía.....	50
Anexos .....	53
Anexo 1: Principales componentes.....	57
Anexo 2: Ensamble de los elementos estructurales de la NanoPla que afectan a la medición .....	68
Anexo 3: Estudio de la Parte 1 del ensamblaje simplificado de la NanoPla .....	71
Anexo 4: Estudio de la Parte 2 del ensamblaje simplificado de la NanoPla .....	79
Anexo 5: Evolución de los diseños soporte y adaptadores para sensores .....	83
Anexo 6: Dimensionado de los canales del soporte del sensor para alojar los cilindros .....	90
Anexo 7: Simulación de los diseños finales del soporte-adaptador-sensor .....	91
Anexo 8: Simulación del diseño del soporte de la nanoposicionadora.....	101
Anexo 9: Código Matlab del modelo matemático de la NanoPla .....	105
Anexo 10: Modelo matemático del soporte externo del confocal y su código Matlab .....	111
PLANOS.....	116
Plano 1: Soporte sensor .....	119
Plano 2: Adaptador sensor confocal .....	122
Plano 3: Adaptador sensor táctil .....	124
Plano 4: Soporte nanoposicionadora .....	126

## Índice de figuras

Figura 1: Los tres niveles de la estructura de la NanoPla. Fuente: [6] .....	6
Figura 2: Partes principales del funcionamiento de la NanoPla .....	7
Figura 3: Esquema del rango de trabajo de la NanoPla con la estructura de dos etapas. Fuente: [5] .....	7
Figura 4: Elementos estructurales de la NanoPla que afectan a la medición del sensor .....	9
Figura 5: Elementos estructurales de la NanoPla que afectan a la medición. Vista explotada .....	10
Figura 6: Ensamblaje simplificado de los elementos estructurales de la NanoPla que afectan a la medición .....	12
Figura 7: Desplazamientos 21°C - Parte 3 del ensamblaje simplificado de la NanoPla .....	12
Figura 8: Desplazamientos 19°C - Parte 3 del ensamblaje simplificado de la NanoPla .....	13
Figura 9: Desplazamientos en soporte 19°C (detalle zona sensor)- Parte 3 del ensamblaje simplificado de la NanoPla .....	13
Figura 10: Tensiones 21°C - Parte 3 del ensamblaje simplificado de la NanoPla .....	13
Figura 11: Acople cinemático .....	15
Figura 12: Soporte sensor - Diseño final .....	15
Figura 13: Adaptador del sensor confocal - Diseño final .....	16
Figura 14: Adaptador del sensor táctil - Diseño final .....	17
Figura 15: Sensor confocal en su adaptador (izquierda) y sensor táctil en su adaptador (derecha) .....	18
Figura 16: Ensamble - Simulación soporte sensor confocal .....	19
Figura 17: Desplazamientos 21°C - Simulación soporte sensor confocal .....	20
Figura 18: Ensamble - Simulación soporte sensor táctil .....	20
Figura 19: Tensiones (izquierda) y desplazamientos (derecha) 21°C - Simulación soporte sensor táctil .....	21
Figura 20: Soporte del sensor impreso en 3D con cilindros e imanes colocados .....	21
Figura 21: Adaptador del sensor confocal impreso en 3D con esferas e imanes colocados .....	22
Figura 22: Adaptador del sensor confocal montado en el soporte mediante el acople cinemático .....	22
Figura 23: Sensor confocal sobre su adaptador y el soporte impresos en 3D .....	22
Figura 24: Corte longitudinal de la NanoPla .....	23
Figura 25: Localización del diseño .....	23
Figura 26: Movimiento guiado de los tornillos micrométricos y nanoposicionadora .....	25
Figura 27: Agujeros del marco metrológico inferior para el paso de los micrómetros y cilindros .....	26
Figura 28: Soporte de la nanoposicionadora (vista inferior) .....	27
Figura 29: Soporte de la nanoposicionadora integrado en ella .....	27
Figura 30: Ensamble - Simulación soporte nanoposicionadora .....	28
Figura 31: Desplazamientos 21°C - Simulación soporte nanoposicionadora .....	29
Figura 32: Tensiones 21°C - Simulación soporte nanoposicionadora .....	29
Figura 33: Esquema global del bucle de medición con sensor confocal .....	31
Figura 34: Esquema global del bucle de medición con sensor táctil .....	31
Figura 35: Cadena cinemática de la NanoPla .....	32
Figura 36: Ensamblaje del modelo del soporte externo. Fuente: [8] .....	42
Figura 37: Esquema global del bucle de medición del soporte externo .....	43
Figura 38: Cadena cinemática del soporte externo .....	43
Figura 39: Componentes para el ensayo experimental .....	45
Figura 40: Ensayo con nanoposicionadora inclinada en Y .....	48

# 1. Introducción

## 1.1. Objetivo y justificación

La nanotecnología cada vez tiene 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. Actualmente, existe un gran número de plataformas de nanoposicionamiento comerciales con precisión nanométrica; sin embargo, su rango de trabajo es muy pequeño (normalmente menor a 1 mm) [1, 2]. Pese a ello, aplicaciones como la litografía, y la caracterización de superficies con microscopios ópticos y de escaneo demandan un posicionamiento a escala submicrométrica en un rango de trabajo más amplio [3]. En relación con esto, el Grupo de Ingeniería de Fabricación y Metrología Avanzada (GIFMA) perteneciente a la Universidad de Zaragoza ha desarrollado durante los últimos años una plataforma de nanoposicionamiento de alto rango, llamada NanoPla.

La NanoPla es un sistema bidimensional de posicionamiento que alcanza una precisión submicrométrica en un amplio rango de trabajo (50 mm x 50 mm). En el grupo GIFMA se han realizado dos tesis sobre el diseño, la fabricación y el montaje de la NanoPla [4, 5].

La estructura de la NanoPla se divide en tres niveles: una base inferior fija, una base superior fija y una plataforma móvil localizada entre ambas bases. Esto se observa en la Figura 1.

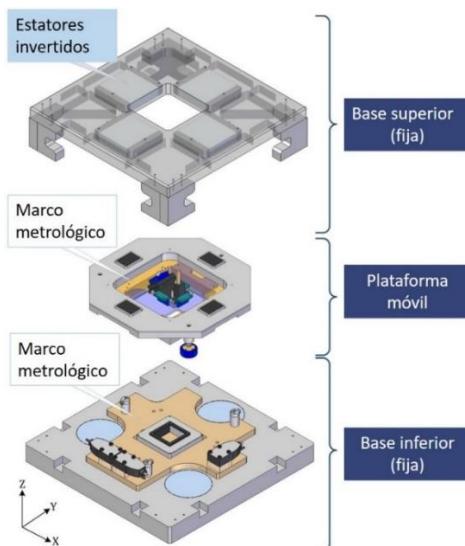


Figura 1: Los tres niveles de la estructura de la NanoPla. Fuente: [6]

Tres cojinetes de aire hacen levitar la plataforma móvil, y cuatro motores lineares Halbach forman el sistema de actuación. Los estatores de dichos motores están fijos a la base superior, mientras que los caminos magnéticos se encuentran en la plataforma móvil. Como sensor de posición se emplea un sistema bidimensional de interferómetros láser que proporciona una alta precisión y trazabilidad directa. Los tres cabezales de los láseres que forman parte de este sistema bidimensional de interferómetros láser se sitúan en el marco metrológico de la base inferior; por el contrario, los espejos planos están fijos al marco metrológico de la plataforma móvil, de esta forma es posible medir tanto los desplazamientos en X e Y como la rotación en torno a Z. Cabe destacar, que el uso de espejos planos como retrorreflectores permite la medición del desplazamiento coplanario de dos ejes. Por otro lado, los movimientos fuera del plano XY son medidos por tres sondas capacitivas. Para una mejor comprensión se muestra la Figura 2.

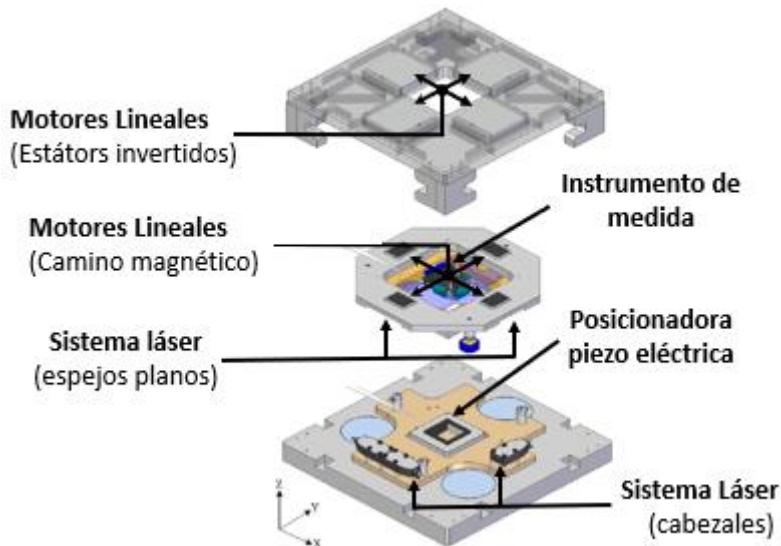


Figura 2: Partes principales del funcionamiento de la NanoPla.

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 [7]) está diseñada concretamente para llevar a cabo el movimiento de escaneo en aplicaciones metrológicas con microscópicos y tiene un rango de trabajo de 100 µm x 100 µm x 10 µm. El catálogo y las especificaciones de la posicionadora se encuentran en el Anexo 1: Principales componentes.

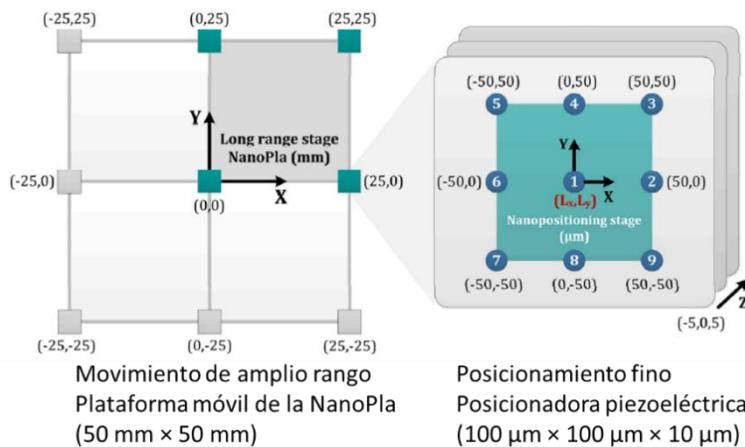


Figura 3: Esquema del rango de trabajo de la NanoPla con la estructura de dos etapas. Fuente: [5]

En proyectos anteriores, un sistema de control de posicionamiento ha sido desarrollado mediante Simulink (Matlab) para coordinar el funcionamiento de los cuatro motores Halbach e integrar el sistema láser bidimensional como sensor para la realimentación de la posición [6].

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 desea integrar en la plataforma móvil un instrumento de medida. En este trabajo se van a considerar dos instrumentos de medida diferentes. El primero es 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  $\mu\text{m}$ . Este sensor confocal es el modelo CL4 MG 35. El principio de funcionamiento del sensor confocal y su catálogo se encuentra en el Anexo 1: Principales componentes.

El segundo instrumento a integrar es un sensor táctil de la marca Heidenhain, el cual tiene que estar en contacto con la muestra para poder realizar la medición. Dicho sensor posee menor precisión que el sensor confocal, pero una mayor versatilidad de muestras a medir (al tener mayor rango de trabajo: 12 mm) y una mayor simplicidad de operación. El catálogo del sensor táctil se encuentra en el Anexo 1: Principales componentes.

## 1.2. Alcance

El objeto del presente trabajo se divide en tres partes: la integración tanto del sensor confocal como del sensor táctil en la plataforma móvil de la NanoPla, colocar correctamente la nanopositionadora comercial de nPoint en la NanoPla mediante tres tornillos micrométricos que permitan su ajuste; así como la elaboración del modelo matemático de la NanoPla que permita corregir los errores de montaje de los sensores y de la posicionadora.

La primera parte del trabajo consiste en, a partir de un diseño inicial de la NanoPla, la realización de estudios de transferencia de calor de estado estable y estudios estáticos lineales para conocer cómo reacciona frente a cargas y temperaturas.

La segunda parte del trabajo trata de una fase de diseño y validación. En ella se diseña un sistema de acople de ambos sensores en la plataforma móvil, así como otro sistema de acople de la posicionadora comercial nPoint a la base inferior de la NanoPla. El sistema de acople de la posicionadora comercial nPoint, requiere de tres tornillos micrométricos (dos manuales y uno motorizado) que permiten corregir las desviaciones angulares entre el plano XY de la nanopositionadora y de la NanoPla. Estos diseños de los sistemas de acoplos se realizan con el objetivo de fabricar e integrar dichas piezas en la NanoPla. Para la realización de ambos diseños se tienen en cuenta los principios de ingeniería de precisión.

La tercera y última parte del trabajo se centra en validar los diseños mediante simulaciones en Solid Edge, atendiendo principalmente al efecto de la temperatura y de las tensiones generadas. En esta fase de validación de los diseños también se realizan pruebas por impresión 3D.

Es decir, se parte de un diseño inicial el cual se va mejorando (primera y segunda parte del trabajo), comprobando siempre que tiene la estabilidad térmica adecuada (tercera parte).

La cuarta y última parte del trabajo consiste en la elaboración de un modelo matemático de la NanoPla con el objetivo de conocer los errores que afectan para poder estimarlos teóricamente. Como ayuda para la validación de este modelo, se elabora un modelo matemático auxiliar de un soporte externo ya fabricado [8].

Este documento se estructura de la siguiente manera. Primero se describe el diseño inicial de la NanoPla (Sección 2.1) y se valida su estabilidad térmica-lineal (Sección 2.2). A continuación, se diseña el soporte del sensor, el adaptador del sensor confocal y el adaptador del sensor táctil (Sección 3.1) y se valida su estabilidad térmica-lineal (Sección 3.2). Despues, se diseña el soporte de la nanopositionadora (Sección 4.1) y se valida su estabilidad térmica-lineal (Sección 4.2). Luego, se realiza un análisis y corrección teórica de los errores geométricos de la NanoPla (Sección 5.1), así como de los de un soporte externo (Sección 5.2). Finalmente, se discuten las conclusiones y se proponen líneas de trabajo futuras (Sección 6).

## 2. Análisis del diseño de la NanoPla

El trabajo comienza por el análisis del diseño de la NanoPla con el objetivo de estudiar los desplazamientos que sufre la punta del sensor confocal con respecto al portamuestras (debido a los incrementos de temperatura que puedan existir en el ambiente). Se quiere conocer el valor del desplazamiento de la punta del instrumento de medida para estudiar su magnitud y tenerla en cuenta a la hora de diseñar el soporte y el adaptador del sensor, así como en el modelo matemático de la NanoPla para corregir dicho desplazamiento y que no afecte en la medida del sensor. Para llevar a cabo este análisis, se han realizado simulaciones del ensamble mediante Solid Edge.

### 2.1. Componentes de la NanoPla que afectan a la medición del diseño del sensor

Este ensamble está constituido por las piezas estructurales que afectan a la medición del sensor. Cabe destacar, que el diseño básico del soporte del sensor aquí analizado es simplemente empleado para la realización de los cálculos iniciales. De aquí en adelante, a este ensamble se le llamará *ensamble de los elementos estructurales de la NanoPla que afectan a la medición*. En la Figura 4 y Figura 5, se muestra dicho ensamble.

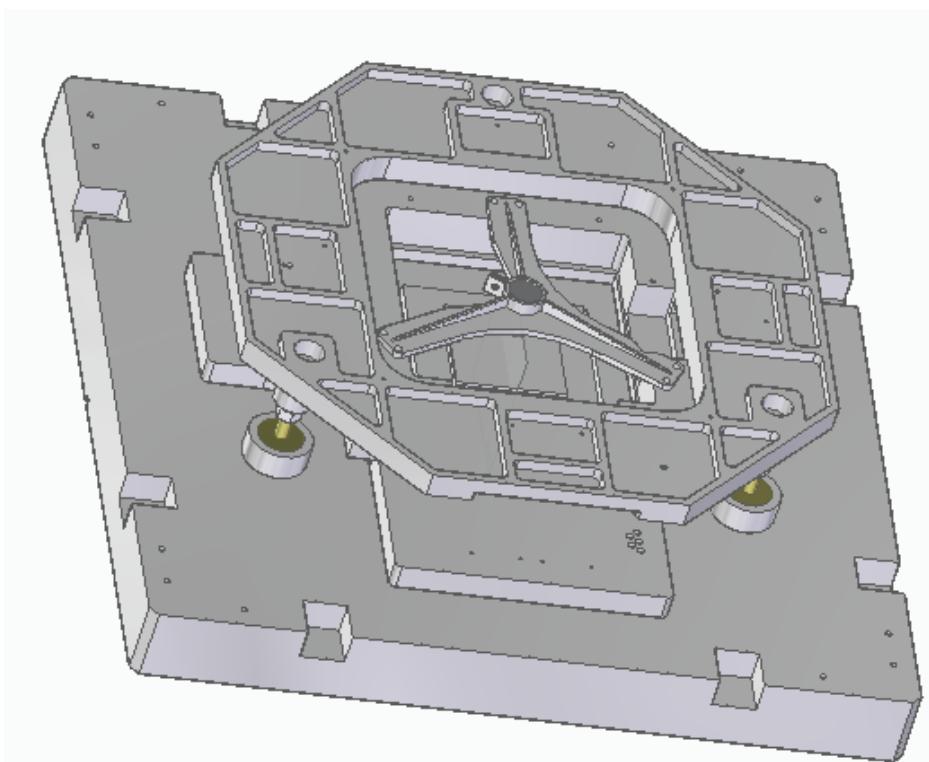


Figura 4: Elementos estructurales de la NanoPla que afectan a la medición del sensor.

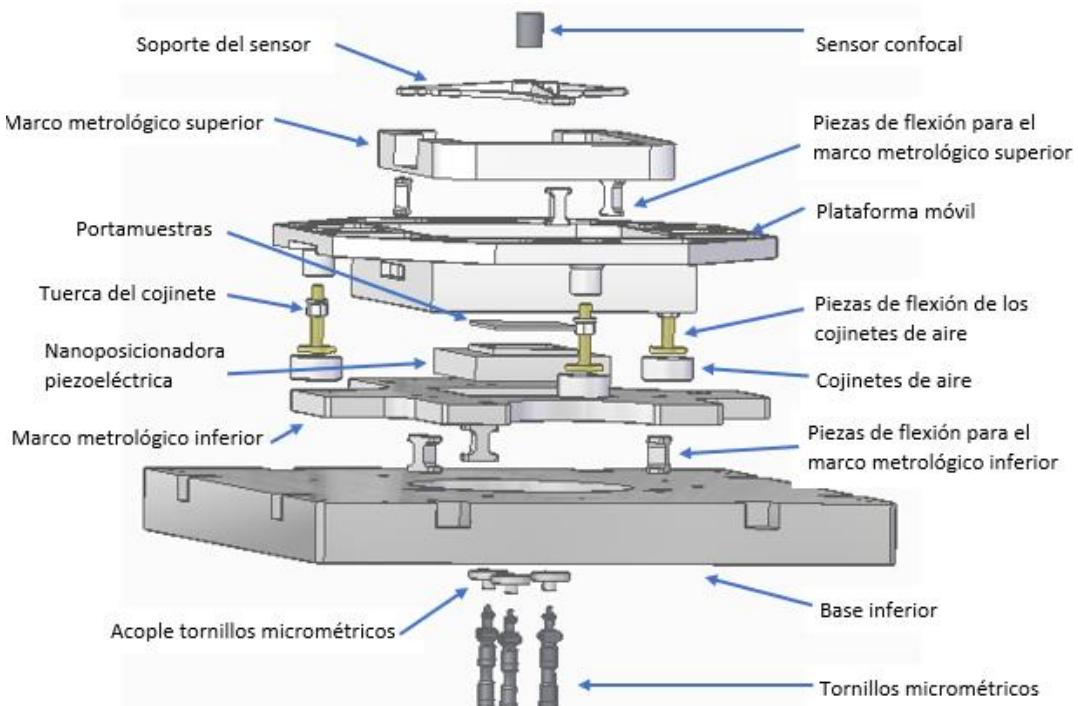


Figura 5: Elementos estructurales de la NanoPla que afectan a la medición. Vista explotada.

El ensamblaje de los elementos estructurales de la NanoPla que afectan a la medición está formado por:

- **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:** 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).
- **Piezas de flexión para el marco metrológico inferior** (3 unidades): sirve para aislar el marco metrológico inferior de la base inferior.
- **Nanoposicionadora piezoeléctrica:** Es una posicionadora comercial y consiste en un sistema bidimensional de posicionamiento que alcanza una precisión submicrométrica en su rango de trabajo de  $100 \mu\text{m} \times 100 \mu\text{m} \times 10 \mu\text{m}$ .
- **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 1: 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.
- **Piezas de flexión de los cojinetes de aire** (3 unidades): en ellos se apoya la plataforma móvil.
- **Tuerca del cojinete** (3 unidades): para apretar las piezas de flexión de los cojinetes de aire y fijar así la altura de los apoyos de la plataforma móvil.
- **Plataforma móvil:** 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 y cuyo diseño es objeto de este trabajo.
- **Piezas de flexión para el marco metrológico superior** (3 unidades): sirve para aislar el marco metrológico superior de la plataforma móvil.
- **Soporte del sensor:** esta pieza es la que sujetta al sensor. En este primer momento se emplea un diseño inicial básico usado únicamente en los estudios térmicos-lineales iniciales.
- **Sensor confocal:** el sensor aquí representado es un diseño básico que posee el peso y diámetro del sensor real.

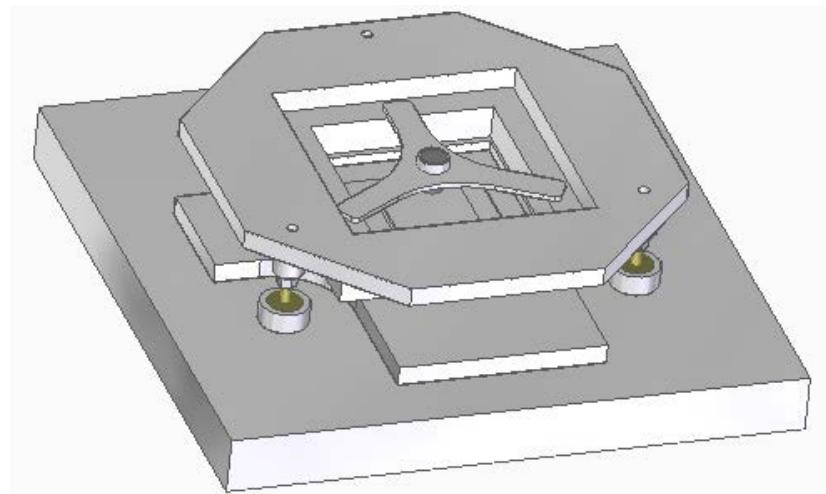
El ensamblaje de los elementos estructurales de la NanoPla que afectan a la medición se ha simulado en Solid Edge pieza a pieza, estableciendo conexiones entre ellas (principalmente conexiones de contacto y alineaciones axiales). Los pasos detallados de estas uniones se encuentran en el Anexo 2: Ensamblaje de los elementos estructurales de la NanoPla que afectan a la medición.

Para posteriormente poder realizar las simulaciones por elementos finitos en Solid Edge se deben definir las propiedades de los materiales de las piezas. El material por el que están constituidas todas las piezas (a excepción de los tres tornillos micrométricos, las tres piezas de flexión de los cojinetes de aire y el sensor confocal) es aleación de aluminio 7075-T6 [9] debido a su resistencia, su bajo coeficiente de expansión térmica, baja densidad, resistencia a la corrosión, y un procesamiento fácil y económico [9]. En los tres tornillos micrométricos el material es acero inoxidable 304. En las tres piezas de flexión de los cojinetes de aire [10] el material es latón. Las propiedades de estos materiales se encuentran en el Anexo 2: Ensamblaje de los elementos estructurales de la NanoPla que afectan a la medición.

Se quiere conocer la variación del desplazamiento que aparece entre la punta del sensor confocal y el portamuestras debidos a cambios de temperatura en el ambiente. Por ello, se simplifican las piezas anteriormente descritas para que el mallado y la resolución por el método de elementos finitos (FEM) sea más rápida y sencilla. Es decir, a las piezas descritas anteriormente se les eliminan todas las cavidades, muescas y demás detalles que no son relevantes para el estudio que se quiere realizar. De aquí en adelante, a este nuevo ensamblaje se le referirá como *ensamblaje simplificado de los elementos estructurales de la NanoPla que afectan a la medición*.

## 2.2. Simulaciones de los elementos estructurales simplificados

Las simulaciones de los elementos estructurales de la NanoPla que afectan a la medición del sensor siguen siendo un estudio complejo debido a la cantidad de piezas a analizar y los diferentes aspectos importantes a tener en cuenta (como los coeficientes de dilatación térmica, la magnitud del efecto de la gravedad y de la temperatura, etc.). Para ello se ha realizado el análisis por fases incluyendo progresivamente más piezas hasta llegar al diseño completo (ver Anexo 3: Estudio de la Parte 1 del ensamblaje simplificado de la NanoPla y Anexo 4: Estudio de la Parte 2 del ensamblaje simplificado de la NanoPla). El diseño completo se muestra en la Figura 6.

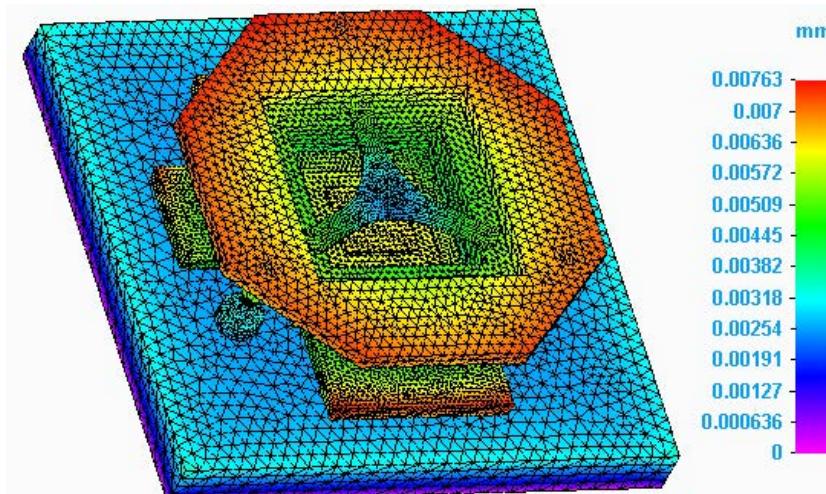


*Figura 6: Ensamblaje simplificado de los elementos estructurales de la NanoPla que afectan a la medición.*

A continuación, se pueden ver algunas de las simulaciones realizadas en Solid Edge sobre el diseño completo simplificado combinando el problema térmico y el estático lineal. En dichas simulaciones se ha introducido la gravedad y la temperatura ambiente como cargas y se han impedido los 6 grados de libertad de la superficie inferior de la base inferior. Se ha usado un tipo de malla tetraédrica de tamaño 3,72 mm (nivel de precisión 6 de 10), presentando una buena precisión sin un excesivo tiempo computacional (se ha comprobado que mallados más finos presentaban resultados similares). Estas simulaciones se hacen para los casos de 21°C y 19°C debido a que la temperatura de referencia es de 20°C y se quiere estudiar la influencia de la variación de 1°C (condiciones de laboratorio).

En cuanto al análisis de los desplazamientos, los máximos se observan principalmente en la periferia de la plataforma móvil y en algunos bordes del marco metrológico inferior; alcanzando un valor de 7,63 µm en el caso de 21°C (Figura 7) y de 9,43 µm en el caso de 19°C (Figura 8). Estos valores son asumibles puesto que las zonas en las que aparecen no son críticas. Los desplazamientos en Z en el soporte del sensor, en la zona de fijación del sensor, tienen un valor de 2,95 µm (componente positiva) en el caso de 21°C y de -8,79 µm (componente negativa) en el caso de 19°C (Figura 9). Estos valores son considerables debido a que esta zona es crítica y presentan un elevado valor.

En cuanto a las tensiones, se observa (Figura 10) como las máximas se dan en las zonas empotradas (zonas no críticas) y con valores asumibles (tensión máxima con 21°C de 9,94 MPa y con 19°C de 9,72 MPa).



*Figura 7: Desplazamientos 21°C - Parte 3 del ensamblaje simplificado de la NanoPla.*

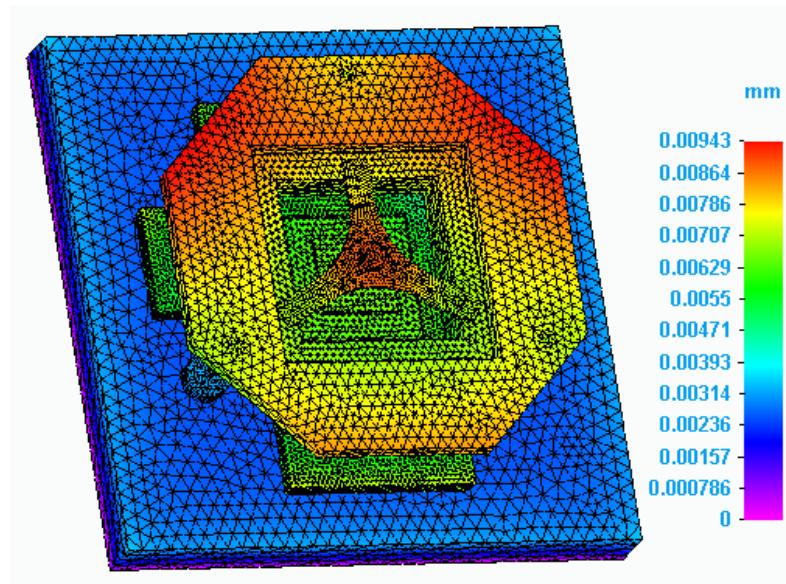


Figura 8: Desplazamientos 19°C - Parte 3 del ensamblaje simplificado de la NanoPla.

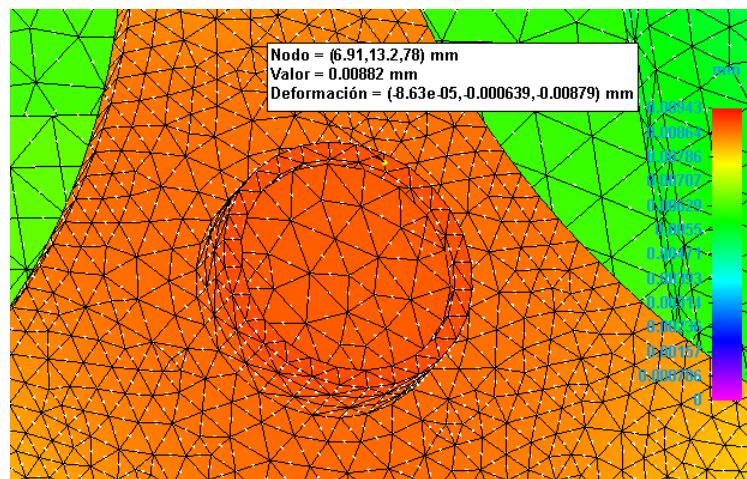


Figura 9: Desplazamientos en soporte 19°C (detalle zona sensor)- Parte 3 del ensamblaje simplificado de la NanoPla.

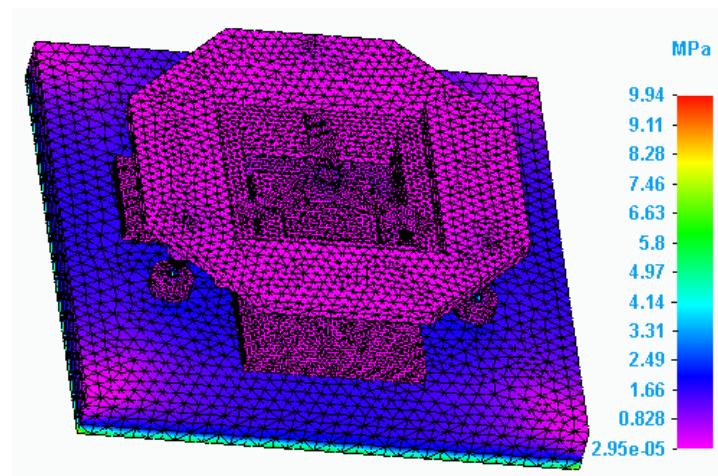


Figura 10: Tensiones 21°C - Parte 3 del ensamblaje simplificado de la NanoPla.

### 3. Diseños del soporte y adaptadores de los sensores

Una vez conocidos los comportamientos de las tensiones y desplazamiento de la NanoPla y del prediseño básico del soporte del sensor, para poder llevar a cabo la caracterización metrológica de superficies a escala submicrométrica en el rango de trabajo de 50 mm x 50 mm, se estudia un diseño óptimo para poder integrar el instrumento de medida a la NanoPla, concretamente al marco metrológico de la plataforma móvil.

#### 3.1. Consideraciones y diseños

A continuación, se muestran las consideraciones y diseños finales. El historial de diseños, así como el motivo de su evolución se muestran en el Anexo 5: Evolución de los diseños soporte y adaptadores para sensores.

Las consideraciones más importantes a tener en cuenta son las siguientes:

1. El soporte del instrumento de medida debe ser versátil, es decir, que se pueda emplear tanto para el sensor confocal, como para el sensor táctil indistintamente, como para otros instrumentos de medida que se quieran integrar en el futuro. Para ello hay que considerar que el sensor confocal necesita una distancia de trabajo de 16,2 mm, es decir, distancia desde la base del sensor hasta el ‘punto focal superior’ (ver Anexo 1: Principales componentes). Sin embargo, el sensor táctil debe estar en contacto con la muestra.
2. Una vez atornillado el soporte del sensor en el marco metrológico superior se quedará fijo.
3. El instrumento de medida debe permanecer completamente inmóvil en el momento en el que se mide la muestra/pieza. La punta del instrumento de medida con la que mide debe quedar en el centro del marco metrológico de la plataforma móvil.
4. El material va a ser aluminio 7075-T6, dado que el resto de la NanoPla es de dicho material y así evitar diferencias de coeficientes de dilataciones térmicas. Además, se intenta que el diseño sea lo más ligero posible para no añadir excesiva carga a la plataforma móvil.
5. Debe tener en cuenta el comportamiento de tensiones analizado anteriormente con el fin de aliviar tensión.
6. El diseño debe ser compatible con su fabricación a través del Servicio de Mecánica de Precisión de la Universidad de Zaragoza.
7. El diseño no puede implicar modificaciones en componentes ya fabricados de la plataforma.
8. Las muestras a medir pueden tener una altura de hasta 18 mm, aunque será en ocasiones especiales. Este factor junto con el factor de la distancia de trabajo del instrumento de medida (primera consideración) condiciona las dimensiones y características de los diseños.

Con todas estas consideraciones, el diseño final consta de dos partes: una pieza inferior (soporte) que quede atornillada al marco metrológico superior y una pieza superior (adaptador) que sea postiza e intercambiable. La pieza superior es la que sujetará el instrumento de medida mediante tonillos roscados y tuercas, apoyándose en la pieza inferior mediante el uso de acoplamientos cinemáticos, consiguiendo así reducir la transmisión de tensiones al soporte.

El motivo principal por el que se decide un diseño constituido por dos partes independientes es el de conseguir la versatilidad del instrumento de medida. De esta forma, se diseña una pieza superior (adaptador) propia para cada instrumento de medida siendo común la pieza inferior. En este trabajo se estudian dos instrumentos de medida y se diseña un adaptador para cada uno de ellos. Pero queda abierta la opción de poder integrar en el futuro un nuevo instrumento de medida en la NanoPla teniendo que diseñar únicamente su adaptador y pudiendo emplear la pieza inferior común que estará fija en la NanoPla.

El adaptador, propio de cada instrumento de medida, es fácilmente desmontable. Para poder montar el adaptador de forma repetible (es decir, minimizando los errores por recolocación) se plantea el uso de un acoplamiento cinemático [11]. Dicho acople está constituido por 6 cilindros y 3 esferas, restringiéndose así los seis grados de libertad (GDL) de forma simétrica. Para conseguir que este acople sea estable, se

introducen 6 imanes (3 en el soporte, 3 en el adaptador del sensor) de modo que se establezca una fuerza magnética de precarga suficientemente grande como para que la unión de las piezas sea fija sin la necesidad de usar tornillos que puedan generar tensiones. Esta atracción magnética es debida a que los imanes son de neodimio [12] y las esferas [13] y cilindros [14] de acero. En cuanto a la disposición de los cilindros y esferas, se determina que los 6 cilindros vayan pegados al soporte y las esferas a los adaptadores (3 esferas en cada adaptador), para una mejor comprensión ver Figura 11. Para facilitar el pegado, se diseña una cavidad para alojar el exceso de pegamento. Se estudia el dimensionamiento óptimo de los cilindros, imanes y esferas y resultan: cilindros de diámetro 4 mm y de longitud 8 mm, esferas de diámetro 5 mm e imanes de diámetro 6,5 mm y de altura 3 mm.

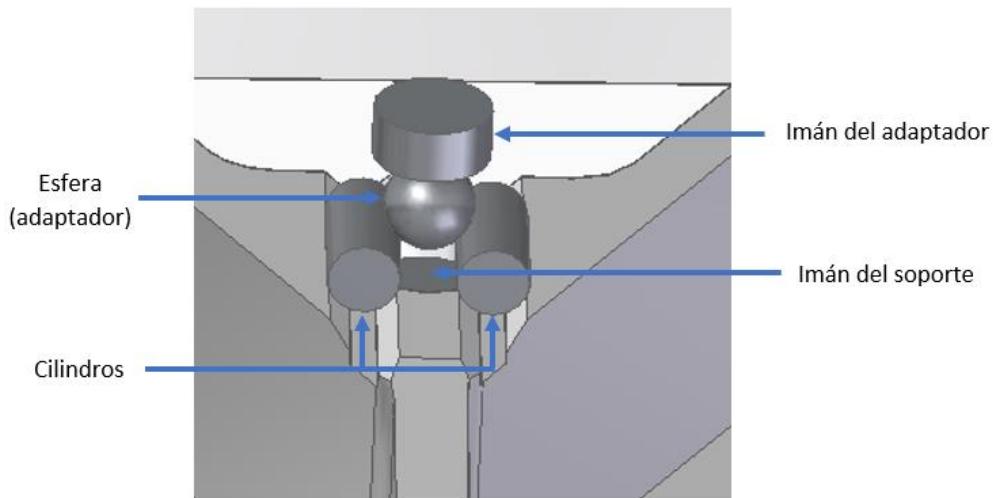


Figura 11: Acople cinemático.

El diseño final del soporte se muestra en la Figura 12.

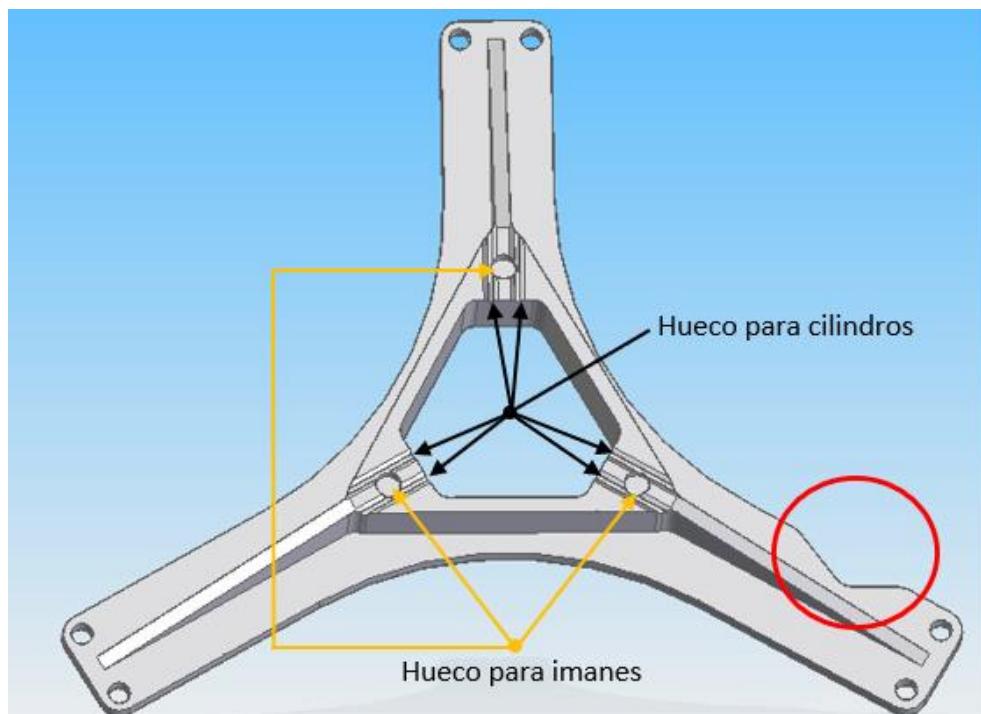


Figura 12: Soporte sensor - Diseño final.

Las características principales del soporte son las siguientes:

- Tiene un peso de 224 g.
- Se establece un hueco central amplio para que se introduzcan los instrumentos de medida (sensor confocal, sensor táctil y futuros instrumentos que se puedan integrar en la NanoPla) y el adaptador táctil sin que se produzcan choques; y además aligerar el peso.
- La elevación central es maciza, lo que facilita enormemente la fabricación de la pieza.
- Se diseñan canales en los que se apoyan los cilindros. Dado que las dimensiones de los canales son importantes, estas se especifican y explican en el Anexo 6: Dimensionado de los canales del soporte del sensor para alojar los cilindros.
- Se diseñan agujeros en la parte central (entre los canales de los cilindros) para insertar los imanes.
- Los nervios, los cuales tienen el espesor suficiente para dar rigidez a la pieza y empiezan alineados con los centros de los agujeros de la base y terminan en la cota superior (altura).
- La ‘pata’ derecha tiene una cavidad (rodeada en la Figura 12) para evitar la colisión con uno de los espejos de la NanoPla.
- La posición de los seis agujeros de las tres ‘patas’ del soporte (dos agujeros por pata) que apoyan sobre el marco metrológico superior están alineados con la posición de los seis tornillos de los flexibles, evitándose así mecanizar la NanoPla. Estos agujeros están diseñados para atornillar el soporte al marco metrológico.

El diseño final del adaptador para el sensor confocal se muestra en la Figura 13.

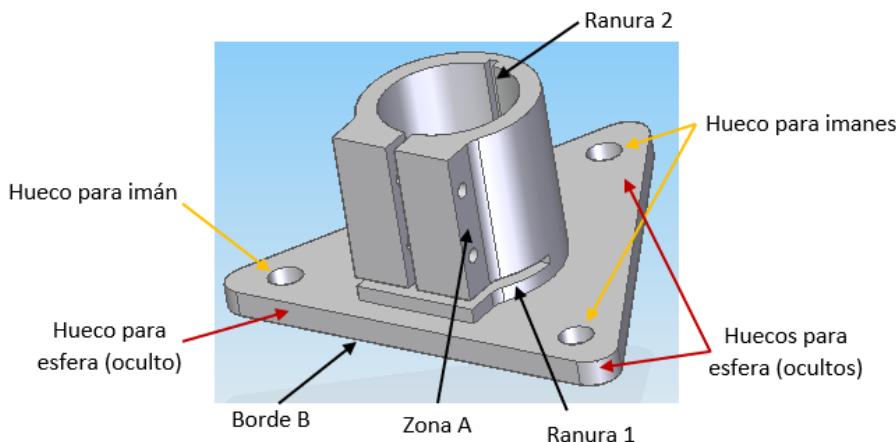


Figura 13: Adaptador del sensor confocal - Diseño final.

Las características principales del adaptador del sensor confocal son las siguientes:

- Tiene un peso de 88 g.
- La zona de sujeción del sensor se divide en dos partes. La superior que fija la altura del sensor mediante tornillos roscados y tuercas y la inferior que sirve para que la desviación del sensor sea pequeña, es decir, para que el haz del sensor sea lo más perpendicular posible a la muestra. Ambas partes están separadas por una ranura (ranura 1 señalada en la Figura 13) cuya finalidad es evitar que la tensión generada en el apriete no se transmita al soporte. La altura de esta zona de agarre del sensor cubre todo el rango de posibles tamaños de las muestras (considerando que la distancia de trabajo requerida por el sensor confocal es 16,2 mm). La parte superior de la zona donde se aloja el sensor no es completamente circular, sino que posee una terminación rectangular (zona A señalada en la Figura 13) en la zona de los agujeros (no roscados) de los tornillos con la finalidad de que la cabeza del tornillo y la tuerca queden paralelos a la superficie una vez apretados. Además, esta zona A (zona rectangular donde se encuentran los agujeros) tiene suficiente área para que no se produzcan tensiones elevadas al apretar los tornillos.

- Los agujeros en los que se introducen los tornillos que aprietan el sensor se sitúan paralelos al borde más próximo (borde B señalado en la Figura 13) con el fin de facilitar las operaciones de fabricación de la pieza.
- La ranura (ranura 2 señalada en la Figura 13) longitudinal al eje de la zona de sujeción del sensor está diseñada para liberar tensiones en el momento del apriete.
- Base triangular con las cavidades para los imanes y las esferas.

El diseño final del adaptador para el sensor táctil se muestra en la Figura 14.

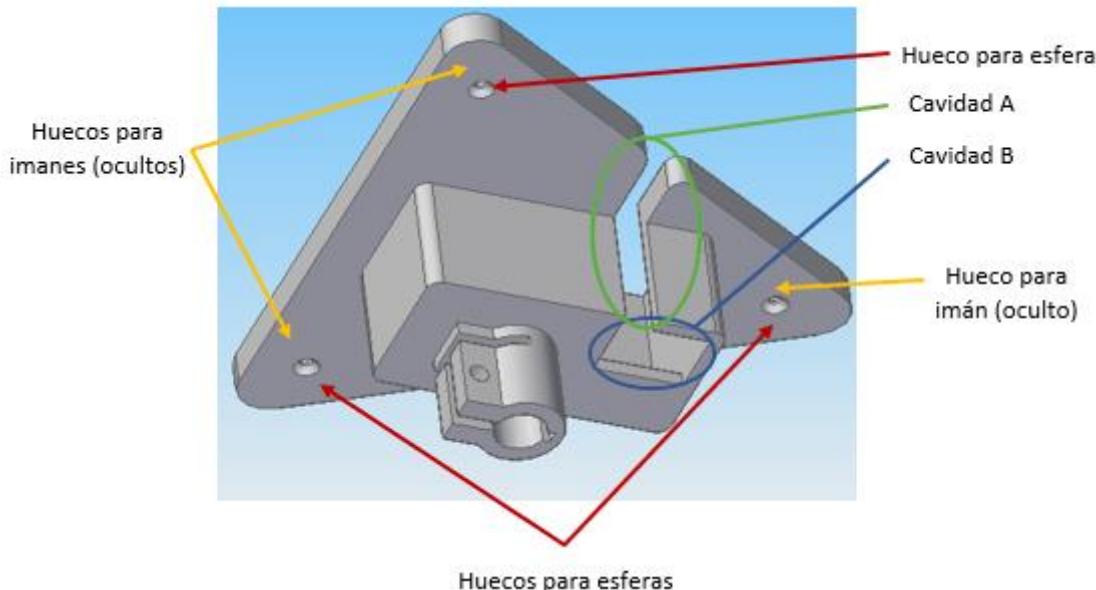


Figura 14: Adaptador del sensor táctil - Diseño final.

Las características principales del adaptador del sensor táctil son las siguientes:

- Tiene un peso de 60 g.
- De manera análoga al sensor confocal, la parte que sujetala sensor se diseña considerando los mismos aspectos (ranuras para liberar tensiones, tornillos y tuercas, facilidad en la fabricación, etc.).
- De manera análoga al sensor confocal, la base triangular que apoya sobre el soporte mediante acople cinemático se diseña considerando los mismos aspectos (esferas e imanes).
- La “caja” central está dimensionada para albergar el sensor táctil, dejando escapatoria al cable que transmite la información del sensor, y con una altura tal que la punta del sensor con el vástago completamente extendido quede en contacto con la muestra y se sujete al sensor en la zona especificada para ello (esta zona se estudia en el Anexo 5: Evolución de los diseños soporte y adaptadores para sensores). La escapatoria del cable se consigue mediante un corte transversal (cavidad A señalada en la Figura 14) y una cavidad en la parte inferior (cavidad B señalada en la Figura 14).
- Debido a los aspectos indispensables de que el sensor tiene que estar en contacto con la muestra, la zona en la que se debe sujetar el sensor y que el rango de medida del sensor táctil es de 12 mm; la altura máxima de la muestra es de 19,5 mm. Esto se muestra más detalladamente en el Anexo 5: Evolución de los diseños soporte y adaptadores para sensores.

En la Figura 15 (izquierda) se muestra el adaptador del sensor confocal sujetando el sensor confocal y en la Figura 15 (derecha) se muestra el adaptador del sensor táctil sujetando el sensor táctil (en la pieza 3D del sensor táctil no está representado el cable que transmite la información).

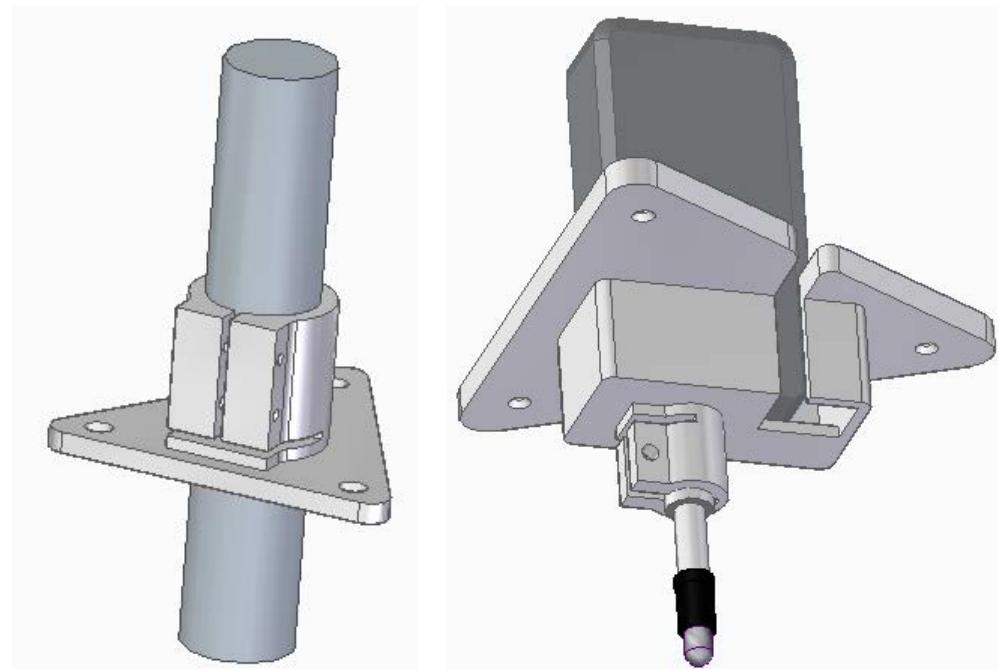


Figura 15: Sensor confocal en su adaptador (izquierda) y sensor táctil en su adaptador (derecha).

### 3.2. Validación de los diseños finales del soporte-adaptador-sensor

Con los diseños finales creados, se simulan los ensamblajes del sensor confocal y del sensor táctil para comprobar que las tensiones y desplazamientos resultantes son admisibles. Estos ensamblajes están conformados por las siguientes piezas: soporte, adaptador, sensor, seis cilindros, tres esferas, seis imanes y el marco metrológico superior.

El motivo por el que las simulaciones se realizan en los ensamblajes anteriormente mencionados y no en el ensamblaje de los elementos estructurales de la NanoPla que afectan a la medición es el siguiente. Como ya se ha visto en las simulaciones de las 3 partes del ensamblaje simplificado de los elementos estructurales de la NanoPla que afectan a la medición, los resultados del soporte en cada una de las 3 partes son prácticamente iguales (ver Sección 2.2 de la memoria, Anexo 3: Estudio de la Parte 1 del ensamblaje simplificado de la NanoPla, y Anexo 4: Estudio de la Parte 2 del ensamblaje simplificado de la NanoPla). Por esta razón, con el fin de simplificar las simulaciones de forma que se puedan mallar y resolver en un menor tiempo, se simulan solo los ensamblajes del sensor confocal y del sensor táctil.

Primeramente, se estudia el caso del sensor confocal. Para ello, se realiza el ensamblaje (Figura 16) uniendo pieza a pieza mediante conexiones. Los pasos detallados de cómo se crea el ensamblaje se encuentran en el Anexo 7: Simulación de los diseños finales del soporte-adaptador-sensor.

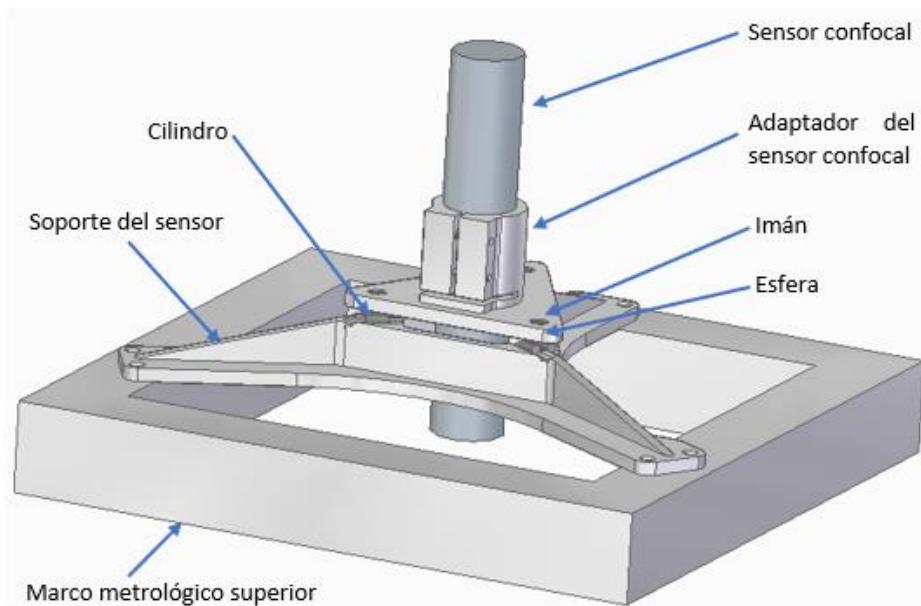


Figura 16: Ensamble - Simulación soporte sensor confocal.

En cuanto a la simulación del sensor confocal, se realiza un estudio combinado de transferencia de calor de estado estable y estudio estático lineal. En este estudio se aplican la gravedad y la temperatura ambiente como cargas. Las restricciones aplicadas son dos: la primera es impedir el desplazamiento en Z en la superficie inferior del marco metrológico superior, y la segunda es impedir el desplazamiento en X e Y de la superficie cilíndrica del sensor. Además, se aplican de forma automática los conectores (se detallan en el Anexo 7: Simulación de los diseños finales del soporte-adaptador-sensor). A continuación, se realiza el mallado con un tipo de malla tetraédrica de tamaño 2,68 mm (nivel de precisión 4 de 10) y finalmente se resuelve.

Estas simulaciones se resuelven para temperatura ambiente 21°C y 19°C. Los resultados obtenidos se analizan detalladamente en el Anexo 7: Simulación de los diseños finales del soporte-adaptador-sensor. El comportamiento de las tensiones es análogo en el caso de 21°C y 19°C, sufriéndose los valores máximos (7,1 MPa aproximadamente) en la zona del adaptador que fija al sensor y dicho sensor presenta una tensión constante en todos sus puntos (2,46 MPa). En relación con los desplazamientos, la punta del sensor presenta un desplazamiento en la componente Z de expansión de valor 1,66 µm en el caso de 21°C, y de expansión de valor 0,709 µm en el caso de 19°C. Ambos desplazamientos son relevantes dado que el sensor confocal tiene una resolución de 0,122 µm y transmitirá estos desplazamientos al valor de la medida (altura de la muestra) ocasionando así un error en la misma. Tanto los desplazamientos como las tensiones presentan simetría en el eje Y (eje de simetría del conjunto), ver Figura 17. A pesar de ello, este desplazamiento es sufrido cuando la temperatura se incrementa en 1°C durante la medición; situación muy poco probable dado que las medidas se realizan en un laboratorio de metrología donde la temperatura ambiente es controlada. Además, al tratarse de un error sistemático, la temperatura ambiente se podría monitorizar y compensar así los errores que provoque. Esto se plantea como trabajo futuro. Cabe destacar que este error no es debido al diseño en sí del soporte del sensor y del adaptador del mismo aquí diseñados, puesto que la propia NanoPla ya estaba diseñada y fabricada en aluminio. En línea con esto, la NanoPla sea completamente de aluminio, se plantea la opción de fabricar los marcos metrológicos y las piezas aquí diseñadas en Zerodur, que es un material con baja expansión térmica.

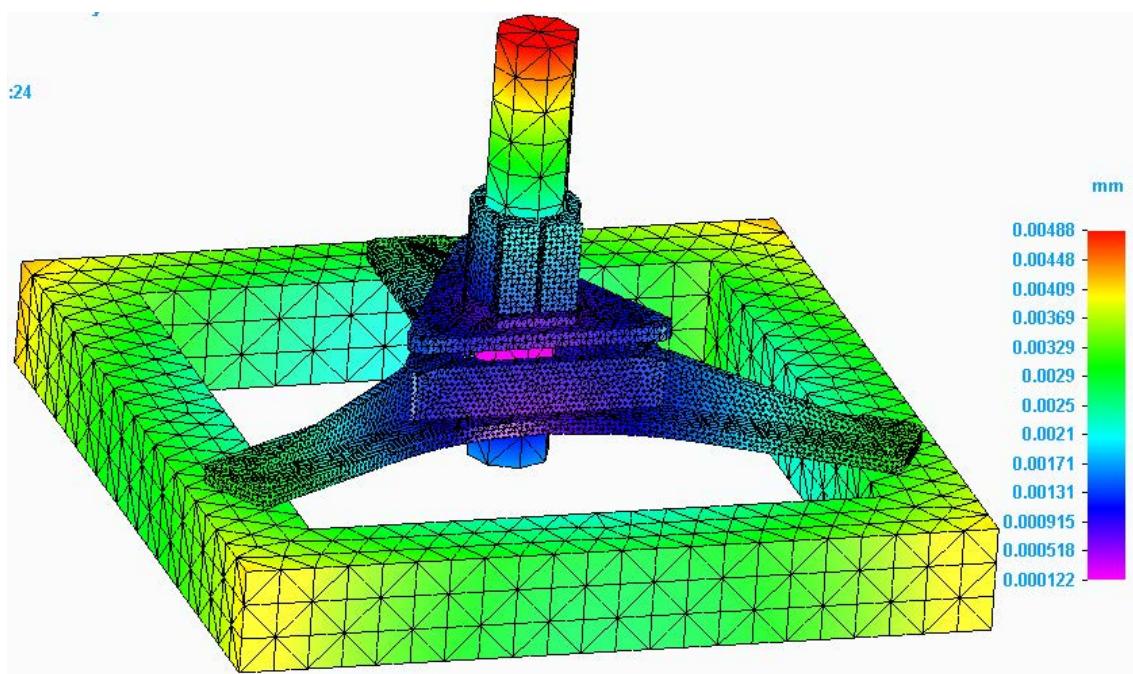


Figura 17: Desplazamientos 21°C - Simulación soporte sensor confocal.

En cuanto a la simulación del ensamblaje del sensor táctil (análisis detallado en el Anexo 7: Simulación de los diseños finales del soporte-adaptador-sensor.), su procedimiento es análogo al del sensor confocal. Se comienza creando el ensamblaje (Figura 18) para la realización de un estudio combinado de transferencia de calor de estado estable y estudio estático líneas, con las mismas cargas, restricciones y tipo de malla (nivel 4 de 10, con tamaño 2,44 mm).

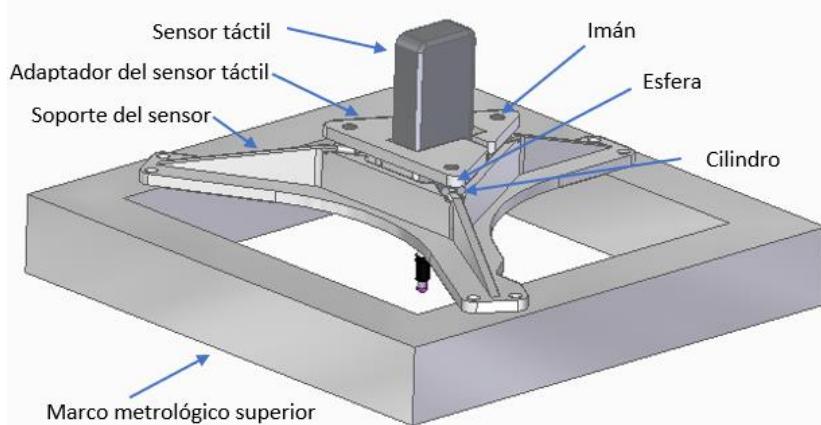
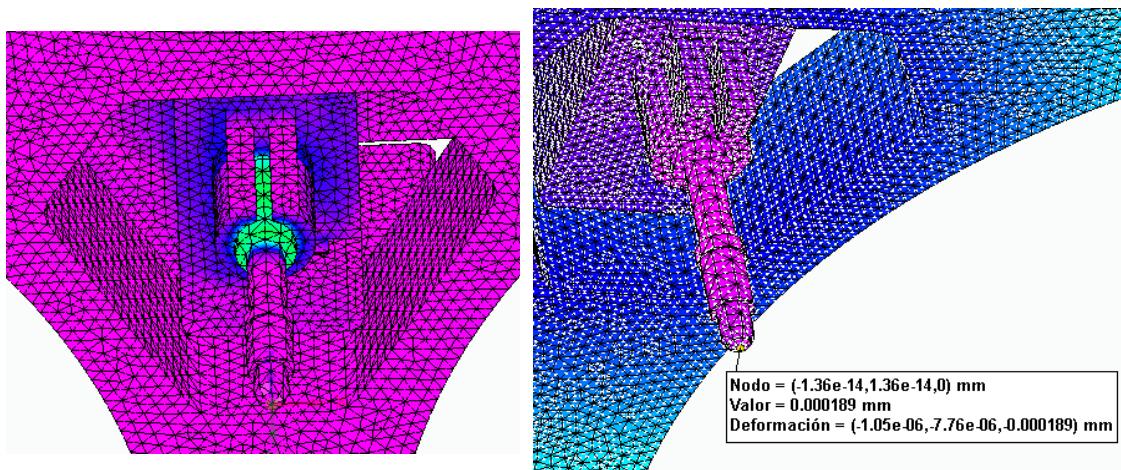


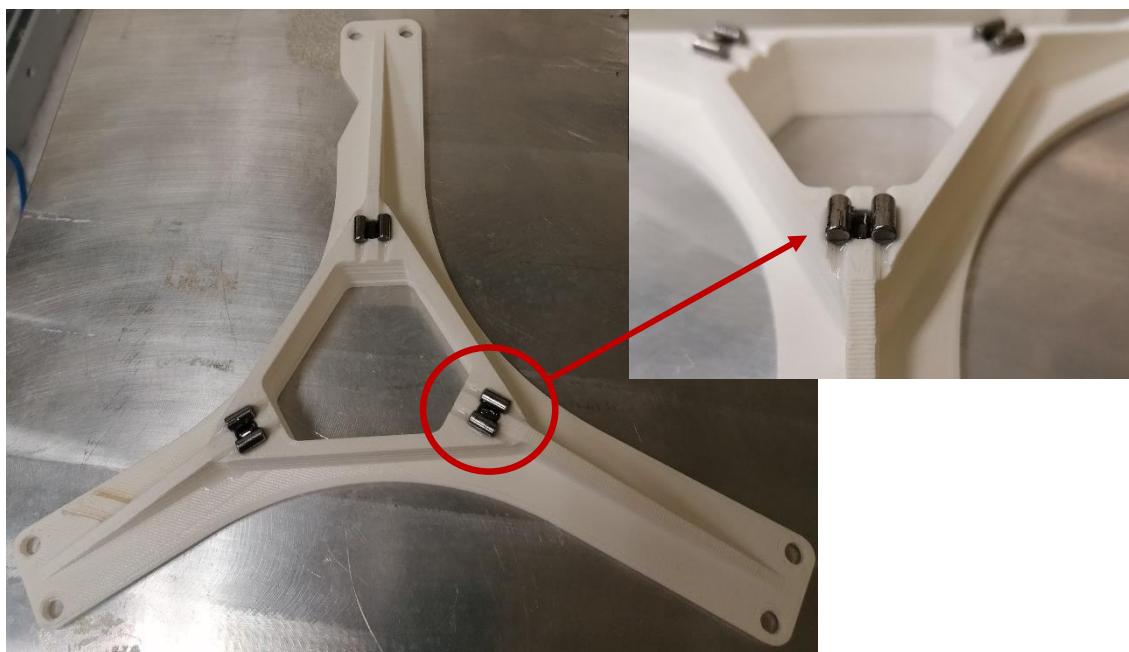
Figura 18: Ensamble - Simulación soporte sensor táctil.

El comportamiento de las tensiones que sufre este ensamblaje es análogo al del sensor confocal. Las máximas tensiones las sufre el adaptador en la zona que fija al sensor (ilustración izquierda de la Figura 19), siendo el valor de la tensión que predomina en esta zona inferior a 3 MPa. En cuanto a los desplazamientos en Z en la punta del sensor, son asumibles en el caso de 21°C (ilustración derecha de la Figura 19), pero una vez que desciende la temperatura a 19°C ya no son despreciables puesto que presentan unos valores de contracción de  $-0,894 \mu\text{m}$ , siendo de  $0,2 \mu\text{m}$  la precisión del sensor.



*Figura 19: Tensiones (izquierda) y desplazamientos (derecha) 21°C - Simulación soporte sensor táctil.*

Con los estudios realizados y analizados, los diseños del adaptador del sensor confocal, del adaptador del sensor táctil y del soporte del sensor se imprimen en 3D a modo de prototipo para validar el diseño y el montaje antes de la fabricación en aluminio. La impresora utilizada es la impresora de hilo, FDM, BQ Witbox 2. En la Figura 20 se muestra el soporte del sensor impreso en 3D con los seis cilindros y los tres imanes colocados en sus respectivas posiciones, así como una vista detallada (desde otra perspectiva) de los mismos. En la Figura 21 se muestra el adaptador del sensor confocal impreso en 3D con las tres esferas y los tres imanes colocados en sus respectivas posiciones, así como una vista detallada (desde otra perspectiva) de los mismos. En la Figura 22 se muestra el adaptador del sensor confocal montado sobre el soporte del sensor mediante el acople cinemático. Finalmente, en la Figura 23 se muestra el soporte del sensor y el adaptador del sensor confocal (impresos en 3D) integrados en la NanoPla; así como el sensor confocal integrado en su adaptador.



*Figura 20: Soporte del sensor impreso en 3D con cilindros e imanes colocados.*

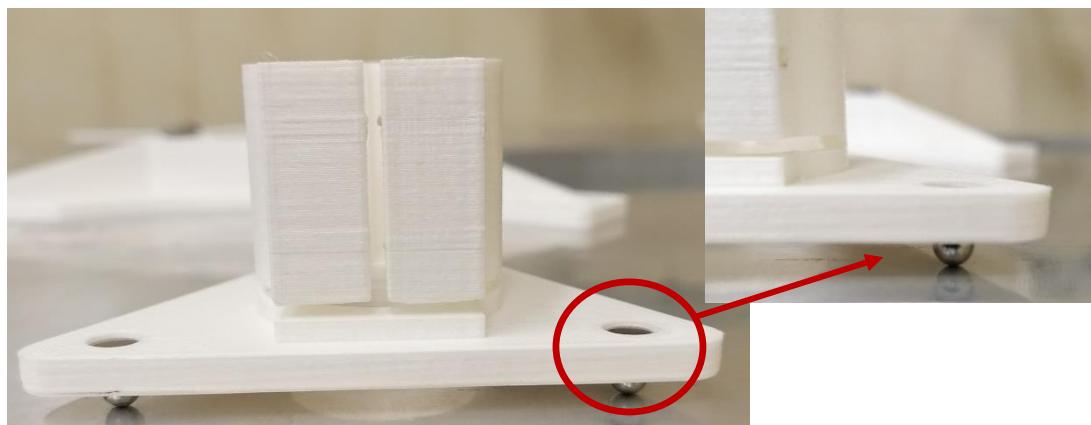


Figura 21: Adaptador del sensor confocal impreso en 3D con esferas e imanes colocados.

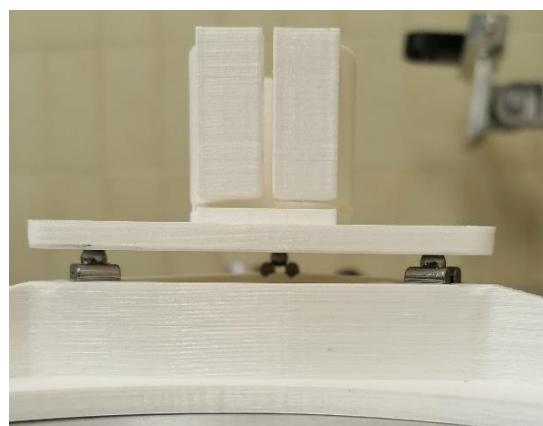


Figura 22: Adaptador del sensor confocal montado en el soporte mediante el acople cinemático

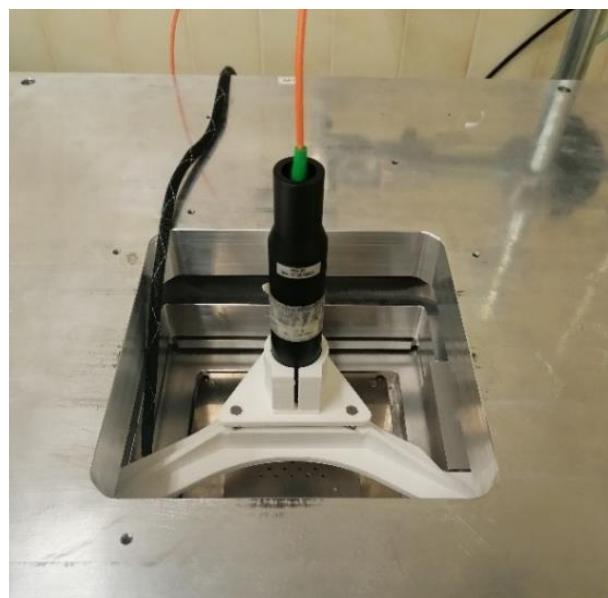


Figura 23: Sensor confocal sobre su adaptador y el soporte impresos en 3D.

## 4. Diseño del acople cinemático de la nanoposicionadora con la NanoPla

En este apartado del proyecto se desarrolla la fase de diseño de un sistema de acople de la posicionadora comercial nPoint a la base inferior de la NanoPla, así como su validación mediante simulaciones térmicas-lineales con el objetivo de fabricar e integrar dicho diseño en la NanoPla. Dicho sistema de acople se va a integrar entre los tornillos micrométricos y la nanoposicionadora. Para una mejor comprensión se muestra la Figura 25 (en la Figura 24 se muestra el contexto) en la que se señala con un rectángulo (rojo) el lugar en el que se debe alojar el sistema de acople y con un óvalo (azul) una de las consideraciones tomadas para el diseño (el diseño debe ser estrecho).

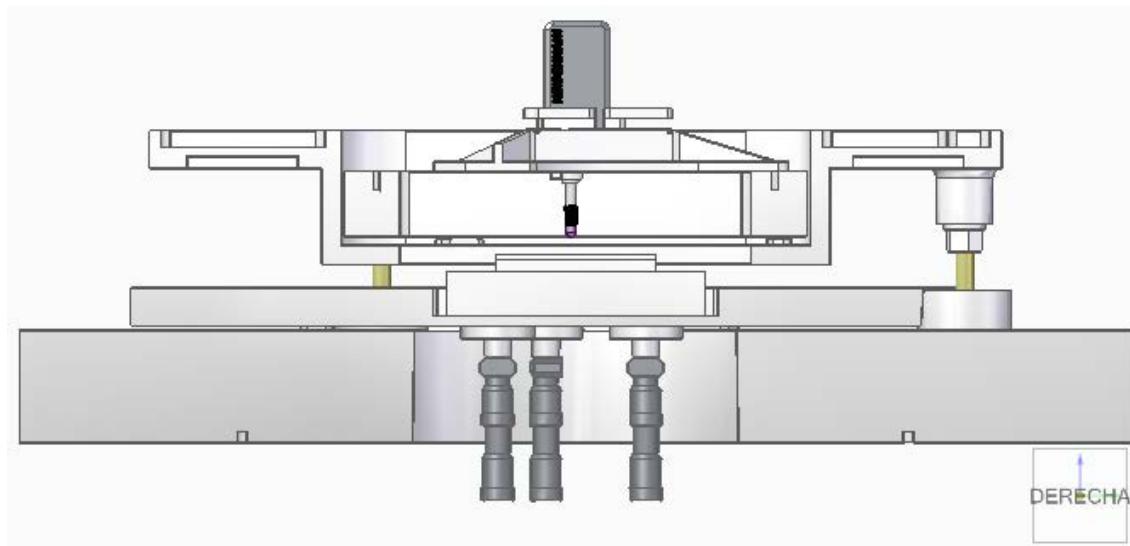


Figura 24: Corte longitudinal de la NanoPla.

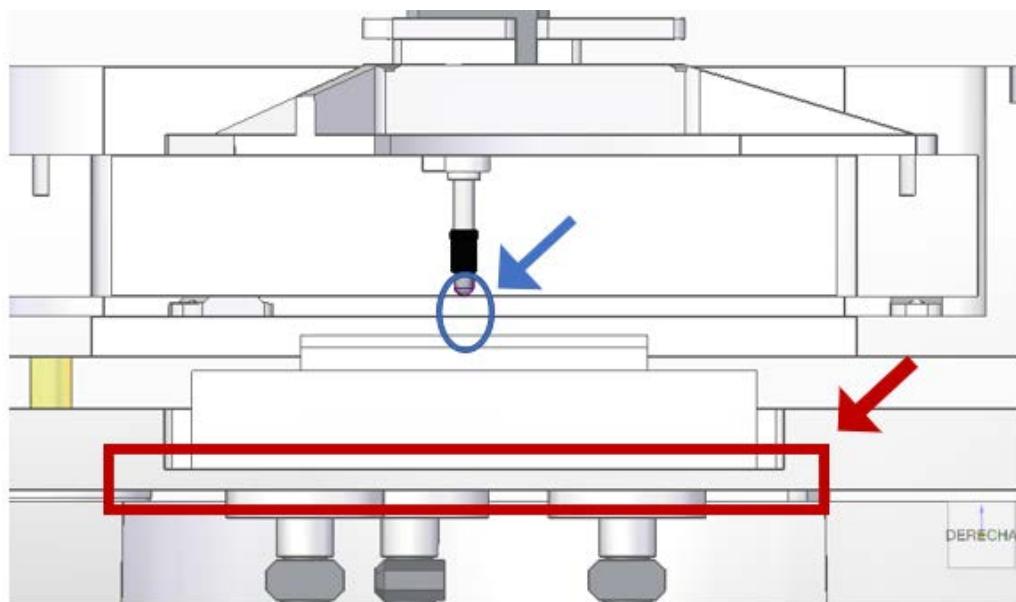


Figura 25: Localización del diseño

#### 4.1. Consideraciones para el diseño y diseño del acople

Las consideraciones más importantes para tener en cuenta en el diseño del acople de la nanoposicionadora, así como sus soluciones son las siguientes:

1. El diseño debe considerar el resto de las piezas de la NanoPla para evitar mecanizar la misma.
2. El material va a ser aluminio 7075-T6, dado que el resto de la NanoPla es de dicho material y así evitar diferencias de coeficientes de dilataciones térmicas. Además, se intenta que el diseño sea lo más ligero posible para no añadir excesiva carga a la plataforma móvil.
3. Debe permitir corregir las desviaciones angulares entre el plano XY de la nanoposicionadora y de la NanoPla. Como solución a ello, este sistema de acople requiere de tres tornillos micrométricos (dos manuales y uno motorizado). Cabe recordar que los tornillos micrométricos están fijos al marco metrológico inferior a través de los acoplos de los tornillos micrométricos. Por ello, estos micrómetros permanecen inmóviles en el plano XY y se mueven en Z según la extensión o contracción del vástago.
4. 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.
5. Debe tener el menor espesor posible con el fin de permitir el máximo recorrido de los micrómetros (subir y bajar en Z). Es decir, se quiere un espesor mínimo de la pieza a diseñar para que cuando los micrómetros estén totalmente contraídos conseguir el contacto entre la esfera de los tornillos micrométricos y la pieza diseñada. De esta forma, el factor que limita la máxima posición inferior posible de la nanoposicionadora sean los tornillos micrométricos y no la altura de la pieza diseñada.
6. Se deben impedir los desplazamientos indeseados entre las piezas. Como solución, se plantea la generación de una precarga mediante la fuerza magnética de imanes. Para ello, el diseño debe albergar imanes que generen una fuerza atracción suficiente con los imanes colocados en el marco metrológico inferior. Cabe destacar que la nanoposicionadora es una posicionadora piezoeléctrica y, por tanto, los campos magnéticos de los imanes no afectan al funcionamiento de la misma [15].
7. Se deben evitar errores angulares en el momento del movimiento del vástago de los micrómetros. Para ello, aprovechando que este desplazamiento se transmite mediante la esfera de los tornillos micrométricos, se plantea el acople cinemático como modo de unión de la pieza de diseño y los micrómetros. 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. Para conseguir que los cilindros guíen a las esferas correctamente, la posición en la que se coloquen los cilindros debe ser estudiada cuidadosamente. En la Figura 26 se muestran dos imágenes de la nanoposicionadora unida a los tornillos micrométricos por medio del acople cinemático con diferente extensión de los micrómetros; para poder observar con detalle (en otras dos imágenes) la posición de las esferas de los micrómetros respecto a los cilindros y así comprobar el funcionamiento de guía.

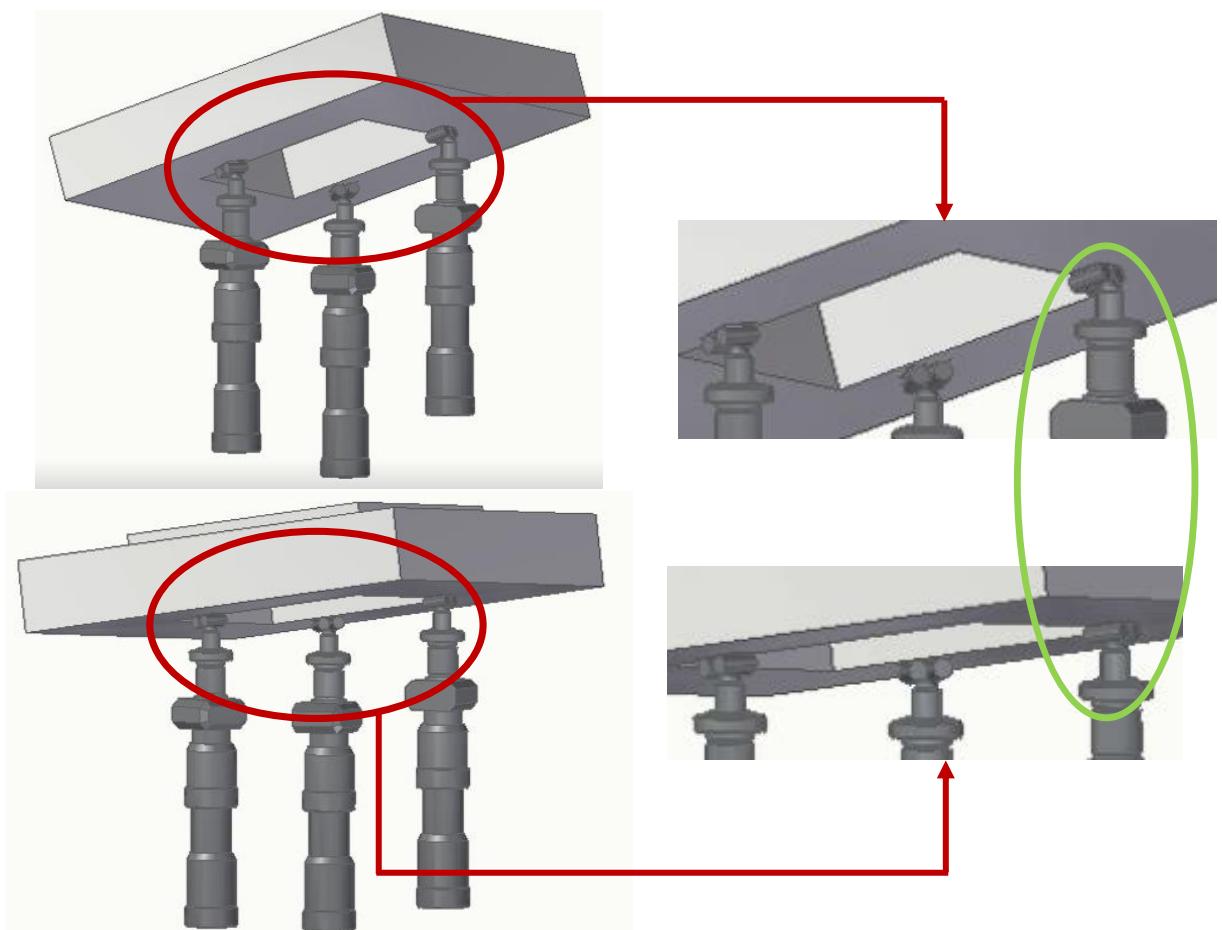
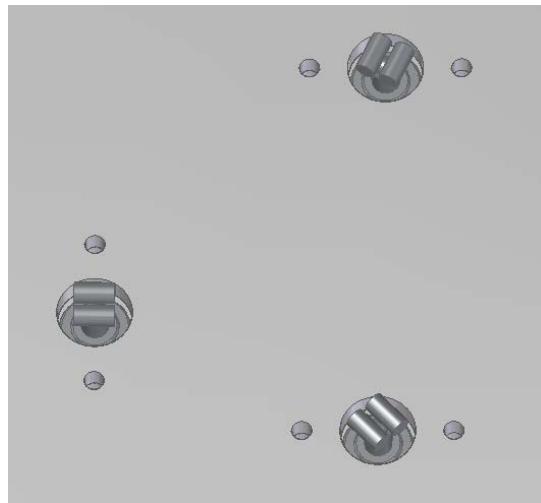


Figura 26: Movimiento guiado de los tornillos micrométricos y nanoposicionadora

8. Debe albergar los cilindros del acople cinemático, los cuales apoyan sobre las esferas de los micrómetros. Dichos cilindros deben tener una dimensión tal que satisfaga las siguientes casuísticas:
  - o Suficientemente largos para que cuando el cilindro motorizado se mueva en +/-Z y se incline la nanoposicionadora, las esferas de los tres cilindros recorran siempre el recorrido de los cilindros.
  - o Suficientemente cortos para que cuando el micrómetro se mueva en -Z no choquen con el marco metrológico inferior. Los agujeros del marco metrológico inferior diseñados para que circulen por su interior los vástagos de los micrómetros, y, por tanto, los cilindros del acople cinemático cuando el micrómetro se mueva en -Z tiene diámetro 15 mm. Por tanto, la longitud de los cilindros debe ser menor a 15 mm. Para una mejor comprensión ver Figura 27.
  - o Menor diámetro posible para minimizar la distancia entre el marco metrológico inferior y la nanoposicionadora.



*Figura 27: Agujeros del marco metrológico inferior para el paso de los micrómetros y cilindros.*

A continuación, se estudia la longitud óptima de los cilindros para que cumplan los aspectos a considerar. Al estar los cilindros fijos con respecto a la nanoposicionadora, el diferente desplazamiento en +/- Z de cada uno de los vástagos de los micrómetros provoca la inclinación de la nanoposicionadora y, por ende, de los cilindros. Esto causa que, colocando los cilindros de manera extremadamente precisa, su longitud máxima para que no colisionen con el marco metrológico inferior sea de 10 mm. Este estudio se ha realizado considerando el caso límite de un micrómetro completamente extendido, otro completamente recogido (o contraído) y el otro estático.

Con el fin de facilitar la fabricación y montaje, es decir, evitar tener que hacer un montaje extremadamente preciso para establecer la posición los cilindros (y que así no colisione con el marco metrológico inferior), se reduce la longitud del cilindro a 8 mm.

Además, cabe destacar que la diferencia de altura relativa de los micrómetros está limitada por la hipótesis de pequeños errores angulares, lo que conlleva a que el ángulo de inclinación de la nanoposicionadora tenga que ser pequeño. Esto se explica con mayor detalle en la Sección 5.1 de la presente memoria. Esta consideración provoca que la altura relativa de los micrómetros sea menor al caso límite estudiado anteriormente (uno completamente extendido y otro completamente recogido) y que, por tanto, la longitud mínima requerida para cubrir todo el recorrido de guía de las esferas de los micrómetros sea menor.

En cuanto al diámetro de los cilindros, se selecciona el de 4 mm puesto que es el mismo diámetro que el de las esferas de los micrómetros y el fabricante lo tiene en su catálogo.

Finalmente, se validan los cilindros (longitud 8 mm y diámetro 4 mm) mediante un estudio de movimiento en el que desplazan los micrómetros lo máximo posible (según la hipótesis de pequeños ángulos y el resto de las consideraciones).

Por otro lado, se escogen imanes planos de 28 x 11 x 1,5 mm [16], por ser los de menor espesor con el fin de minimizar la distancia entre el marco metrológico inferior y la nanoposicionadora.

Una vez conocidas las dimensiones de los cilindros e imanes se termina de diseñar el soporte de la nanoposicionadora. Se le asigna en Solid Edge el material aluminio 7075-T6 y se observa que tiene un peso de 20 g. En la Figura 28 se muestra la vista inferior del soporte de la nanoposicionadora en el que se observan los huecos para los imanes, los huecos para los cilindros, y los agujeros (pasantes) para los tornillos que fijan este soporte a la nanoposicionadora. En la Figura 29 se muestra el soporte de la nanoposicionadora (diferenciado en amarillo) integrado en ella junto con los imanes, cilindros y tornillos micrométricos.

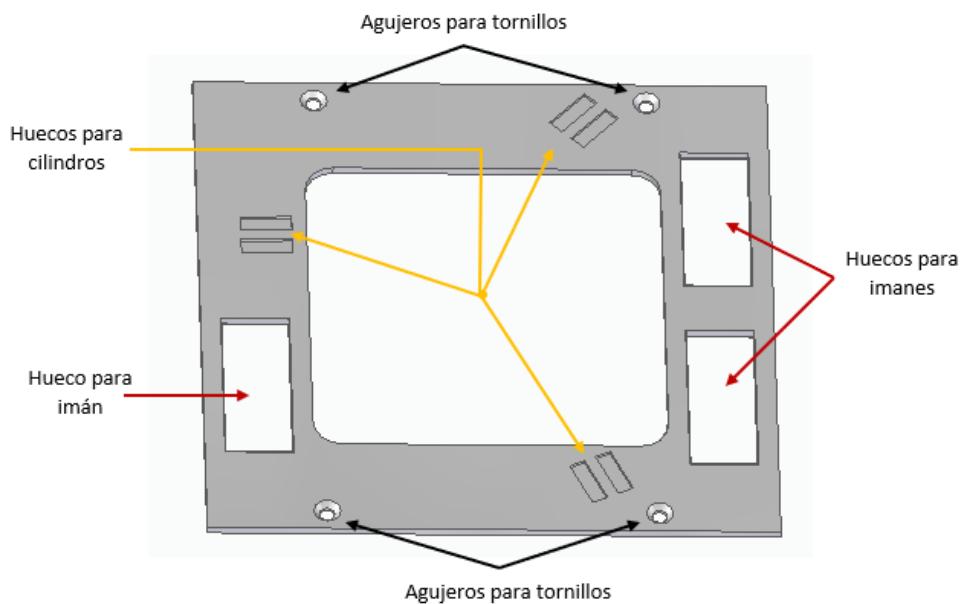


Figura 28: Soporte de la nanoposicionadora (vista inferior).

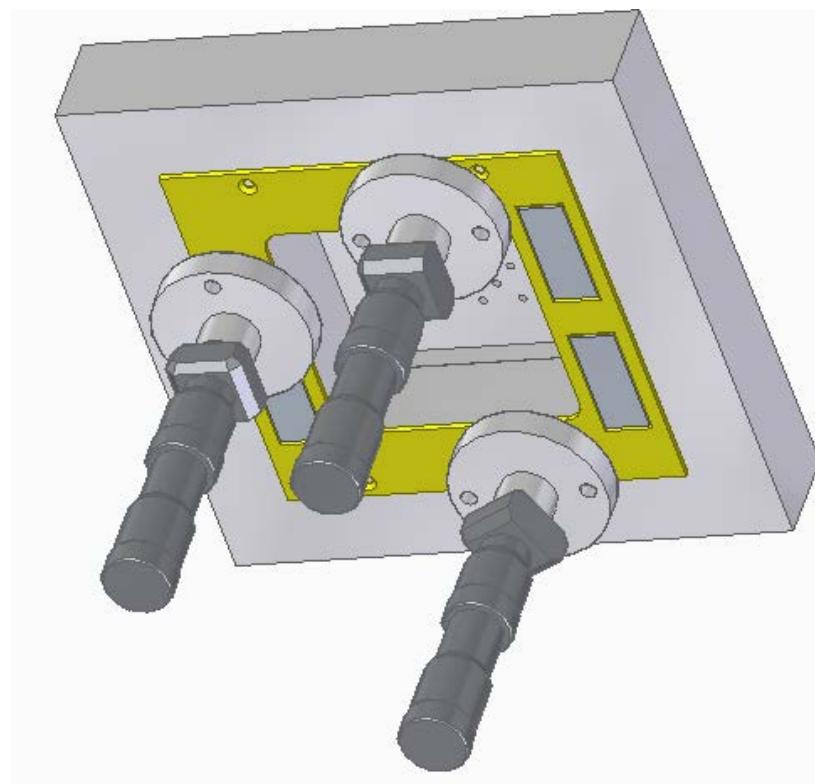


Figura 29: Soporte de la nanoposicionadora integrado en ella.

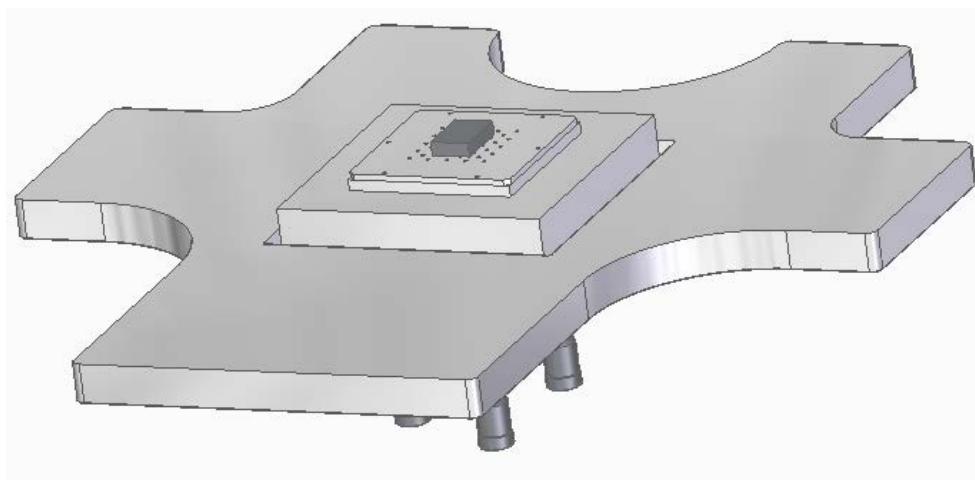
#### 4.2. Validación del diseño del soporte de la nanoposicionadora

Para validar el diseño del soporte de la nanoposicionadora se realiza un estudio combinado de transferencia de calor de estado estable y estudio estático lineal del ensamblaje.

Los elementos que forman parte del estudio son:

- Dos tornillos micrométricos manuales y uno motorizado
- Tres acoplos para los tornillos micrométricos
- Marco metrológico inferior
- Soporte nanoposicionadora
- Nanoposicionadora
- Portamuestras
- Muestra
- Tres imanes.
- Cilindros (6 unidades)

Primeramente, se realiza el ensamblaje (Figura 30) pieza a pieza estableciendo conexiones entre ellas en Solid Edge. Los pasos detallados de cómo se crea el ensamblaje se encuentran en Anexo 8: Simulación del diseño del soporte de la nanoposicionadora.



*Figura 30: Ensamble - Simulación soporte nanoposicionadora.*

En este estudio se aplican la gravedad y la temperatura ambiente como cargas, se fija (impidiéndose los 6 GDL) la superficie inferior del marco metrológico inferior, y se aplican de forma automática los conectores (se detallan en el Anexo 8: Simulación del diseño del soporte de la nanoposicionadora). A continuación, se realiza el mallado con un tipo de malla tetraédrica de tamaño 2,51 mm (nivel de precisión 3 de 10) y finalmente se resuelve. Estas simulaciones se resuelven para una temperatura ambiente de 21°C y de 19°C. Los resultados obtenidos se analizan detalladamente en el Anexo 8: Simulación del diseño del soporte de la nanoposicionadora.

En cuanto a los desplazamientos sufridos, los máximos se dan en ambos casos (21°C y 19°C) en las esquinas traseras de la nanoposicionadora y en la parte inferior de los micrómetros (Figura 26). Sin embargo, estas zonas no son relevantes dado que no van a afectar en la medida de la muestra (no transmiten los desplazamientos a la muestra). Por otro lado, se observa una variación en Z entre 19°C y 21°C de 0,724 μm en las esferas de los micrómetros y de 0,76 μm en la muestra. Sin embargo, esta variación de 2°C no se va a dar en el laboratorio de metrología donde la temperatura está controlada. Los desplazamientos que sufren las partes delicadas del ensamblaje (muestra, más genéricamente el portamuestras) son considerables: expansión de 0,224 μm en el caso de 21°C y contracción de -0,536 μm en el caso de 19°C.

En cuanto a las tensiones (Figura 27), los máximos valores aparecen en ambos casos ( $21^{\circ}\text{C}$  y  $19^{\circ}\text{C}$ ) en el contacto entre los cilindros y las esferas de los micrómetros alcanzando los 17,3 MPa, siendo considerablemente menores en el resto de las zonas. Como la zona de contacto entre los cilindros y las esferas no es una zona crítica, estas tensiones son aceptables.

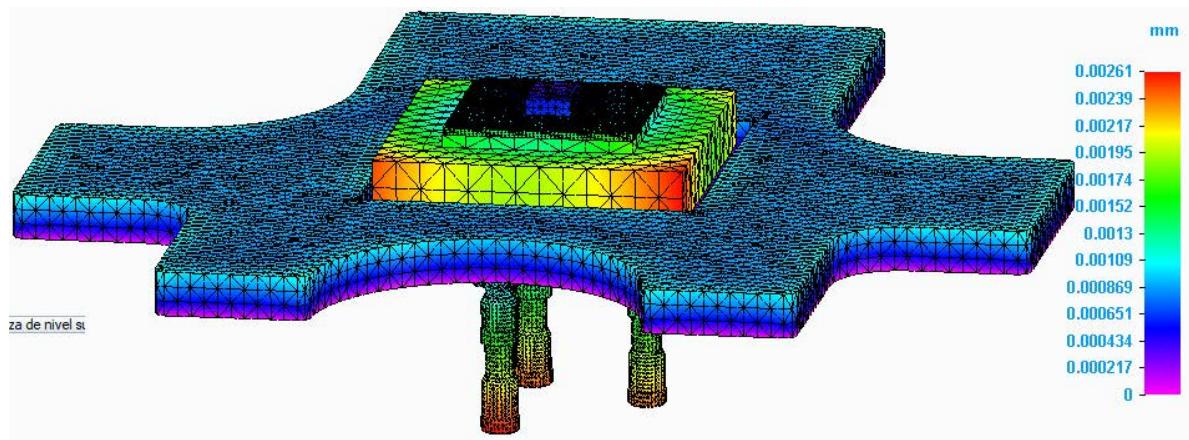


Figura 31: Desplazamientos  $21^{\circ}\text{C}$  - Simulación soporte nanoposicionadora.

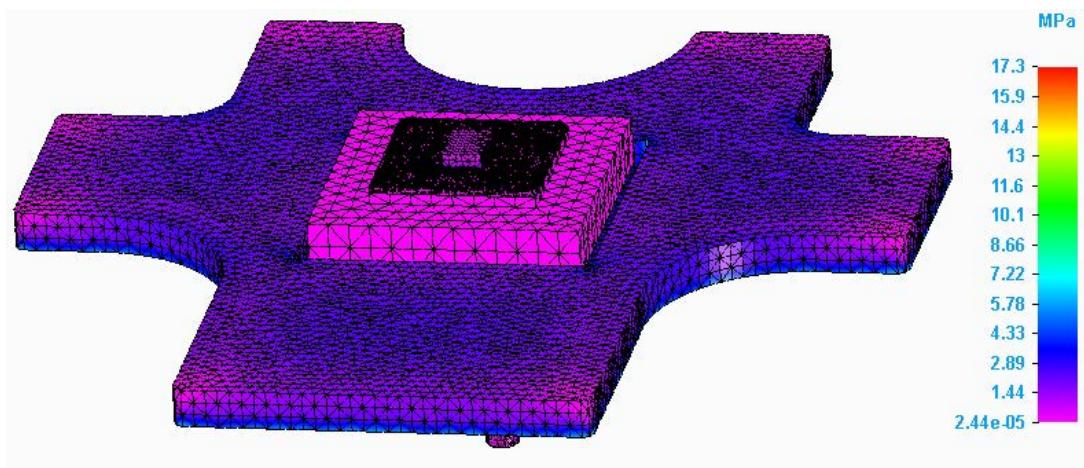


Figura 32: Tensiones  $21^{\circ}\text{C}$  - Simulación soporte nanoposicionadora.

## 5. Análisis y corrección de errores geométricos

Con todas las piezas diseñadas, el objetivo ahora es obtener un modelo matemático que determine cómo afectan los errores geométricos de la NanoPla a la medición de una pieza. Para ello, se realiza un análisis teórico de los errores de todas las piezas estructurales de la NanoPla que afectan a la medición para una futura corrección de los mismos. Las técnicas empleadas para esta corrección teórica de errores (reducción y compensación) se centran en la precisión del sistema determinando para ello el número de influencias de error y el camino que recorren dichos errores.

Antes de comenzar con los análisis de los modelos, se explica el procedimiento de medida que va a llevar a cabo la NanoPla. Mediante cuatro motores lineales, el sistema de posicionamiento de la plataforma móvil realiza el movimiento principal de aproximación en todo el rango de trabajo (50 mm x 50 mm), levitando gracias a los cojinetes de aire, situando el instrumento de medida en las coordenadas introducidas por el usuario. A continuación, los cojinetes de aire se apagan y la plataforma móvil, y por tanto el sensor, quedan estáticos. De esta manera, la nanoposicionadora realiza el movimiento de escaneo de la pieza a medir.

### 5.1. Análisis del modelo de la NanoPla

La metodología seguida para esta corrección de errores comienza con la definición de las partes de la NanoPla que tienen relación directa con el resultado de la medición. Estas piezas se engloban en bloques, que son los siguientes:

- Base fija {0}: base inferior, piezas de flexión para el marco metrológico inferior, marco metrológico inferior, sistema láser y los capacitivos.
- Bloque plataforma móvil {1}: Cojinetes de aire, piezas de flexión de los cojinetes de aire, tuercas del cojinete, plataforma móvil, marco metrológico superior, imanes de los motores lineales, soporte sensor y cilindros soporte.
- Adaptador del sensor {2}: Esferas y adaptador del sensor
- Sensor {3}
- Sistema de referencia micrómetros {S.M}: tornillos micrométricos, y acople tornillos micrométricos.
- Nanoposicionador {N}: cilindros e imanes de la nanoposicionadora, soporte de la nanoposicionadora, nanoposicionadora, y portamuestras.
- Muestra {S}. En la nomenclatura de la ecuación cinemática y sus variables se considera el subíndice S para la muestra (del inglés ‘Sample’) debido a que el presente trabajo se publicará en un congreso internacional y esta parte es fundamental.

A continuación, se muestra el esquema global del bucle de medición, se ha realizado un esquema distinto para cada instrumento de medida: el sensor confocal (Figura 33) y el sensor táctil (Figura 34).

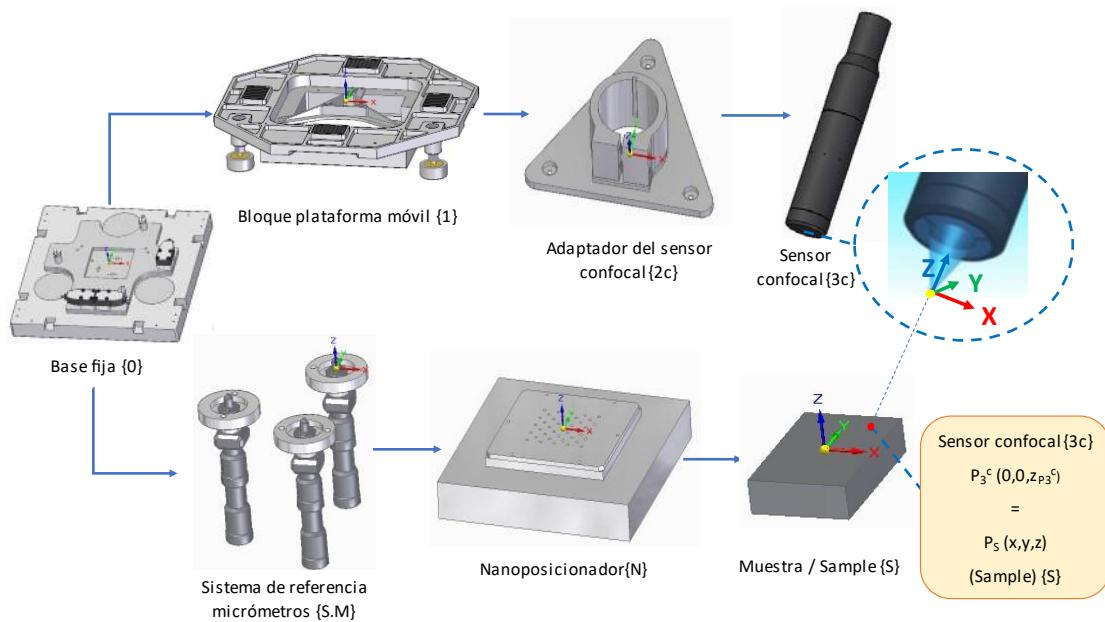


Figura 33: Esquema global del bucle de medición con sensor confocal.

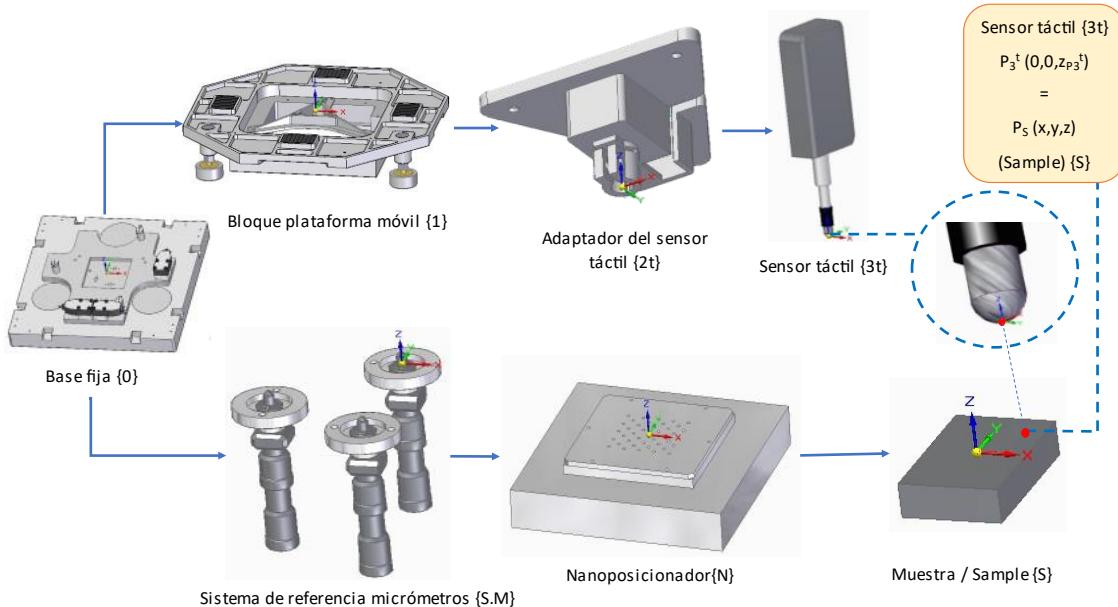


Figura 34: Esquema global del bucle de medición con sensor táctil.

Como se ha comentado con anterioridad, pueden existir errores en la medición debido a errores geométricos en el montaje. Es decir, un giro o desplazamiento indeseado e involuntario en una de las partes afecta consecutivamente a las siguientes partes de la cadena; repercutiendo finalmente en el valor calculado del punto de la muestra ( $P_S$ ). Por ello, se estudia el modelo matemático que permite conocer el efecto de dichos errores con el fin de determinar la medida real de la muestra. Este estudio se lleva a cabo mediante la consideración de matrices de traslación y rotación de los sistemas de referencia. De este modo, se plantea la cadena cinemática que permitirá determinar el modelo matemático. El esquema de la cadena cinemática es el mismo para ambos instrumentos de medida (sensor táctil y sensor confocal) puesto que se estudian los mismos bloques de piezas en ambos, siendo diferentes los valores de las

matrices de rotación y traslación. Por ello, en la Figura 35 se representa la cadena cinemática de ambos, asignando el color morado al sensor confocal y el color rojo al sensor táctil.

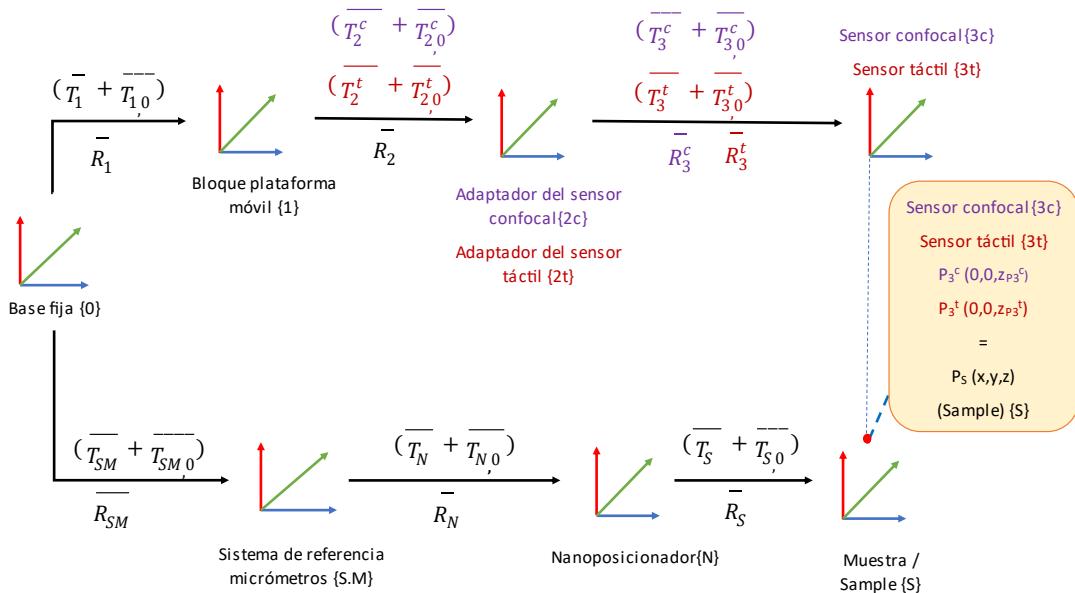


Figura 35: Cadena cinemática de la NanoPla

En la cadena cinemática de la Figura 35 se observan las matrices de traslación y rotación:

- $\bar{T}_{K,0}$  es la matriz que representa la distancia (en mm) entre el origen del sistema de referencia del bloque K (siendo K = 1, 2, 3c, 3t, SM, N, S) respecto al bloque anterior. Es decir, esta matriz representa los offsets.
- $\bar{T}_t$  es la matriz que representa el desplazamiento de los componentes y sus errores. Será descrita más adelante.
- $\bar{R}_t$  es la matriz de rotación. Será descrita más adelante.

Una vez conocida la cadena cinemática de la NanoPla se define el modelo matemático. Mediante dicho modelo matemático, se puede relacionar el punto del haz que emite el sensor sobre la muestra ( $P_3$ ) con el punto de la muestra ( $P_S$ ), dado que físicamente son coincidentes.

Para comenzar a definir el modelo matemático, se recorre el camino por el lado del sensor desde el punto del haz que emite el sensor sobre la muestra ( $P_3$ ) hasta el sistema de referencia común {0}. Esto se muestra en las siguientes ecuaciones.

$$\bar{P}_3 = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ z_{P3} \end{pmatrix} \quad (1)$$

$$\bar{P}_2 = \bar{R}_3 \cdot \bar{P}_3 + (\bar{T}_3 + \bar{T}_{3,0}) \quad (2)$$

$$\bar{P}_1 = \bar{R}_2 \cdot \bar{P}_2 + (\bar{T}_2 + \bar{T}_{2,0}) \quad (3)$$

$$\bar{P}_0 = \bar{R}_1 \cdot \bar{P}_1 + (\bar{T}_1 + \bar{T}_{1,0}) \quad (4)$$

Ahora, se recorre el camino por el lado de la nanoposicionadora desde el punto de la muestra ( $P_S$ ) hasta el sistema de referencia común {0}. Esto se muestra en las siguientes ecuaciones.

$$\overline{P_N} = \overline{R_S} \cdot \overline{P_S} + (\overline{T_S} + \overline{T_{S,0}}) \quad (5)$$

$$\overline{P_{SM}} = \overline{R_N} \cdot \overline{P_N} + (\overline{T_N} + \overline{T_{N,0}}) \quad (6)$$

$$\overline{P_0} = \overline{R_{SM}} \cdot \overline{P_{SM}} + (\overline{T_{SM}} + \overline{T_{SM,0}}) \quad (7)$$

Teniendo ambos caminos recorridos, estos se relacionan:

$$\begin{aligned} \overline{R_{SM}} \cdot \left( \overline{R_N} \cdot \left( \overline{R_S} \cdot \overline{P_S} + (\overline{T_S} + \overline{T_{S,0}}) \right) + (\overline{T_N} + \overline{T_{N,0}}) \right) + (\overline{T_{SM}} + \overline{T_{SM,0}}) \\ = \overline{R_1} \cdot \left( \overline{R_2} \cdot \left( \overline{R_3} \cdot \overline{P_3} + (\overline{T_3} + \overline{T_{3,0}}) \right) + (\overline{T_2} + \overline{T_{2,0}}) \right) + (\overline{T_1} + \overline{T_{1,0}}) \end{aligned} \quad (8)$$

Y se despeja la incógnita  $\overline{P_S}$  (el punto de la muestra), resultando la ecuación del modelo matemático de la NanoPla:

$$\begin{aligned} \overline{P_S} = [\overline{R_S}]^{-1} \cdot & \left[ [\overline{R_N}]^{-1} \right. \\ & \cdot [\overline{R_{SM}}]^{-1} \\ & \cdot \left[ \overline{R_1} \cdot (\overline{R_2} \cdot (\overline{R_3} \cdot \overline{P_3} + \overline{T_3} + \overline{T_{3,0}}) + \overline{T_2} + \overline{T_{2,0}}) + \overline{T_1} + \overline{T_{1,0}} \right. \\ & \left. \left. - \overline{T_{SM}} - \overline{T_{SM,0}} \right] - \overline{T_N} - \overline{T_{N,0}} \right] - \overline{T_S} - \overline{T_{S,0}} \end{aligned} \quad (9)$$

A continuación, se definen las matrices de traslación de los offsets (todas las medidas en mm).

$$\overline{T_{1,0}} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 73,5 \end{pmatrix} \quad (10)$$

$$\overline{T_{2,0}^c} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 5,3 \end{pmatrix} \quad (11)$$

$$\overline{T_{2,0}^t} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ -27,6 \end{pmatrix} \quad (12)$$

$$\overline{T_{3,0}^c} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ Z_{3,0}^c - 16,2 \end{pmatrix} \quad (13)$$

Donde  $Z_{3,0}^c$  es la distancia en Z (en milímetros) a la que se coloque la parte inferior del sensor confocal respecto al origen de coordenadas del sistema de su adaptador {2c}. En la matriz anterior se reduce en 16,2 mm al valor  $Z_{3,0}^c$  debido a que el origen del sistema de coordenadas del sistema {3c} se sitúa en el '*punto focal superior*' (posición en sentido negativo en Z) y ese valor es el de la distancia de trabajo mínima.

Cabe destacar que la altura a la que se sube o se baja el sensor confocal se considera en su origen de coordenadas y no como desplazamiento en la matriz de traslación debido a que este posicionamiento se realiza manualmente antes de encender la NanoPla y no durante la medición.

$$\overline{T_{3,0}^t} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ Z_{3,0}^t \end{pmatrix} \quad (14)$$

Siendo  $Z_{3,0}^t$  la distancia en Z (en milímetros) a la que se coloque la punta de medición del sensor táctil completamente extendido respecto al origen de coordenadas del sistema de su adaptador {2t}.

$$\overline{T_{SM,0}} = \begin{pmatrix} 19 \\ 38 \\ -20 \end{pmatrix} \quad (15)$$

$$\overline{T_{N,0}} = \begin{pmatrix} -19 \\ -38 \\ 38 \end{pmatrix} \quad (16)$$

$$\overline{T_{S,0}} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ Z_{S,0} \end{pmatrix} \quad (17)$$

En este último vector, el valor de  $Z_{S,0}$  se modifica según la altura de la muestra.

Para el análisis de errores estudiado se han considerado tres principales hipótesis [9] son:

- Movimiento plano en 2D: se supone que el movimiento de largo rango (50 mm x 50 mm) que realiza la plataforma móvil consiste solo en el movimiento de una estructura en el plano horizontal, y no de en la superposición de movimientos lineales. Es decir, la plataforma móvil se desplaza coplanarmente en X e Y gracias a los cuatro motores lineales, en lugar de tener montado un eje sobre otro. De esta forma hay errores geométricos relacionados como el error de perpendicularidad entre X e Y.
- Comportamiento de cuerpo rígido: en el artículo [9] se demuestra que el comportamiento de la NanoPla es de cuerpo rígido. De esta forma, los errores sistemáticos respectivos en cada eje dependen únicamente del desplazamiento a lo largo de dicho eje.
- Pequeños errores angulares: se asumen que los errores angulares sufridos en la NanoPla son ángulos menores a 0,05 radianes con el fin de simplificar la matriz de rotación compuesta en los tres ejes. Realmente esta matriz no es ortogonal y existen algunos errores mínimos de perpendicularidad que son incluidos en el modelo.

Durante el posicionamiento puede haber desviaciones, por ello esos errores se introducen en las matrices de rotación ( $\bar{R}_l$ ) y traslación ( $\bar{T}_l$ ) para su posterior eliminación o reducción. Las siguientes matrices de rotación ( $\bar{R}_l$ ) y traslación ( $\bar{T}_l$ ) muestran los errores considerados de forma general en cada uno de los bloques.

$$\bar{R}_l = \begin{pmatrix} 1 & -\varepsilon_z^{(k)} & \varepsilon_y^{(k)} \\ \varepsilon_z^{(k)} & 1 & -\varepsilon_x^{(k)} \\ -\varepsilon_y^{(k)} & \varepsilon_x^{(k)} & 1 \end{pmatrix} \quad (18)$$

$$\bar{T}_l = \begin{pmatrix} i^{(k)} + \delta_i^{(k)} \\ i^{(k)} + \delta_i^{(k)} - i^{(k)} \cdot \alpha_{ij}^{(k)} \\ i^{(k)} + \delta_i^{(k)} \end{pmatrix} \quad (19)$$

Donde

- $\varepsilon_i^{(k)}$  es el error de rotación en el eje i del bloque k respecto al bloque anterior.
- $\delta_i^{(k)}$  es el error lineal de rectitud en el eje i del bloque k respecto al bloque anterior.
- $i^{(k)}$  los desplazamientos en eje i (positiva si movemos el instrumento de medida y negativa si movemos la pieza) del bloque k respecto al bloque anterior.
- $\alpha_{ij}^{(k)}$  es el error de perpendicularidad entre el sistema de coordenadas anterior y el actual del bloque k respecto al bloque anterior.

Se comienza a definir la matriz de rotación ( $\bar{R}_1$ ) y traslación ( $\bar{T}_1$ ) del bloque de la plataforma móvil {1}. Aunque en el momento de medición la plataforma móvil se encuentra fija, es decir, los cojinetes de aire están apagados, existen errores inherentes a la lectura de los láseres (lectura que determina la posición del instrumento de medida en X e Y) y al posicionamiento debido al movimiento previo de la plataforma móvil. Estos errores de rotación y traslación del bloque de la plataforma móvil {1} han sido estudiados en trabajos anteriores [17] y no son objeto del presente trabajo.

$$\bar{R}_1 = \begin{pmatrix} 1 & -\varepsilon_z^{\{1\}} & \varepsilon_y^{\{1\}} \\ \varepsilon_z^{\{1\}} & 1 & -\varepsilon_x^{\{1\}} \\ -\varepsilon_y^{\{1\}} & \varepsilon_x^{\{1\}} & 1 \end{pmatrix} \quad (20)$$

La matriz de traslación del sistema de referencia {1} es la siguiente:

$$\bar{T}_1 = \begin{pmatrix} x^{\{1\}} + \delta_x^{\{1\}} \\ y^{\{1\}} + \delta_y^{\{1\}} - x^{\{1\}} \cdot \alpha_{yx}^{\{1\}} \\ \delta_z^{\{1\}} \end{pmatrix} \quad (21)$$

En la matriz anterior ( $\bar{T}_1$ ), lo que se mueve es la plataforma (instrumento de medida), por ello el signo positivo en los desplazamientos de los ejes.

En cuanto a la matriz de rotación del adaptador del sensor ( $\bar{R}_2$ ), se considera matriz identidad. Realmente, hay errores mínimos de rotación entre el soporte y su adaptador, ya que su diseño se hizo desmontable con el fin de poder emplear indistintamente el sensor táctil o el confocal. Sin embargo, como también existen errores de rotación entre el sensor y su adaptador ( $\bar{R}_3^c, \bar{R}_3^t$ ) y la funcionalidad del sistema es considerar soporte-adaptador como un único componente; se consideran en esta matriz los errores de rotación existentes entre el sensor y el soporte, y no de forma desglosada.

$$\bar{R}_2 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (22)$$

Las matrices de traslación del adaptador respecto al sensor, tanto en el caso del confocal como del táctil ( $\bar{T}_2^c, \bar{T}_2^t$ ), cuyos orígenes son coincidentes, se consideran nulas. Como se ha visto en el apartado de los estudios de simulación, existen errores térmicos. Estos errores son sistemáticos y para poder caracterizarlos y controlarlos se requiere un modelo que mida cada cierto instante la temperatura y en función de ella corrija el error. Este modelo no ha tenido en cuenta las posibles desviaciones térmicas.

$$\bar{T}_2^c = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (23)$$

$$\bar{T}_2^t = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (24)$$

Como se ha comentado anteriormente, existen errores de rotación entre los sensores y el soporte ( $\bar{R}_3^c, \bar{R}_3^t$ ), los cuales se caracterizan con las siguientes matrices.

$$\overline{R}_3^c = \begin{pmatrix} 1 & 0 & \varepsilon_y^{\{3c\}} \\ 0 & 1 & -\varepsilon_x^{\{3c\}} \\ -\varepsilon_y^{\{3c\}} & \varepsilon_x^{\{3c\}} & 1 \end{pmatrix} \quad (25)$$

$$\overline{R}_3^t = \begin{pmatrix} 1 & 0 & \varepsilon_y^{\{3t\}} \\ 0 & 1 & -\varepsilon_x^{\{3t\}} \\ -\varepsilon_y^{\{3t\}} & \varepsilon_x^{\{3t\}} & 1 \end{pmatrix} \quad (26)$$

Cabe destacar que  $\varepsilon_z^{\{3c\}}, \varepsilon_z^{\{3t\}}$  son cero ya que corresponden al giro del sensor respecto el eje Z, y dicho giro no afecta a la medida.

Las matrices de traslación del sensor respecto al adaptador se consideran nulas debido que la medida que sube y baja el sensor se tiene en cuenta en las matrices de traslación de los orígenes de coordenadas dado que son desplazamientos que se producen antes de la medición del sensor. Es decir, durante el proceso de medición, el sensor es solidario con su adaptador.

$$\overline{T}_3^c = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (27)$$

$$\overline{T}_3^t = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (28)$$

El punto de la muestra ( $P_3$ ) respecto del origen de coordenadas del sistema del sensor {3} depende de la medida tomada por el sensor:

$$P_3^t = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ Z_{P3}^t \end{pmatrix} \quad (29)$$

$$P_3^c = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ Z_{P3}^c \end{pmatrix} \quad (30)$$

Siendo  $Z_{P3}$  la distancia que mide el sensor ya corregida, a la que mide el sensor se le restan los errores de medición del propio sensor (error lineal  $\delta_{P3,l}$ , la resolución  $\delta_{P3,r}$  y el ruido  $\delta_{P3,n}$ ). En el caso del sensor confocal,  $Z_{P3}^c$  es la distancia de la muestra al '*punto focal superior*' del sensor (más sus errores), es decir, la distancia en Z de la muestra respecto al origen de coordenadas {3c} sin los errores de medición del sensor. Este valor es negativo puesto que la muestra se encuentra en el sentido de -Z de dicho origen de coordenadas.

$$Z_{P3}^c = Z_{P3,experimental}^c + \delta_{P3,l}^c + \delta_{P3,n}^c + \delta_{P3,r}^c \quad (31)$$

En el caso del sensor táctil,  $Z_{P3}^t$  es la distancia que se extiende o contrae el vástago del sensor más sus errores. Este valor es positivo puesto que el origen de coordenadas {3t} es cuando el vástago está totalmente extendido.

El sistema de micrómetros {S.M} solo presenta movimiento en Z en el micrómetro motorizado (donde se encuentra el origen de coordenadas del sistema). Por esta razón, el bloque {S.M} no presenta errores de perpendicularidad. La matriz de traslación del sistema de micrómetros {S.M} es la siguiente.

$$\overline{T_{SM}} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ -z^{\{SM\}} + \delta_z^{\{SM\}} \end{pmatrix} \quad (32)$$

Los micrómetros se mueven exclusivamente en Z, por lo que los errores de linealidad en X ( $\delta_x^{\{SM\}}$ ) e Y ( $\delta_y^{\{SM\}}$ ) son despreciables. Además, se considera que los micrómetros manuales, una vez ajustado el montaje inicial, permanecerán estáticos, de esta forma, el micrómetro motorizado será el único que se use para un ajuste más fino. El valor del error de linealidad en Z ( $\delta_z^{\{SM\}}$ ) es conocido (100 nm) a partir del catálogo del micrómetro motorizado.

Para definir la matriz de rotación del sistema de micrómetros {S.M} se analiza el plano que forman las esferas de los tres micrómetros.

$$\overline{R_{SM}} = \begin{pmatrix} 1 & -\varepsilon_z^{\{SM\}} & \varepsilon_y^{\{SM\}} \\ \varepsilon_z^{\{SM\}} & 1 & -\varepsilon_x^{\{SM\}} \\ -\varepsilon_y^{\{SM\}} & \varepsilon_x^{\{SM\}} & 1 \end{pmatrix} \quad (33)$$

Como se ha comentado, los errores angulares de la matriz  $\overline{R_{SM}}$  dependen de la posición de los micrómetros. Es decir, a partir del plano que pasa por las esferas de los tres micrómetros se conoce su inclinación y por tanto sus errores angulares. Es importante destacar que la altura (medida en Z) relativa entre la esfera del micrómetro motorizado y la esfera de los micrómetros manuales debe ser inferior a 3,653 mm para poder seguir empleando la hipótesis de pequeños errores angulares ( $\leq 0,05$  radianes). Este valor de la altura relativa se ha calculado gracias al modelo matemático definido en Matlab (que se encuentra en el Anexo 9: Código Matlab del modelo matemático de la NanoPla). Para ello se ha establecido que la altura de los micrómetros manuales sea nula, calculándose así la altura máxima que puede tener el micrómetro motorizado (que es el que se mueve para un ajuste preciso) para que ninguno de los tres ángulos sobrepase el valor de 0,05 rad.

Los micrómetros se mueven inicialmente (en Z) para ajustar la pieza. Una vez ajustada, estos se mantienen fijos a lo largo de las mediciones. Por este motivo y por el hecho de que la unión entre los micrómetros y la nanoposicionadora sea un acople cinemático, se pueden despreciar cualquier desviación en el sistema nanoposicionador {N} con respecto al sistema de micrómetros. Cabe destacar, que al igual que ocurría con los adaptadores y el soporte del sensor, existen pequeños errores térmicos que quedan fuera del presente trabajo y se plantean como futuro ámbito de estudio.

$$\overline{T_N} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (34)$$

$$\overline{R_N} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (35)$$

A continuación, se estudia cómo afecta el movimiento de la nanoposicionadora piezoelectrónica en la muestra. Este movimiento es el de corto rango (100  $\mu\text{m} \times 100 \mu\text{m} \times 10 \mu\text{m}$ ). Los errores introducidos dependen de la arquitectura de la nanoposicionadora y su rendimiento. La información de la hoja de datos de la nanoposicionadora comercial (NPXY100Z10A de nPoint) solo incluye errores de no linealidad para los tres ejes cartesianos de movimiento. Por lo que la matriz de traslación  $\overline{T_S}$  resulta:

$$\bar{T}_S = \begin{pmatrix} -x^{\{S\}} + l_{error,x}^{\{S\}} \cdot x^{\{S\}} \\ -y^{\{S\}} + l_{error,y}^{\{S\}} \cdot y^{\{S\}} \\ -z^{\{S\}} + l_{error,z}^{\{S\}} \cdot z^{\{S\}} \end{pmatrix} \quad (36)$$

Siendo  $l_{error,i}^{\{S\}}$  el error no lineal de la nanoposicionadora comercial proporcionado por el fabricante. En la matriz anterior este valor se encuentra multiplicado por el desplazamiento de la nanoposicionadora en su eje correspondiente debido a que este error aumenta cuando se aleja del origen de coordenadas.

La matriz de rotación de la muestra  $\bar{R}_S$  se considera identidad porque los errores angulares son despreciables en esta plataforma, incluso el propio fabricante no los menciona en las especificaciones.

$$\bar{R}_S = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (37)$$

Con todas estas consideraciones se puede simplificar la ecuación del modelo matemático de la NanoPla (Ec. 9) que da a conocer las coordenadas del punto  $\bar{P}_S$ . Se diferencia entre la cadena cinemática del sensor confocal y del sensor táctil.

El punto de la muestra que se está midiendo con el sensor confocal ( $\bar{P}_S^C$ ), se calcula mediante la siguiente expresión (Ec. 38):

$$\begin{aligned} \bar{P}_S^C = \begin{pmatrix} X_{P_S}^C \\ Y_{P_S}^C \\ Z_{P_S}^C \end{pmatrix} &= [\bar{R}_S]^{-1} \\ &\cdot [\bar{R}_N]^{-1} \\ &\cdot [\bar{R}_{SM}]^{-1} \\ &\cdot [\bar{R}_1 \cdot (\bar{R}_2 \cdot (\bar{R}_3^C \cdot \bar{P}_3^C + \bar{T}_{3,0}^C) + \bar{T}_{2,0}^C) + \bar{T}_1 + \bar{T}_{1,0} - \bar{T}_{SM} - \bar{T}_{SM,0}] \\ &- \bar{T}_{N,0} - \bar{T}_S - \bar{T}_{S,0}] \end{aligned} \quad (38)$$

Este punto ( $\bar{P}_S^C$ ) se descompone en sus coordenadas X, Y, Z mediante las siguientes ecuaciones escalares (Ec. 39), (Ec. 40) y (Ec. 41) respectivamente. En estas ecuaciones se han omitido los términos que por su reducido valor son despreciables.

$$\begin{aligned} X_{P_S}^C &= (x^{\{1\}} + \delta_x^{\{1\}}) + (x^{\{S\}} - l_{error,x}^{\{S\}} \cdot x^{\{S\}}) - x^{\{1\}} \cdot \alpha_{yx}^{\{1\}} \cdot \varepsilon_z^{\{SM\}} + z_{P_3}^C \\ &\cdot [\varepsilon_y^{\{3C\}} + \varepsilon_y^{\{1\}} - \varepsilon_y^{\{SM\}}] + z_{3,0}^C \cdot (\varepsilon_y^{\{1\}} - \varepsilon_x^{\{1\}} \cdot \varepsilon_z^{\{SM\}} - \varepsilon_y^{\{SM\}}) \\ &+ y^{\{1\}} \cdot \varepsilon_z^{\{SM\}} - z^{\{SM\}} \cdot \varepsilon_y^{\{SM\}} \\ &+ [\varepsilon_z^{\{SM\}} \cdot (\delta_y^{\{1\}} - 38) - \varepsilon_y^{\{SM\}} \cdot (\delta_z^{\{1\}} - \delta_z^{\{SM\}} + 82,6)] \end{aligned} \quad (39)$$

Se observa en la ecuación escalar de X (Ec. 39) como depende de lo que se mueve la plataforma móvil en ambos ejes ( $x^{\{1\}}, y^{\{1\}}$ ), de lo que se desplaza en X la nanoposicionadora comercial ( $x^{\{S\}}$ ), de la distancia que mide el sensor confocal ( $Z_{P_3}^C$ ), de la altura a la que se coloca el sensor confocal respecto a su adaptador ( $Z_{3,0}^C$ ), y de la altura del micrómetro motorizado ( $Z^{\{SM\}}$ ).

$$\begin{aligned}
 Y_{P_s}^c = & \left( y^{\{1\}} + \delta_y^{\{1\}} \right) + \left( y^{\{S\}} - l_{error,y}^{\{S\}} \cdot y^{\{S\}} \right) + x^{\{1\}} \cdot \left( -\varepsilon_z^{\{SM\}} - \alpha_{yx}^{\{1\}} \right) + z_{P_3}^c \\
 & \cdot \left( -\varepsilon_x^{\{3c\}} - \varepsilon_x^{\{1\}} + \varepsilon_x^{\{SM\}} \right) + z_{3,0}^c \cdot \left( -\varepsilon_z^{\{SM\}} \cdot \varepsilon_y^{\{1\}} - \varepsilon_x^{\{1\}} + \varepsilon_x^{\{SM\}} \right) \\
 & + z^{\{SM\}} \cdot \varepsilon_x^{\{SM\}} \\
 & + \left[ -\varepsilon_z^{\{SM\}} \left( \delta_x^{\{1\}} - 19 \right) + \varepsilon_x^{\{SM\}} \cdot \left( \delta_z^{\{1\}} - \delta_z^{\{SM\}} + 82,6 \right) \right]
 \end{aligned} \quad (40)$$

Se observa en la ecuación escalar de Y (Ec. 40) como depende de los mismos parámetros que la ecuación escalar de X (Ec. 39) (lo que se mueve la plataforma móvil en ambos ejes ( $x^{\{1\}}, y^{\{1\}}$ ), de la distancia que mide el sensor confocal ( $Z_{P_3}^c$ ), de la altura a la que se coloca el sensor confocal respecto a su adaptador ( $Z_{3,0}^c$ ), de la altura del micrómetro motorizado ( $Z^{\{SM\}}$ )), a excepción del desplazamiento en X de la nanopositionadora comercial ( $x^{\{S\}}$ ), que la ecuación escalar de Y depende del desplazamiento en Y de la nanopositionadora comercial ( $y^{\{S\}}$ ).

$$\begin{aligned}
 Z_{P_s}^c = & \left( z^{\{S\}} - l_{error,z}^{\{S\}} \cdot z^{\{S\}} - z_{S,0} \right) + z_{P_3}^c + z^{\{SM\}} + z_{3,0}^c \\
 & \cdot \left( \varepsilon_y^{\{SM\}} \cdot \varepsilon_y^{\{1\}} + \varepsilon_x^{\{SM\}} \cdot \varepsilon_x^{\{1\}} + 1 \right) + x^{\{1\}} \cdot \left( \varepsilon_y^{\{SM\}} + \varepsilon_x^{\{SM\}} \cdot \alpha_{yx}^{\{1\}} \right) \\
 & - y^{\{1\}} \cdot \varepsilon_x^{\{SM\}} \\
 & + \left[ \varepsilon_y^{\{SM\}} \cdot \left( \delta_x^{\{1\}} - 19 \right) - \varepsilon_x^{\{SM\}} \cdot \left( \delta_y^{\{1\}} - 38 \right) + \delta_z^{\{1\}} - \delta_z^{\{SM\}} \right. \\
 & \left. + 44,6 \right]
 \end{aligned} \quad (41)$$

Se observa en la ecuación escalar de Z (Ec. 41) como depende, además del desplazamiento en Z de la nanopositionadora comercial ( $Z^{\{S\}}$ ) y de la altura de la muestra ( $z_{S,0}$ ), de los mismos parámetros comunes de la ecuación escalar de X e Y: la distancia que mide el sensor confocal ( $Z_{P_3}^c$ ), la altura a la que se coloca el sensor confocal respecto a su adaptador ( $Z_{3,0}^c$ ), la altura del micrómetro motorizado ( $Z^{\{SM\}}$ ), y lo que se mueve la plataforma móvil en ambos ejes ( $x^{\{1\}}, y^{\{1\}}$ ).

Finalmente, para obtener los valores de los errores que afectan a la medida  $Z_{P_s}^c$  se reestructura la (Ec. 41) y se introduce el término que elimina los offsets a cada lado de la ecuación ( $Z_{P_3}^c\{0,0,0\}$ , que es la lectura del sensor confocal en el punto de referencia (0,0,0)), resultando la siguiente ecuación:

$$\begin{aligned}
 Z_{P_s}^c - z_{3,0}^c + z_{S,0} - 44,6 - z_{P_3}^c\{0,0,0\} = & \left( z^{\{S\}} - l_{error,z}^{\{S\}} \cdot z^{\{S\}} \right) + z_{P_3}^c + z^{\{SM\}} + z_{3,0}^c \\
 & \cdot \left( \varepsilon_y^{\{SM\}} \cdot \varepsilon_y^{\{1\}} + \varepsilon_x^{\{SM\}} \cdot \varepsilon_x^{\{1\}} \right) + x^{\{1\}} \cdot \left( \varepsilon_y^{\{SM\}} + \varepsilon_x^{\{SM\}} \cdot \alpha_{yx}^{\{1\}} \right) \\
 & - y^{\{1\}} \cdot \varepsilon_x^{\{SM\}} \\
 & + \left[ \varepsilon_y^{\{SM\}} \cdot \left( \delta_x^{\{1\}} - 19 \right) - \varepsilon_x^{\{SM\}} \cdot \left( \delta_y^{\{1\}} - 38 \right) + \delta_z^{\{1\}} - \delta_z^{\{SM\}} \right. \\
 & \left. - z_{P_3}^c\{0,0,0\} \right]
 \end{aligned} \quad (42)$$

Eliminando los offsets (por definición de la propia cadena cinemática), la ecuación con la que ensayar en futuros estudios experimentales es la siguiente:

$$\begin{aligned}
 Z_{P_s}^c = & \left( z_{P_3}^c - z_{P_3}^c\{0,0,0\} \right) + \left( z^{\{S\}} - l_{error,z}^{\{S\}} \cdot z^{\{S\}} \right) + z^{\{SM\}} + z_{3,0}^c \\
 & \cdot \left( \varepsilon_y^{\{SM\}} \cdot \varepsilon_y^{\{1\}} + \varepsilon_x^{\{SM\}} \cdot \varepsilon_x^{\{1\}} \right) + x^{\{1\}} \cdot \left( \varepsilon_y^{\{SM\}} + \varepsilon_x^{\{SM\}} \cdot \alpha_{yx}^{\{1\}} \right) \\
 & - y^{\{1\}} \cdot \varepsilon_x^{\{SM\}} \\
 & + \left[ \varepsilon_y^{\{SM\}} \cdot \left( \delta_x^{\{1\}} - 19 \right) - \varepsilon_x^{\{SM\}} \cdot \left( \delta_y^{\{1\}} - 38 \right) + \delta_z^{\{1\}} - \delta_z^{\{SM\}} \right]
 \end{aligned} \quad (43)$$

En cuanto al punto de la muestra que se está midiendo con el sensor táctil ( $\overline{P}_S^t$ ), que se obtiene de la ecuación del modelo matemático de la NanoPla (Ec. 9), se calcula mediante la siguiente expresión (Ec. 44):

$$\begin{aligned} \overline{P}_S^t = & \begin{pmatrix} X_{P_S}^t \\ Y_{P_S}^t \\ Z_{P_S}^t \end{pmatrix} = [\overline{R}_S]^{-1} \\ & \cdot [\overline{R}_N]^{-1} \\ & \cdot [\overline{R}_{SM}]^{-1} \\ & \cdot [\overline{R}_1 \cdot (\overline{R}_2 \cdot (\overline{R}_3^t \cdot \overline{P}_3^t + \overline{T}_{3,0}^t) + \overline{T}_{2,0}^t) + \overline{T}_1 + \overline{T}_{1,0} - \overline{T}_{SM} - \overline{T}_{SM,0}] \\ & - \overline{T}_{N,0}] - \overline{T}_S - \overline{T}_{S,0}] \end{aligned} \quad (44)$$

Este punto ( $\overline{P}_S^t$ ) se descompone en sus coordenadas X, Y, Z mediante las siguientes ecuaciones escalares (Ec. 45), (Ec. 46) y (Ec. 47) respectivamente. Al igual que para el caso del confocal, en estas ecuaciones se han omitido los términos que por su reducido valor son despreciables.

$$\begin{aligned} X_{P_S}^t = & (x^{(1)} + \delta_x^{(1)}) + (x^{(S)} - l_{error,x}^{(S)} \cdot x^{(S)}) - x^{(1)} \cdot \alpha_{yx}^{(1)} \cdot \varepsilon_z^{(SM)} + z_{P_3}^t \\ & \cdot (\varepsilon_y^{(3t)} + \varepsilon_y^{(1)}) + z_{3,0}^t \cdot (\varepsilon_y^{(1)} - \varepsilon_x^{(1)} \cdot \varepsilon_z^{(SM)} - \varepsilon_y^{(SM)}) + y^{(1)} \cdot \varepsilon_z^{(SM)} \\ & - z^{(SM)} \cdot \varepsilon_y^{(SM)} \\ & + [-27,6 \cdot \varepsilon_y^{(1)} + \varepsilon_z^{(SM)} \cdot (\delta_y^{(1)} + 27,6 \cdot \varepsilon_x^{(1)} - 38) - \varepsilon_y^{(SM)} \\ & \cdot (\delta_z^{(1)} - \delta_z^{(SM)} + 65,9)] \end{aligned} \quad (45)$$

Se observa en la ecuación escalar de X (Ec. 45) como depende de lo que se mueve la plataforma móvil en ambos ejes ( $x^{(1)}, y^{(1)}$ ), de lo que se desplaza en X la nanoposicionadora comercial ( $x^{(S)}$ ), de la distancia que mide el sensor táctil ( $Z_{P_3}^t$ ), de la altura a la que se coloca el sensor táctil respecto a su adaptador ( $Z_{3,0}^t$ ), y de la altura del micrómetro motorizado ( $Z^{(SM)}$ ). Es decir, depende de las variables análogas a la ecuación escalar de X en el caso del sensor confocal.

$$\begin{aligned} Y_{P_S}^t = & (y^{(1)} + \delta_y^{(1)}) + (y^{(S)} - l_{error,y}^{(S)} \cdot y^{(S)}) + x^{(1)} \cdot (-\varepsilon_z^{(SM)} - \alpha_{yx}^{(1)}) + z_{P_3}^t \\ & \cdot (-\varepsilon_x^{(3t)} - \varepsilon_x^{(1)}) + z_{3,0}^t \cdot (-\varepsilon_x^{(1)} - \varepsilon_z^{(SM)} \cdot \varepsilon_y^{(1)} + \varepsilon_x^{(SM)}) + z^{(SM)} \\ & \cdot \varepsilon_x^{(SM)} \\ & + [-\varepsilon_z^{(SM)} \cdot (\delta_x^{(1)} - 27,6 \cdot \varepsilon_y^{(1)} - 19) + 27,6 \cdot \varepsilon_x^{(1)} + \varepsilon_x^{(SM)} \\ & \cdot (\delta_z^{(1)} - \delta_z^{(SM)} + 65,9)] \end{aligned} \quad (46)$$

Se observa en la ecuación escalar de Y (Ec. 46) que dicha ecuación depende de las variables análogas a la ecuación escalar de Y en el caso del sensor confocal.

$$\begin{aligned} Z_{P_S}^t = & (z^{(S)} - l_{error,z}^{(S)} \cdot z^{(S)} - z_{S,0}) + z_{P_3}^t + z^{(SM)} + z_{3,0}^t \\ & \cdot (1 + \varepsilon_y^{(SM)} \cdot \varepsilon_y^{(1)} + \varepsilon_x^{(SM)} \cdot \varepsilon_x^{(1)}) + x^{(1)} \cdot (\varepsilon_y^{(SM)} + \varepsilon_x^{(SM)} \cdot \alpha_{yx}^{(1)}) \\ & - y^{(1)} \cdot \varepsilon_x^{(SM)} \\ & + [\varepsilon_y^{(SM)} \cdot (\delta_x^{(1)} - 27,6 \cdot \varepsilon_y^{(1)} - 19) - \varepsilon_x^{(SM)} \\ & \cdot (\delta_y^{(1)} + 27,6 \cdot \varepsilon_x^{(1)} - 38) + \delta_z^{(1)} - \delta_z^{(SM)} + 27,9] \end{aligned} \quad (47)$$

Se observa en la ecuación escalar de Z (Ec. 47) que dicha ecuación depende de las variables análogas a la ecuación escalar de Z en el caso del sensor confocal.

Finalmente, para obtener los valores de los errores que afectan a la medida  $Z_{P_s}^t$  se reestructura la (Ec. 47) y se introduce el término que elimina los offsets a cada lado de la ecuación ( $Z_{P_3}^t\{0,0,0\}$ , que es la lectura del sensor táctil en el punto de referencia (0,0,0)), resultando la siguiente ecuación:

$$\begin{aligned}
 Z_{P_s}^t - z_{3,0}^t + z_{S,0} - 27,9 - z_{P_3}^t\{0,0,0\} \\
 = z_{P_3}^t + z_{3,0}^t \cdot \left( \varepsilon_y^{\{SM\}} \cdot \varepsilon_y^{\{1\}} + \varepsilon_x^{\{SM\}} \cdot \varepsilon_x^{\{1\}} \right) + x^{\{1\}} \\
 \cdot \left( \varepsilon_y^{\{SM\}} + \varepsilon_x^{\{SM\}} \cdot \alpha_{yx}^{\{1\}} \right) - y^{\{1\}} \cdot \varepsilon_x^{\{SM\}} + z^{\{SM\}} \\
 + \left( z^{\{S\}} - l_{error,z}^{\{S\}} \cdot z^{\{S\}} \right) \\
 + \left[ \varepsilon_y^{\{SM\}} \cdot \left( \delta_x^{\{1\}} - 27,6 \cdot \varepsilon_y^{\{1\}} - 19 \right) - \varepsilon_x^{\{SM\}} \right. \\
 \left. \cdot \left( \delta_y^{\{1\}} + 27,6 \cdot \varepsilon_x^{\{1\}} - 38 \right) + \delta_z^{\{1\}} - \delta_z^{\{SM\}} - z_{P_3}^t\{0,0,0\} \right]
 \end{aligned} \tag{48}$$

Eliminando los offsets (por definición de la propia cadena cinemática), la ecuación con la que ensayar en futuros estudios experimentales es la siguiente:

$$\begin{aligned}
 Z_{P_s}^t = (z_{P_3}^t - z_{P_3}^t\{0,0,0\}) + z_{3,0}^t \cdot \left( \varepsilon_y^{\{SM\}} \cdot \varepsilon_y^{\{1\}} + \varepsilon_x^{\{SM\}} \cdot \varepsilon_x^{\{1\}} \right) + x^{\{1\}} \\
 \cdot \left( \varepsilon_y^{\{SM\}} + \varepsilon_x^{\{SM\}} \cdot \alpha_{yx}^{\{1\}} \right) - y^{\{1\}} \cdot \varepsilon_x^{\{SM\}} + z^{\{SM\}} \\
 + \left( z^{\{S\}} - l_{error,z}^{\{S\}} \cdot z^{\{S\}} \right) \\
 + \left[ \varepsilon_y^{\{SM\}} \cdot \left( \delta_x^{\{1\}} - 27,6 \cdot \varepsilon_y^{\{1\}} - 19 \right) - \varepsilon_x^{\{SM\}} \right. \\
 \left. \cdot \left( \delta_y^{\{1\}} + 27,6 \cdot \varepsilon_x^{\{1\}} - 38 \right) + \delta_z^{\{1\}} - \delta_z^{\{SM\}} \right]
 \end{aligned} \tag{49}$$

Una vez conocidas las ecuaciones del modelo matemático y los errores que afectan de manera teórica, se crea el código MATLAB para que, introduciendo los valores de las variables propias de cada ensayo, obtener el valor del punto de la muestra ( $\bar{P}_s^C$ ,  $\bar{P}_s^T$ ). Las variables propias de cada ensayo, así como el propio código de MATLAB se encuentran en el Anexo 9: Código Matlab del modelo matemático de la NanoPla.

Para poder ejecutar este código se deben definir dichos errores mediante ensayos experimentales. Sin embargo, actualmente, algunas de las piezas diseñadas y necesarias aún están en proceso de fabricación por parte del Servicio de Mecánica de Precisión de la UZ. Por esta razón, y como primera aproximación al problema de la estrategia de corrección de errores, se estudia el modelo matemático del sensor confocal respecto a la nanopositionadora en un soporte externo ya existente [8]. Es decir, con el modelo matemático de este sistema más simple se puede verificar que la forma de caracterizar los errores es correcta. Además, al ser utilizada la nanopositionadora, el estudio de este modelo cinemático queda disponible para ser usado en ensayos en los que no se requiera la funcionalidad de la plataforma móvil.

## 5.2. Análisis del modelo del soporte externo

El ensamblaje del conjunto del sensor confocal con la nanoposicionadora en un soporte externo se muestra en la Figura 36.

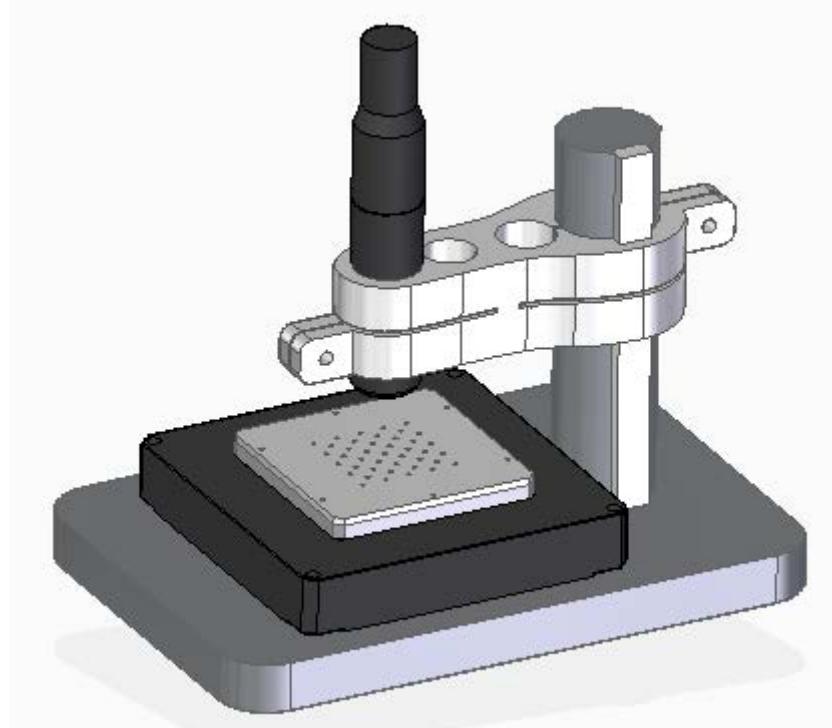


Figura 36: Ensamblaje del modelo del soporte externo. Fuente: [8]

En este caso, los bloques de piezas que forman parte de este estudio son las siguientes:

- Base fija {0}: soporte externo para el sensor confocal.
- Sensor confocal {SC}
- Nanoposicionador {N}: nanoposicionadora y portamuestras.
- Muestra {S}. En la nomenclatura de la ecuación cinemática y sus variables se considera el subíndice S para la muestra (del inglés ‘Sample’).

A continuación, se muestra el esquema global del bucle de medición (Figura 37)

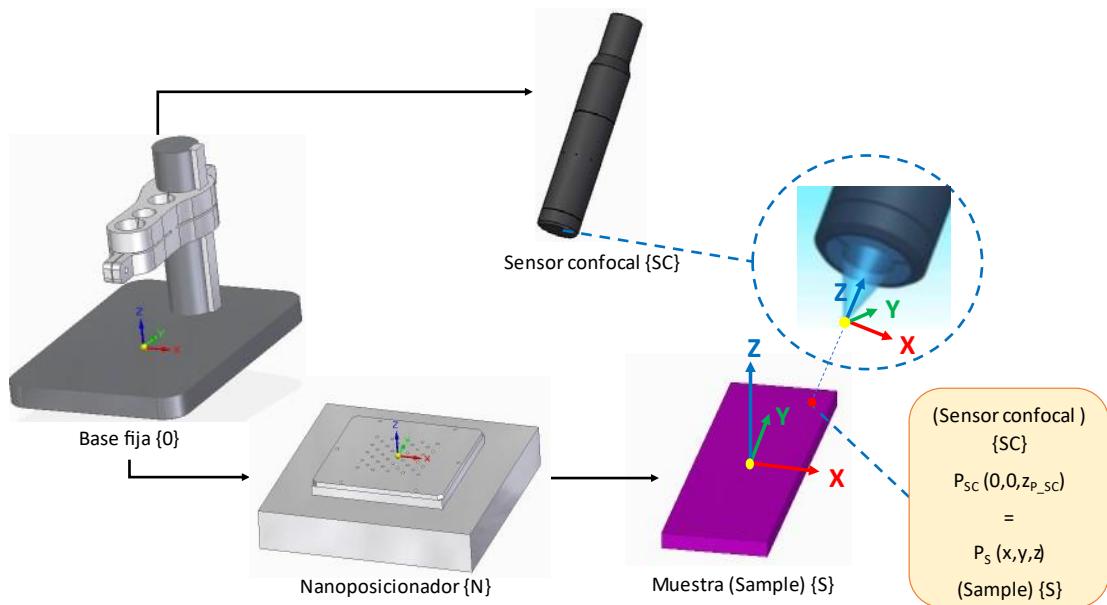


Figura 37: Esquema global del bucle de medición del soporte externo.

En el montaje de este conjunto de piezas, también existen errores geométricos que van a causar errores en la medición del punto de la muestra ( $P_S$ ). De esta forma, se estudia el modelo matemático que permite corregir dichos errores. En la (Figura 38) se muestra la cadena cinemática que permitirá determinar el modelo matemático.

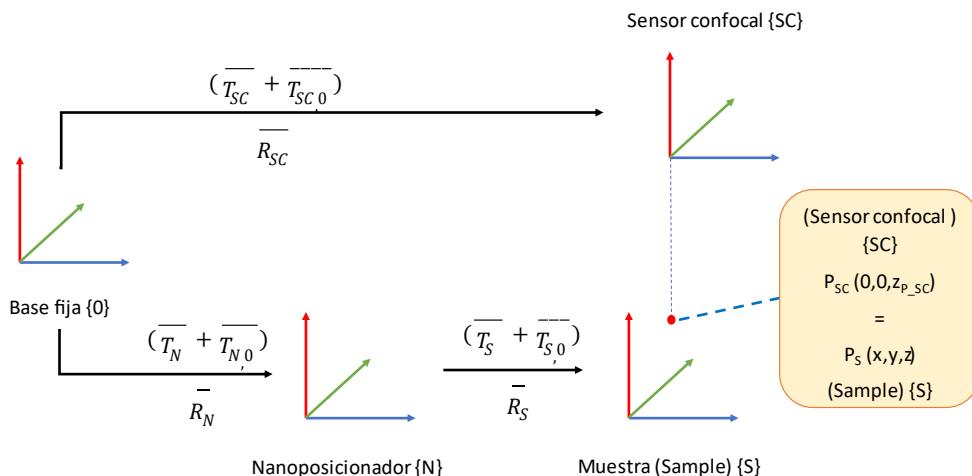


Figura 38: Cadena cinemática del soporte externo.

Conociendo la cadena cinemática del soporte externo se define el modelo matemático, a partir del cual se puede relacionar el punto del haz que emite el sensor sobre la muestra ( $P_{SC}$ ) con el punto de la muestra ( $P_S$ ), dado que físicamente son coincidentes.

El procedimiento seguido para la creación de este modelo es similar al de la NanoPla. Se recorre el camino desde el punto del haz que emite el sensor sobre la muestra ( $P_{SC}$ ) hasta el sistema de referencia común  $\{0\}$  por el lado del sensor y por el lado de la nanoposicionadora mediante las matrices de translación (incluidos los offsets) y de rotación. Se consideran rotaciones angulares del sistema nanoposicionador  $\{N\}$  respecto de la base fija  $\{0\}$  y del sensor  $\{SC\}$  a la base fija  $\{0\}$ , así como errores de desplazamiento propios de la nanoposicionadora y del sensor confocal. El procedimiento detallado para elaborar el modelo

mametámico del soporte externo se muestra en el Anexo 10: Modelo matemático del soporte externo del confocal y su código Matlab.

A partir de la ecuación del modelo matemático del soporte externo se conocen las coordenadas del punto de la muestra que se está midiendo  $\bar{P}_S$  (Ec. 50).

$$\bar{P}_S = \begin{pmatrix} X_{P_S} \\ Y_{P_S} \\ Z_{P_S} \end{pmatrix} = [\bar{R}_S]^{-1} \cdot [\bar{R}_N]^{-1} \cdot (\bar{R}_{SC} \cdot \bar{P}_{SC} + \bar{T}_{SC,0} - \bar{T}_{N,0}) - \bar{T}_S - \bar{T}_{S,0} \quad (50)$$

Este punto ( $\bar{P}_S$ ) se descompone en sus coordenadas X, Y, Z mediante las siguientes ecuaciones escalares (Ec. 51), (Ec. 52) y (Ec. 53) respectivamente. En estas ecuaciones se han omitido los términos que por su reducido valor son despreciables.

$$X_{P_S} = (x^{\{S\}} - l_{error,x}^{\{S\}} \cdot x^{\{S\}}) + z_{P_{SC}} \cdot (\varepsilon_y^{\{SC\}} - \varepsilon_y^{\{N\}}) - z_{SC,0} \cdot \varepsilon_y^{\{N\}} + 49,2 \cdot \varepsilon_y^{\{N\}} \quad (51)$$

Se observa en la ecuación escalar de X (Ec. 51) como depende de lo que se desplaza en X la nanoposicionadora comercial ( $x^{\{S\}}$ ), de la distancia que mide el sensor confocal corregida ( $Z_{P_{SC}}$ ), y de la altura a la que se coloca el sensor confocal respecto al sistema de referencia de la base fija {0} ( $Z_{SC,0}$ ).

$$Y_{P_S} = (y^{\{S\}} - l_{error,y}^{\{S\}} \cdot y^{\{S\}}) + z_{P_{SC}} \cdot (-\varepsilon_x^{\{SC\}} + \varepsilon_x^{\{N\}}) + z_{SC,0} \cdot \varepsilon_x^{\{N\}} - 49,2 \cdot \varepsilon_x^{\{N\}} \quad (52)$$

Se observa en la ecuación escalar de Y (Ec. 52) como depende de los mismos parámetros que la ecuación escalar de X (Ec. 51) (la distancia que mide el sensor confocal corregida ( $Z_{P_{SC}}$ ) y de la altura a la que se coloca el sensor confocal respecto al sistema de referencia de la base fija {0} ( $Z_{SC,0}$ )), a excepción del desplazamiento en X de la nanoposicionadora comercial ( $x^{\{S\}}$ ), que la ecuación escalar de Y depende del desplazamiento en Y de la nanoposicionadora comercial ( $y^{\{S\}}$ ).

$$Z_{P_S} = z_{P_{SC}} + z_{SC,0} + z^{\{S\}} - l_{error,z}^{\{S\}} \cdot z^{\{S\}} - z_{S,0} - 49,2 \quad (53)$$

Se observa en la ecuación escalar de Z (Ec. 53) como depende de, además del desplazamiento en Z de la nanoposicionadora comercial ( $z^{\{S\}}$ ) y de la altura de la muestra ( $Z_{S,0}$ ), los mismos parámetros comunes de la ecuación escalar de X e Y: la distancia que mide el sensor confocal corregida ( $Z_{P_{SC}}$ ) y de la altura a la que se coloca el sensor confocal respecto al sistema de referencia de la base fija {0} ( $Z_{SC,0}$ ).

Cabe destacar que tanto en la (Ec. 51) como en la (Ec. 52) aparecen errores angulares, mientras que en la ecuación (Ec. 53) no. Esto se debe a que en  $X_{P_S}$  e  $Y_{P_S}$  los errores son de seno y se deben considerar, mientras que en  $Z_{P_S}$  los errores son de coseno y se pueden despreciar debido a que son ángulos muy pequeños.

Una vez conocidas las ecuaciones del modelo matemático y los errores que afectan de manera teórica, se crea el código MATLAB para que, introduciendo los valores de las variables propias del ensayo, obtener el valor del punto de la muestra ( $\bar{P}_S$ ). La definición de las variables a definir, así como el propio código de MATLAB se encuentran en el Anexo 10: Modelo matemático del soporte externo del confocal.

Por otro lado, conocidas las ecuaciones del modelo matemático y los errores que afectan de manera teórica, se pueden caracterizar dichos errores mediante ensayos experimentales. El presente trabajo se centra en la descripción teórica; sin embargo, se va a explicar el procedimiento que se podría seguir para cuantificar los errores presentes en la ecuación del modelo matemático del soporte externo (Ec. 54).

Para realizar los ensayos experimentales se necesitan las piezas consideradas en el modelo matemático del soporte externo (el soporte externo, el sensor confocal, la nanoposicionadora comercial, el portamuestras y la muestra -un patrón calibrado-), el controlador CCS Optima Plus de la marca Stil (Anexo 1: Principales componentes) conectado mediante el cable de fibra óptica con el lápiz óptico (sensor confocal), un PC, un bloque patrón completamente plano (sin errores angulares) y elementos de fijación de la muestra al portamuestras. En la Figura 39 se muestran los componentes mencionados preparados para el ensayo.

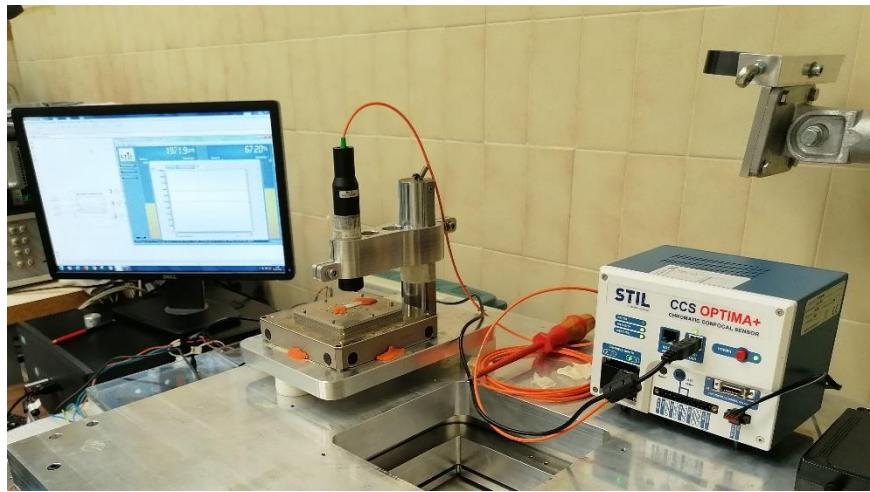


Figura 39: Componentes para el ensayo experimental

Para la correcta realización del ensayo experimental y la cuantificación de los errores existentes se propone el siguiente procedimiento. Dicho procedimiento va a ser dividido en 3 partes, una para cada eje. Dado que cada error solo afecta en una única coordenada del punto de la muestra ( $\bar{P}_S$ ), el orden de las partes es indistinto. Sin embargo, por simplicidad del eje Z, se comienza explicando el procedimiento seguido para obtener los valores de los errores que afectan a la medida  $Z_{P_S}$  ("parte 1"). Para ello, se reestructura la (Ec. 53) y se introduce el término que elimina los offsets a cada lado de la ecuación ( $Z_{P_{SC}}\{0,0,0\}$ , que es la lectura del sensor confocal en el punto de referencia (0,0,0)), resultando la siguiente ecuación:

$$Z_{P_S} - z_{SC,0} + z_{S,0} + 49,2 - z_{P_{SC}}\{0,0,0\} = z_{P_{SC}} + z^{\{S\}} - l_{error,z}^{\{S\}} \cdot z^{\{S\}} - z_{P_{SC}}\{0,0,0\} \quad (54)$$

Eliminando los offsets (por definición de la propia cadena cinemática), la ecuación con la que ensayar es la siguiente:

$$Z_{P_S} = (z_{P_{SC}} - z_{P_{SC}}\{0,0,0\}) + z^{\{S\}} - l_{error,z}^{\{S\}} \cdot z^{\{S\}} \quad (55)$$

Conociendo la ecuación con la que trabajar (Ec. 55) y de esta forma, las medidas que influyen en el resultado de  $Z_{P_S}$ , el procedimiento comienza limpiando las superficies de las piezas y el posterior montaje del sistema (como en la Figura 36). A continuación, se coloca el patrón (muestra) sobre el portamuestras fijándolo correctamente en el mismo. Después, se posiciona el sensor confocal a una altura tal del patrón que en el software propio del sensor confocal marque una distancia lo más próxima a 2000  $\mu\text{m}$ , dado que el rango de trabajo del sensor confocal es de 4000  $\mu\text{m}$  (Anexo 1: Principales componentes) y se obtienen menos errores en el centro del rango de medida que en los extremos del mismo. Con todo el equipamiento preparado, se procede a la primera medición del patrón, estableciendo una posición inicial de la nanoposicionadora en el software de control. Y, se toma nota de la componente Z de la posición real (media) de la nanoposicionadora ( $z^{\{S\}}$ ) y de la lectura (media) del confocal ( $z_{P_{SC}(0)}$ ). Una vez realizada la primera medición, se eleva el patrón con un bloque patrón completamente plano haciendo uso de las

fijaciones para que se coloque exactamente en el mismo punto. Se repite la medición (segunda medición) y se toma nota de la lectura (media) del confocal ( $Z_{PS(1)}$ ).

La ecuación de la primera medición, que se obtiene a partir de la Ec. 55, es la Ec. 56 y la ecuación de la segunda medición es la Ec. 57.

$$Z_{PS(0)} = (z_{PS(0)} - z_{PS}\{0,0,0\}_{(0)}) + z^{\{S\}} - l_{error,z}^{\{S\}} \cdot z^{\{S\}} \quad (56)$$

$$Z_{PS(1)} = (z_{PS(1)} - z_{PS}\{0,0,0\}_{(0)}) + z^{\{S\}} - l_{error,z}^{\{S\}} \cdot z^{\{S\}} \quad (57)$$

Los valores de  $z^{\{S\}}$  (posición en Z de la nanoposicionadora) y de  $l_{error,z}^{\{S\}} \cdot z^{\{S\}}$  (error de la nanoposicionadora en Z) son los mismos en ambas ecuaciones puesto que no se ha movido la nanoposicionadora entre las dos mediciones. El valor de  $z_{PS}\{0,0,0\}$  (medida del sensor en la posición de referencia) es constante en ambas medidas para poder observar el cambio de altura al añadir el bloque ( $z_{BP}$ ).

$$(Z_{PS(1)} - Z_{PS(0)}) = z_{BP} \quad (58)$$

Por tanto, a partir de la Ec. 56, Ec. 57, Ec. 58 y Ec. A.13 se pueden obtener los errores internos del sensor (Ec. 62).

$$(Z_{PS(0)} - Z_{PS(1)}) = (z_{PS(0)} - z_{PS(1)}) \quad (59)$$

$$z_{PS(0)} = z_{PS,experimental(0)} + \delta_{PS,l(0)} + \delta_{PS,r(0)} + \delta_{PS,n} \quad (60)$$

$$z_{PS(1)} = z_{PS,experimental(1)} + \delta_{PS,l(1)} + \delta_{PS,r(1)} + \delta_{PS,n} \quad (61)$$

$$\begin{aligned} (Z_{PS(1)} - Z_{PS(0)}) &= z_{BP} \\ &= (z_{PS,experimental(1)} - z_{PS,experimental(0)}) \\ &\quad + [(\delta_{PS,l(1)} + \delta_{PS,r(1)}) - (\delta_{PS,l(0)} + \delta_{PS,r(0)})] \end{aligned} \quad (62)$$

Considerando que en el centro del rango de trabajo del confocal los errores lineales son nulos ( $\delta_{PS,l(0)} = 0$ ). Además, los errores del ruido son una RMSD (Root Mean Square Deviation) que se puede calcular y los de resolución con constantes. De esta forma, se pueden conocer los errores del sensor confocal ( $\delta_{PS,l(1)}$ ).

$$\delta_{PS,l(1)} = z_{BP} - (z_{PS,experimental(1)} - z_{PS,experimental(0)}) \quad (63)$$

Una vez conocidos los errores del sensor, se procede a calcular los errores de la componente Z de la nanoposicionadora ( $l_{error,z}^{\{S\}} \cdot z^{\{S\}}$ ). Para ello, se fija el patrón sobre el portamuestras (en la misma posición que estaba en la primera medición). Se mueve la nanoposicionadora variando la componente Z ( $z^{\{S\}}$ ) y se realiza la medición (tercera medición). Se toma nota de la posición a la que realmente se desplaza la nanoposicionadora ( $x^{\{S\}}, y^{\{S\}}, z^{\{S\}}$ ), y de la lectura (media) del confocal ( $Z_{PS}$ ). Finalmente, se comparan las mediciones para obtener el valor de  $l_{error,z}^{\{S\}} \cdot z^{\{S\}}$ .

$$Z_{PS(0)} = (z_{PS(0)} - z_{PS}\{0,0,0\}) + z_{(0)}^{\{S\}} - (l_{error,z}^{\{S\}} \cdot z^{\{S\}})_{(0)} \quad (64)$$

$$Z_{PS(0)} = (z_{PS(2)} - z_{PS}\{0,0,0\}) + z_{(2)}^{\{S\}} - (l_{error,z}^{\{S\}} \cdot z^{\{S\}})_{(2)} \quad (65)$$

$$(l_{error,z}^{\{S\}} \cdot z^{\{S\}})_{(2)} = (l_{error,z}^{\{S\}} \cdot z^{\{S\}})_{(0)} + (z_{PS(2)} - z_{PS(0)}) + (z_{(2)}^{\{S\}} - z_{(0)}^{\{S\}}) \quad (66)$$

Una vez caracterizados los errores de la componente Z, se procede explicar el procedimiento para obtener los valores de los errores que afectan a la medida  $X_{PS}$ . Al igual que para la componente Z, se limpia y fija el patrón en el portamuestras de forma muy precisa (para conocer exactamente el punto XY en el que se coloca), se coloca el sensor a la altura idónea y se toma nota ( $Z_{SC,0}$ ). Con todo el equipamiento preparado, se realiza la medición (primera medición) y se toma nota de la posición real (media) de la nanoposicionadora y de la lectura (media) del confocal. A continuación, se eleva el patrón con el bloque patrón completamente plano y se repite la medición (segunda medición), tomando nota de la nueva lectura del confocal. A partir de la Ec. 51 se comparan estas dos mediciones y se obtiene el valor de  $(\varepsilon_y^{\{SC\}} - \varepsilon_y^{\{N\}})$ .

$$X_{PS(0)} = z_{PS(0)} \cdot (\varepsilon_y^{\{SC\}} - \varepsilon_y^{\{N\}}) - z_{SC,0(0)} \cdot \varepsilon_y^{\{N\}} + x^{\{S\}} - l_{error,x}^{\{S\}} \cdot x^{\{S\}} + 49,2 \cdot \varepsilon_y^{\{N\}} \quad (67)$$

$$X_{PS(1)} = z_{PS(1)} \cdot (\varepsilon_y^{\{SC\}} - \varepsilon_y^{\{N\}}) - z_{SC,0(0)} \cdot \varepsilon_y^{\{N\}} + x^{\{S\}} - l_{error,x}^{\{S\}} \cdot x^{\{S\}} + 49,2 \cdot \varepsilon_y^{\{N\}} \quad (68)$$

El resto de los valores son comunes puesto que ni el sensor ni la nanoposicionadora se han desplazado entre mediciones.

Comparando las ecuaciones resulta:

$$(\varepsilon_y^{\{SC\}} - \varepsilon_y^{\{N\}}) = \frac{(X_{PS(1)} - X_{PS(0)})}{(z_{PS(1)} - z_{PS(0)})} \quad (69)$$

Gracias al uso de un patrón calibrado y al preciso posicionamiento en el portamuestras de los patrones conseguido por las fijaciones, se debería conocer el valor de  $(X_{PS(1)} - X_{PS(0)})$ .

A continuación, con el mismo patrón calibrado en el portamuestras se modifica la altura del sensor confocal y se repite la medición (tercera medición), tomando nota de la nueva lectura del confocal. A partir de la Ec. 51 se compara esta medición con la primera y se obtiene el error de  $\varepsilon_y^{\{N\}}$  (Ec. 72).

$$X_{PS(0)} = z_{PS(0)} \cdot (\varepsilon_y^{\{SC\}} - \varepsilon_y^{\{N\}}) - z_{SC,0(0)} \cdot \varepsilon_y^{\{N\}} + x^{\{S\}} - l_{error,x}^{\{S\}} \cdot x^{\{S\}} + 49,2 \cdot \varepsilon_y^{\{N\}} \quad (70)$$

$$X_{PS(2)} = z_{PS(2)} \cdot (\varepsilon_y^{\{SC\}} - \varepsilon_y^{\{N\}}) - z_{SC,0(2)} \cdot \varepsilon_y^{\{N\}} + x^{\{S\}} - l_{error,x}^{\{S\}} \cdot x^{\{S\}} + 49,2 \cdot \varepsilon_y^{\{N\}} \quad (71)$$

$$\varepsilon_y^{\{N\}} = \frac{(z_{PS(2)} - z_{PS(0)}) \cdot (\varepsilon_y^{\{SC\}} - \varepsilon_y^{\{N\}}) - (X_{PS(2)} - X_{PS(0)})}{(z_{SC,0(2)} - z_{SC,0(0)})} \quad (72)$$

Conocidos los valores de  $(\varepsilon_y^{\{SC\}} - \varepsilon_y^{\{N\}})$  y de  $\varepsilon_y^{\{N\}}$ , ya se puede conocer  $\varepsilon_y^{\{SC\}}$ . Conocidos los errores de rotación, ya se pueden calcular los errores de la componente X de la nanoposicionadora a partir de la Ec. 51.

$$l_{error,x}^{\{S\}} \cdot x^{\{S\}} = z_{PS(0)} \cdot (\varepsilon_y^{\{SC\}} - \varepsilon_y^{\{N\}}) - z_{SC,0(0)} \cdot \varepsilon_y^{\{N\}} + x^{\{S\}} + 49,2 \cdot \varepsilon_y^{\{N\}} - X_{PS(0)} \quad (73)$$

Estos errores calculados se pueden verificar inclinando la nanoposicionadora en el eje Y con bloques patrón de aluminio. Se realizaría de esta forma una nueva medición de la que se obtendría un nuevo valor de la lectura del confocal. Con la Ec. 51 se calcularía  $\varepsilon_y^{\{N\}}$ , el cual debiera coincidir con el ángulo que se ha inclinado la nanoposicionadora.

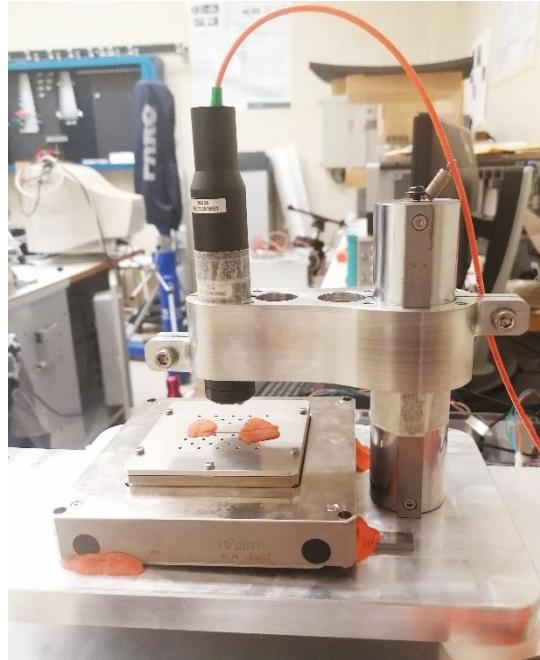


Figura 40: Ensayo con nanoposicionadora inclinada en Y

Para obtener los valores de los errores que afectan a la medida  $Y_{P_S}$ , el procedimiento a seguir es análogo al seguido para la componente X, con la única diferencia de emplear la Ec. 52 e inclinar la nanoposicionadora en el eje X para la verificación de los errores. Las ecuaciones que se obtienen en este caso son:

$$\left( -\varepsilon_x^{\{SC\}} + \varepsilon_x^{\{N\}} \right) = \frac{\left( Y_{P_{S(1)}} - Y_{P_{S(0)}} \right)}{\left( z_{P_{SC}(1)} - z_{P_{SC}(0)} \right)} \quad (74)$$

$$\varepsilon_x^{\{N\}} = \frac{-\left( z_{P_{SC}(2)} - z_{P_{SC}(0)} \right) \cdot \left( -\varepsilon_x^{\{SC\}} + \varepsilon_x^{\{N\}} \right) + \left( Y_{P_{S(2)}} - Y_{P_{S(0)}} \right)}{\left( z_{SC,0(2)} - z_{SC,0(0)} \right)} \quad (75)$$

$$l_{error,x}^{\{S\}} \cdot x^{\{S\}} = z_{P_{SC}(0)} \cdot \left( -\varepsilon_x^{\{SC\}} + \varepsilon_x^{\{N\}} \right) + z_{SC,0(0)} \cdot \varepsilon_x^{\{N\}} + y_{(0)}^{\{S\}} - 49,2 \cdot \varepsilon_x^{\{N\}} - Y_{P_{S(0)}} \quad (76)$$

## 6. Conclusiones y líneas de trabajo futuras

En este proyecto se presenta el diseño, desarrollo y fabricación de diversos elementos auxiliares para una plataforma posicionadora 2D de alto rango con resolución submicrométrica. Dichos elementos permitirán la integración de diferentes instrumentos de medida (debido a su diseño modular y repetible gracias al acople cinemático), así como de un portamuestras, con los que poder realizar mediciones 3D. La importancia de la influencia de la temperatura en el momento de medición del instrumento de medida, así como el seguimiento de principios propios de la ingeniería de precisión, han guiado el diseño de los diversos componentes para alcanzar una versión que reduzca errores de fabricación y montaje.

Con el objetivo de conocer la influencia que tienen los errores geométricos del montaje de la NanoPla en la medida final, se ha realizado un modelo matemático de la NanoPla. Por otro lado, para verificar que la forma de caracterizar los errores es correcta, se ha realizado también el modelo matemático de un soporte externo ya existente, así como su procedimiento para la caracterización de sus errores geométricos. Este modelo también brinda la posibilidad de ser usado para la futura realización de ensayos en los que no se requiera el uso de la plataforma móvil.

En línea con la reducción de los errores presentes en el sistema, se deberían de corregir también los errores debidos a dilataciones térmicas. Como se ha analizado en el presente trabajo, todos los componentes que forman la parte estructural de la NanoPla e influyen en la medición sufren desplazamientos al existir una diferencia de temperatura entre la de ambiente y la de referencia. En especial, se debe de prestar especial atención a los desplazamientos sufridos en la punta de los instrumentos de medida, dado que son los más críticos y son elevados. Para corregir estos errores, se propone como línea de trabajo futuro la monitorización de la temperatura ambiente del laboratorio metrológico y de los componentes de la NanoPla con el fin de compensar en el modelo matemático estas variaciones de temperatura.

Una vez cuantificados todos los errores que influyen en el modelo matemático de la NanoPla se ha desarrollado un procedimiento de medida estático. Dicho procedimiento se llevaría a cabo de la siguiente manera. El sistema de posicionamiento de la plataforma móvil realiza el movimiento de aproximación en todo el rango de trabajo, situando el instrumento de medida en las coordenadas introducidas por el usuario. A continuación, los cojinetes de aire se apagan y la plataforma móvil y el instrumento de medida quedan estáticos; pudiendo realizar así la posicionadora comercial el movimiento de escaneo de la pieza a medir. Para ello, se desarrolla el procedimiento de medida del instrumento mediante Simulink. Finalmente, para validar el sistema se hacen pruebas con un bloque patrón.

Otra vía más de trabajo futuro puede ser la medición del bloque patrón con un rugosímetro y con un microscopio de variación focal (ambos instrumentos presentan resoluciones en Z mejores que 0,1 micrómetros), con el fin de comparar los resultados y analizar los errores de medición de la NanoPla.

Una vez controlada la medición estática, el siguiente reto sería el desarrollo de un procedimiento de medida dinámico permitiendo así escanear superficies en todo el rango de trabajo de manera rápida. En este procedimiento de medida, mientras que la plataforma móvil se mueve por todo el rango de trabajo (50 mm x 50 mm), el instrumento de medida mediría la pieza. Durante dicho procedimiento, la nanoposicionadora nPoint permanecería estática, actuando simplemente como portamuestras. Con ello se consigue en cada instante una medida tridimensional con coordenadas X, Y, Z; siendo X e Y la posición del instrumento de medida sobre la muestra (proporcionadas por el sistema de interferometría láser que mide la posición de la plataforma móvil en cada instante); mientras que la coordenada Z es la medida de la superficie de la muestra medida por el instrumento de medida. Para lograr este procedimiento de medida, las principales tareas serían optimizar la estrategia de control de la posición de la plataforma móvil (para evitar vibraciones y otros errores), el análisis de las fuentes de errores que afectan al posicionamiento de la plataforma móvil (como la de la “posición cero” de la plataforma, donde X=0 e Y=0, dado que el sistema láser de posicionamiento es incremental); así como el desarrollo de un programa que permita extraer simultáneamente todas las lecturas.

## Bibliografía

- [1] A. Balasubramanian, M. Jun, R. DeVor y S. Kapoor, «A submicron multiaxis positioning stage for micro- and nanoscale manufacturing processes,» *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, vol. 130, nº 3, p. 031112, 2008.
- [2] S. Ducourtieux y B. Poyet, «Development of a metrological atomic force microscope with minimized Abbe error and differential interferometer-based real-time position control,» *Measurement Science and Technology*, vol. 22, nº 9, p. 094010, 2011.
- [3] 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.
- [4] M. Torralba, Development of a 2D positioning stage with submicrometric accuracy for metrological applications, Tesis doctoral, Universidad de Zaragoza, 2015.
- [5] L. D. Pérez, Positioning Control System for a Large Range 2D Platform with Submicrometre Accuracy for Metrological and Manufacturing Applications, Tesis doctoral, Universidad de Zaragoza, 2019.
- [6] L. D. Pérez, M. Torralba, J. A. Albajez y J. A. Yagüe, «2D Positioning Control System for the Planar Motion of a Nanopositioning Platform,» *Applied Sciences*, vol. 9, nº 22, p. 4860, 2019.
- [7] nPoint, 2020. [En línea]. Available: <https://npoint.com/>.
- [8] J. Camino, Diseño de un soporte metrológico para sensor confocal, Trabajo Final de Grado, Universidad de Zaragoza, 2018.
- [9] M. Torralba, J. Yagüe, J. A. Albajez y J. J. Aguilar, «Design Optimization for the Measurement Accuracy Improvement of a Large Range Nanopositioning Stage,» *Sensors*, vol. 16, p. 84, 2016.
- [10] «0.375 - 80 Thread Flexure Mounts,» New Way Air Bearings, 2021. [En línea]. Available: <https://www.newwayairbearings.com/catalog/product/flexure-mount-0-375-80-thread-flexure-mounts/>.

- [11] A. Slocum, «Kinematic Couplings: A Review of Design Principles and Applications,» *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 50, nº 4, pp. 310-327, 2010.
- [12] «Imán de Neodimio círculo,» Materials World, 2020. [En línea]. Available: <https://www.mwmaterialsworld.com/es/iman-de-neodimio-circulo.html>.
- [13] «Bolas de rodamiento de acero,» Materials World, 2020. [En línea]. Available: <https://www.mwmaterialsworld.com/es/formatos/bolas-y-esferas/bolas-esferas-metal/bolas-de-rodamiento-de-acero.html>.
- [14] «Rodillos de rodamiento de Acero,» Materials World, 2020. [En línea]. Available: <https://www.mwmaterialsworld.com/es/rodillos-de-rodamiento-de-acero.html>.
- [15] «Piezo motion control tutorial,» PI, 2021. [En línea]. Available: <https://www.pi-usa.us/en/products/piezo-motors-stages-actuators/piezo-motion-control-tutorial/tutorial-4-4/>.
- [16] «Imán de Neodimio rectangular,» Materials World, 2021. [En línea]. Available: <https://www.mwmaterialsworld.com/es/iman-de-neodimio-rectangular.html>.
- [17] M. Torralba Gracia, L. C. Díaz Pérez, J. A. Albajez García y J. A. Yagüe Fabra, «Positioning uncertainty assessment of a large-range nanopositioning platform.,» de *Euspen's 21th International Conference & exhibition*, Virtual, 07/06/2021.
- [18] «Chromapoint - Point sensors,» STIL MARPOSS, 2019. [En línea]. Available: <http://point.stil-sensors.com/?lang=EN>.
- [19] «HEIDENHAIN-METRO,» Heidenhain, 2021. [En línea]. Available: [https://www.heidenhain.es/es\\_ES/productos/palpadores-de-medida/product-overview/metro/](https://www.heidenhain.es/es_ES/productos/palpadores-de-medida/product-overview/metro/).
- [20] «DM-13L Lockable Differential Micrometer Heads,» MSK Newport, 2021. [En línea]. Available: <https://www.newport.com/p/DM-13L>.
- [21] «M-230 High-Resolution Linear Actuator with DC Motor,» Physik Instrumente (PI) GmbH & Co, 2020. [En línea]. Available: <https://www.physikinstrumente.store/eu/m-230.10/>.

- [22] G. Muro Lanuza, Diseño y modelado geométrico de un palpador analógico para máquinas de medir por coordenadas y desarrollo de un sistema de ensayo independiente, Trabajo Final de Grado, Universidad de Zaragoza, 2004.
- [23] «Neodimio – Propiedades – Precio – Aplicaciones – Producción,» Nuclear power, 2021. [En línea]. Available: <https://material-properties.org/es/neodimio-propiedades-precio-aplicaciones-produccion/>.



## Trabajo Fin de Máster

Diseño e integración de instrumentos metrológicos  
en una nanoposicionadora 2D de alto rango.

Design and integration of metrological instruments  
in a high-range 2D nanopositioning platform.

## Anexos

Autora

Laura Muro Fraguas

Directores

José Antonio Albajez García  
Lucía Candela Díaz Pérez

Máster en Ingeniería Mecánica

ESCUELA DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

2021



## Índice de anexos

Anexo 1: Principales componentes.....	57
Anexo 2: Ensamble de los elementos estructurales de la NanoPla que afectan a la medición .....	68
Anexo 3: Estudio de la Parte 1 del ensamblaje simplificado de la NanoPla .....	71
Anexo 4: Estudio de la Parte 2 del ensamblaje simplificado de la NanoPla .....	79
Anexo 5: Evolución de los diseños soporte y adaptadores para sensores .....	83
Anexo 6: Dimensionado de los canales del soporte del sensor para alojar los cilindros .....	90
Anexo 7: Simulación de los diseños finales del soporte-adaptador-sensor .....	91
Anexo 8: Simulación del diseño del soporte de la nanoposicionadora.....	101
Anexo 9: Código Matlab del modelo matemático de la NanoPla .....	105
Anexo 10: Modelo matemático del soporte externo del confocal y su código Matlab .....	111

## Índice de ilustraciones de anexos

Figura A- 1: Especificaciones de la nanopositionadora comercial de nPoint. Fuente: [7].....	57
Figura A- 2: Dimensiones de la nanopositionadora comercial de nPoint. Fuente: [7].....	58
Figura A- 3: Luz monocromática en un sensor confocal. Fuente: [18].....	59
Figura A- 4: Esquema de un sensor confocal cromático. Fuente: [18].....	59
Figura A- 5: Controlador CCS Optima Plus de la marca Stil. Fuente: [18] .....	60
Figura A- 6: Lápiz óptico y cable de fibra óptica. Fuente: [18] .....	60
Figura A- 7: Lápiz óptico. Fuente: [18] .....	61
Figura A- 8: Características del sensor confocal. Fuente: [18] .....	62
Figura A- 9: Sensor táctil Heidenhain MT1200. Fuente: [19] .....	63
Figura A- 10: Micrómetro manual DM-13L. Fuente: [20].....	64
Figura A- 11: Especificaciones del micrómetro manual DM-13L. Fuente: [20] .....	64
Figura A- 12: Dimensiones del micrómetro manual DM-13L. Fuente: [20].....	65
Figura A- 13: Micrómetro motorizado M-230.10. Fuente: [21] .....	65
Figura A- 14: Especificaciones del micrómetro motorizado M-230.10 (I). Fuente: [21] .....	66
Figura A- 15: Especificaciones del micrómetro motorizado M-230.10 (II). Fuente: [21] .....	66
Figura A- 16: Dimensiones del micrómetro motorizado M-230.10. Fuente: [21].....	67
Figura A- 17: Propiedades de aleación de aluminio 7075-T6. Fuente: Solid-Edge. .....	70
Figura A- 18: Propiedades de acero inoxidable 304. Fuente: Solid-Edge.....	70
Figura A- 19: Propiedades del latón. Fuente: Solid-Edge.....	70
Figura A- 20: Ensamblaje de la Parte 1 del ensamble simplificado de la NanoPla.....	71
Figura A- 21: Restricción - Parte 1 del ensamble simplificado de la NanoPla.....	71
Figura A- 22: Desplazamientos 21°C - Parte 1 del ensamblaje simplificado de la NanoPla. ....	72
Figura A- 23: Desplazamientos en soporte 21°C - Parte 1 del ensamblaje simplificado de la NanoPla....	73
Figura A- 24: Tensiones 21°C - Parte 1 del ensamblaje simplificado de la NanoPla. ....	73
Figura A- 25: Tensiones 21°C (vista inferior) - Parte 1 del ensamblaje simplificado de la NanoPla. ....	74
Figura A- 26: Tensiones en soporte 21°C - Parte 1 del ensamblaje simplificado de la NanoPla. ....	74
Figura A- 27: Tensiones en soporte 21°C (vista detalle) - Parte 1 del ensamblaje simplificado de la NanoPla.....	75
Figura A- 28: Desplazamientos 19°C - Parte 1 del ensamblaje simplificado de la NanoPla. ....	75
Figura A- 29: Desplazamientos en soporte 19°C - Parte 1 del ensamblaje simplificado de la NanoPla....	76
Figura A- 30: Desplazamientos en soporte 19°C (vista detalle) - Parte 1 del ensamblaje simplificado de la NanoPla.....	76
Figura A- 31: Tensiones 19°C - Parte 1 del ensamblaje simplificado de la NanoPla. ....	77
Figura A- 32: Tensiones 19°C (vista superior) - Parte 1 del ensamblaje simplificado de la NanoPla.....	77

Figura A- 33: Tensiones 19°C (zona sensor) - Parte 1 del ensamblaje simplificado de la NanoPla.....	78
Figura A- 34: Ensamblaje de la Parte 2 del ensamblaje simplificado de la NanoPla.....	79
Figura A- 35: Restricción - Parte 2 del ensamblaje simplificado de la NanoPla.....	79
Figura A- 36: Desplazamientos 21°C - Parte 2 del ensamblaje simplificado de la NanoPla .....	80
Figura A- 37: Desplazamientos en soporte 21°C - Parte 2 del ensamblaje simplificado de la NanoPla.....	81
Figura A- 38: Desplazamientos 19°C - Parte 2 del ensamblaje simplificado de la NanoPla .....	81
Figura A- 39: Desplazamientos en soporte 19°C (vista detalle) - Parte 2 del ensamblaje simplificado de la NanoPla.....	82
Figura A- 40: Soporte sensor - Diseño inicial.....	83
Figura A- 41: Soporte sensor - Diseño segundo.....	84
Figura A- 42: Soporte sensor - Diseño tercero. ....	85
Figura A- 43: Adaptador sensor confocal - Diseño tercero. ....	85
Figura A- 44: Adaptador sensor táctil - Diseño tercero.....	86
Figura A- 45: Zona de sujeción del sensor táctil. ....	86
Figura A- 46: Distancia óptima para maximización de la altura de la muestra.....	87
Figura A- 47: Soporte sensor - Diseño cuarto.....	87
Figura A- 48: Adaptador sensor confocal - Diseño cuarto.....	88
Figura A- 49: Adaptador sensor táctil - Diseño cuarto.....	89
Figura A- 50: Dimensionado de canales del soporte para cilindros.....	90
Figura A- 51: Propiedades del acero. Fuente: Solid-Edge. ....	92
Figura A- 52: Propiedades del neodimio.....	92
Figura A- 53: Tensiones 21°C - Simulación soporte sensor confocal. ....	93
Figura A- 54: Tensiones 21°C (detalle fijación sensor) - Simulación soporte sensor confocal. ....	93
Figura A- 55: Desplazamientos 21°C - Simulación soporte sensor confocal. ....	94
Figura A- 56: Desplazamientos 21°C (detalle punta sensor) - Simulación soporte sensor confocal.....	94
Figura A- 57: Desplazamientos 19°C - Simulación soporte sensor confocal. ....	95
Figura A- 58: Tensiones 21°C - Simulación soporte sensor táctil. ....	96
Figura A- 59: Tensiones 21°C (vistas detalles) - Simulación soporte sensor táctil.....	96
Figura A- 60: Desplazamientos 21°C - Simulación soporte sensor táctil.....	97
Figura A- 61: Desplazamientos en Z para 21°C (vista trasera) - Simulación soporte sensor táctil. ....	97
Figura A- 62: Desplazamientos en Z para 21°C (vista trasera-detalle) - Simulación soporte sensor táctil. ....	97
Figura A- 63: Desplazamientos 21°C (detalle punta sensor) - Simulación soporte sensor táctil.....	98
Figura A- 64: Desplazamientos 19°C - Simulación soporte sensor táctil.....	99
Figura A- 65: Desplazamientos en Z para 19°C - Simulación soporte sensor táctil. ....	99
Figura A- 66: Desplazamientos 19°C (detalle punta sensor) - Simulación soporte sensor táctil. ....	100
Figura A- 67: Tensiones 21°C - Simulación soporte nanoposicionadora.....	102
Figura A- 68: Tensiones 21°C (detalle cilindros) - Simulación soporte nanoposicionadora.....	102
Figura A- 69: Desplazamientos 21°C - Simulación soporte nanoposicionadora.....	103
Figura A- 70: Desplazamientos 21°C (detalle esquina nanoposicionadora) - Simulación soporte nanoposicionadora.....	103
Figura A- 71: Desplazamientos 21°C (detalle cilindros) - Simulación soporte nanoposicionadora. ....	104

## Índice de tablas de anexos

Tabla 1: Errores de la nanoposicionadora.....	57
Tabla 2: Errores del sensor confocal.....	60

## Anexo 1: Principales componentes

### Nanopositionadora comercial de nPoint [7]

El modelo de la posicionadora es NPXY100Z10A de la marca nPoint. 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.

Los errores de la nanopositionadora se muestran resumidos en la Tabla 1.

Tabla 1: Errores de la nanopositionadora

Fuente de error	Parte	Descripción	Vector de error	Valor	Distribución de probabilidad	Incertidumbre estándar [nm]
Nanopositionadora	{N} - {S}	Errores lineales	$\vec{l}_{error,x}^{(S)}$	0,05%	Uniforme	$\pm 14,4^1$
			$\vec{l}_{error,y}^{(S)}$	0,5%		$\pm 1,4^1$
	Ruido de posicionamiento	$\phi_x = \phi_y$	0,5 nm	Uniforme	$\pm 0,5$	
			$\phi_z$		$\pm 0,1$	

<sup>1</sup> Depende de la posición. Valor mostrado para la posición X= 50  $\mu\text{m}$ ; Y= 50  $\mu\text{m}$ ; Z= 5  $\mu\text{m}$  de la etapa del piezo (escenario más desfavorable).

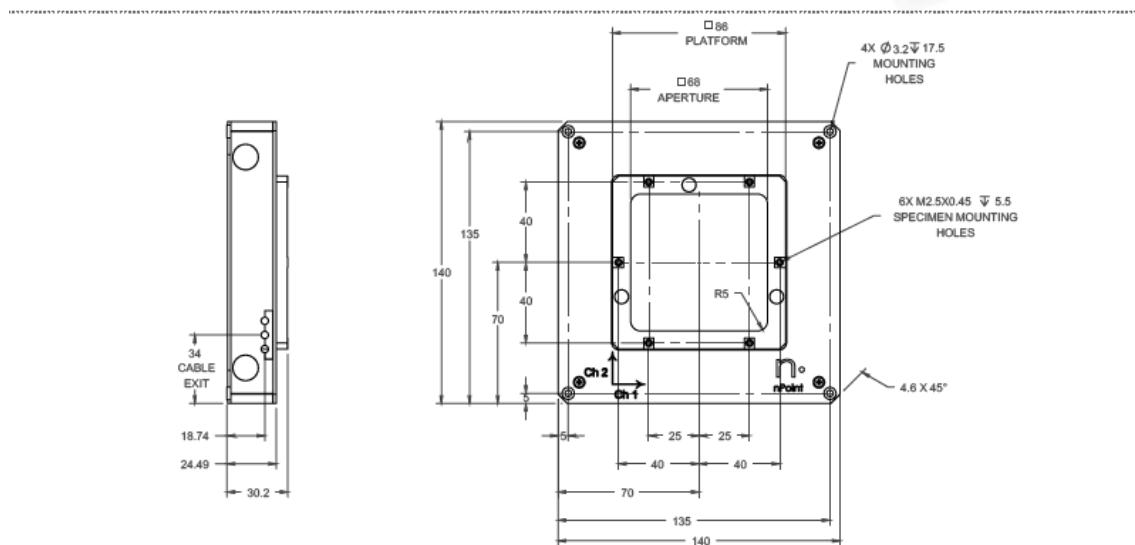
Las especificaciones y dimensiones de la nanopositionadora se muestran a continuación.

#### Specifications

Range ( $\mu\text{m}$ )	100 x 100 x 10		The NPXY100Z10A is a closed-loop XYZ nanopositioner with 100 $\mu\text{m}$ x 100 $\mu\text{m}$ x 10 $\mu\text{m}$ 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.	
Footprint (mm)	140 x 140 x 30			
Aperture (mm)	68 x 68			
Material	Aluminum			
Max Load (kg)	1			
	<b>XY</b>	<b>Z</b>		
Position Noise (nm)	0.5	0.1	<b>Application Examples</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Near-Field Scanning Optical Microscopy</li> <li>• Scanning Probe Microscopy</li> <li>• Optical Microscopy</li> <li>• Lithography</li> <li>• Nanometer-scale Manipulation</li> <li>• Metrology</li> <li>• Optical Fiber Alignment</li> </ul>	
Small Signal Settling Time (ms/1 $\mu\text{m}$ 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			

Figura A- 1: Especificaciones de la nanopositionadora comercial de nPoint. Fuente: [7]

## Installation



www.npoint.com  
sales@npoint.com

sales: 608.824.1770  
fax: 608.824.1774

3030 Laura Ln., #100  
Middleton, WI 53562

Figura A- 2: Dimensiones de la nanoposicionadora comercial de nPoint. Fuente: [7]

### Sensor confocal

El sensor confocal estudiado es un sensor confocal cromático y su principio de funcionamiento es el siguiente. Una fuente de luz (en el lápiz óptico) emite un haz de luz blanca que se descompone en los diferentes colores que la componen, de forma que cada luz monocromática tiene asociada una longitud de onda y un plano focal distinto. Dichos 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 Figura A- 3. Este fotodetector es un espectómetro que analiza el espectro de frecuencias, de forma que puede identificar a qué luz cromática pertenece el plano focal en el que se sitúa la muestra y así conocer su posición, es decir, la altura de la misma (Figura A- 4).

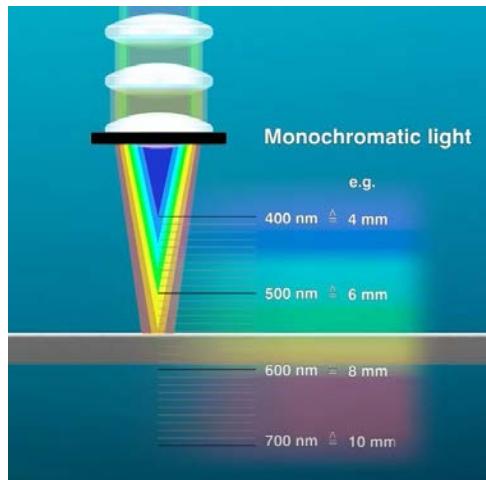


Figura A- 3: Luz monocromática en un sensor confocal. Fuente: [18]

Figura A. 1

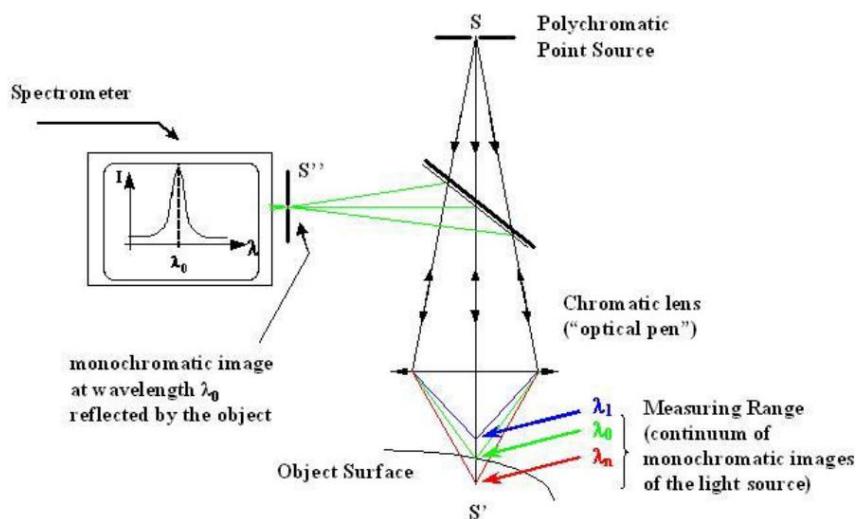


Figura A- 4: Esquema de un sensor confocal cromático. Fuente: [18]

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  $\mu\text{m}$  y con una resolución de 0,122  $\mu\text{m}$ . La dimensión que va a medir el sensor es la componente z (la altura) de la muestra que se encuentre sobre el portamuestras.

Los errores del sensor confocal se muestran resumidos en la Tabla 2.

Tabla 2: Errores del sensor confocal

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

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

El sensor está compuesto por el controlador CCS Optima Plus de la marca Stil (Figura A- 5), el lápiz óptico, y el cable de fibra óptica (Figura A- 6).

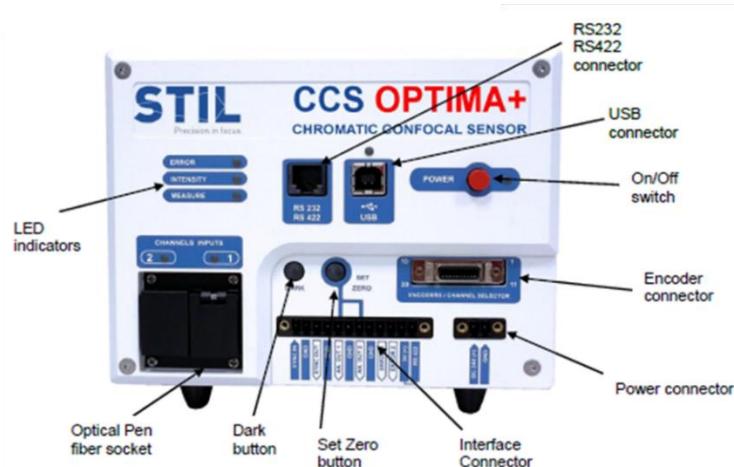


Figura A- 5: Controlador CCS Optima Plus de la marca Stil. Fuente: [18]



Figura A- 6: Lápiz óptico y cable de fibra óptica. Fuente: [18]

Este lápiz óptico tiene un peso de 155 g y requiere una distancia de trabajo mínima de 16,2 mm. El punto determinado por la distancia mínima de trabajo es nombrado en el presente trabajo como '*punto focal superior*' (ver imagen inferior izquierda de la Figura A- 7). La medida que proporciona el sensor se da en micrómetros y el origen de la medida está en el '*punto focal superior*', por lo que el rango de trabajo comienza a partir de este punto (ver imagen inferior derecha de la Figura A- 7). Fuera de dicho rango de trabajo, el valor de la medida del confocal es siempre nulo.

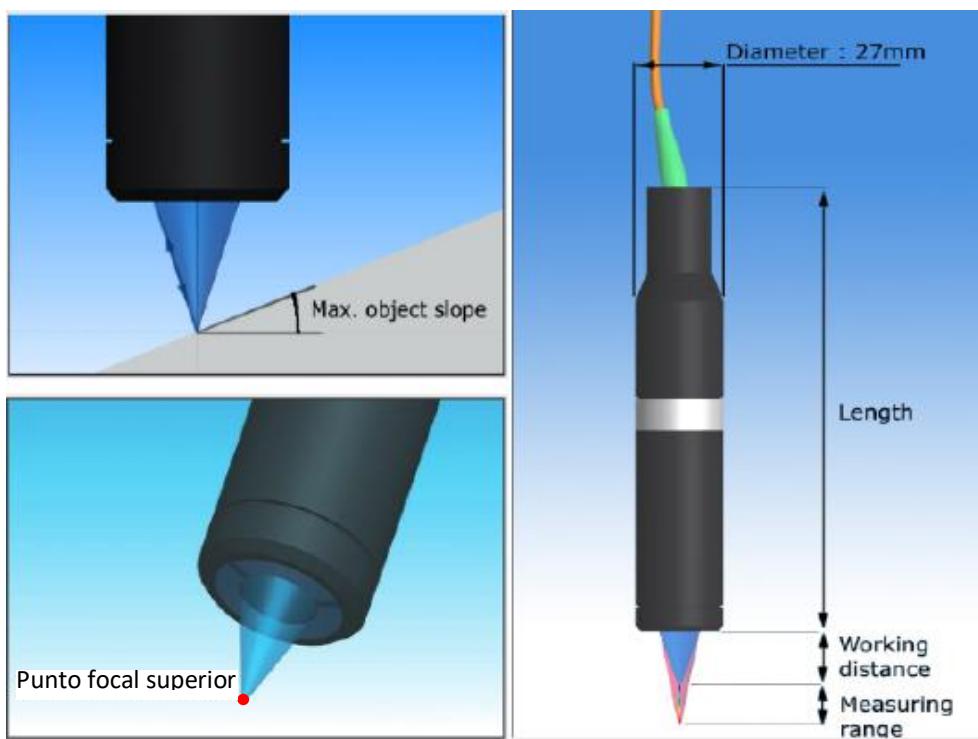


Figura A- 7: Lápiz óptico. Fuente: [18]

Las características del sensor confocal estudiado se muestran en la Figura A- 8.

CL-MG Line Specifications for CCS Optima+ Controller														
Model		CL0 <sup>(1)</sup>	CL1		CL2		CL3		CL4		CL5		CL6	
Measuring range <sup>(1)</sup>	µm	100	150		400		1300		4000		12000		24000	
Working distance <sup>(2)</sup>	mm	2.69		3.35		10.8		12.0		16.2		25.9		21.5
Max. sample slope <sup>(3)</sup>	deg	±42°		±42.5°		±28°		±25°		±21°		±14°		±8.5°
Reference plate <sup>(4)</sup>	-	No		No		Yes		Yes		Yes		Yes		No
Axial model <sup>(5)</sup>	-	Standard												
Radial model <sup>(5)</sup>	-	Optional												
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
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
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
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
LATERAL (XY) PROPERTIES														
Spot size <sup>(12)</sup>	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
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
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
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
Lateral resolution <sup>(6)</sup>	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
PHOTOMETRIC EFFICIENCY <sup>(7)</sup>														
Collected energy (relative)		0.5	1.7	3.3	10	2.8	7.9	41	10	57	25	91	33	100
MECHANICAL INTERFACE														
Length <sup>(8)</sup>	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
Diameter	mm	27	27	27	27	27	27	27	27	27	27	27	27	27
Weight <sup>(8)</sup>	g	227	192	268	195	248	190	189	215	214	155	140	175	160

Figura A- 8: Características del sensor confocal. Fuente: [18]

### Sensor táctil

El segundo sensor estudiado en el presente trabajo es el sensor táctil de la marca “Heidenhain”, modelo MT1200. Para realizar la medición, el sensor táctil debe estar en contacto con la muestra a través de la punta del vástago. El sensor se encuentra en una posición fija, de forma que conoce la altura de la muestra en función de lo extendido o recogido que tenga el vástago.

El sensor táctil de la marca “Heidenhain”, modelo MT1200 tiene una precisión de 0,2 µm en todo el recorrido de medición (12 mm) y permite medir diversas piezas en un mismo dispositivo de medición (es decir, sin tener que cambiar frecuentemente la configuración).

#### HEIDENHAIN-METRO MT 1200/MT 2500

High accuracy	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>\pm 0.2 \mu\text{m}</math> system accuracy</li> </ul>
High repeatability	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Repeatability typically <math>&lt; 0.03 \mu\text{m}</math> with 12 mm measuring range</li> </ul>
Zerodur scale	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Close to 0 ppm/K scale expansion between 0 °C and 50 °C</li> <li>• Provides the true measured value</li> </ul>
Actuation by cable-type lifter	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Defined velocity of the plunger</li> <li>• No counting errors</li> </ul>
Ball-bearing guide	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ball-bearing guide with low friction</li> <li>• High-precision measuring loop</li> </ul>

#### Properties

Measuring range	12 or 25 mm
System accuracy	$\pm 0.2 \mu\text{m}$
Repeatability	MT 1200: $< 0.03 \mu\text{m}$ MT 2500: $< 0.09 \mu\text{m}$
Short-range accuracy	MT 1200: $< 0.03 \mu\text{m}$ MT 2500: $< 0.04 \mu\text{m}$
Plunger actuation	By measured object, cable-type lifter or pneumatic
Interface	1 V <sub>pp</sub> , TTL



Figura A- 9: Sensor táctil Heidenhain MT1200. Fuente: [19]

### Tornillos micrométricos

Se emplean tres tornillos micrométricos, dos manuales y uno motorizado.

Los micrómetros manuales son el modelo DM-13L de la marca micro-controle del grupo Newport [20]. 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  $\mu\text{m}$ ; mientras que el micrómetro de alta resolución permite un posicionamiento ultrafino en 0,2 mm de recorrido, con una sensibilidad de 0,1  $\mu\text{m}$ . 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.

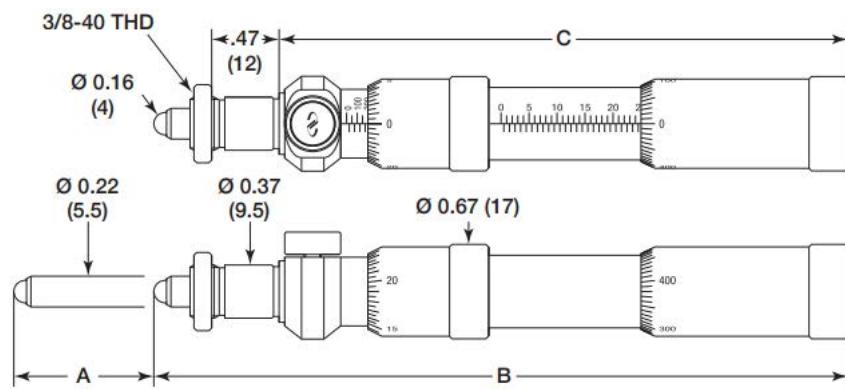


Figura A- 10: Micrómetro manual DM-13L. Fuente: [20]

#### – Specifications

Type	Differential Micrometer	Fine Travel	0.2 mm
Travel Range	13.0 mm	Graduations, Fine	0.5 $\mu\text{m}$
Drive Type	Knob	Sensitivity	0.1 $\mu\text{m}$
Graduations	10 $\mu\text{m}$	Lock	Side Lock
Axial Load Capacity	49 N		

Figura A- 11: Especificaciones del micrómetro manual DM-13L. Fuente: [20]



Dimensions [in. (mm)]			
Model	A	B	C
DM-6L	0.24 +0.008 (6 +0.2)	3.33 (85)	2.50 (63.6)
<b>DM-13L</b>	<b>0.51 +0.008 (13 +0.2)</b>	<b>3.73 (95)</b>	<b>3.06 (77.6)</b>
DM-25L	0.98 +0.008 (25 +0.2)	4.88 (124)	4.09 (101.6)

Figura A- 12: Dimensiones del micrómetro manual DM-13L. Fuente: [20]

En cuanto al micrómetro motorizado, se trata del modelo M-230.10 de la marca PI [21]. Este micrómetro permite un movimiento incremental con una repetibilidad de solo 100 nm.



Figura A- 13: Micrómetro motorizado M-230.10. Fuente: [21]

En las Figura A- 14 y Figura A- 15 se muestran sus especificaciones y en la Figura A- 16 se muestra el plano del micrómetro.

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 A- 14: Especificaciones del micrómetro motorizado M-230.10 (I). Fuente: [21]

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 A- 15: Especificaciones del micrómetro motorizado M-230.10 (II). Fuente: [21]

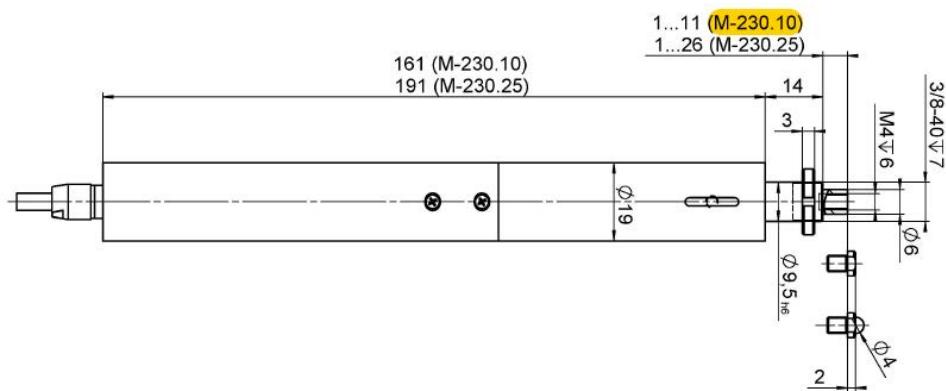


Figura A- 16: Dimensiones del micrómetro motorizado M-230.10. Fuente: [21]

## Anexo 2: Ensamble de los elementos estructurales de la NanoPla que afectan a la medición

Antes de nada, se va a explicar el motivo del diseño básico del sensor confocal. El sensor confocal está constituido por varios materiales. Sin embargo, se le debe de asignar un material en Solid Edge para poder simularlo. Dado que el material de la carcasa del sensor es aluminio 7075-T6 y dicho sensor presenta un bajo coeficiente de expansión (puesto que está internamente formado por lentes ópticas) se le asigna este material. Como se quiere conservar el diámetro del sensor, se modifica su altura para conservar su peso (155 g).

El ensamblaje de los elementos estructurales de la NanoPla que afectan a la medición se ha simulado en Solid Edge pieza a pieza estableciendo conexiones entre ellas. Los pasos de estas uniones son los siguientes:

1. Se coloca la base inferior como pieza inicial.
2. Se inserta una de las piezas de flexión para el marco metrológico inferior. Las conexiones son tres: contacto entre esta pieza y la base inferior, y dos alineaciones axiales de los ejes de los agujeros existentes en estas piezas para tornillos pasantes. Se insertan y colocan de la misma forma las otras dos piezas de flexión para el marco metrológico inferior.
3. Se inserta el marco metrológico inferior. Las conexiones son tres: contacto entre el marco y una de las piezas de flexión anteriores, y dos alineaciones axiales de los ejes de los agujeros existentes en estas piezas para tornillos pasantes.
4. Se inserta un acople de los tornillos micrométricos. Las conexiones son tres: contacto entre el marco metrológico inferior y el acople, y dos alineaciones axiales de los ejes de los agujeros existentes en estas piezas para tornillos. Se insertan y colocan de la misma forma los otros dos acoplos de los tornillos micrométricos.
5. Se inserta un tornillo micrométrico. Las conexiones son dos: contacto entre el tornillo y su acople, y alineación axial de ambos. Se insertan y colocan de la misma forma los otros dos tornillos micrométricos.
6. Se inserta la nanoposicionadora. Las conexiones son tres: contacto entre los tornillos micrométricos y la nanoposicionadora (al estar los tornillos extendidos con la misma longitud esta conexión es análoga a la de un único contacto), y dos relaciones de 'plano central' para que quede la nanoposicionadora centrada en el eje X e Y respecto al marco.
7. Se inserta el portamuestras. Las conexiones son tres: contacto entre la nanoposicionadora y el portamuestras, y dos relaciones de 'plano central' para que quede el portamuestras coincidente en el eje X e Y con la nanoposicionadora.
8. Se inserta un cojinete de aire. Las conexiones son dos: contacto entre el cojinete de aire y la base inferior, y alineación axial de ambos. Se insertan y colocan de la misma forma los otros dos cojinetes de aire.
9. Se inserta una pieza de flexión de los cojinetes de aire. Las conexiones son dos: contacto entre esta pieza de flexión y el cojinete de aire, y alineación axial de ambos. Se insertan y colocan de la misma forma las otras dos piezas de flexión de los cojinetes de aire.
10. Se inserta una tuerca del cojinete. Las conexiones son dos: alineación axial entre la tuerca y la pieza de flexión, y paralelismo con 21 mm de separación entre parte inferior de la tuerca y la superior del cojinete de aire. Se insertan y colocan de la misma forma las otras dos tuercas del cojinete. Cabe reseñar que la distancia de 21 mm ha sido medida en la NanoPla del taller.
11. Se inserta la plataforma móvil. Las conexiones son tres: contacto entre la plataforma móvil y una de las tuercas del cojinete, y dos alineaciones axiales entre las tuercas y los agujeros correspondientes existentes en la plataforma móvil.
12. Se inserta una de las piezas de flexión para el marco metrológico superior. Las conexiones son tres: contacto entre esta pieza y la plataforma móvil, y dos alineaciones axiales de los ejes de los agujeros existentes en estas piezas para tornillos. Se insertan y colocan de la misma forma las otras dos piezas de flexión para el marco metrológico superior.

13. Se inserta el marco metrológico superior. Las conexiones son tres: contacto entre el marco metrológico superior y una de las piezas de flexión anteriores, y dos alineaciones axiales de los ejes de los agujeros existentes en estas piezas para tornillos pasantes.
14. Se inserta el soporte del sensor. Las conexiones son tres: contacto entre el soporte del sensor y el marco metrológico superior, y dos alineaciones axiales de los ejes de los agujeros existentes en estas piezas para tornillos pasantes.
15. Se inserta el sensor confocal. Las conexiones son dos: alineación axial entre el sensor y su soporte, y paralelismo con separación entre parte inferior del sensor confocal y la superior del portamuestras. Esta distancia de separación tiene que ser la suma de la distancia de trabajo del sensor confocal (16,2 mm) y el espesor de la muestra.

Para la realización de las simulaciones, es necesario establecer conectores que representen las uniones anteriormente descritas. Los 35 conectores de este ensamblaje son los siguientes:

- Marco metrológico inferior --- Base inferior.
- Marco metrológico inferior --- Piezas de flexión para el marco metrológico inferior. Son 3 conectores dado que hay tres piezas de flexión para el marco metrológico inferior.
- Marco metrológico inferior --- Nanoposicionadora.
- Marco metrológico inferior --- Acoples tornillos micrométricos. Son 3 conectores dado que hay tres acoples tornillos micrométricos.
- Nanoposicionadora --- Portamuestras.
- Nanoposicionadora --- Tornillos micrométricos. Son 3 conectores dado que hay tres tornillos micrométricos.
- Tornillos micrométricos --- Acople tornillos micrométrico. Son 3 conectores dado que hay tres tornillos micrométricos y tres acoples tornillos micrométricos.
- Base inferior --- Cojinetes de aire. Son 3 conectores dado que hay tres cojinetes de aire.
- Cojinetes de aire --- Piezas de flexión de los cojinetes de aire. Son 3 conectores dado que hay tres cojinetes de aire y tres piezas de flexión de los cojinetes de aire.
- Piezas de flexión de los cojinetes de aire --- Tuercas del cojinete. Son 3 conectores dado que hay tres tuercas del cojinete y tres piezas de flexión de los cojinetes de aire.
- Tuercas del cojinete --- Plataforma móvil. Son 3 conectores dado que hay tres tuercas del cojinete.
- Plataforma móvil --- Piezas de flexión para el marco metrológico superior. Son 3 conectores dado que hay tres piezas de flexión para el marco metrológico superior.
- Piezas de flexión para el marco metrológico superior --- Marco metrológico superior. Son 3 conectores dado que hay tres piezas de flexión para el marco metrológico superior.
- Marco metrológico superior --- Soporte del sensor.
- Soporte del sensor --- Sensor confocal.

Por otro lado, la mayoría de las piezas de la NanoPla son de aluminio 7075-T6 (Figura A- 17), a excepción de los tres tornillos micrométricos que son de acero inoxidable 304 (Figura A- 18) y de las tres piezas de flexión de los cojinetes de aire son de latón (Figura A- 19).

Nombre de propiedad	Valor
Densidad	2.795 g/cm <sup>3</sup>
Coeficiente de expansión térmica	0.000023 /C
Conductividad térmica	121.000 W/m-C
Calor específico	920.000 J/kg-C
Módulo de elasticidad	71705.473 MPa
Coeficiente de Poisson	0.33
Límite elástico	503.317 MPa
Tensión de rotura	572.265 MPa
Elongación %	0.00

Figura A- 17: Propiedades de aleación de aluminio 7075-T6. Fuente: Solid-Edge.

Nombre de propiedad	Valor
Densidad	8.027 g/cm <sup>3</sup>
Coeficiente de expansión térmica	0.000017 /C
Conductividad térmica	17.000 W/m-C
Calor específico	502.000 J/kg-C
Módulo de elasticidad	193053.196 MPa
Coeficiente de Poisson	0.29
Límite elástico	255.106 MPa
Tensión de rotura	579.160 MPa
Elongación %	0.00

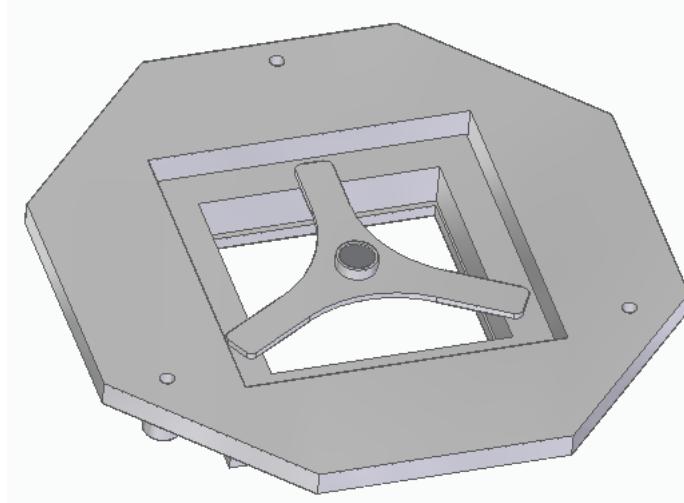
Figura A- 18: Propiedades de acero inoxidable 304. Fuente: Solid-Edge.

Nombre de propiedad	Valor
Densidad	8.470 g/cm <sup>3</sup>
Coeficiente de expansión térmica	0.000020 /C
Conductividad térmica	116.000 W/m-C
Calor específico	377.000 J/kg-C
Módulo de elasticidad	103421.355 MPa
Coeficiente de Poisson	0.32
Límite elástico	413.685 MPa
Tensión de rotura	510.212 MPa
Elongación %	0.00

Figura A- 19: Propiedades del latón. Fuente: Solid-Edge.

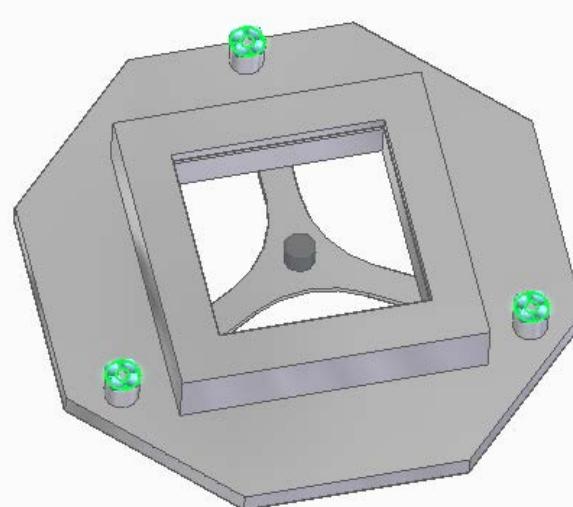
### Anexo 3: Estudio de la Parte 1 del ensamblaje simplificado de la NanoPla

En cuanto al ensamblaje de la primera parte, las piezas que la conforman son: la plataforma móvil, marco metrológico superior, las 3 piezas de flexión para el marco metrológico superior, el soporte del sensor y el sensor confocal. El soporte del sensor aquí analizado es un diseño básico empleado simplemente para la realización de los cálculos iniciales. Lo mismo ocurre con el sensor confocal aquí analizado, que está representado simplemente por un cilindro con el diámetro y peso del sensor confocal real.



*Figura A- 20: Ensamblaje de la Parte 1 del ensamble simplificado de la NanoPla.*

En este ensamblaje se realiza mediante la simulación un estudio de transferencia de calor de estado estable y estudio estático lineal. En este estudio se aplican como cargas, la gravedad y la temperatura ambiente; y como restricción, se fija (impidiéndose los 6 GDL) la superficie inferior de la plataforma móvil que se apoya en las tuercas de los cojinetes.



*Figura A- 21: Restricción - Parte 1 del ensamble simplificado de la NanoPla.*

Además, se aplican los conectores requeridos para resolver el FEM. Estos conectores se realizan primeramente de forma automática, con una distancia de búsqueda de 0,33 mm. Se generan los siguientes 8 conectores:

- Plataforma móvil --- Piezas de flexión para el marco metrológico superior. Son 3 conectores dado que hay tres piezas de flexión para el marco metrológico superior.

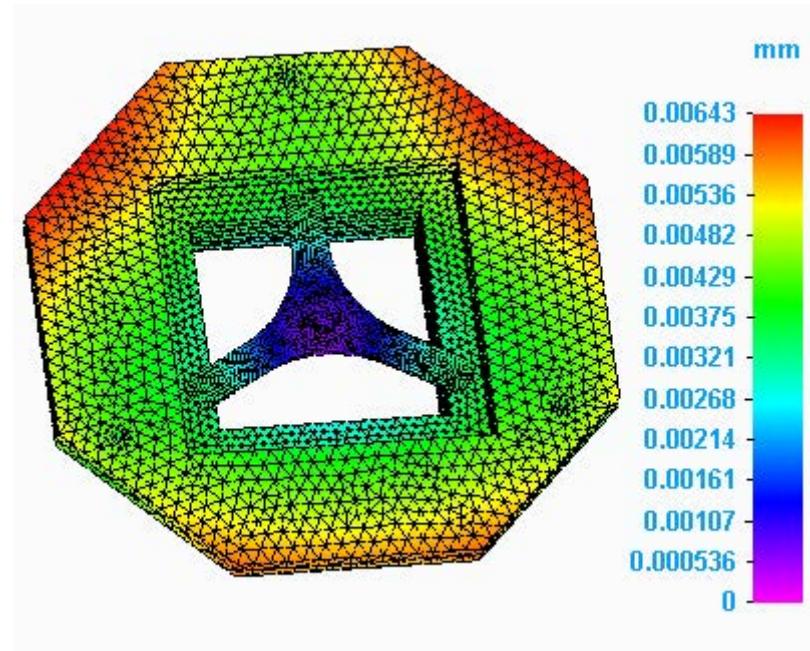
- Piezas de flexión para el marco metrológico superior --- Marco metrológico superior. Son 3 conectores dado que hay tres piezas de flexión para el marco metrológico superior.
- Marco metrológico superior --- Soporte del sensor.
- Soporte del sensor --- Sensor confocal.

A continuación, se realiza el mallado con un tipo de malla tetraédrica. En cuanto al tamaño de malla, Solid Edge establece una escala de 10 niveles (siendo el nivel 1 el más basto y el nivel 10 el más fino) en donde el tamaño de malla es relativo al tamaño y complejidad de las piezas que quieras mallar. En este estudio el tamaño de malla es 8,17 mm (nivel de precisión 6 de 10).

Finalmente se resuelve mediante un solucionador iterativo para obtener resultados de desplazamientos y temperaturas nodales, y tensiones elementales.

Estas simulaciones se resuelven para temperatura ambiente 21°C y 19°C; siendo 20°C la temperatura de referencia. Los resultados de desplazamientos y tensiones obtenidos se muestran a continuación, primero para el caso de 21°C y posteriormente para el caso de 19°C.

Los desplazamientos máximos en el caso de 21°C se dan en las esquinas de los bordes de la plataforma móvil que están más alejados de los apoyos, con un valor máximo de 6,43 µm. Este valor es la magnitud del vector resultante. Cabe destacar que el resultado de este desplazamiento en la componente Z es positivo (perpendicular hacia arriba). El motivo de que el desplazamiento sea en ese sentido es debido a que la diferencia de temperatura afecta más que la gravedad. Esto se estudiará más adelante en el presente trabajo.



*Figura A- 22: Desplazamientos 21°C - Parte 1 del ensamblaje simplificado de la NanoPla.*

El desplazamiento máximo en el soporte del sensor se da en las tres zonas en las que se apoya sobre el marco metrológico superior, con un valor de 2,68 µm en el eje +Z.

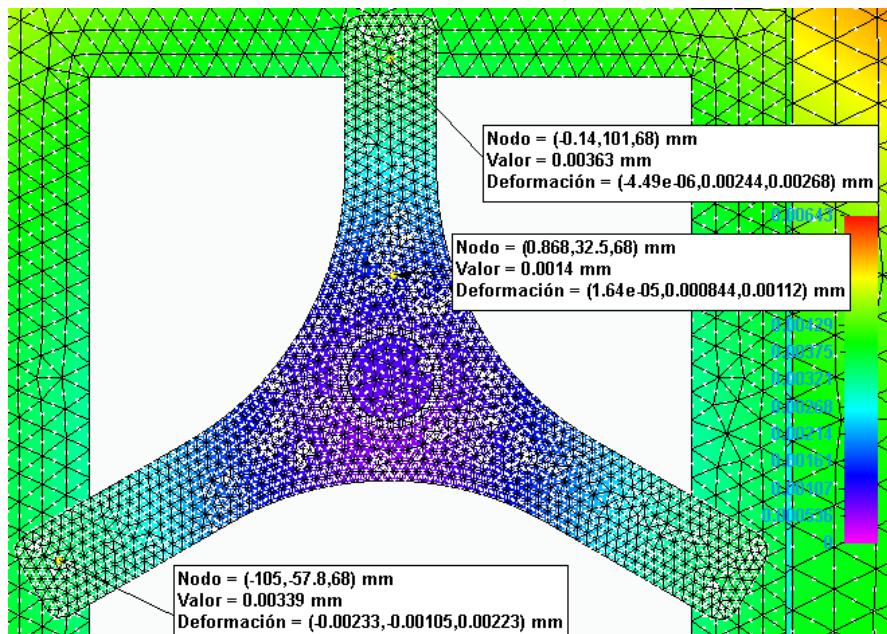


Figura A- 23: Desplazamientos en soporte 21°C - Parte 1 del ensamblaje simplificado de la NanoPla.

Las tensiones máximas en el caso de 21°C se dan en los apoyos, con un valor máximo de 6,33 MPa. En el resto de las zonas, las tensiones son bajas.

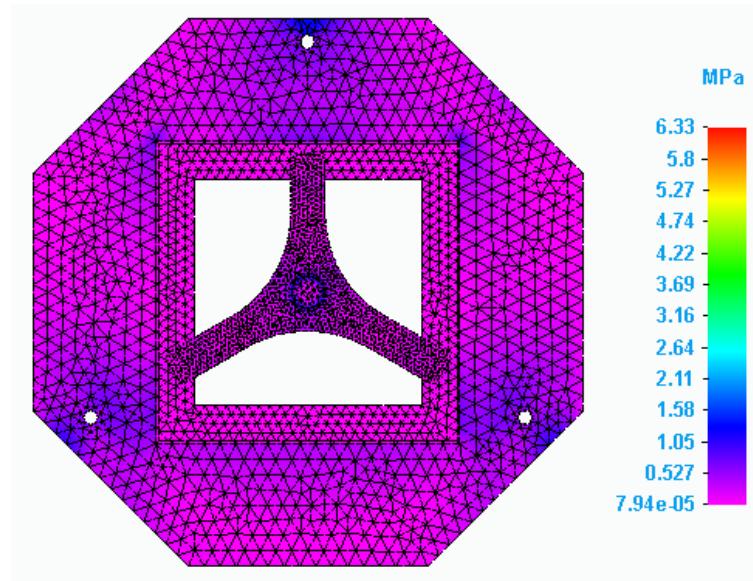


Figura A- 24: Tensiones 21°C - Parte 1 del ensamblaje simplificado de la NanoPla.

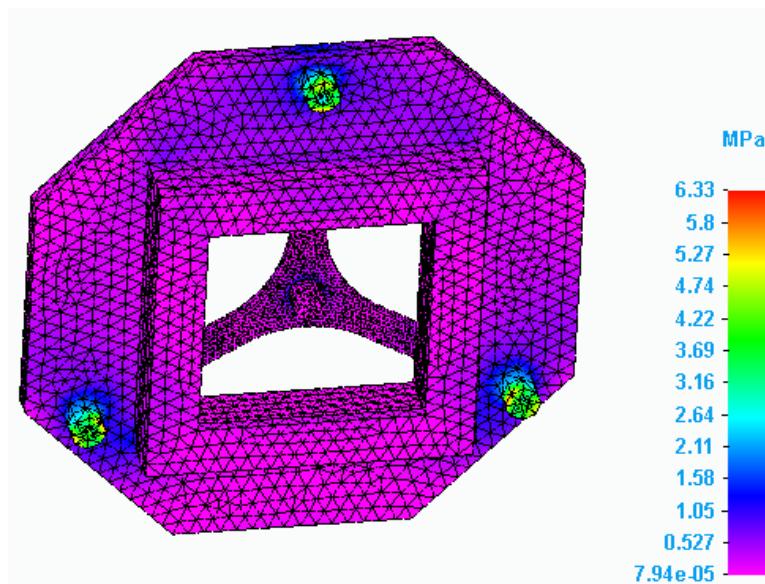


Figura A- 25: Tensiones 21ºC (vista inferior) - Parte 1 del ensamblaje simplificado de la NanoPla.

En el soporte del sensor, solo aparece una ligera tensión en la zona que sujeta al sensor, donde existen 0,868 MPa.

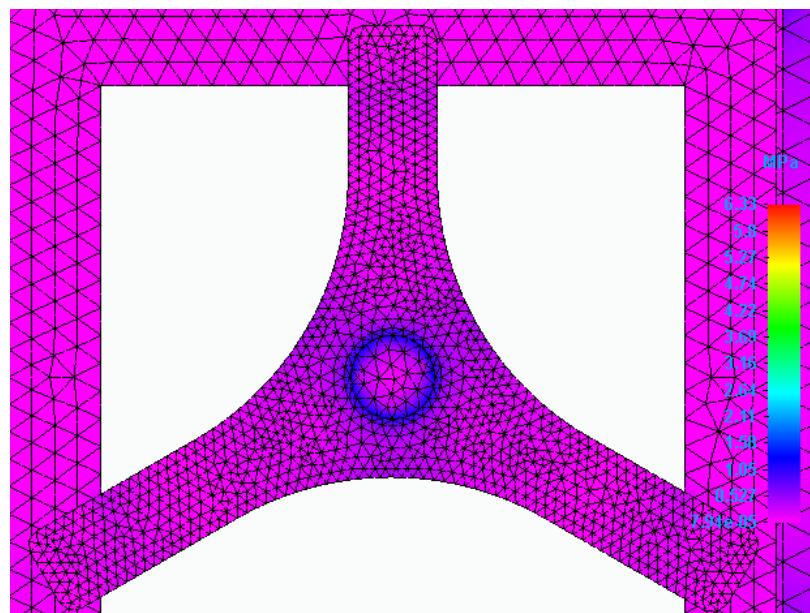
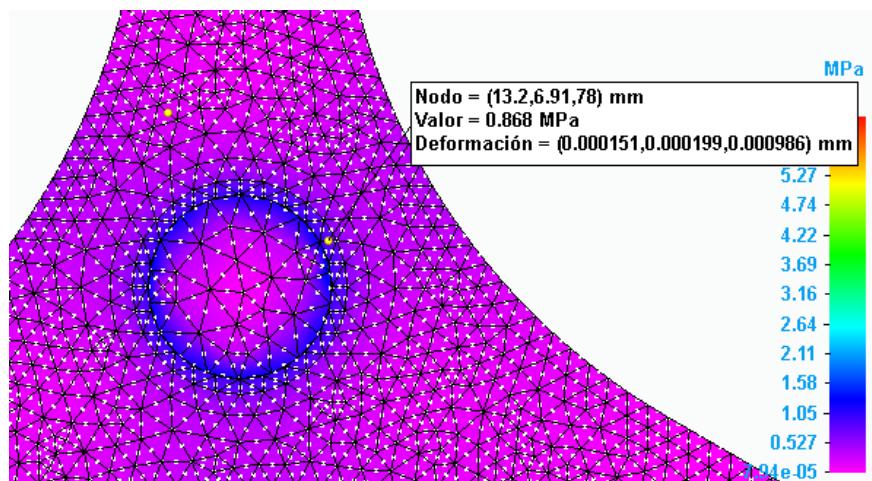
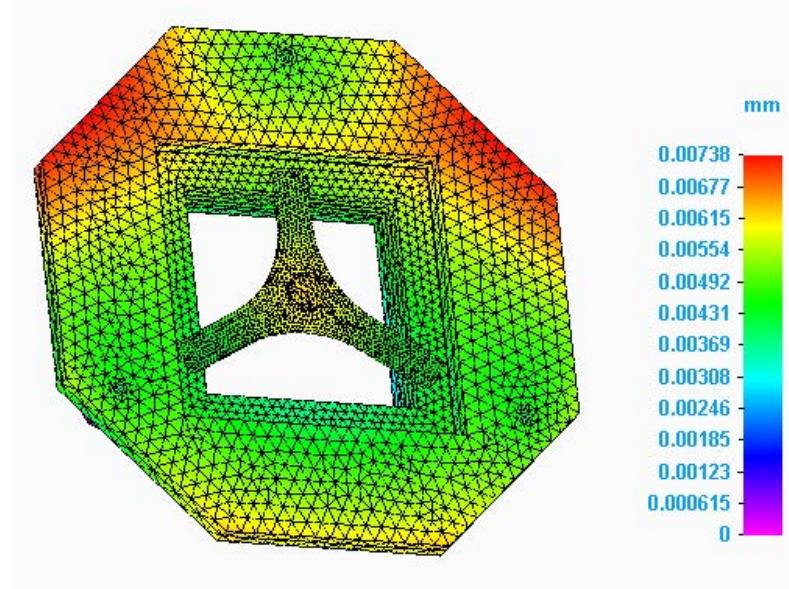


Figura A- 26: Tensiones en soporte 21ºC - Parte 1 del ensamblaje simplificado de la NanoPla.



*Figura A- 27: Tensiones en soporte 21°C (vista detalle) - Parte 1 del ensamblaje simplificado de la NanoPla.*

En cuanto a los desplazamientos y las tensiones para el caso de 19°C, estos son algo mayores a los obtenidos con 21°C de temperatura ambiente. En este caso se dan 7,38  $\mu\text{m}$  de desplazamiento máximo. Este valor es la magnitud del vector resultante. El resultado de este desplazamiento en la componente Z es negativo (perpendicular hacia abajo), a diferencia del caso de 21°C que el desplazamiento se producía en el eje +Z. Las zonas en las que aparecen son las mismas que en el caso de 21°C, es decir, en las esquinas de los bordes de la plataforma móvil que están más alejados de los apoyos superior.



*Figura A- 28: Desplazamientos 19°C - Parte 1 del ensamblaje simplificado de la NanoPla.*

Con relación a los mayores desplazamientos en el soporte del sensor, tienen un valor de 6,13  $\mu\text{m}$  en el eje -Z en la zona en la que se sujeta al sensor. Caso diferente a lo que ocurría con 21°C donde el máximo desplazamiento se daba en la zona que se apoya sobre el marco metrológico superior y en sentido +Z. Esto se debe al fenómeno contracción/expansión que se estudia más adelante.

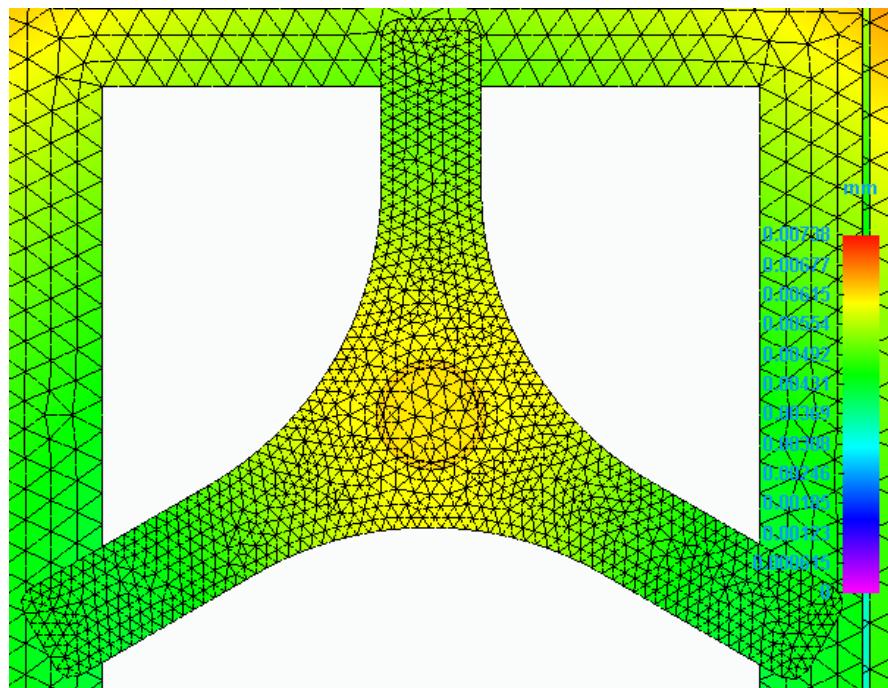


Figura A- 29: Desplazamientos en soporte 19°C - Parte 1 del ensamblaje simplificado de la NanoPla.

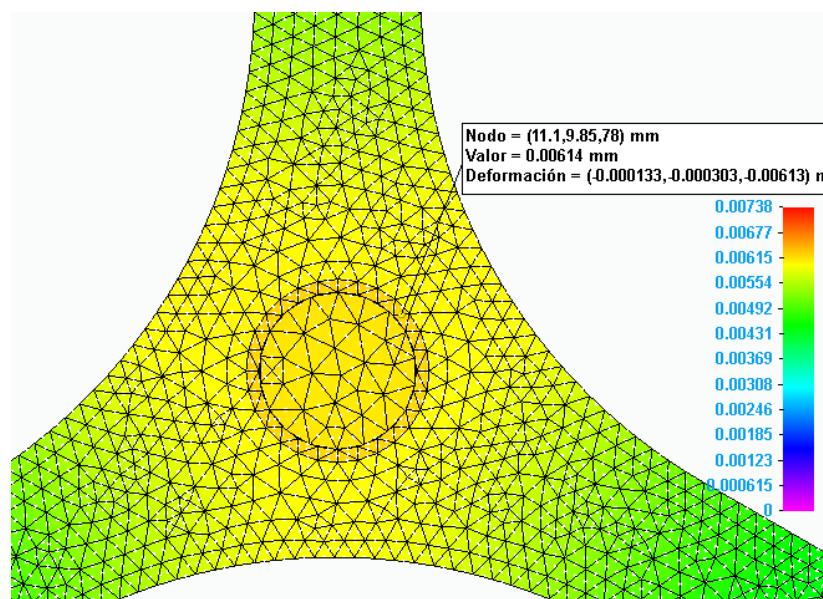


Figura A- 30: Desplazamientos en soporte 19°C (vista detalle) - Parte 1 del ensamblaje simplificado de la NanoPla.

En cuanto a las tensiones en el caso de 19°C, al igual que con los desplazamientos, los máximos se dan en las mismas zonas que para el caso de 21°C, es decir, en los apoyos. En este caso presentan un valor de 6,57 MPa, ligeramente superior al del caso de 21°C.

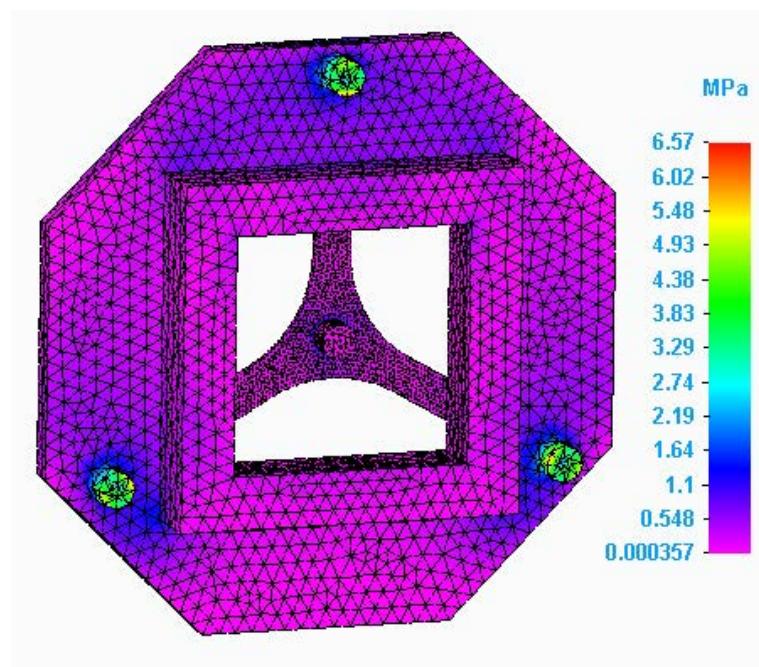


Figura A- 31: Tensiones 19°C - Parte 1 del ensamblaje simplificado de la NanoPla.

En el soporte del sensor, las tensiones son bastante menores a las máximas, y las mayores tensiones en esta zona se dan en la unión con el sensor confocal, con un valor de 0,878 MPa. También ligeramente superior al caso de 21°C.

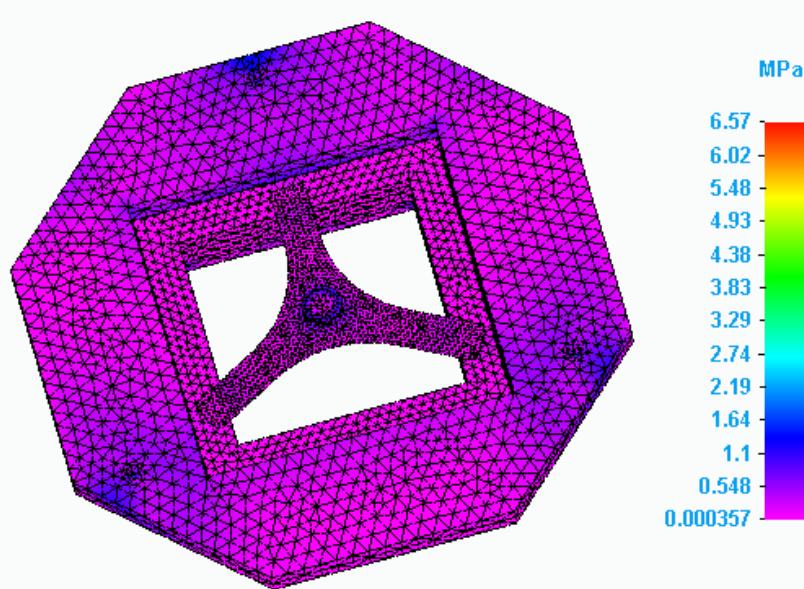


Figura A- 32: Tensiones 19°C (vista superior) - Parte 1 del ensamblaje simplificado de la NanoPla.

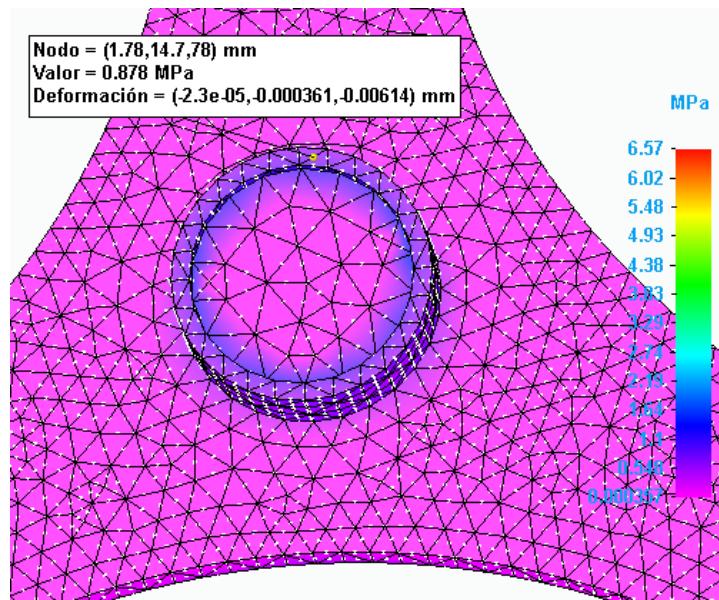
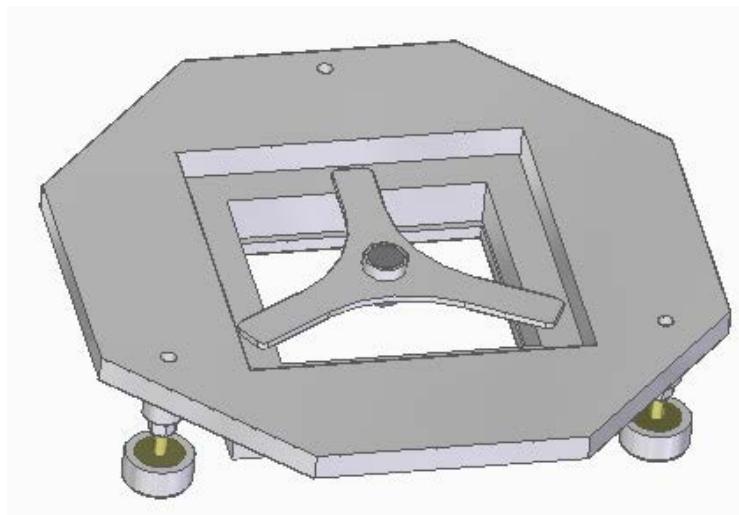


Figura A- 33: Tensiones 19°C (zona sensor) - Parte 1 del ensamblaje simplificado de la NanoPla.

Una vez obtenidos y analizados los resultados de las simulaciones de 21°C y 19°C, se comprueba que los pasos seguidos en dichas simulaciones han sido correctos. Para ello, se repite la simulación de 21°C, pero en esta ocasión estableciendo los conectores entre piezas manualmente. Los resultados obtenidos son idénticos a los obtenidos con los conectores automáticos. De esta forma se confirma que la distancia de búsqueda aplicada en la creación automática de conectores es válida.

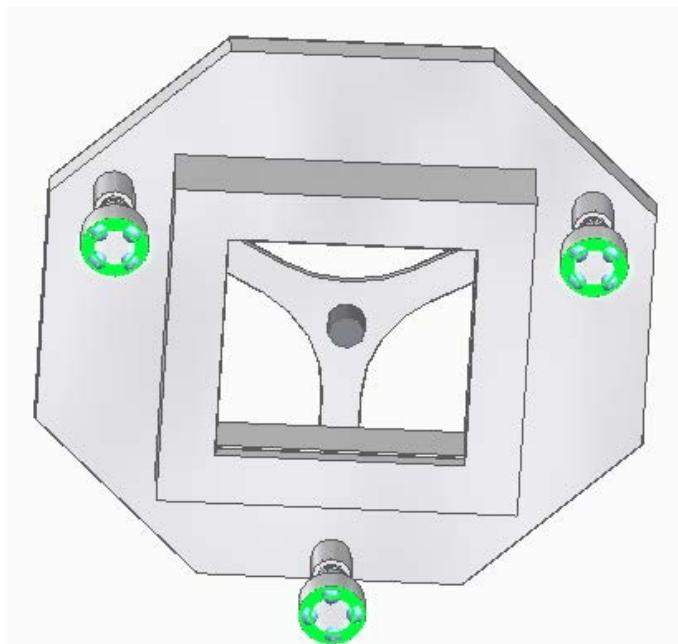
#### Anexo 4: Estudio de la Parte 2 del ensamblaje simplificado de la NanoPla

Analizados los resultados de la primera parte, se estudia la segunda parte, la cual abarca las 7 piezas anteriores y 9 piezas más, que son 3 cojinetes de aire, 3 piezas de flexión de los cojinetes de aire y 3 tuercas del cojinete. Este estudio se lleva a cabo con el objetivo de ver cómo influye el introducir nuevas piezas en los resultados del sensor y del soporte del mismo.



*Figura A- 34: Ensamblaje de la Parte 2 del ensamblaje simplificado de la NanoPla.*

En este ensamblaje se realiza mediante la simulación un estudio de transferencia de calor de estado estable y estudio estático lineal. En este estudio se aplican la gravedad y la temperatura ambiente como cargas, y se fija (impidiéndose los 6 GDL) la superficie inferior del cojinete de aire como se muestra en la Figura A- 35.



*Figura A- 35: Restricción - Parte 2 del ensamblaje simplificado de la NanoPla.*

Además, se aplican de forma automática los conectores requeridos para resolver el FEM, empleándose una distancia de búsqueda de 0,33 mm. Se generan los siguientes 17 conectores:

- Cojinetes de aire --- Piezas de flexión de los cojinetes de aire. Son 3 conectores dado que hay tres cojinetes de aire y tres piezas de flexión de los cojinetes de aire.

- Piezas de flexión de los cojinetes de aire --- Tuerca del cojinete. Son 3 conectores dado que hay tres tuercas del cojinete y tres piezas de flexión de los cojinetes de aire.
- Tuerca del cojinete --- Plataforma móvil. Son 3 conectores dado que hay tres tuercas del cojinete.
- Plataforma móvil --- Piezas de flexión para el marco metrológico superior. Son 3 conectores dado que hay tres piezas de flexión para el marco metrológico superior.
- Piezas de flexión para el marco metrológico superior --- Marco metrológico superior. Son 3 conectores dado que hay tres piezas de flexión para el marco metrológico superior.
- Marco metrológico superior --- Soporte del sensor.
- Soporte del sensor --- Sensor confocal.

A continuación, se realiza el mallado con un tipo de malla tetraédrica de tamaño 3,31 mm (nivel de precisión 6 de 10) y finalmente se resuelve.

Estas simulaciones se hacen para los casos de 21°C y 19°C. En ambos casos, las tensiones máximas aparecen en los apoyos (donde se han restringido los 6 GDL), concretamente en los bordes de estos. Estas tensiones máximas poseen un valor mayor que el obtenido en la Parte 1 correspondiente a su misma temperatura, dado que ahora soportan más peso. En el caso de 21°C de temperatura ambiente la tensión máxima ahora es 9,73 MPa, frente a 6,33 MPa que aparecía en la Parte 1. En el caso de 19°C de temperatura ambiente la tensión máxima ahora es 7,97 MPa, frente a 6,57 MPa que aparecía en la Parte 1.

El campo de tensiones en el soporte del sensor sigue el mismo comportamiento que en la Parte 1 correspondiente a su misma temperatura y con los mismos valores.

En cuanto a los desplazamientos, los máximos obtenidos siguen el mismo patrón que en la simulación de la Parte 1 correspondiente a la misma temperatura; pero ahora abarcan más zona.

Para el caso de 21°C, se observa en la Figura A- 36 que los máximos desplazamientos se encuentran en toda la periferia de la plataforma móvil. Los valores de los desplazamientos son ligeramente menores a los obtenidos en la Parte 1. Esto es debido a que los desplazamientos tienen componente en Z positiva debido al fenómeno de expansión. Al incluir nuevas piezas (por tanto, mayor peso recae en los puntos de apoyo) el efecto de la gravedad es mayor que en la Parte 1, por lo que ahora el desplazamiento en la componente Z sigue siendo positiva, pero de menor valor.

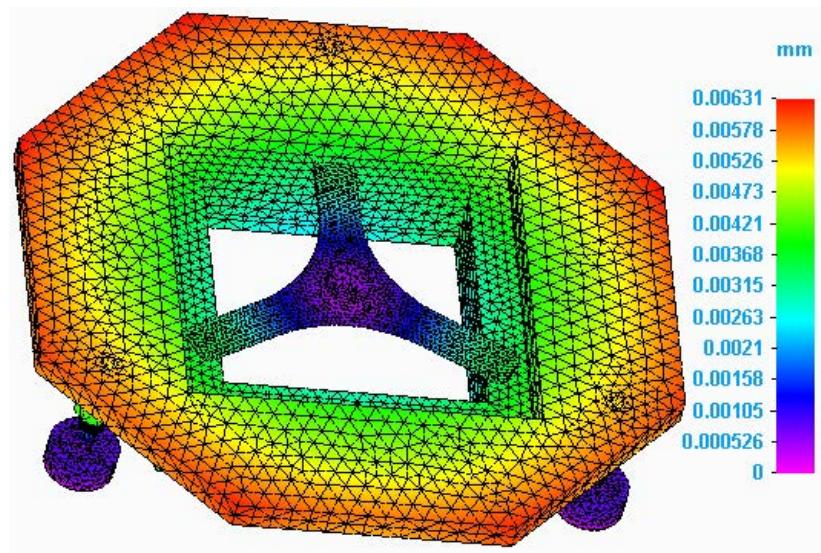


Figura A- 36: Desplazamientos 21°C - Parte 2 del ensamblaje simplificado de la NanoPla.

En el soporte del sensor ocurre lo mismo, el comportamiento que sigue el desplazamiento es el mismo, pero con menor valor que en la Parte 1.

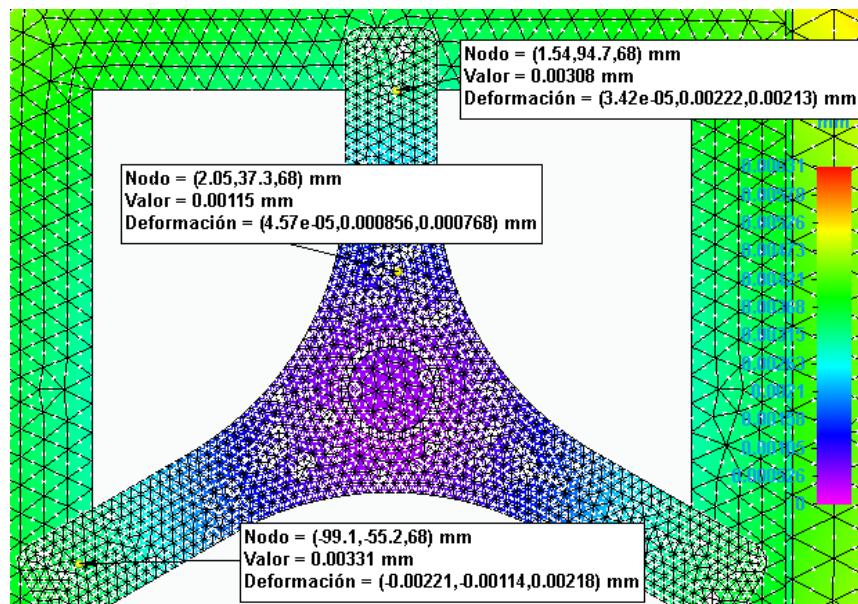


Figura A- 37: Desplazamientos en soporte 21ºC - Parte 2 del ensamblaje simplificado de la NanoPla.

Para el caso de 19ºC, se observa en la Figura A- 38 como los desplazamientos máximos abarcan más zona que en la Parte 1. Sus valores son un poco mayores debido a que la componente en Z era y sigue siendo negativa.

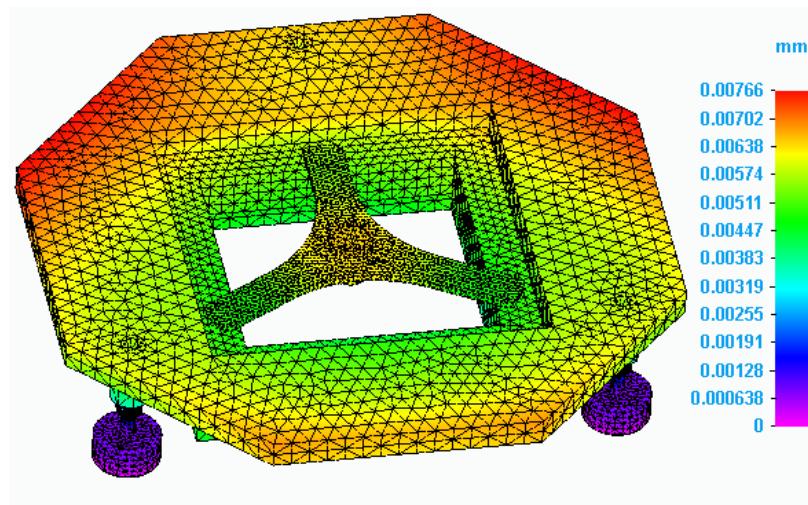


Figura A- 38: Desplazamientos 19ºC - Parte 2 del ensamblaje simplificado de la NanoPla.

El soporte del sensor sufre los mayores desplazamientos en la zona donde sujeción del sensor, con un valor de 6,46  $\mu\text{m}$  (mayor a los 6,14  $\mu\text{m}$  que aparecían en la Parte 1).

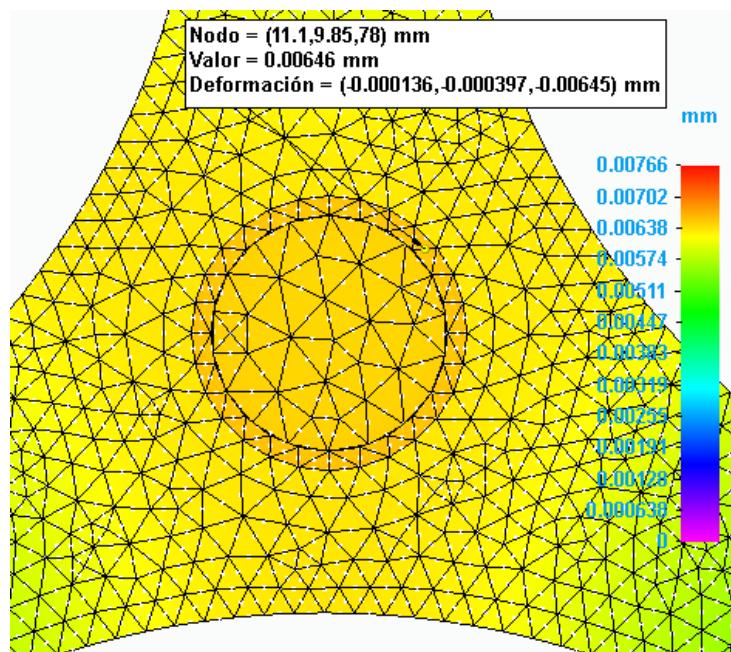


Figura A- 39: Desplazamientos en soporte 19°C (vista detalle) - Parte 2 del ensamblaje simplificado de la NanoPla.

Con todo ello, se puede concluir que las piezas que están presentes tanto en la Parte 1 como en la Parte 2 tienen los mismos resultados de tensión, y que las tensiones máximas aparecen en los apoyos. En cuanto a los desplazamientos, se observa un ligero aumento de la zona de máximos, pero con una ligera diferencia en el valor.

Tras esto, se espera en la Parte 3 (NanoPla completa simplificada) que las piezas que componen la Parte 2 presenten las mismas tensiones y prácticamente los mismos desplazamientos; y que las tensiones máximas tengan un valor mayor (debido a que ahora soportan más peso) y aparezcan en la zona empotrada (cara inferior de la base inferior).

## Anexo 5: Evolución de los diseños soporte y adaptadores para sensores

En este anexo se muestra la evolución de los diseños del soporte del sensor, del adaptador del sensor confocal y del adaptador del sensor táctil. Cabe destacar que inicialmente solo se planteaba el uso del sensor confocal como única herramienta de medida.

### Diseño inicial:

El diseño inicial del soporte se muestra en la Figura A- 40. Este ha sido el soporte empleado en todas las simulaciones realizadas en el Anexo 3: Estudio de la Parte 1 del ensamblaje simplificado de la NanoPla, en el Anexo 4: Estudio de la Parte 2 del ensamblaje simplificado de la NanoPla , y en la Sección 2.2 de la memoria.

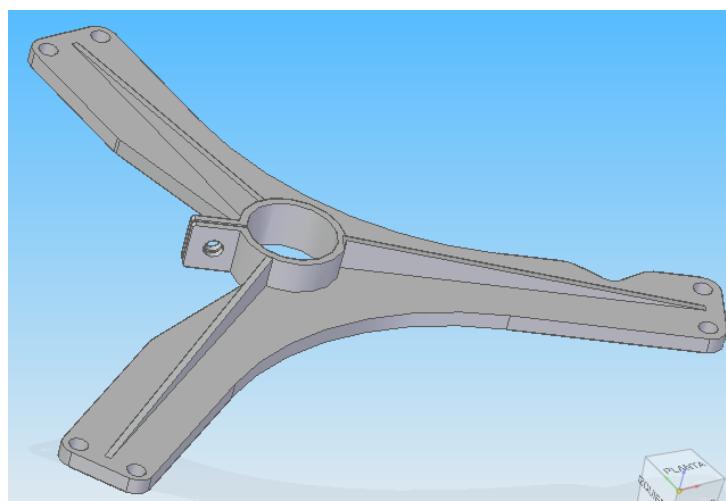


Figura A- 40: Soporte sensor - Diseño inicial.

Esta pieza tiene un peso de 155 g.

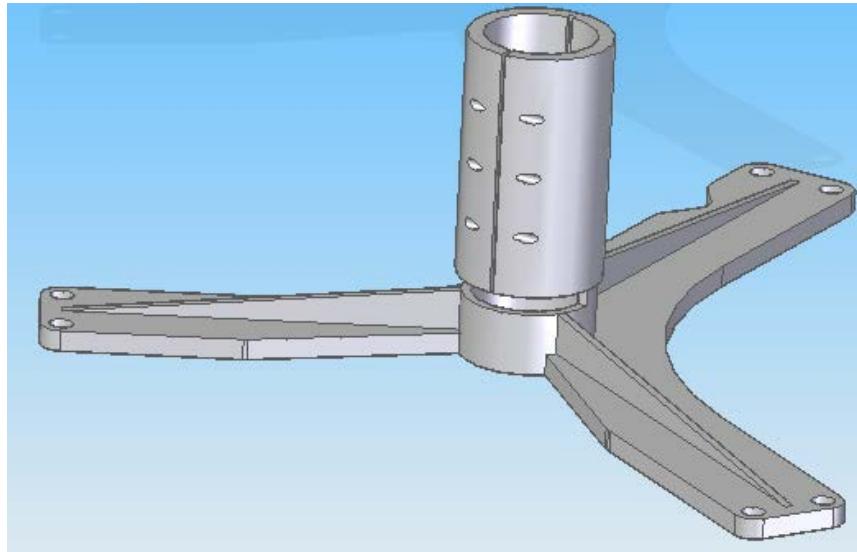
Con la anilla se aprieta el sensor confocal a la altura deseada en función de la altura de la muestra.

La cavidad de la patilla opuesta a la anilla de apriete se debe a que debe salvar uno de los espejos de la NanoPla.

Sin embargo, la anilla se sitúa en la zona más próxima a la muestra. Por tanto, cuando se apriete el tornillo para fijar bien el sensor, se transmitirán tensiones y desplazamientos al sensor, lo que se traduce en errores de medición.

### Diseño segundo

Para evitar el problema anterior, se divide en dos partes la zona de agarre al sensor. De esta forma, se atornilla la parte de arriba, mientras que la tensión generada en el apriete se libera en la cavidad que separa la parte superior de la inferior. La parte inferior sirve para que la desviación del sensor sea pequeña, es decir, para que el haz del sensor sea casi perpendicular a la muestra.



*Figura A- 41: Soporte sensor - Diseño segundo.*

Esta pieza tiene un peso de 213 g, siendo más pesada que la anterior, pero con un peso aceptable.

Sin embargo, este diseño solo es válido para el sensor confocal, y el sensor puede presentar una ligera desviación. Por tanto, este diseño se descarta.

### Diseño tercero

Debido a la importancia de poder emplear los dos sensores indistintamente, se ha planteado la idea de hacer un diseño que conste de dos partes. Una pieza inferior (soporte) que quede atornillada al marco metrológico superior y una pieza superior (adaptador) que sea postiza.

La pieza superior es la que fija el sensor mediante tonillos roscados y tuercas, de esta forma, se consigue liberar tensiones en el soporte.

La pieza superior es propia de cada sensor y se puede quitar y poner cuando se quiera. Para poder implementar el adaptador de forma repetible, es decir, siempre en el mismo lugar se plantea el acople cinemático [11].

El acople puede estar constituido por las siguientes dos opciones:

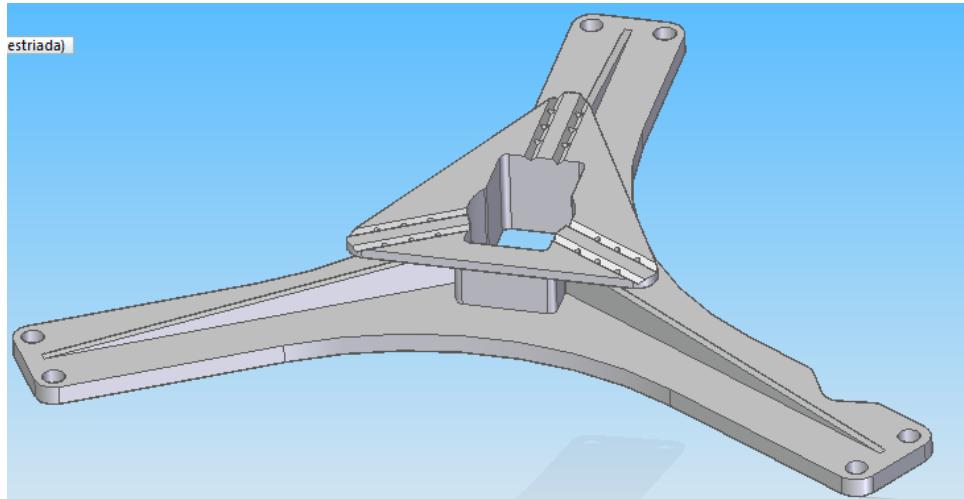
- 6 cilindros, 3 esferas y 3 imanes. Cada pareja de dos cilindros con una esfera impide 2 grados de libertad (GDL), por lo que las tres parejas impiden los 6GDL y por tanto cualquier movimiento.
- 2 cilindros, 7 esferas, 3 imanes. Estas piezas se ensamblan en los siguientes tres grupos:
  - 3 esferas en el soporte y 1 esfera en el adaptador. Esto impide 3 GDL.
  - 2 cilindros en el soporte y 1 esfera en el adaptador. Esto impide 2 GDL.
  - 1 esfera en el soporte y 1 esfera en el adaptador. Esto impide 1 GDL.

Con ambas opciones se restringen 6 GDL. Sin embargo, se escoge la primera opción por ser más simple y crear simetría.

En cuanto a la disposición de los cilindros, esferas, e imanes se determina que los imanes vayan apoyados en el adaptador debido a una mayor simpleza. Por tanto, como los imanes se colocan en el adaptador, los cilindros se pegan en el soporte (ya que dos cilindros tienen más masa que una esfera y, por tanto, la atracción magnética será mayor). Para generar esta atracción magnética, los imanes son de neodimio y las esferas y cilindros de acero.

Como los cilindros se pegan en el soporte, las esferas se pegan en el adaptador. Para facilitar el pegado, se diseña una cavidad para incorporar el pegamento.

Por tanto, el diseño del soporte queda de la siguiente manera:



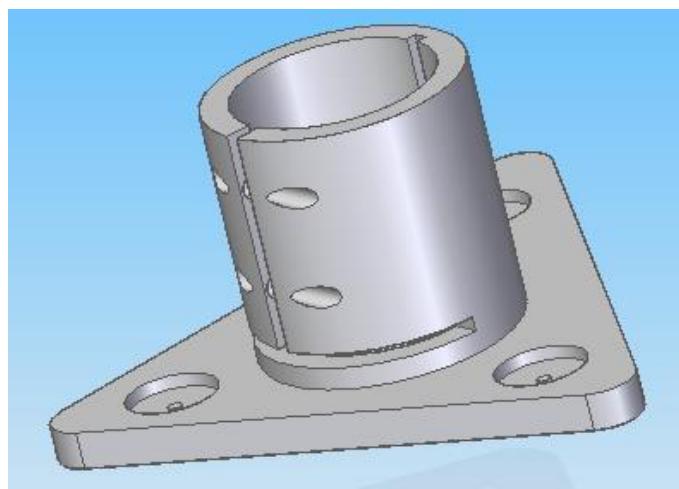
*Figura A- 42: Soporte sensor - Diseño tercero.*

Este soporte tiene un peso de 186 g.

El diseño de la cavidad central se debe a las diferentes dimensiones y formas de ambos sensores.

La parte triangular es en la que se pegan los cilindros. Para ello, se han creado unos canales en V para un mejor apoyo de los mismos.

En cuanto al adaptador del sensor confocal, su diseño es el siguiente:



*Figura A- 43: Adaptador sensor confocal - Diseño tercero.*

Este adaptador tiene un peso de 72 g.

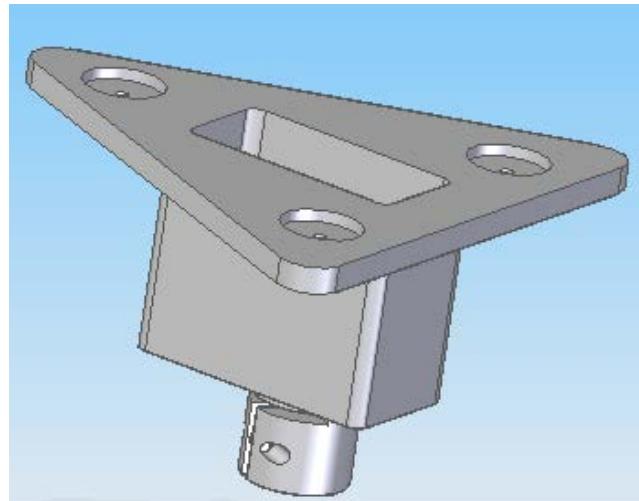
La parte triangular es en la que se encuentran las esferas e imanes que apoyan mediante el acople cinemático sobre los cilindros del soporte.

La parte cilíndrica es la que sujetta al sensor confocal mediante dos tornillos pasantes. Como el sensor confocal requiere una distancia de trabajo de 16,2 mm y el agarre se encuentra encima del acople, no van a existir problemas de espacio para los tornillos y tuercas ni para establecer una altura u otra según el

tamaño de la muestra. Es decir, este diseño cubre todo el rango de posibles tamaños de las muestras (hasta 30 mm).

La ranura que encuentra en la parte cilíndrica y es paralela a la base triangular es para liberar tensiones que se puedan producir en el apriete y evitar que se transfieran al soporte. Lo mismo ocurre con la ranura opuesta a los agujeros de los tornillos, diseñada para liberar tensiones a la hora del apriete.

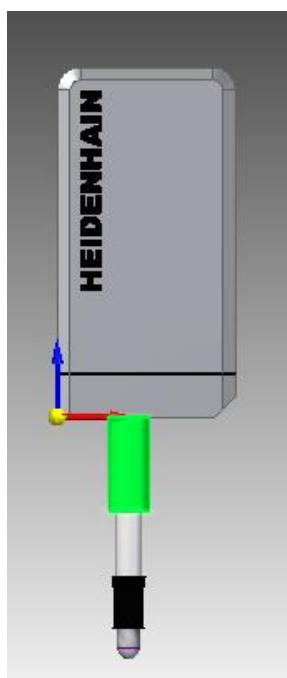
En cuanto al adaptador del sensor táctil, su diseño es el siguiente:



*Figura A- 44: Adaptador sensor táctil - Diseño tercero.*

Este adaptador tiene un peso de 57 g.

Cabe destacar, que la zona del sensor táctil en la se tiene que sujetar el adaptador es la inferior (zona verde en la Figura inferior), lo cual se tiene en cuenta en el diseño del adaptador.



*Figura A- 45: Zona de sujeción del sensor táctil.*

Debido a que este sensor es táctil y que la parte sujetada del sensor es la inferior, la zona de apriete sensor-adaptador queda en una cota inferior a la del acople, lo que puede generar un problema. Para

evitar que se genere dicho el problema, se pone especial atención a las dimensiones del hueco central del soporte, altura del agarre y dimensión de la zona del agarre considerando tornillos y tuercas.

El rango de medida del sensor táctil es de 12 mm, mientras que la distancia entre la cota inferior de la zona del sensor donde puede ser sujetado y el centro del agujero para el tornillo pasante es de 7,5 mm (Figura A- 46). Es decir, con este acople se consigue que la altura máxima de la muestra sea de 19,5 mm.

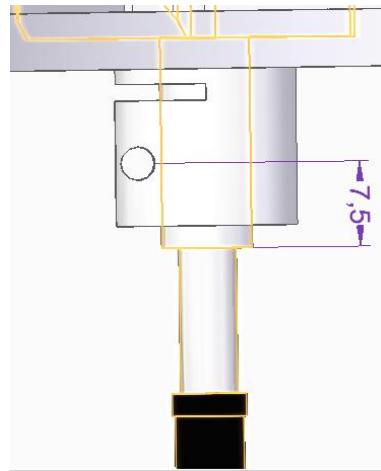


Figura A- 46: Distancia óptima para maximización de la altura de la muestra.

Sin embargo, debido a algunas complejidades de fabricación, se decide hacer algún cambio en los diseños de las tres piezas.

#### Diseño cuarto

El cuarto diseño del soporte, el cual es válido para los dos sensores, es el siguiente:

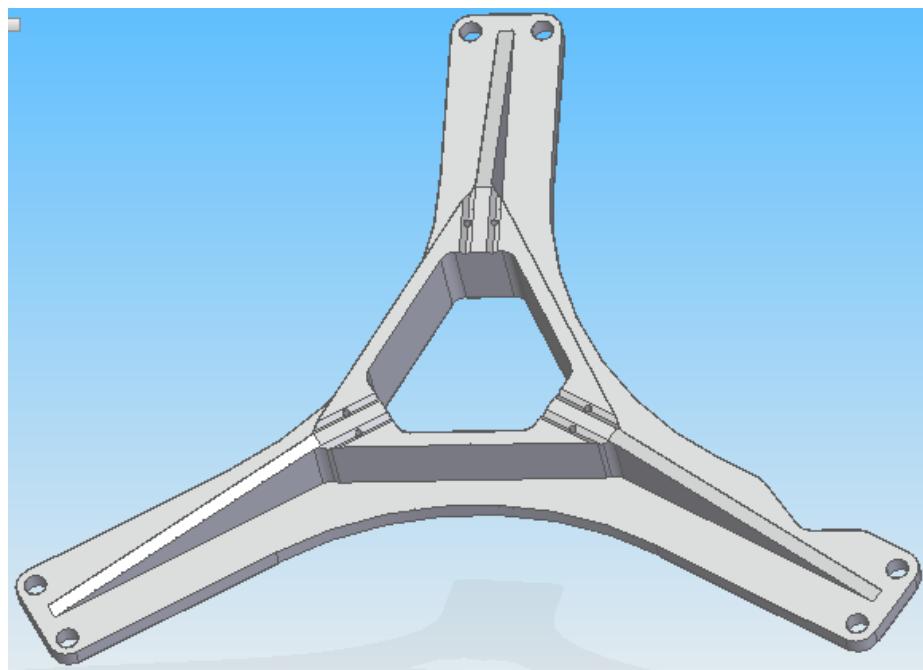


Figura A- 47: Soporte sensor - Diseño cuarto.

Este soporte tiene un peso de 224 g, el cual es aceptable.

Los cambios que se han realizado en el diseño respecto al anterior son:

- El hueco central se hace simétrico y se aumenta para aligerar el soporte. Como consecuencia de ello, la longitud del canal en V para los cilindros se reduce, pero sigue siendo suficiente dado la del anterior diseño era demasiado grande.
- La elevación central es maciza, a diferencia del diseño anterior donde la cota superior (altura) del soporte era más ancha que la cota media. Este cambio facilita enormemente la fabricación de la pieza.
- Los nervios que empiezan alineados con los centros de los agujeros de la base terminan en la cota superior (altura). Además, se aumenta el grosor de los mismos.

El cuarto diseño del adaptador del sensor confocal es el siguiente:

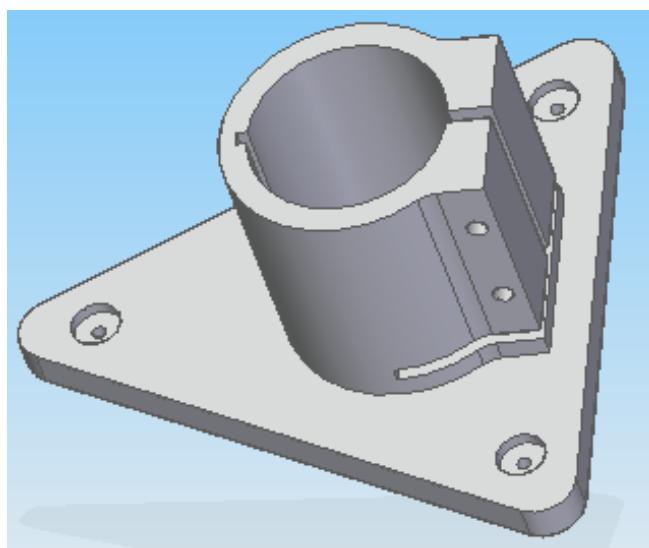


Figura A- 48: Adaptador sensor confocal - Diseño cuarto.

Este adaptador tiene un peso de 82 g.

Los cambios que se han realizado en el diseño respecto al anterior son:

- El hueco en el que se apoyan los imanes se reduce, puesto que no va a ser necesario unos de gran diámetro.
- La zona donde se sujeta al sensor ya no es completamente circular. Se realiza una terminación rectangular en la zona de los agujeros de los tornillos pasantes con la finalidad de que la cabeza del tornillo y la tuerca queden paralelos a la superficie una vez apretados. Además, esta zona de los agujeros tiene mayor espesor para que no se produzcan grietas.
- La zona donde se sujeta al sensor se gira de forma que la pieza sea simétrica. De las dos posiciones posibles para crear esta simetría, se escoge la opción en la que la zona rectangular de los agujeros quede más próxima al borde de la base. Este cambio facilita en gran medida las operaciones de fabricación de la pieza.

El cuarto diseño del adaptador del sensor táctil es el siguiente:

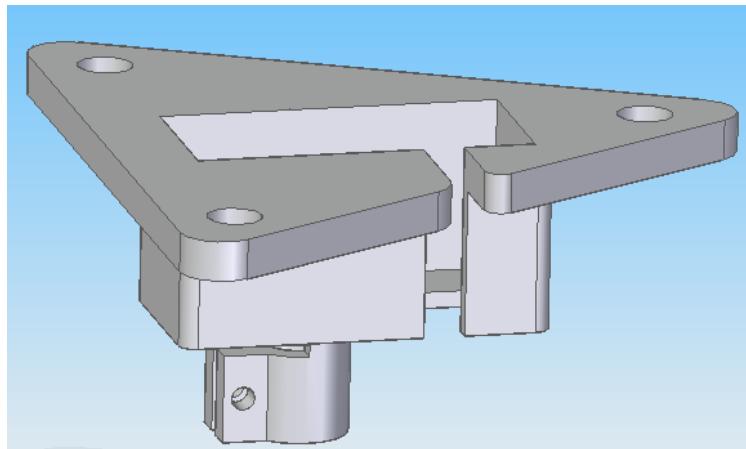


Figura A- 49: Adaptador sensor táctil - Diseño cuarto.

Este adaptador tiene un peso de 57 g.

Los cambios que se han realizado en el diseño respecto al anterior siguen la misma línea que los cambios del adaptador del sensor confocal:

- Se reduce la altura del hueco en el que se apoya el sensor con el fin de que el sensor táctil con el vástago completamente extendido quede unos milímetros por encima del portamuestras. Esto se debe a que, como se verá más adelante, debido al acople cinemático de la nanoposicionadora con los micrómetros el portamuestras queda a una altura superior.
- Se realiza un corte transversal y una cavidad en la parte inferior del hueco en el que apoya el sensor, así como una mayor área del hueco con el fin de poder introducir el cable del sensor que recoge la información.
- El hueco en el que se apoyan los imanes se reduce.
- La zona donde se sujetta al sensor ya no es completamente circular, sino que se realiza una terminación rectangular y con mayor espesor en la zona del agujero del tornillo pasante.
- La zona donde se sujetta al sensor se gira de forma que la pieza sea simétrica y que la zona rectangular del agujero quede más próxima al borde de la base.

Finalmente, estos diseños del soporte, del adaptador del sensor confocal y del adaptador del sensor táctil se imprimen en 3D para comprobar que los diseños son compatibles con los imanes y NanoPla real. Se observa que la fuerza de unión entre dos cilindros y una esfera mediante un único imán no es suficiente. Por ello se diseña una nueva versión que alberga más imanes, esta nueva versión es la definitiva.

## Anexo 6: Dimensionado de los canales del soporte del sensor para alojar los cilindros

Para realizar un diseño correcto de los canales del soporte en los que apoyan los cilindros, hay que conocer primeramente el tamaño de dichos cilindros y de las esferas que apoyan sobre ellos. El diámetro de los cilindros es de 4 mm [14] y el de las esferas de 5 mm [13].

Estos cilindros no pueden introducirse o elevarse todo lo que se quiera. Hay que dejar un margen suficiente como para que el cilindro apoye de forma segura, así como una cavidad para que escape el pegamento sobrante necesario para la unión cilindro-soporte. Además, es necesario definir unas características del contacto puntual entre el cilindro y la esfera; por lo que el “ángulo de contacto” ( $\alpha$ ) está delimitado entre  $10^\circ$  y  $60^\circ$  [11, 22].

A continuación, en la Figura A- 50 se representan dos cilindros (círculos inferiores), la esfera (círculo superior) en contacto con ellos, así como dos canales en V para el apoyo de los cilindros.

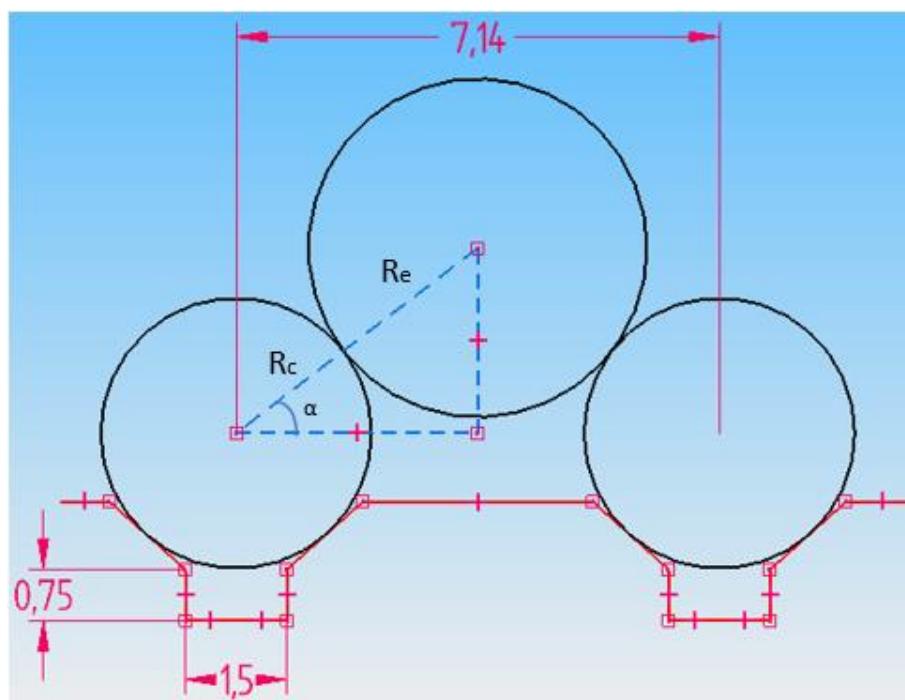


Figura A- 50: Dimensionado de canales del soporte para cilindros

Se establece una distancia entre los ejes longitudinales de los cilindros suficientemente ancha para que la esfera descienda más y, por tanto, la separación entre el soporte del sensor y los adaptadores sea menor. Conocidas las dimensiones se calcula el ángulo de contacto.

$$\alpha = \arccos \left( \frac{\frac{7,14}{2}}{R_c + R_e} \right) = \arccos \left( \frac{\frac{7,14}{2}}{2 + 2,5} \right) = 37,5^\circ \quad (\text{A.1})$$

El valor obtenido ( $37,5^\circ$ ) se encuentra dentro de los límites recomendados (entre  $10^\circ$  y  $60^\circ$ ) por lo que el diseño resulta válido y óptimo.

## Anexo 7: Simulación de los diseños finales del soporte-adaptador-sensor

A continuación, se explica detalladamente los pasos seguidos en la creación del ensamblaje del sensor confocal con su adaptador y el soporte.

1. Se coloca el marco metrológico superior como pieza inicial.
2. Se inserta el soporte del sensor. Las conexiones son tres: contacto entre la superficie inferior del soporte con la superficie superior del marco; y dos alineaciones axiales de los agujeros para los tornillos pasantes del soporte con los agujeros de los tornillos pasantes del marco.
3. Se inserta un imán correspondiente al soporte. Las conexiones son dos: alineación axial del imán con el agujero correspondiente para él en el soporte; y contacto entre las superficies de dicho agujero y del imán. Se insertan y colocan de la misma forma los otros dos imanes correspondientes al soporte.
4. Se inserta un cilindro. Las conexiones son tres: contacto tangencial entre el cilindro y la superficie del canal del soporte; alineación axial entre el cilindro y el eje longitudinal del canal del soporte; y centrar el cilindro longitudinalmente respecto al eje del agujero del soporte para el imán. Se insertan y colocan de la misma forma los otros cinco cilindros.
5. Se inserta una esfera. Las conexiones son tres: alineación axial entre el eje de la esfera y el eje del agujero del soporte para el imán; dos contactos tangenciales entre el imán y los dos cilindros correspondientes. Se insertan y colocan de la misma forma las otras dos esferas.
6. Se inserta el adaptador del sensor confocal. Las conexiones son tres: dos alineaciones axiales del eje del agujero del adaptador donde va el imán con el eje del agujero del soporte donde va el imán; y contacto tangencial entre la cavidad del adaptador donde va la esfera con la esfera.
7. Se inserta un imán correspondiente al adaptador. Las conexiones son dos: alineación axial del imán con el agujero correspondiente para él en el adaptador; y contacto entre las superficies de dicho agujero y del imán. Se insertan y colocan de la misma forma los otros dos imanes correspondientes al adaptador.
8. Se inserta el sensor confocal. Solo se establece una conexión: alineación axial del eje del sensor confocal con el eje del hueco del adaptador diseñado para el sensor confocal. De forma manual y sin crear una conexión fija, se sitúa el sensor a una distancia tal que la superficie inferior del sensor respecto a la superficie inferior del marco metrológico simule una distancia aproximada de 18 mm entre la superficie inferior del sensor y el portamuestras. Esta distancia es algo mayor que la distancia de trabajo necesaria por el sensor confocal (16,2 mm) debido a que encima del portamuestras se colocará la muestra y esta tendrá una mínima altura.

Los 23 conectores que se generan de forma automática (con una distancia de búsqueda de 0,2 mm) para poder realizar la simulación son los siguientes:

- Sensor confocal --- Adaptador del sensor confocal.
- Adaptador del sensor --- Imanes. Son 3 conectores dado que hay tres imanes.
- Adaptador del sensor --- Esferas. Son 3 conectores dado que hay tres esferas.
- Esferas --- Cilindros. Son 6 conectores dado que se unen dos cilindros con una esfera y hay seis cilindros y tres esferas.
- Cilindros --- Soporte. Son 6 conectores dado que hay tres cilindros.
- Imanes --- Soporte. Son 3 conectores dado que hay tres imanes.
- Soporte – Marco metrológico superior.

Para que Solid Edge pueda llevar a cabo las simulaciones hay que especificar el material de las piezas que componen el ensamblaje. Al soporte del sensor y al adaptador del mismo se le asigna aluminio 7075-T6 (propiedades en Figura A- 17, en Anexo 2: Ensamble de los elementos estructurales de la NanoPla que afectan a la medición). A los cilindros y esferas se les asigna acero (propiedades en Figura A- 51). Los imanes son de neodimio; sin embargo, este material no está en la librería de materiales de Solid Edge por lo que se crea el material introduciendo las propiedades necesarias para el análisis (propiedades en Figura A- 52) [23]. El marco metrológico ya tiene el material asignado (aluminio 7075-T6) de las simulaciones de los elementos estructurales simplificados que afectan a la medición del diseño del sensor (Sección 2.2).

En cuanto al sensor confocal, este está realmente constituido por varios materiales. Para facilitar su representación en Solid Edge se tienen en consideración los aspectos más importantes (diámetro, altura y peso). Por tanto, con el volumen ( $\pi \cdot r^2 \cdot h$ ) y el peso del sensor (155 g), se determina una densidad ficticia. De esta forma, se crea un nuevo material con la densidad calculada y el coeficiente de expansión térmica, la conductividad térmica, el módulo de elasticidad, el coeficiente de Poisson y el límite elástico del aluminio 7075-T6. El material escogido para las propiedades recientemente citadas, como se acaba de mencionar, es el aluminio 7075-T6 debido a que es el material de la carcasa del sensor y presenta un bajo coeficiente de expansión, lo cual es relevante dado que el sensor está internamente formado por lentes ópticas las cuales presentan un coeficiente de expansión térmica bajo.

Nombre de propiedad	Valor
Densidad	7833.000 kg/m <sup>3</sup>
Coeficiente de expansión térmica	0.0000 /C
Conductividad térmica	0.032 kW/m-C
Calor específico	481.000 J/kg-C
Módulo de elasticidad	199947.953 MPa
Coeficiente de Poisson	0.290
Límite elástico	262.001 MPa
Tensión de rotura	358.527 MPa
Elongación %	0.000

Figura A- 51: Propiedades del acero. Fuente: Solid-Edge.

Nombre de propiedad	Valor
Densidad	6800.000 kg/m <sup>3</sup>
Coeficiente de expansión térmica	0.0000 /C
Conductividad térmica	0.017 kW/m-C
Calor específico	190.000 J/kg-C
Módulo de elasticidad	41400.000 MPa
Coeficiente de Poisson	0.310
Límite elástico	165.000 MPa
Tensión de rotura	155.000 MPa
Elongación %	0.000

Figura A- 52: Propiedades del neodimio.

Por otro lado, se van a comentar a continuación los análisis de los resultados de las simulaciones del ensamblaje para el sensor confocal. En la Figura A- 53 se muestran las tensiones sufridas. Se observa un comportamiento simétrico respecto al eje Y (eje de simetría del conjunto).

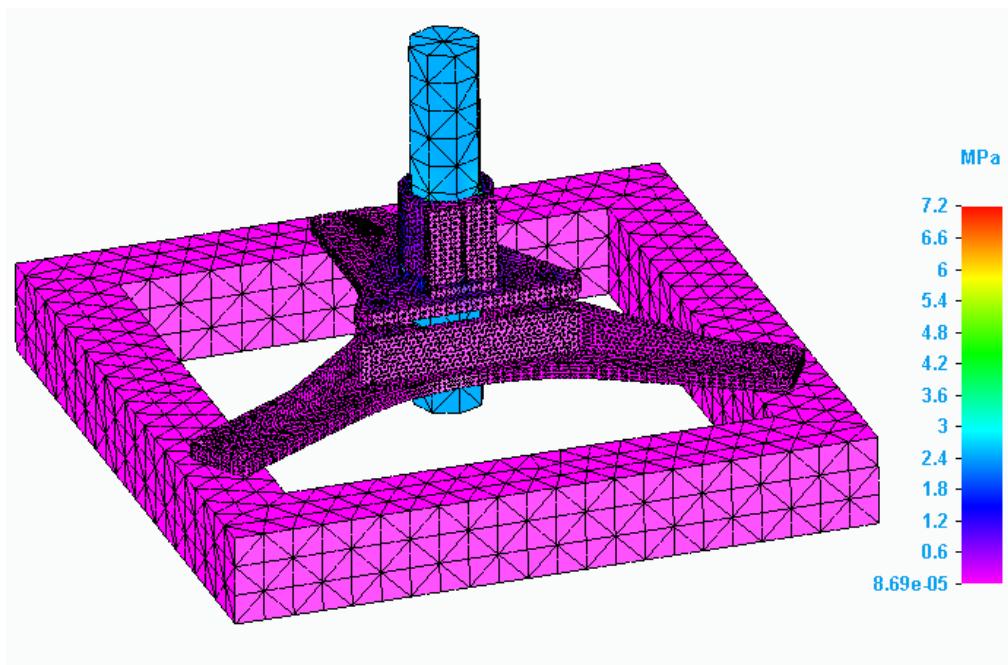


Figura A- 53: Tensiones 21ºC - Simulación soporte sensor confocal.

Las tensiones máximas se dan en el adaptador del sensor en la zona de fijación del mismo, alcanzando los 7,2 MPa. Mientras que el sensor presenta una tensión constante en todos sus puntos (incluidos los de la base, que es por donde mide) de valor 2,46 MPa. Estas tensiones son asumibles.

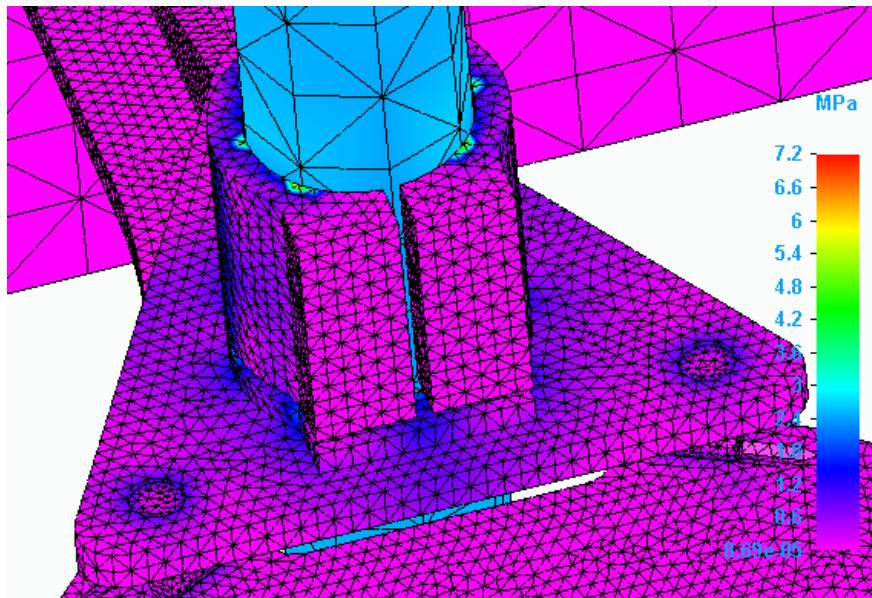


Figura A- 54: Tensiones 21ºC (detalle fijación sensor) - Simulación soporte sensor confocal.

Los desplazamientos para el caso de 21ºC son de expansión (componente Z positiva) y presentan un comportamiento simétrico en el eje Y (eje de simetría del conjunto). El desplazamiento máximo ( $4,88 \mu\text{m}$ ) aparece en la parte superior del sensor, pero esta no es una zona crítica. En cuanto a los desplazamientos de la parte inferior del sensor confocal, que es en la que se encuentra el haz de medición, presentan un valor de  $1,66 \mu\text{m}$  en la componente Z. Este desplazamiento es importante, dado que el sensor confocal tiene una resolución de  $0,122 \mu\text{m}$  y transmitirá este desplazamiento al valor de la medida (altura de la muestra) ocasionando así un error en la misma.

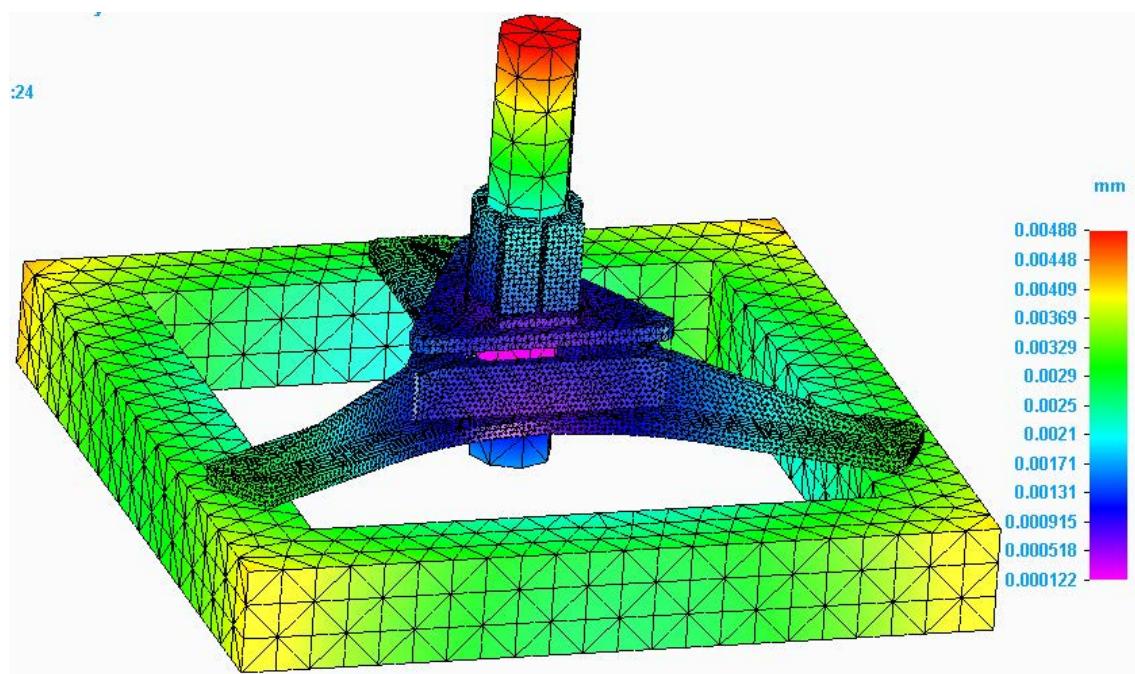


Figura A- 55: Desplazamientos 21°C - Simulación soporte sensor confocal.

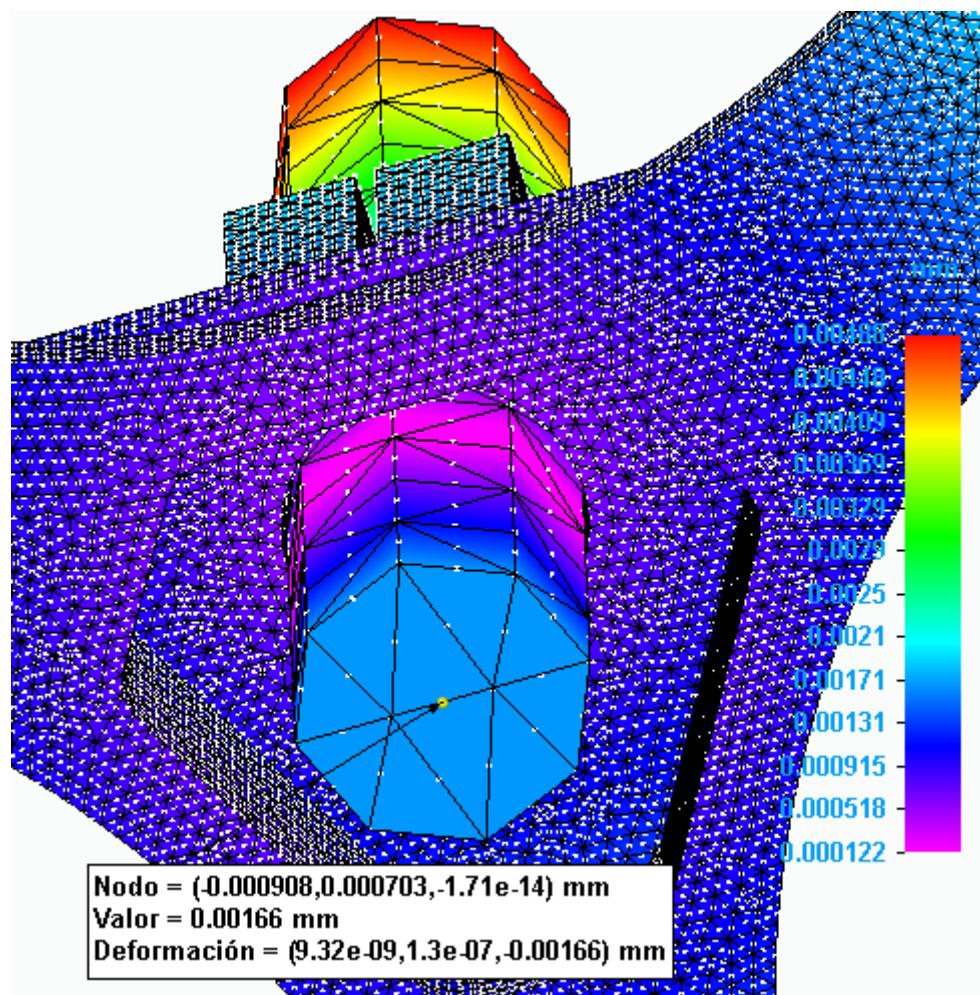


Figura A- 56: Desplazamientos 21°C (detalle punta sensor) - Simulación soporte sensor confocal.

A pesar de ello, este desplazamiento descrito es sufrido cuando la temperatura se incrementa en 1ºC durante el proceso de medición; situación muy poco probable dado que las medidas se realizan en un laboratorio de metrología donde la temperatura ambiente es controlada. Se ha realizado la simulación para una temperatura ambiente de 20,5ºC para ver cómo influye una reducción a la mitad de la diferencia de temperatura (ahora +0,5ºC de diferencia, a pesar de seguir siendo una diferencia alta en el momento de medición para un laboratorio de metrología). El desplazamiento en Z de la parte inferior del sensor se reduce a 1,07 µm, pero sigue siendo considerable.

Para el caso de 19ºC, el comportamiento de las tensiones es análogo al caso del 21ºC. Es decir, los máximos valores (7,11 MPa) se obtienen en la zona del adaptador que fija al sensor y dicho sensor presenta una tensión constante en todos sus puntos (2,46 MPa, exactamente el mismo valor que en el caso de 21ºC). En cuanto a los desplazamientos en Z, estos son de contracción en todo el conjunto a excepción de la zona inferior del sensor (zona del haz) que presenta un desplazamiento de expansión (+0,709 µm) el cual es relevante.

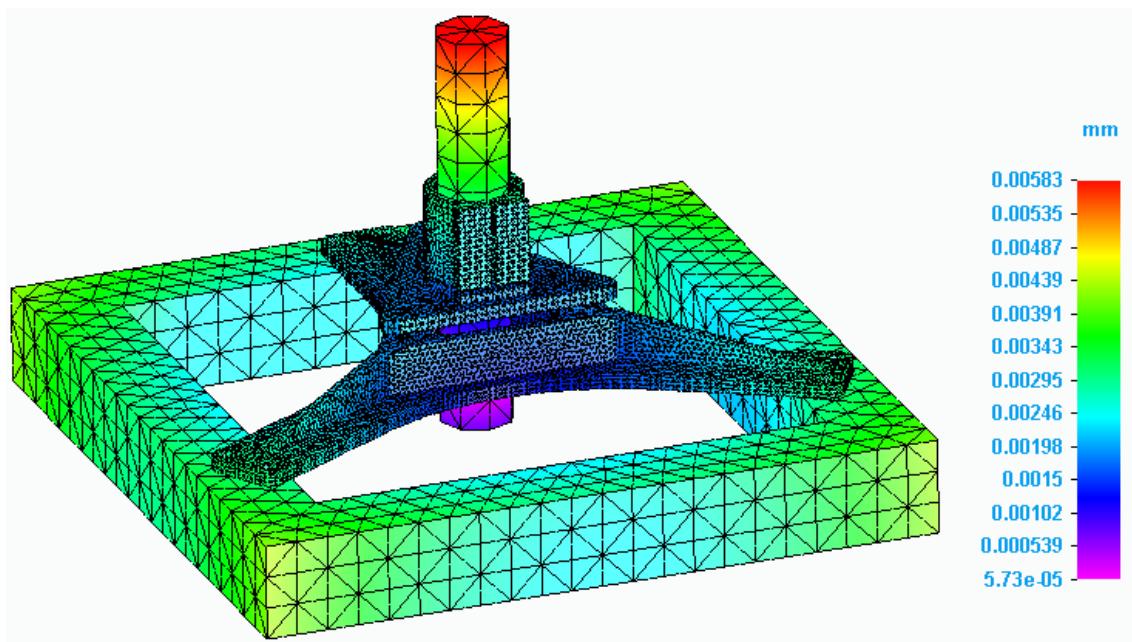


Figura A- 57: Desplazamientos 19ºC - Simulación soporte sensor confocal.

En cuanto al ensamblaje para el sensor táctil, este se crea a partir del ensamblaje para el sensor confocal. Se mantienen todas las piezas excepto el sensor y su adaptador que se cambian. Las nuevas conexiones a realizar en este ensamblaje son las conexiones del sensor táctil, que son tres: conexión axial del vástago del sensor con el cilindro del adaptador que sujet a el sensor; contacto entre la superficie inferior de la caja del sensor con la superficie de la cavidad del adaptador en la que se apoya el sensor (por poner una posible altura que se pueda dar en las mediciones); centrado de las paredes grandes del sensor con el eje del agujero del adaptador correspondiente al imán el cual est a alineado con el eje del vástago del sensor.

Para la simulación del sensor táctil, se realiza el mismo estudio que para el sensor confocal. Los 23 conectores que se generan de forma automática (con una distancia de búsqueda de 0,25 mm) son análogos a los conectores del estudio con el sensor confocal. Además, se asigna acero como material del sensor táctil debido a que el principal material por el que est formado.

Para la simulación del sensor táctil, se realiza el mismo estudio que para el sensor confocal. Se establece un tipo de malla tetraédrica de tamaño 2,44 mm (nivel de precisión 4 de 10) y finalmente se resuelve. Estas simulaciones se resuelven para temperatura ambiente 21ºC y 19ºC. Los resultados obtenidos son los siguientes.

Las tensiones máximas (5,83 MPa), en el caso de 21°C, se dan algunos puntos del adaptador en la zona que fija al sensor, siendo el valor de la tensión que predomina en esta zona de 2,97 MPa (ver ilustración izquierda de la Figura A- 59).

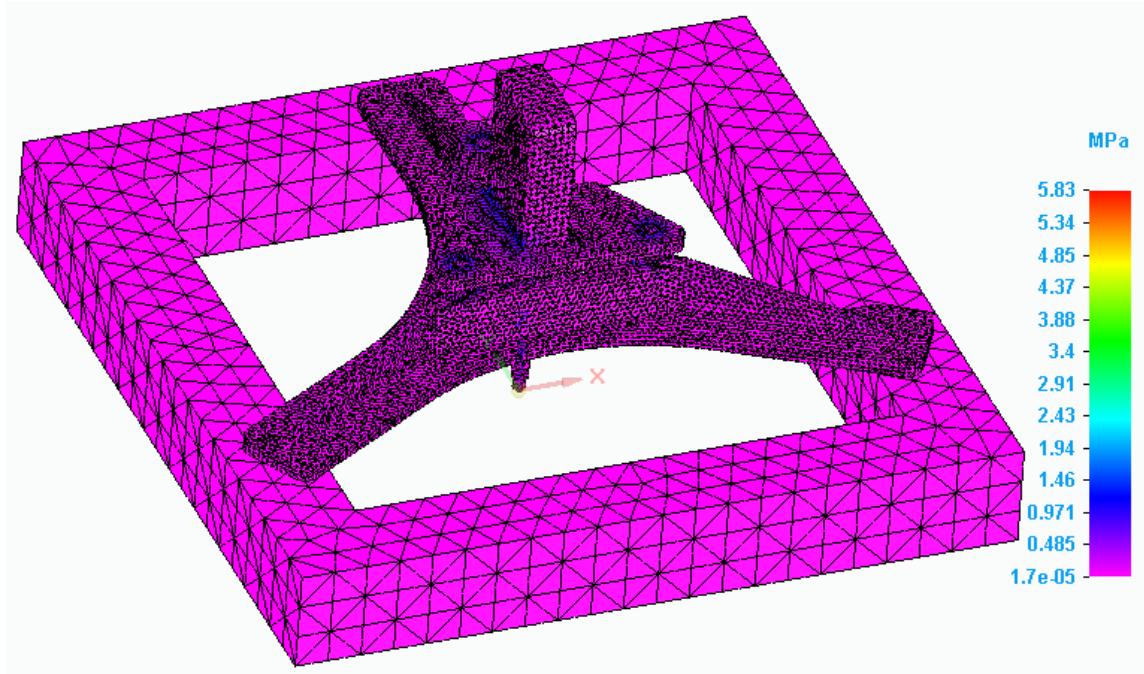


Figura A- 58: Tensiones 21°C - Simulación soporte sensor táctil.

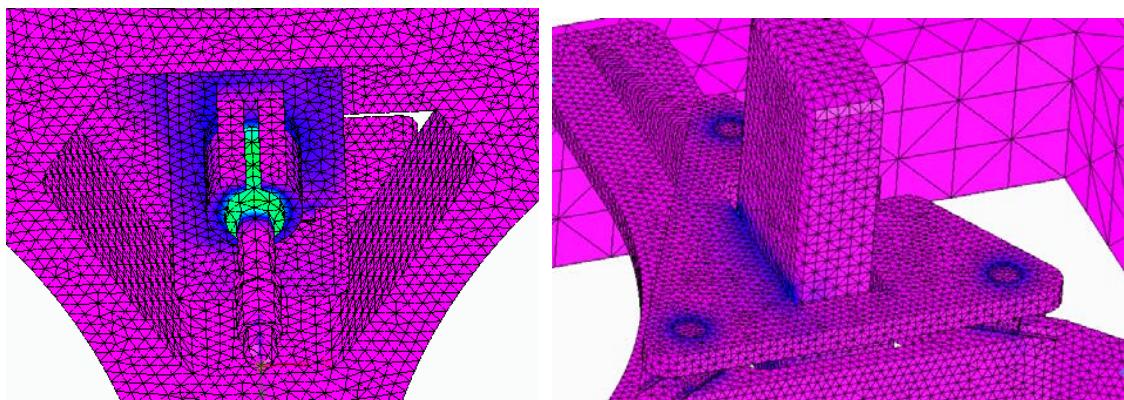


Figura A- 59: Tensiones 21°C (vistas detalles) - Simulación soporte sensor táctil.

Los desplazamientos sufridos, en el caso de 21°C, son de expansión (Figura A- 60) en todo el conjunto a excepción de la parte inferior del vástagos del sensor que presenta contracción. Los máximos desplazamientos ( $4,38 \mu\text{m}$ ) se dan en las esquinas de la nanoposicionadora. Sin embargo, estos desplazamientos se dan principalmente en el plano XY, por lo que se pueden despreciar al no ser un desplazamiento que afecte a la medida del sensor.

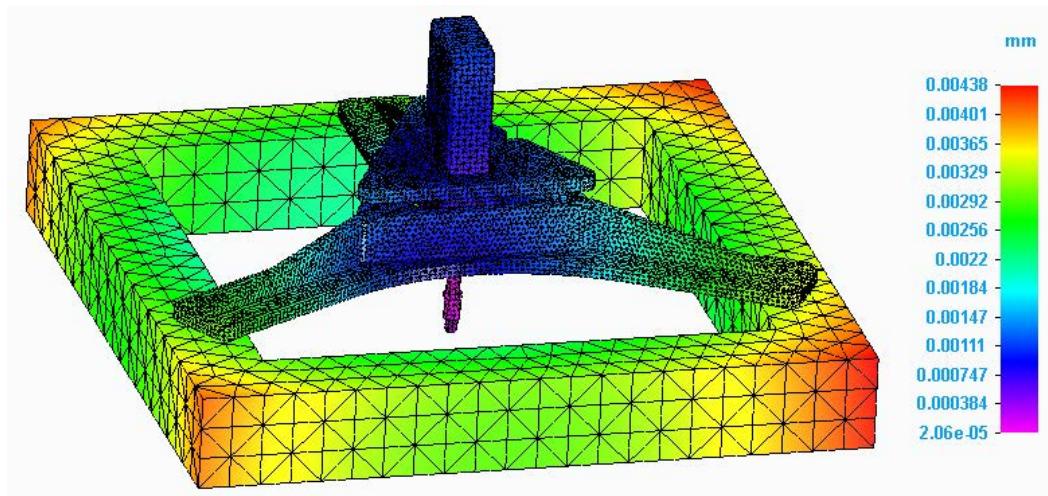


Figura A- 60: Desplazamientos 21°C - Simulación soporte sensor táctil.

Para observar con mejor detalle los desplazamientos que afectan a la medida, se muestra en la Figura A- 61 los desplazamientos en el eje Z. Se observa un valor máximo de 1,41  $\mu\text{m}$  (expansión) en una esquina de la base triangular del adaptador del sensor (Figura A- 62). Sin embargo, se puede despreciar dado que esta zona no es crítica.

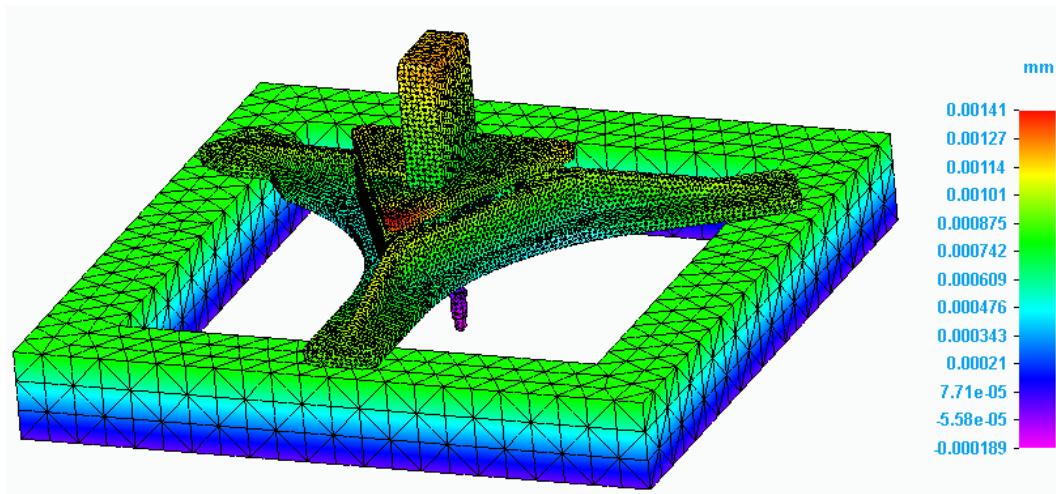


Figura A- 61: Desplazamientos en Z para 21°C (vista trasera) - Simulación soporte sensor táctil.

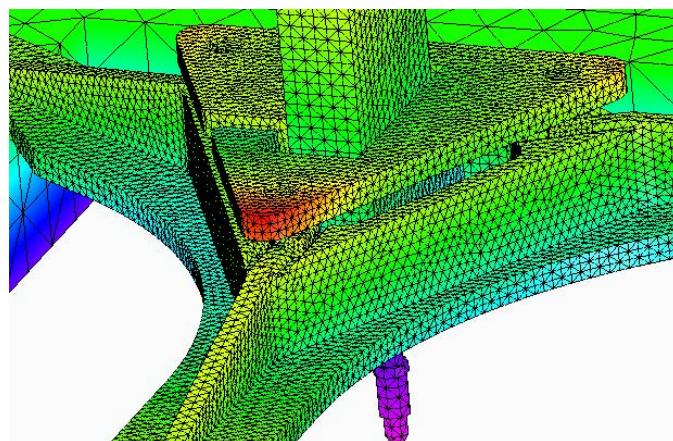


Figura A- 62: Desplazamientos en Z para 21°C (vista trasera-detalle) - Simulación soporte sensor táctil.

Con relación al desplazamiento de la punta del vástago del sensor, que es en la parte que se encuentra en contacto con la muestra y realiza la medición, presenta una contracción de  $-0,189 \mu\text{m}$  en la componente Z. A pesar de ser el desplazamiento de la zona crítica, este valor es asumible puesto que el sensor táctil tiene una precisión de  $0,2 \mu\text{m}$ . El motivo de este pequeño valor es que la temperatura ambiente es superior a la de referencia y en lugar de presentar una expansión, se contrae.

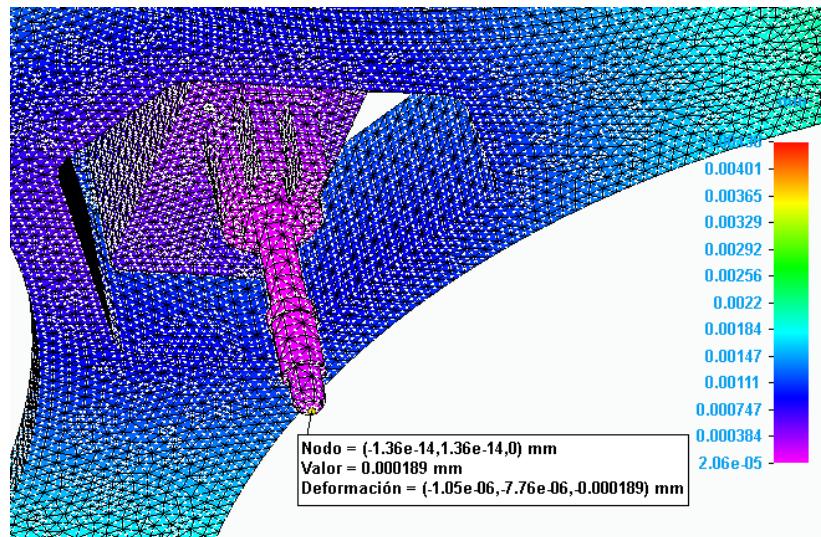


Figura A- 63: Desplazamientos 21°C (detalle punta sensor) - Simulación soporte sensor táctil.

Debido a que el punto de medición del sensor presenta una contracción cuando el incremento de temperatura es positivo, se estudia el caso de una temperatura ambiente de  $20,5^\circ\text{C}$  para ver el comportamiento del mismo. En este caso, la punta del sensor sufre una contracción en Z mayor que la del caso de  $21^\circ\text{C}$  (como era de esperar). Ahora, la contracción tiene un valor de  $-0,365 \mu\text{m}$ , la cual es mayor a la precisión del sensor ( $0,2 \mu\text{m}$ ), por lo que se transmitirá este error a la medida de la muestra. Sin embargo, como ya se ha comentado anteriormente, se podría monitorizar la temperatura para compensar así los errores de desplazamiento que provoque y fabricar los diseños en Zerodur.

En cuanto al caso de  $19^\circ\text{C}$ , el comportamiento de las tensiones es análogo al caso del  $21^\circ\text{C}$ . Es decir, los máximos valores (5,86 MPa) se obtienen en algunos puntos del adaptador en la zona que fija al sensor, siendo el valor de la tensión que predomina en esta zona de 2,96 MPa. En relación con los desplazamientos en el caso de  $19^\circ\text{C}$  (Figura A- 64), estos son de contracción y sus máximos ( $4,33 \mu\text{m}$ ) se dan en las esquinas de la nanoposicionadora principalmente en el plano XY por lo que son asumibles. Los máximos desplazamientos en la componente Z (Figura A- 65) se dan en la parte superior del sensor con un valor de  $-2,28 \mu\text{m}$ , siendo asumibles al ser una zona crítica. En este caso, los desplazamientos en la punta del sensor (Figura A- 66) son considerables en Z ( $-0,894 \mu\text{m}$ ). Sin embargo, esto es considerando un descenso de la temperatura de  $1^\circ\text{C}$  durante la medición (situación poco probable en el laboratorio metrológico y pudiéndose monitorizar la temperatura ambiente para corregir errores).

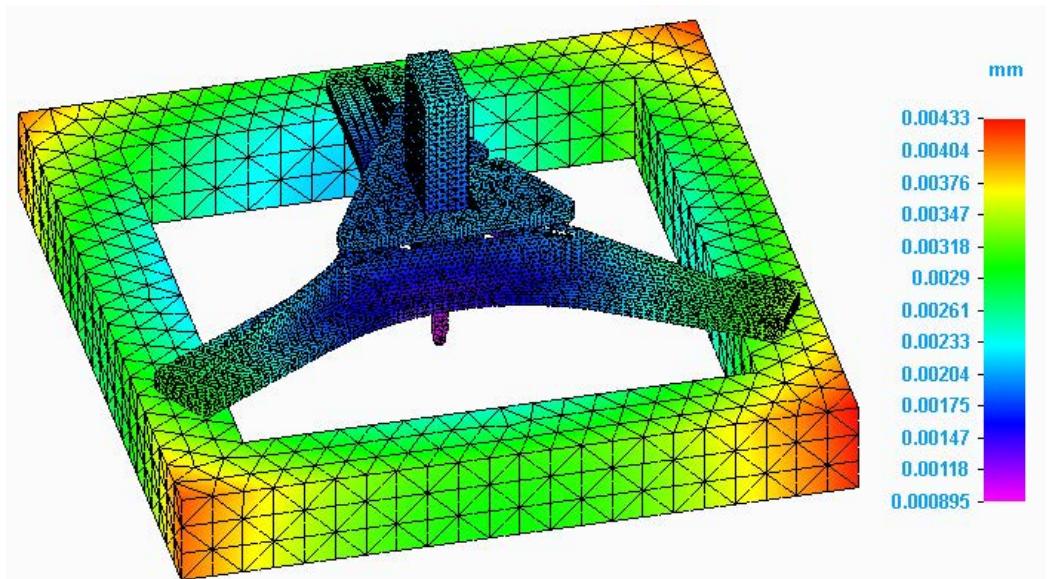


Figura A- 64: Desplazamientos 19°C - Simulación soporte sensor táctil.

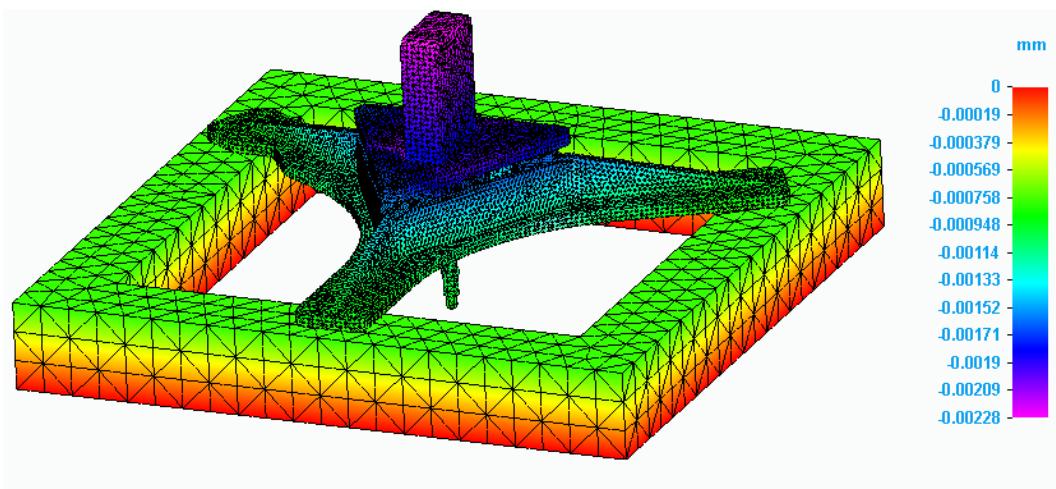


Figura A- 65: Desplazamientos en Z para 19°C - Simulación soporte sensor táctil.

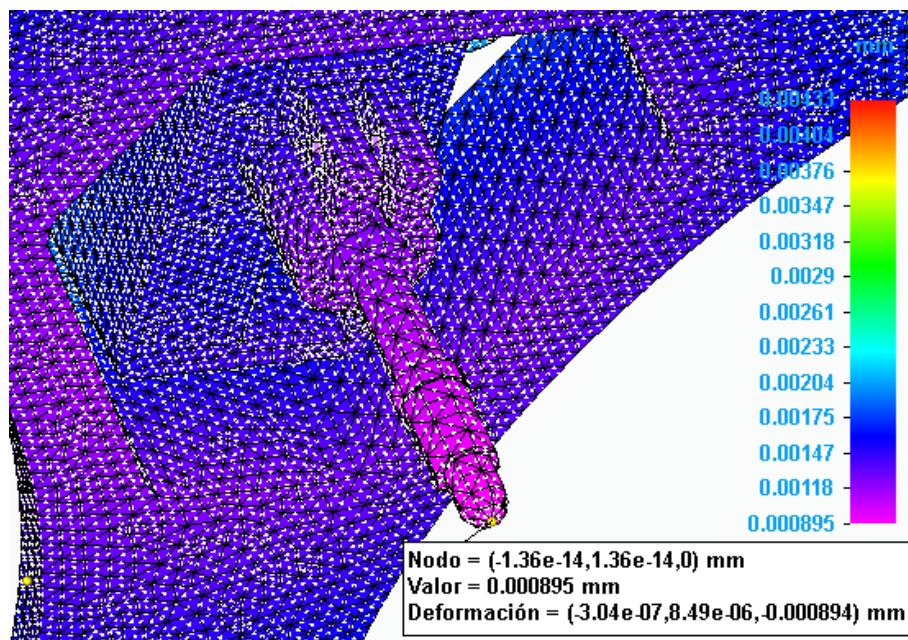


Figura A- 66: Desplazamientos 19°C (detalle punta sensor) - Simulación soporte sensor táctil.

## Anexo 8: Simulación del diseño del soporte de la nanoposicionadora

A continuación, se explica detalladamente los pasos seguidos en la creación del ensamble del soporte de la nanoposicionadora:

1. Se coloca el marco metrológico inferior como pieza inicial.
2. Se inserta un acople de los tornillos micrométricos. Las conexiones son tres: contacto entre el marco metrológico inferior y el acople, y dos alineaciones axiales de los ejes de los agujeros existentes en estas piezas para tornillos. Se insertan y colocan de la misma forma los otros dos acoplos de los tornillos micrométricos.
3. Se inserta un tornillo micrométrico. Las conexiones son dos: contacto entre el tornillo y su acople, y alineación axial de ambos. Se insertan y colocan de la misma forma los otros dos tornillos micrométricos.
4. Se inserta la nanoposicionadora.
5. Se inserta el portamuestras. Las conexiones son tres: contacto entre la nanoposicionadora y el portamuestras, y dos relaciones de 'plano central' para que quede el portamuestras coincidente en el eje X e Y con la nanoposicionadora.
6. Se inserta la muestra. Las conexiones son tres: contacto entre la muestra y el portamuestras, y dos relaciones de 'plano central' para que quede la muestra coincidente en el eje X e Y con el portamuestras.
7. Se inserta el soporte de la nanoposicionadora. Las conexiones son tres: contacto entre la nanoposicionadora y su soporte, y dos relaciones de 'plano central' para que quede el soporte de la nanoposicionadora coincidente en el eje X e Y con la nanoposicionadora. Los agujeros pasantes para los tornillos que fijan la nanoposicionadora con su soporte están situados de manera que coincidan con los de la nanoposicionadora.
8. Se inserta un imán. Las conexiones son tres: contacto entre la nanoposicionadora y el imán, y dos relaciones de 'plano central' para que el imán quede centrado en su hueco del soporte de la nanoposicionadora. Se insertan y colocan de la misma forma los otros dos imanes.
9. Se inserta un cilindro. Las conexiones son cinco: contacto tangencial entre la nanoposicionadora y el cilindro, dos relaciones de 'plano central' para que el cilindro quede centrado en su hueco del soporte de la nanoposicionadora, contacto tangencial entre el cilindro y la esfera del tornillo micrométrico, y relación de 'plano central' para que la esfera del tornillo micrométrico quede en el centro de la longitud del cilindro. Se insertan y colocan de la misma forma los otros cinco cilindros.

Los 27 conectores que se generan de forma automática (con una distancia de búsqueda de 0,33 mm) son los siguientes:

- Tornillos micrométricos --- Acoples tornillos micrométricos. Son 3 conectores dado que hay tres tornillos micrométricos y tres acoplos tornillos micrométricos.
- Acoples tornillos micrométricos --- Marco metrológico inferior. Son 3 conectores dado que hay tres acoplos tornillos micrométricos.
- Tornillos micrométricos --- Cilindros. Son 6 conectores dado que se unen dos cilindros con un tornillo micrométrico y hay seis cilindros y tres tornillos micrométricos.
- Cilindros --- Soporte nanoposicionadora. Son 6 conectores dado que hay seis cilindros.
- Soporte nanoposicionadora --- Imanes. Son 3 conectores dado que hay tres imanes.
- Soporte nanoposicionadora --- Nanoposicionadora.
- Nanoposicionadora --- Imanes. Son 3 conectores dado que hay tres imanes.
- Nanoposicionadora --- Cilindros. Son 6 conectores dado que hay seis cilindros.
- Nanoposicionadora --- Portamuestras.
- Portamuestras --- Muestra.

Para poder realizar la simulación, se asigna aluminio 7075-T6 como material del soporte de la nanoposicionadora.

A continuación, se analiza más detalladamente los resultados de las simulaciones realizadas en este conjunto mediante Solid Edge. Las máximas tensiones para el caso de 21°C, con un valor de 17,3 MPa, aparecen en el contacto entre los cilindros y las esferas de los micrómetros. El resto de las tensiones se dan en las zonas de contacto entre piezas, en esquinas y en la zona empotrada; sin embargo, estas tensiones son en torno a 5 MPa.

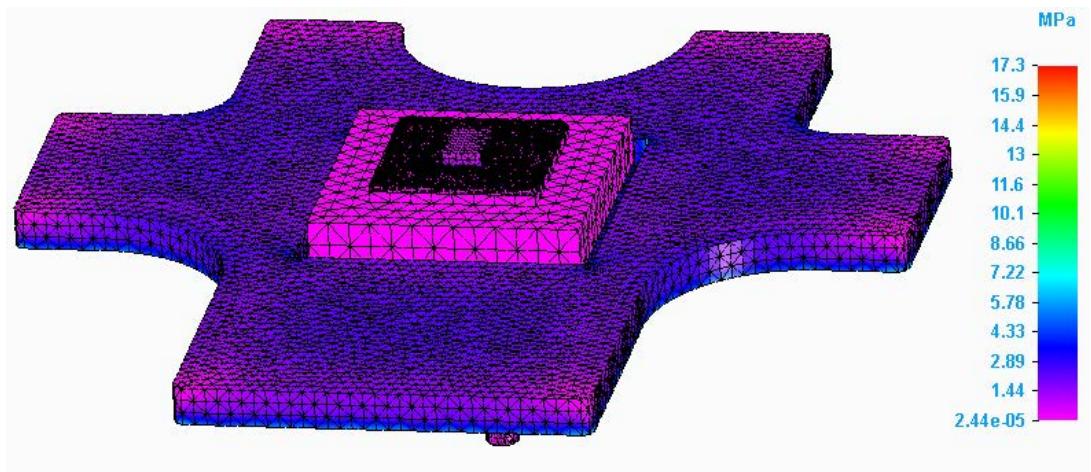


Figura A- 67: Tensiones 21°C - Simulación soporte nanoposicionadora.

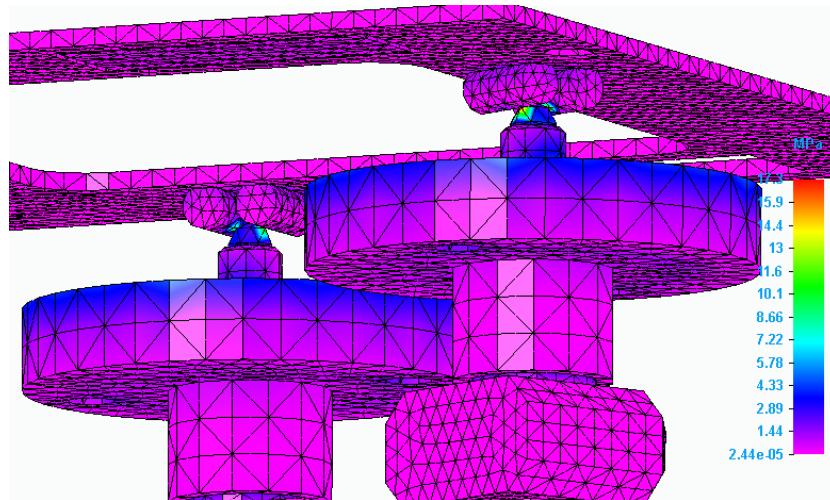


Figura A- 68: Tensiones 21°C (detalle cilindros) - Simulación soporte nanoposicionadora.

En cuanto a los desplazamientos sufridos para el caso de 21°C, los máximos se dan en las esquinas traseras de la nanoposicionadora y en la parte inferior de los micrómetros (Figura A- 69). Sin embargo, estas zonas no son relevantes dado que no van a afectar en la medida de la muestra (no transmiten los desplazamientos a la muestra). Esto se debe a que, en el caso de los micrómetros, estos están atornillados (por la parte media-superior) mediante su acople al marco metrológico inferior, por lo que los desplazamientos que sufra en la parte inferior no son relevantes. En el caso de las esquinas de la nanoposicionadora, los desplazamientos que se observan (Figura A- 70) son principalmente en el plano XY (los cuales no afectan a la medida del sensor, que mide en Z), y los desplazamientos que sufre en Z tienen un valor de 0,49 µm en las esquinas, no en el centro de la nanoposicionadora donde se encuentra la muestra a medir.

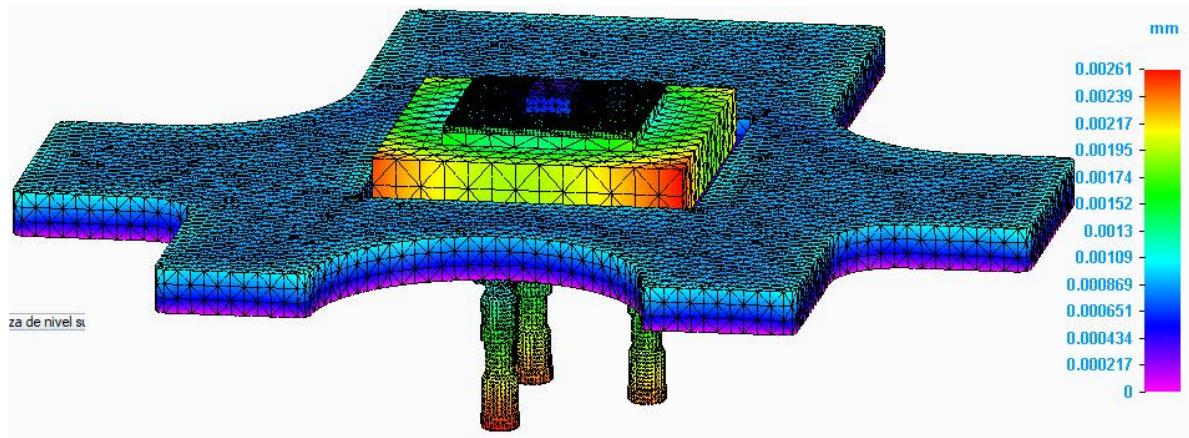


Figura A- 69: Desplazamientos 21ºC - Simulación soporte nanoposicionadora.

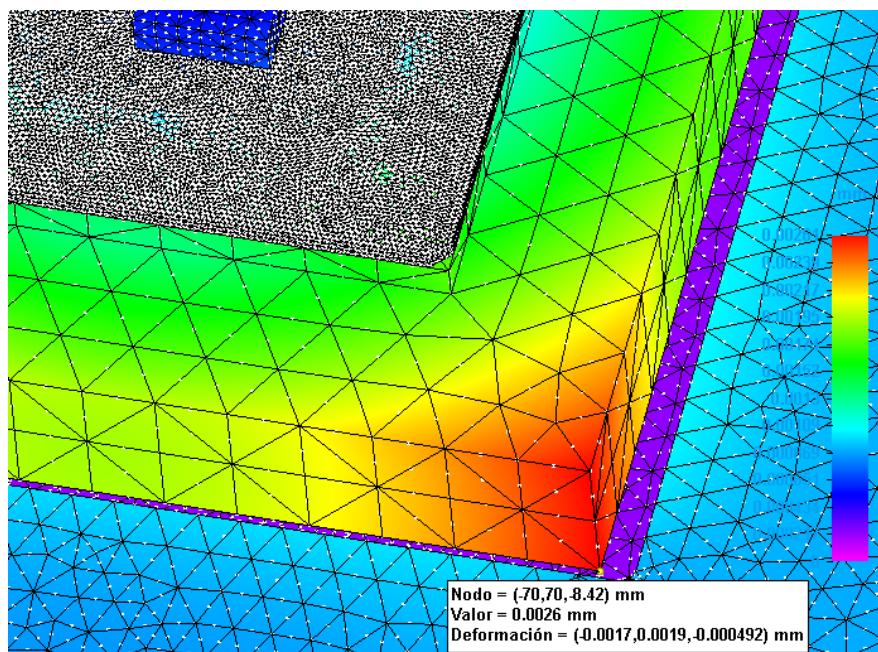


Figura A- 70: Desplazamientos 21ºC (detalle esquina nanoposicionadora) - Simulación soporte nanoposicionadora.

Sin embargo, los desplazamientos que sufren las partes delicadas del ensamblaje (muestra, o más genéricamente el portamuestras) son considerables. El desplazamiento en la componente Z sufrido en la superficie superior de la muestra (la que se mide con el sensor) es de 0,224  $\mu\text{m}$  (expansión). Las esferas de los micrómetros presentan una contracción de -0,412  $\mu\text{m}$ .

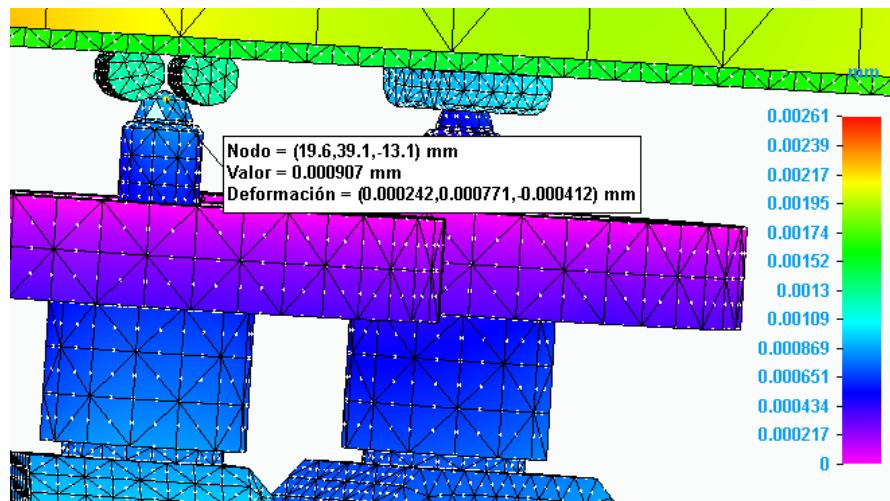


Figura A- 71: Desplazamientos 21°C (detalle cilindros) - Simulación soporte nanoposicionadora.

Con relación a los resultados para el caso de 19°C, las tensiones y los desplazamientos sufridos en el caso de 19°C son análogos a los sufridos con 21°C. Es decir, las máximas tensiones (16,8 MPa) se dan en el contacto entre los cilindros y las esferas de los micrómetros, y los máximos desplazamientos se dan en las esquinas traseras de la nanoposicionadora y en la parte inferior de los micrómetros.

Y al igual que para el caso de 21°C, los desplazamientos que sufren las partes delicadas del ensamblaje (muestra, más genéricamente el portamuestras) son considerables. El desplazamiento en la componente Z sufrido en la superficie superior de la muestra (la que se mide con el sensor) es de -0,536 μm (contracción). Las esferas de los micrómetros presentan una expansión de 0,312 μm.

## Anexo 9: Código Matlab del modelo matemático de la NanoPla

En este anexo, se muestra el código de Matlab del modelo matemático de la NanoPla, así como las variables propias de cada ensayo que hay que especificar en dicho código para obtener el valor del punto de la muestra ( $\bar{P}_S^c$ ,  $\bar{P}_S^t$ ). Las variables son las siguientes:

- $z_{3,0}^c$  : distancia en Z de la base del sensor confocal respecto al origen de coordenadas del sistema del adaptador confocal {2c} (lo que se sube o baja el sensor antes de medir).
- $z_{3,0}^t$  : distancia en Z de la punta de medición del sensor táctil completamente extendido respecto al origen de coordenadas del sistema del adaptador táctil {2t}.
- $z_{P3}^c$  : valor que mide el sensor sin sus errores. Respecto al origen de coordenadas del sensor confocal {3c}.
- $z_{P3}^t$  : valor que mide el sensor sin sus errores. Respecto al origen de coordenadas del sensor táctil {3t}.
- $Z_{S,0}$  : altura de la muestra.
- $x^{(1)}$ : posición real en X a la que se mueve la plataforma móvil
- $y^{(1)}$ : posición real en Y a la que se mueve la plataforma móvil
- $Z_{P1}$  : altura micrómetro motorizado respecto al origen del sistema S.M.
- $Z_{P2}$  : altura micrómetro manual inferior derecho (vista superior) respecto al origen del sistema S.M.
- $Z_{P3}$  : altura micrómetro manual izquierdo (vista superior) respecto al origen del sistema S.M.
- $x^{(S)}$ : posición real en X a la que se mueve la nanoposicionadora.
- $y^{(S)}$  : posición real en Y a la que se mueve la nanoposicionadora.
- $z^{(S)}$  : posición real en Z a la que se mueve la nanoposicionadora.

El código de Matlab es el siguiente:

```
%% MODELO CINEMÁTICO DE LA NANOPLA
```

```
clear all;
```

```
% TODOS LOS VALORES EN MILÍMETROS
```

```
%% DEFINIR VALORES (INICIO)
```

```
% Distancia en Z de la base del sensor confocal respecto al origen de coordenadas del sistema del adaptador confocal {2c} (lo que se sube o baja el sensor antes de medir)
```

```
z_3_0c = 0; % DAR VALOR
```

```
% Distancia en Z de la punta de medición del sensor táctil completamente extendido respecto al origen de coordenadas del sistema del adaptador táctil {2t}
```

```
z_3_0t = 0; % DAR VALOR
```

#### % MEDICIÓN DEL SENSOR

$z\_P\_3c=0;$  % DAR VALOR (El valor que mide el sensor SIN SUS ERRORES. Respecto al origen de coordenadas del sensor confocal {3c})

$P\_3c=(0;0;z\_P\_3c);$

$z\_P\_3t=0;$  % DAR VALOR (El valor que mide el sensor SIN SUS ERRORES. Respecto al origen de coordenadas del sensor táctil {3t})

$P\_3t=(0;0;z\_P\_3t);$

#### % MUESTRA

$z\_S\_0 = 0;$  % DAR VALOR (Altura de la muestra)

#### % POSICIÓN DE LA PLATAFORMA MÓVIL

$x\_1=0;$  % DAR VALOR (posición en X a la que muevo la plataforma móvil)

$y\_1=0;$  % DAR VALOR (posición en Y a la que muevo la plataforma móvil)

% ALTURAS MICRÓMETROS (COMPROBAR DESPUÉS QUE SE CUMPLE LA HIPOTESIS DE ANGULOS PEQUEÑOS ( $E_x\_SM, E_y\_SM, E_z\_SM < 0,05 \text{ rad}$ )))

$z\_P1=0;$  % DAR VALOR (altura micrómetro motorizado (origen sistema S.M.))

$z\_P2=0;$  % DAR VALOR (altura micrómetro manual abajo derecha (origen sistema S.M.))

$z\_P3=0;$  % DAR VALOR (altura micrómetro manual izquierda (origen sistema S.M.))

#### %POSICIÓN DEL NPOINT

$x\_S=0;$  % DEFINIR VALOR (Posición real en X a la que muevo el nPoint, es decir, la media de Matlab)

$y\_S=0;$  % DEFINIR VALOR (Posición real en Y a la que muevo el nPoint, es decir, la media de Matlab)

$z\_S=0;$  % DEFINIR VALOR (Posición real en Z a la que muevo el nPoint, es decir, la media de Matlab)

#### %% OFFSET

% Offset plataforma móvil {1}

$x\_1\_0 = 0;$

$y\_1\_0 = 0;$

$z\_1\_0 = 73.5;$

$T\_1\_0 = [x\_1\_0; y\_1\_0; z\_1\_0];$

% Offset adaptador sensor confocal {2c}

```
x_2_0c = 0;  
y_2_0c = 0;  
z_2_0c = 5.3;  
T_2_0c = [x_2_0c; y_2_0c; z_2_0c];
```

% Offset sensor confocal {3c}

```
x_3_0c = 0;  
y_3_0c = 0;  
T_3_0c = [x_3_0c; y_3_0c; z_3_0c-16.2];
```

% Offset adaptador sensor táctil {2t}

```
x_2_0t = 0;  
y_2_0t = 0;  
z_2_0t = -27.6;  
T_2_0t = [x_2_0t; y_2_0t; z_2_0t];
```

% Offset sensor táctil {3t}

```
x_3_0t = 0;  
y_3_0t = 0;  
T_3_0t = [x_3_0t; y_3_0t; z_3_0t];
```

% Offset sistema referencia micrómetros {S.M}

```
x_SM_0 = 19;  
y_SM_0 = 38;  
z_SM_0 = -20;  
T_SM_0 = [x_SM_0; y_SM_0; z_SM_0];
```

% Offset nanopositionador

{N}

```
x_N_0 = -19;  
y_N_0 = -38;  
z_N_0 = 38;
```

```
T_N_0=[x_N_0; y_N_0; z_N_0];
```

```
% Offset sample {S}
```

```
x_S_0=0;
```

```
y_S_0=0;
```

```
T_S_0=[x_S_0; y_S_0; z_S_0];
```

```
%% MATRICES DE ROTACION (R_i) Y TRASLACION (T_i)
```

```
% E_i_k (epsilon_i_k): error de rotación en el eje i del bloque k respecto al bloque anterior
```

```
% D_i_k (delta_i_k): error lineal de rectitud en el eje i del bloque k respecto al bloque anterior
```

```
% A_ij_k (alfa_ij_k): error de perpendicularidad entre el sistema de coordenadas anterior y el actual del bloque k respecto al bloque anterior
```

```
% i_k: desplazamientos en eje i (positiva si movemos la herramienta y negativa si movemos la pieza) del bloque k respecto al bloque anterior
```

```
E_x_1=0; % DEFINIR VALOR
```

```
E_y_1=0; % DEFINIR VALOR
```

```
E_z_1=0; % DEFINIR VALOR
```

```
D_x_1=0; % DEFINIR VALOR
```

```
D_y_1=0; % DEFINIR VALOR
```

```
D_z_1=0; % DEFINIR VALOR
```

```
A_yx_1=0; % DEFINIR VALOR
```

```
R_1=[1, -E_z_1, E_y_1; E_z_1, 1, -E_x_1; -E_y_1, E_x_1, 1];
```

```
T_1=[x_1+D_x_1; y_1+D_y_1-x_1*A_yx_1 ; D_z_1];
```

```
R_2 = eye(3);
```

```
T_2c = zeros(3,1); %matriz de ceros
```

```
T_2t = zeros(3,1); %matriz de ceros
```

```
E_x_3c=0; % DEFINIR VALOR
```

```
E_y_3c=0; % DEFINIR VALOR
```

```
E_z_3c=0;
```

```
R_3c=[1, -E_z_3c, E_y_3c; E_z_3c ,1, -E_x_3c; -E_y_3c , E_x_3c, 1];
```

```
T_3c = zeros(3,1); %matriz de ceros
```

```
E_x_3t=0; % DEFINIR VALOR
```

```
E_y_3t=0; % DEFINIR VALOR
```

```
E_z_3t=0;
```

```
R_3c = [1, -E_z_3t, E_y_3t; E_z_3t ,1, -E_x_3t; -E_y_3t, E_x_3t, 1];
```

```
T_3t = zeros(3,1); %matriz de ceros
```

```
%% Plano micrómetros
```

```
P1=[0,0,z_P1]; %punto micrómetro motorizado (origen sistema S.M.)
```

```
P2=[-1,-80,z_P2]; %punto micrómetro manual abajo derecha (origen sistema S.M.)
```

```
P3=[-57,-53.9,z_P3]; %punto micrómetro manual izquierda (origen sistema S.M.)
```

```
n=cross(P2-P1 , P3-P1);
```

```
mod_n=norm (n);
```

```
X= [1,0,0];
```

```
Y= [0,1,0];
```

```
Z= [0,0,1];
```

```
ndX=dot(n,X);
```

```
angX=acosd(abs(ndX)/(1*mod_n));
```

```
angX2=90-angX;
```

```
ndY=dot(n,Y);
```

```
angY=acosd(abs(ndY)/(1*mod_n));
```

```
angY2=90-angY;
```

```
ndZ=dot(n,Z);
```

```
angZ=acosd(abs(ndZ)/(1*mod_n));
```

```
%% Continuación definición cadena cinemática
```

```
E_x_SM=degtorad(angX2) % angulo en rad (eje X)
```

```
E_y_SM=degtorad(angY2) % angulo en rad (eje Y)
```

```
E_z_SM=degtorad(angZ) % angulo en rad (eje Z)
```

```
R_SM = [1, -E_z_SM ,E_y_SM; E_z_SM 1,-E_x_SM; -E_y_SM, E_x_SM ,1];
```

```
D_z_SM=0.0001; % Obtenido del catálogo del micrómetro motorizado
```

```
T_SM = [0 ; 0 ; -z_P1+D_z_SM];
```

```
T_N = zeros(3,1); %matriz de ceros
```

```
R_N = eye(3);
```

```
% l_error_i: error no lineal de la nanoposicionadora comercial
```

```
% l_error_nl_x = l_error_x_S*x_S;
```

```
% l_error_nl_y = l_error_y_S*y_S;
```

```
% l_error_nl_z = l_error_z_S*z_S;
```

```
l_error_nl_x=0; % DEFINIR VALOR
```

```
l_error_nl_y=0; % DEFINIR VALOR
```

```
l_error_nl_z=0; % DEFINIR VALOR
```

```
T_S = [-x_S+l_error_nl_x ; -y_S+l_error_nl_y ; -z_S+l_error_nl_z];
```

```
R_S = eye(3);
```

```
%% ECUACIÓN CADENA CINEMÁTICA
```

```
P_Sc = inv(R_S)*(inv(R_N)*(inv(R_SM)*(R_1*(R_2*(R_3c*P_3c + T_3c +  
T_3_0c)+T_2c+T_2_0c)+T_1+T_1_0-T_SM-T_SM_0)-T_N-T_N_0)-T_S-T_S_0)); % confocal
```

```
P_St = inv(R_S)*(inv(R_N)*(inv(R_SM)*(R_1*(R_2*(R_3t*P_3t + T_3t +  
T_3_0t)+T_2t+T_2_0t)+T_1+T_1_0-T_SM-T_SM_0)-T_N-T_N_0)-T_S-T_S_0)); % tactil
```

## Anexo 10: Modelo matemático del soporte externo del confocal y su código Matlab

En este anexo se define el modelo matemático del soporte externo del confocal y se escribe el código de Matlab realizado para la conocer el punto de medición de la muestra.

### Modelo matemático

Para comenzar a definir el modelo matemático, se recorre el camino por el lado del sensor desde el punto del haz que emite el sensor sobre la muestra ( $P_{SC}$ ) hasta el sistema de referencia común  $\{0\}$ . Esto se muestra en la siguiente ecuación.

$$\overline{P_0} = \overline{R_{SC}} \cdot \overline{P_{SC}} + (\overline{T_{SC}} + \overline{T_{SC,0}}) \quad (\text{A.2})$$

Ahora, se recorre el camino por el lado de la nanoposicionadora desde el punto de la muestra ( $P_S$ ) hasta el sistema de referencia común  $\{0\}$ . Esto se muestra en las siguientes ecuaciones.

$$\overline{P_N} = \overline{R_S} \cdot \overline{P_S} + (\overline{T_S} + \overline{T_{S,0}}) \quad (\text{A.3})$$

$$\overline{P_0} = \overline{R_N} \cdot \overline{P_N} + (\overline{T_N} + \overline{T_{N,0}}) \quad (\text{A.4})$$

Teniendo ambos caminos recorridos, estos se relacionan:

$$\overline{R_{SC}} \cdot \overline{P_{SC}} + (\overline{T_{SC}} + \overline{T_{SC,0}}) = \overline{R_N} \cdot [\overline{R_S} \cdot \overline{P_S} + (\overline{T_S} + \overline{T_{S,0}})] + (\overline{T_N} + \overline{T_{N,0}}) \quad (\text{A.5})$$

Y se despeja la incógnita ( $P_S$ ) (el punto de la muestra), siendo esta la ecuación del modelo matemático del soporte externo:

$$\overline{P_S} = [\overline{R_S}]^{-1} \cdot [(\overline{R_N})^{-1} \cdot (\overline{R_{SC}} \cdot \overline{P_{SC}} + \overline{T_{SC}} + \overline{T_{SC,0}} - \overline{T_N} - \overline{T_{N,0}}) - \overline{T_S} - \overline{T_{S,0}}] \quad (\text{A.6})$$

A continuación, se definen las matrices de traslación de los offsets (todas las medidas en mm).

$$\overline{T_{SC,0}} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ z_{SC,0} - 16,2 \end{pmatrix} \quad (\text{A.7})$$

Donde  $z_{SC,0}$  es la distancia en Z (en milímetros) a la que se coloque la parte inferior del sensor confocal respecto al origen de coordenadas del sistema de la base fija  $\{0\}$ . En la matriz anterior se reduce en 16,2 mm al valor  $z_{SC,0}$  debido a que el origen del sistema de coordenadas del sistema  $\{SC\}$  se sitúa en el vértice del haz (posición en sentido negativo en Z) y ese valor es el de la distancia de trabajo mínima.

Cabe destacar que, al igual, que ocurría en el modelo matemático de la NanoPla, la altura a la que se sube o se baja el sensor confocal se considera como offset en su origen de coordenadas y no como desplazamiento en la matriz de traslación debido a que este posicionamiento se realiza antes de encender la nanoposicionadora y no durante la medición.

$$\overline{T_{N,0}} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 33 \end{pmatrix} \quad (\text{A.8})$$

$$\overline{T_{S,0}} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ z_{S,0} \end{pmatrix} \quad (\text{A.9})$$

En este último vector, el valor de  $z_{S,0}$  es la altura de la muestra.

En cuanto a las matrices de rotación y traslación, se comienza definiendo la matriz de rotación del sensor confocal es la siguiente:

$$\overline{R_{SC}} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & \varepsilon_y^{\{SC\}} \\ 0 & 1 & -\varepsilon_x^{\{SC\}} \\ -\varepsilon_y^{\{SC\}} & \varepsilon_x^{\{SC\}} & 1 \end{pmatrix} \quad (\text{A.10})$$

Al igual que ocurría en el modelo matemático de la NanoPla,  $\varepsilon_z^{\{SC\}}$  es cero ya que corresponde al giro del sensor respecto el eje Z, y dicho giro no afecta a la medida.

La matriz de traslación del sensor respecto a la base fija se considera nula debido que, como se ha comentado anteriormente, la medida que sube y baja el sensor se tiene en cuenta en la matriz de traslación del origen de coordenadas dado que son desplazamientos que se producen antes de la medición del sensor. Es decir, durante el proceso de medición, el sensor es solidario con la base fija.

$$\overline{T_{SC}} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (\text{A.11})$$

El punto de la muestra ( $P_{SC}$ ) respecto al origen de coordenadas del sistema de la base fija {0} depende de la medida tomada por el sensor:

$$P_{SC} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ z_{P_{SC}} \end{pmatrix} \quad (\text{A.12})$$

Siendo  $z_{P_{SC}}$  la distancia que mide el sensor ya corregida, a la que mide el sensor se le restan los errores de medición (error lineal  $\delta_{P_{SC},l}$ , la resolución  $\delta_{P_{SC},r}$  y el ruido  $\delta_{P_{SC},n}$ ). Es decir,  $z_{P_{SC}}$  es la distancia (en Z) de la muestra respecto vértice del haz del sensor (origen de coordenadas {SC}) sin los errores de medición del sensor. Este valor es negativo puesto que la muestra se encuentra en el sentido de -Z de dicho origen de coordenadas.

$$z_{P_{SC}} = z_{P_{SC},experimental} + \delta_{P_{SC},l} + \delta_{P_{SC},r} + \delta_{P_{SC},n} \quad (\text{A.13})$$

En cuanto al otro lado de la cadena cinemática se tiene el sistema nanoposicionador y la muestra. Primeramente, se tiene el sistema nanoposicionador {N}, en donde la nanoposicionadora apoya sobre la base del soporte externo {0}. Por ello, la matriz de traslación del sistema nanoposicionador {N} es nula, pero se deben de considerar en la matriz de rotación ( $\overline{R_N}$ ) los giros que puedan existir.

$$\overline{T_N} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (\text{A.14})$$

$$\overline{R_N} = \begin{pmatrix} 1 & -\varepsilon_z^{\{N\}} & \varepsilon_y^{\{N\}} \\ \varepsilon_z^{\{N\}} & 1 & -\varepsilon_x^{\{N\}} \\ -\varepsilon_y^{\{N\}} & \varepsilon_x^{\{N\}} & 1 \end{pmatrix} \quad (\text{A.15})$$

La información de la hoja de datos de la nanoposicionadora comercial solo incluye errores de no linealidad para los tres ejes cartesianos de movimiento. Por lo que la matriz  $\overline{T_S}$  resulta:

$$\bar{T}_S = \begin{pmatrix} -x^{\{S\}} + l_{error,x}^{\{S\}} \cdot x^{\{S\}} \\ -y^{\{S\}} + l_{error,y}^{\{S\}} \cdot y^{\{S\}} \\ -z^{\{S\}} + l_{error,z}^{\{S\}} \cdot z^{\{S\}} \end{pmatrix} \quad (\text{A.16})$$

Siendo  $l_{error,i}^{\{S\}}$  el error no lineal de la nanoposicionadora comercial proporcionado por el fabricante.

La matriz de rotación de la muestra  $\bar{R}_S$  se considera identidad porque los errores angulares son despreciables en esta plataforma, incluso el propio fabricante no los menciona en las especificaciones.

$$\bar{R}_S = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (\text{A.17})$$

Con todas estas consideraciones se puede simplificar la ecuación del modelo matemático del soporte externo (Ec. A.6) que da a conocer las coordenadas del punto de la muestra que se está midiendo  $\bar{P}_S$  (Ec. A.18).

$$\bar{P}_S = \begin{pmatrix} X_{P_S} \\ Y_{P_S} \\ Z_{P_S} \end{pmatrix} = [\bar{R}_S]^{-1} \cdot [ [\bar{R}_N]^{-1} \cdot (\bar{R}_{SC} \cdot \bar{P}_{SC} + \bar{T}_{SC,0} - \bar{T}_{N,0}) - \bar{T}_S - \bar{T}_{S,0} ] \quad (\text{A.18})$$

Por otro lado, una vez conocida la ecuación del modelo matemático y los errores que afectan de manera teórica, se crea el código MATLAB para que, introduciendo los valores de las variables propias de cada ensayo, obtener el valor del punto de la muestra ( $\bar{P}_S$ ). Las variables propias de cada ensayo son las siguientes:

- $Z_{CS,0}$  : distancia en Z (en milímetros) de la parte inferior del sensor confocal respecto al origen de coordenadas del sistema de la base fija {0}.
- $Z_{P_{SC}}$  : valor medio que mide el sensor sin sus errores. Respecto del al origen de coordenadas del sistema de la base fija {0}.
- $Z_{S,0}$  : altura de la muestra.
- $x^{\{S\}}$  : posición real en X a la que se mueve la nanoposicionadora.
- $y^{\{S\}}$  : posición real en Y a la que se mueve la nanoposicionadora.
- $z^{\{S\}}$  : posición real en Z a la que se mueve la nanoposicionadora.

Finalmente, se muestra el código de Matlab:

#### Código Matlab

```
%% MODELO CINEMÁTICO DEL SOPORTE CONFOCAL EXTERNO
```

```
clear all;
```

```
% TODOS LOS VALORES EN MILÍMETROS
```

```
%% DEFINIR VALORES (INICIO)
```

% Distancia en Z (en milímetros) de la parte inferior del sensor confocal respecto al origen de coordenadas del sistema de la base fija {0}

`z_SC_0 = 0; % DAR VALOR`

% MEDICIÓN DEL SENSOR

`z_P_SC=0; % DAR VALOR` (El valor medio que mide el sensor SIN SUS ERRORES. Respecto del al origen de coordenadas del sistema de la base fija {0})

`P_SC=(0;0;z_P_SC);`

% MUESTRA

`z_S_0 = 0; % DAR VALOR` (Altura de la muestra.)

%POSICIÓN DEL NPOINT

`x_S=0; % DEFINIR VALOR` (Posición real en X a la que muevo el nPoint, es decir, la media de Matlab)

`y_S=0; % DEFINIR VALOR` (Posición real en Y a la que muevo el nPoint, es decir, la media de Matlab)

`z_S=0; % DEFINIR VALOR` (Posición real en Z a la que muevo el nPoint, es decir, la media de Matlab)

%% OFFSET

% Offset sensor confocal {SC}

`x_SC_0 = 0;`

`y_SC_0 = 0;`

`T_SC_0 = [x_SC_0; y_SC_0; z_SC_0-16,2];`

% Offset nanoposicionador {N}

`x_N_0 = 0;`

`y_N_0 = 0;`

`z_N_0 = 33;`

`T_N_0 = [x_N_0; y_N_0; z_N_0];`

% Offset sample {S}

`T_S_0 = [0; 0; z_S_0];`

## %% MATRICES DE ROTACION (R\_i) Y TRASLACION (T\_i)

% E\_i\_k (epsilon\_i\_k): error de rotación en el eje i del bloque k respecto al bloque anterior

% D\_i\_k (delta\_i\_k):error lineal de rectitud en el eje i del bloque k respecto al bloque anterior

% A\_ij\_k (alfa\_ij\_k): error de perpendicularidad entre el sistema de coordenadas anterior y el actual del bloque k respecto al bloque anterior

% i\_k: desplazamientos en eje i (positiva si movemos la herramienta y negativa si movemos la pieza) del bloque k respecto al bloque anterior

E\_x\_SC=0; % DEFINIR VALOR

E\_y\_SC=0; % DEFINIR VALOR

R\_SC = [1 0 E\_y\_SC; 0 1 -E\_x\_SC; -E\_y\_SC E\_x\_SC 1];

T\_SC = zeros(3,1); %matriz de ceros

E\_x\_N=0; % DEFINIR VALOR

E\_y\_N=0; % DEFINIR VALOR

E\_z\_N=0; % DEFINIR VALOR

R\_N = [1 , -E\_z\_N, E\_y\_N; E\_z\_N, 1, -E\_x\_N; -E\_y\_SC ,E\_x\_N ,1];

T\_N = zeros(3,1); %matriz de ceros

% l\_error\_i: error no lineal de la nanoposicionadora comercial

% l\_error\_nl\_x=l\_error\_x\_S\*x\_S;

% l\_error\_nl\_y=l\_error\_y\_S\*y\_S;

% l\_error\_nl\_z=l\_error\_z\_S\*z\_S;

l\_error\_nl\_x=0; % DEFINIR VALOR

l\_error\_nl\_y=0; % DEFINIR VALOR

l\_error\_nl\_z=0; % DEFINIR VALOR

T\_S = [-x\_S+l\_error\_nl\_x ; -y\_S+l\_error\_nl\_y ; -z\_S+l\_error\_nl\_z];

R\_S = eye(3);

## %% ECUACIÓN CADENA CINEMÁTICA

P\_S = inv(R\_S)\*(inv(R\_N)\*(R\_SC\*P\_SC+T\_SC+T\_SC\_0-T\_N-T\_N\_0)-T\_S-T\_S\_0);

# Trabajo Fin de Máster

Diseño e integración de instrumentos metrológicos  
en una nanoposicionadora 2D de alto rango.

Design and integration of metrological instruments  
in a high-range 2D nanopositioning platform.

## Planos

Autora

Laura Muro Fraguas

Directores

José Antonio Albajez García  
Lucía Candela Díaz Pérez

Máster en Ingeniería Mecánica

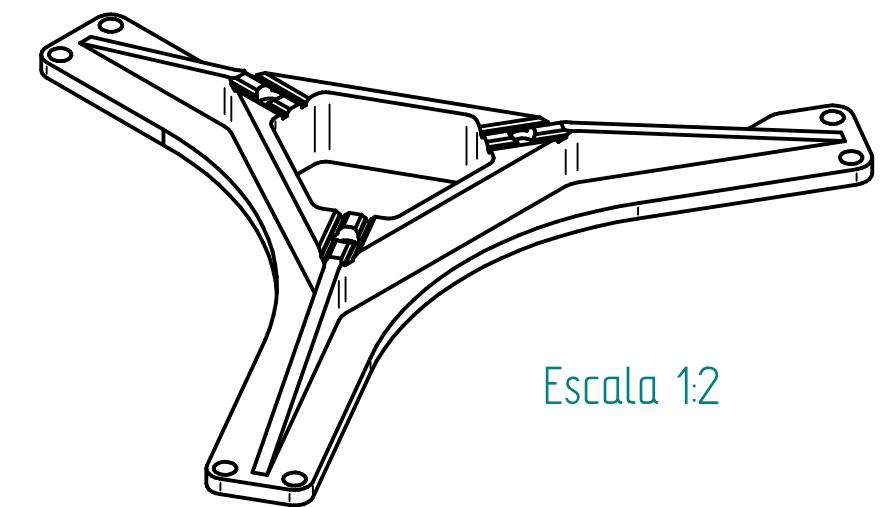
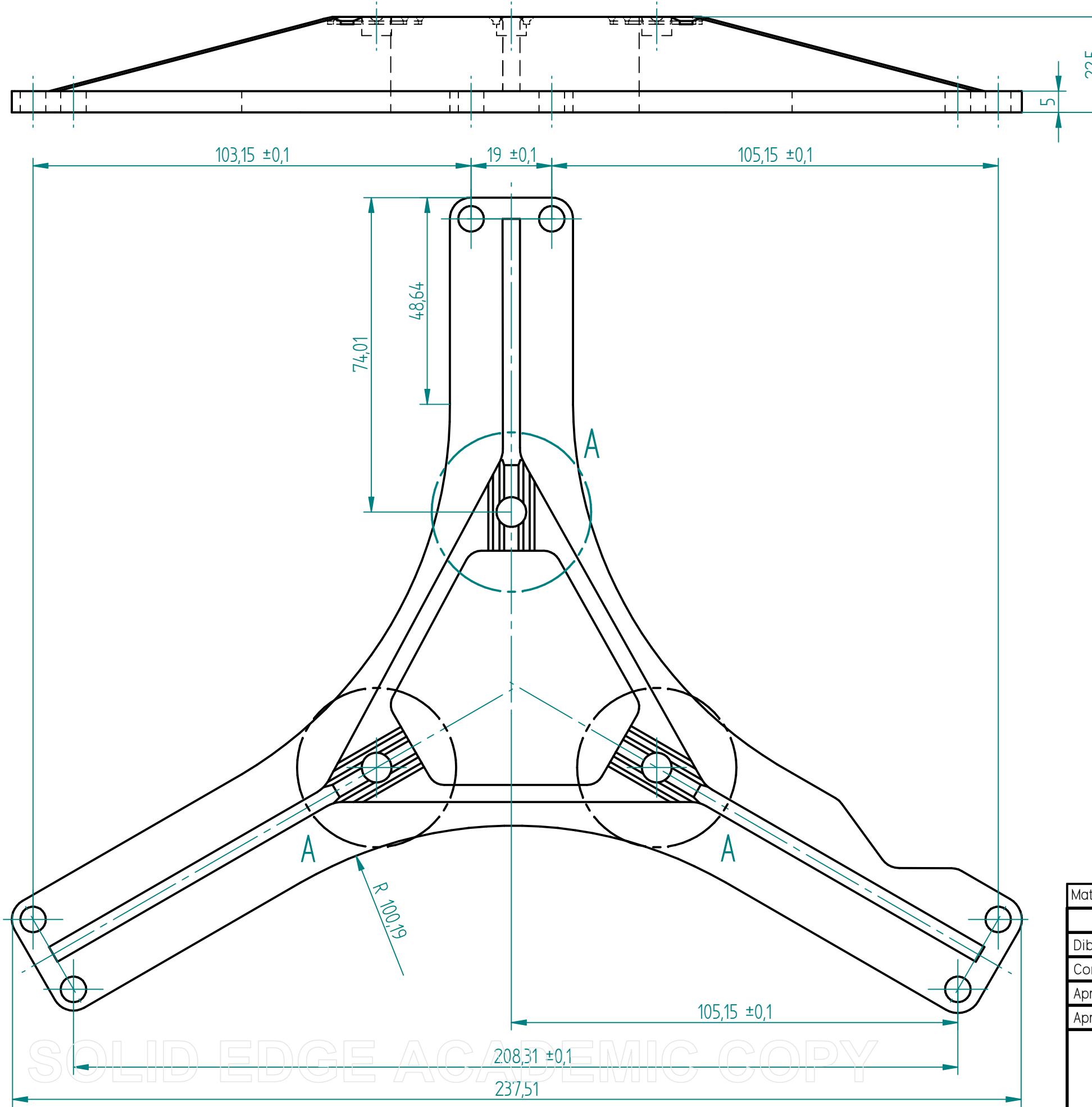
ESCUELA DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

2021



## Índice de planos

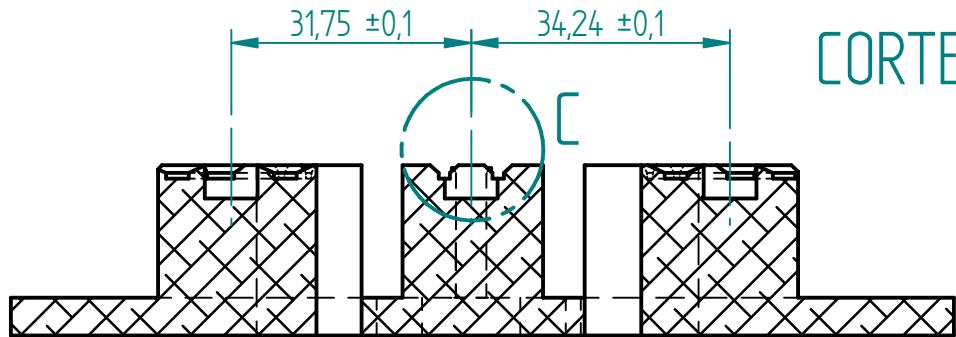
Plano 1: Soporte sensor .....	119
Plano 2: Adaptador sensor confocal .....	122
Plano 3: Adaptador sensor táctil .....	124
Plano 4: Soporte nanoposicionadora .....	126



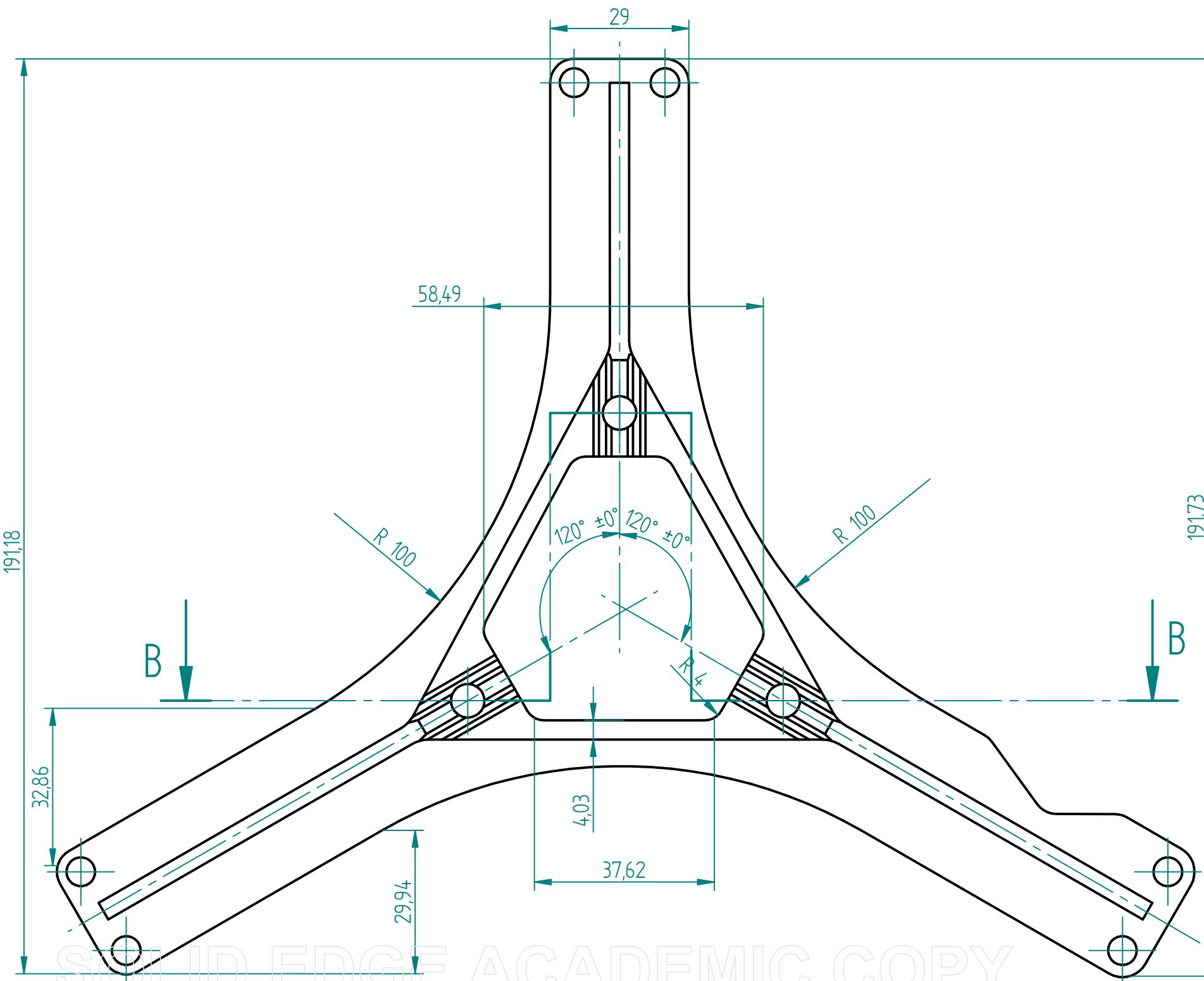
Material	Aluminio 7075 - T6	
Nombre		Fecha
Dibujado	Laura Muro	25/10/2021
Comprobado		
Aprobado 1		
Aprobado 2		
Salvo indicación contraria cotas en milímetros ángulos en grados tolerancias $\pm 0,5$ y $\pm 1^\circ$		
A3	Plano	Rev 1
Archivo: Plano Soporte sensor.dft		
Escala 1:1	Peso 224 g	Hoja 1 de 3

**Solid Edge**  
**Siemens PLM**

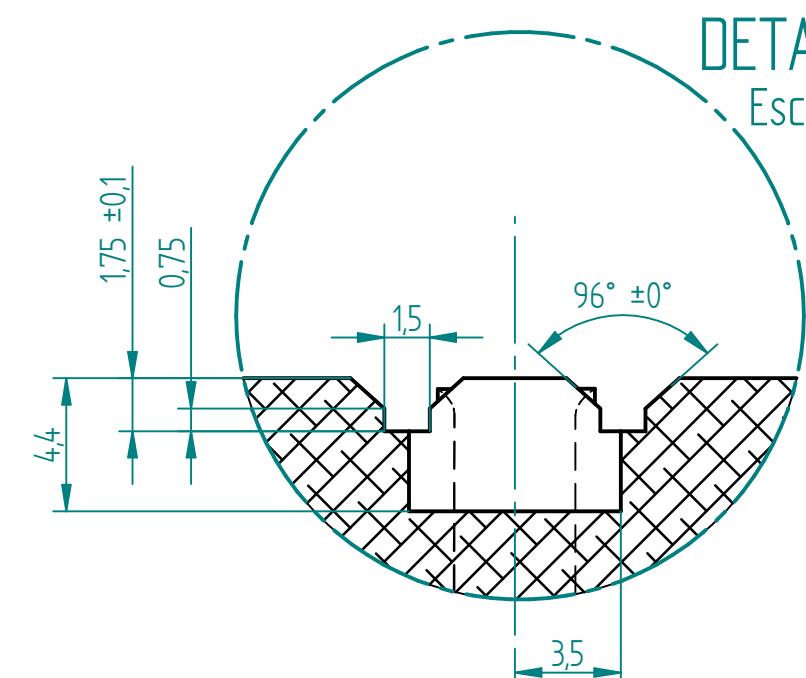
**Título**  
**Soporte sensor**



CORTE B-B

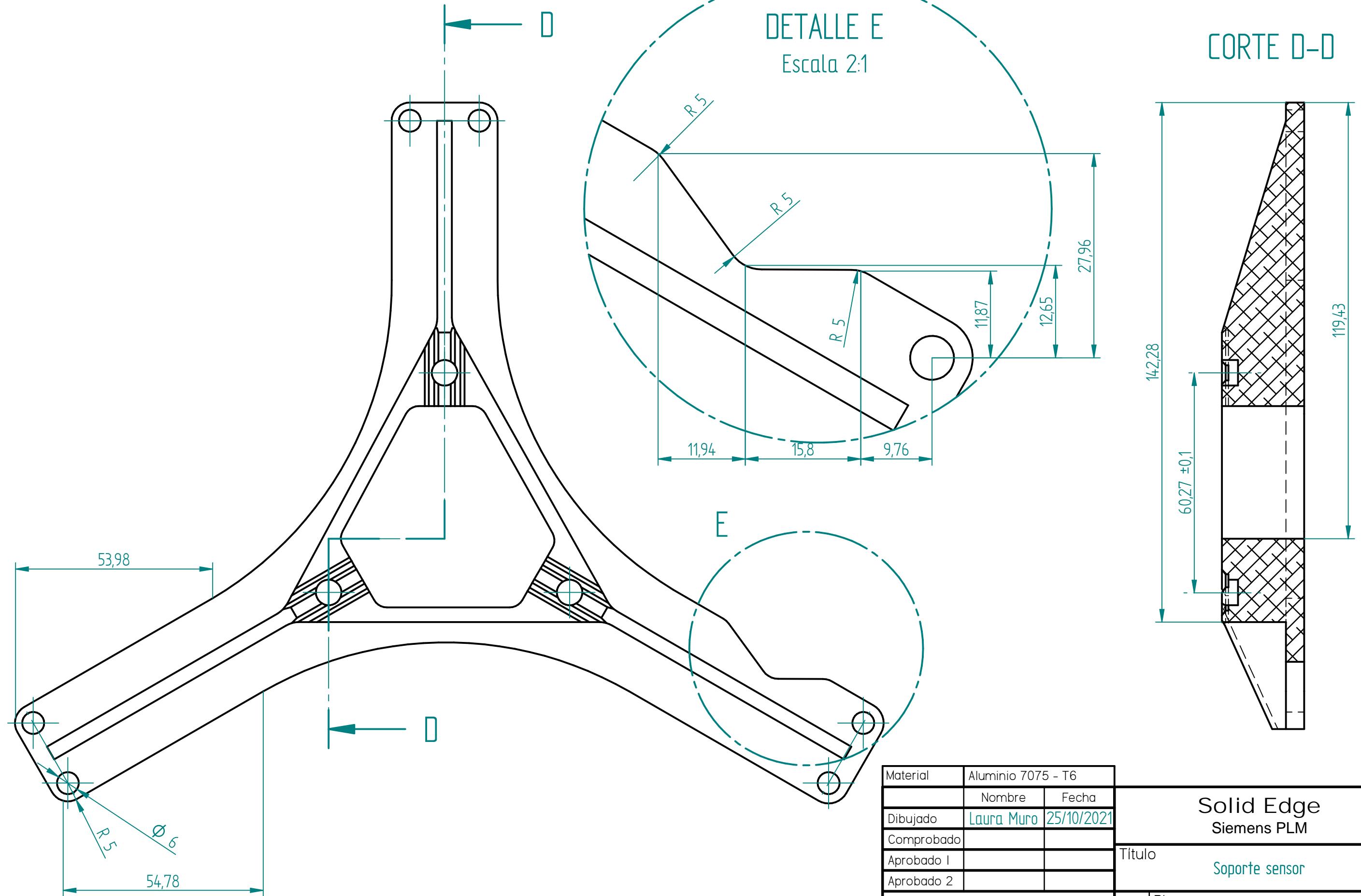


DETALLE C  
Escala 4:1



Material	Aluminio 7075 - T6	
Nombre		Fecha
Dibujado	Laura Muro	25/10/2021
Comprobado		
Aprobado 1		
Aprobado 2		
Solid Edge Siemens PLM		
Título Soporte sensor		
A3	Plano	Rev 1
Archivo: Plano Soporte sensor.dft		
Escala 1:1	Peso 224 g	Hoja 2 de 3

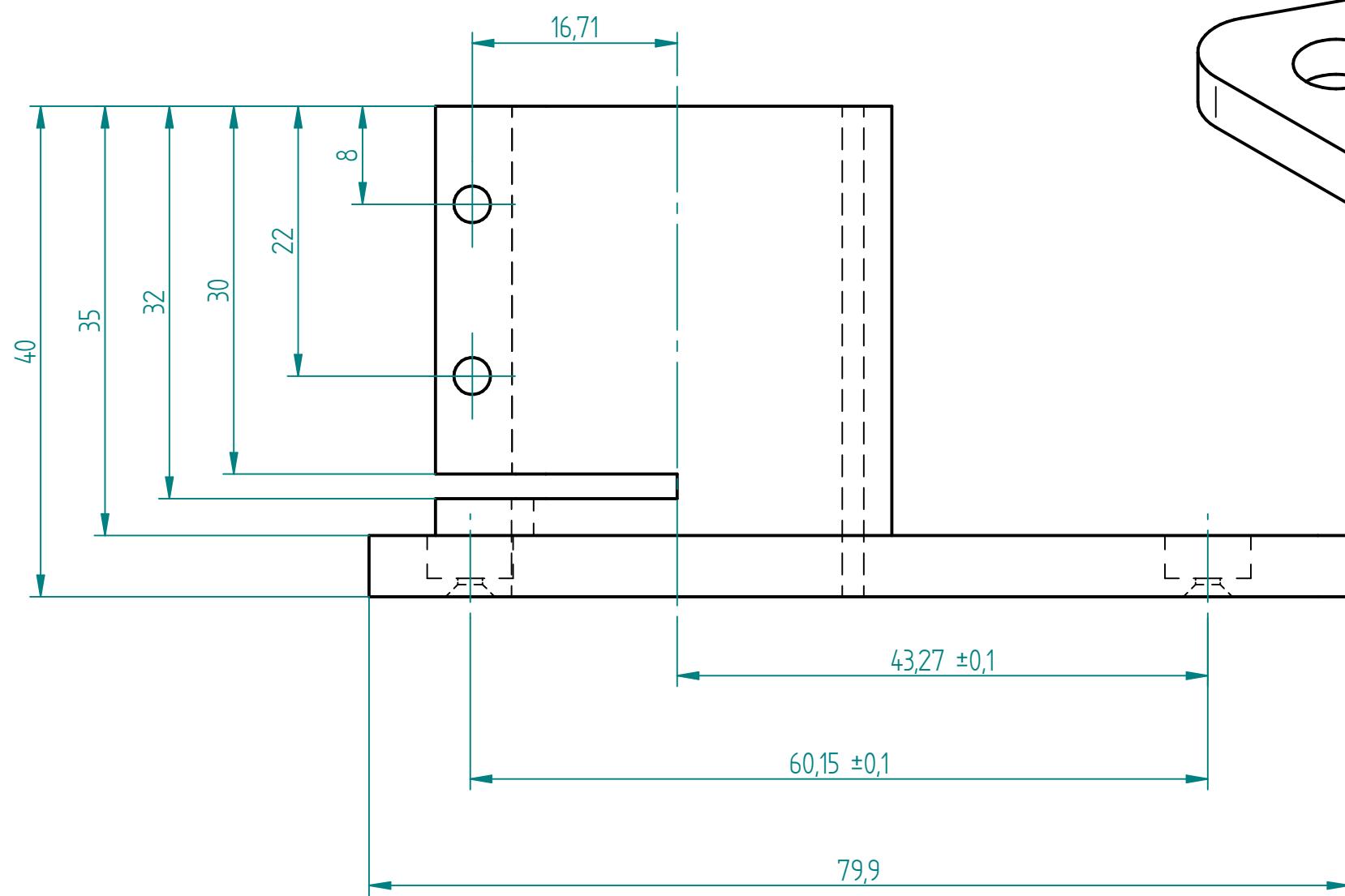
SOLID EDGE ACADEMIC COPY



Material	Aluminio 7075 - T6	
Nombre		Fecha
Dibujado	Laura Muro	25/10/2021
Comprobado		
Aprobado 1		
Aprobado 2		

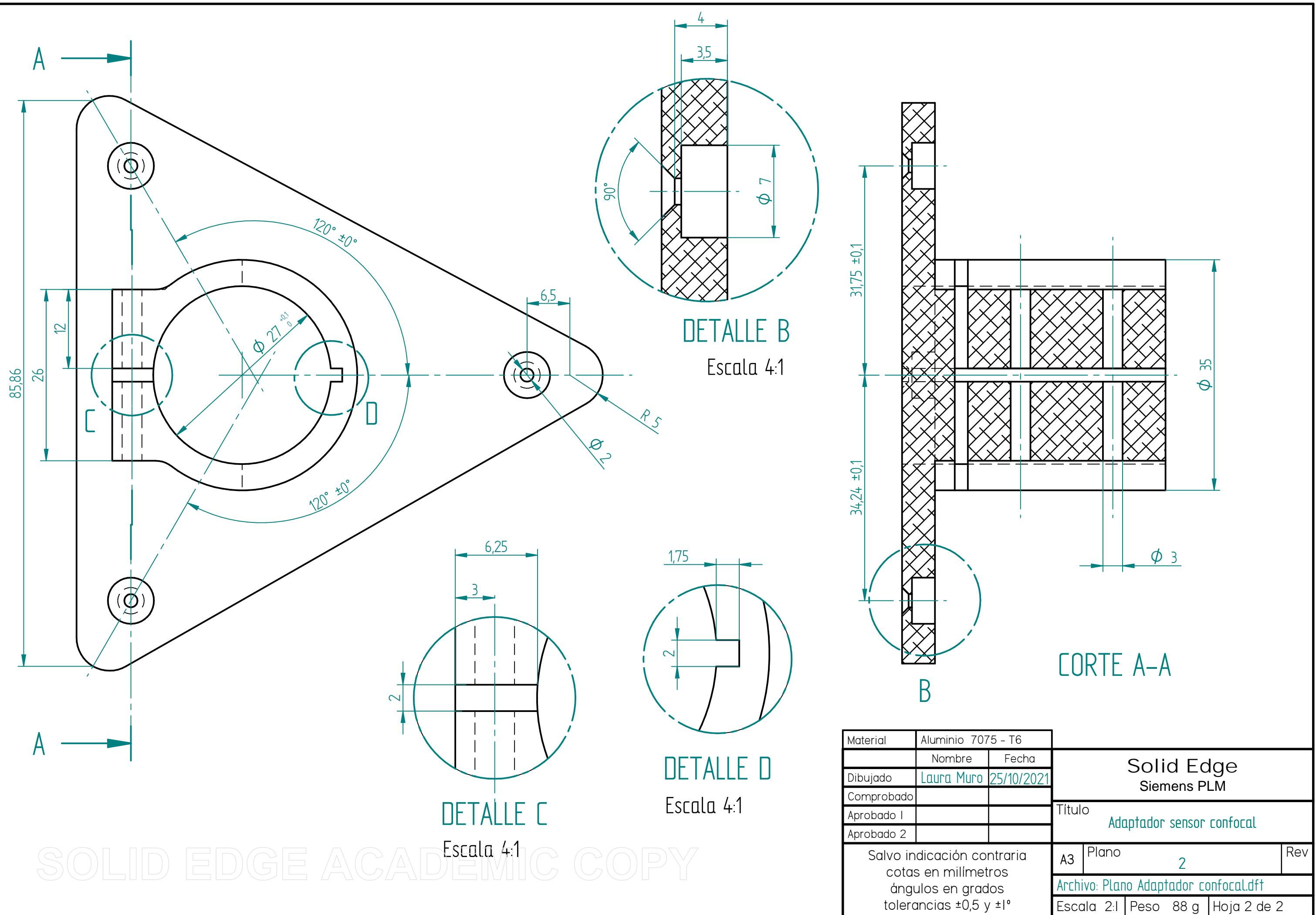
Solid Edge		
Siemens PLM		
Título		
	Soporte sensor	
A3	Plano	Rev
	1	
Archivo: Plano Soporte sensor.dft		
Escala 1:1	Peso 224 g	Hoja 3 de 3

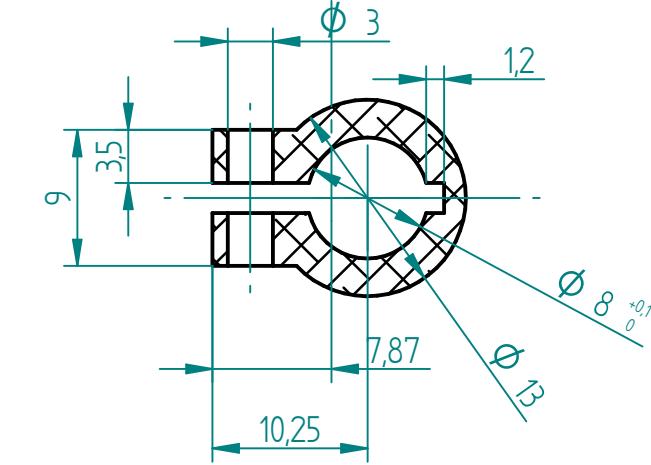
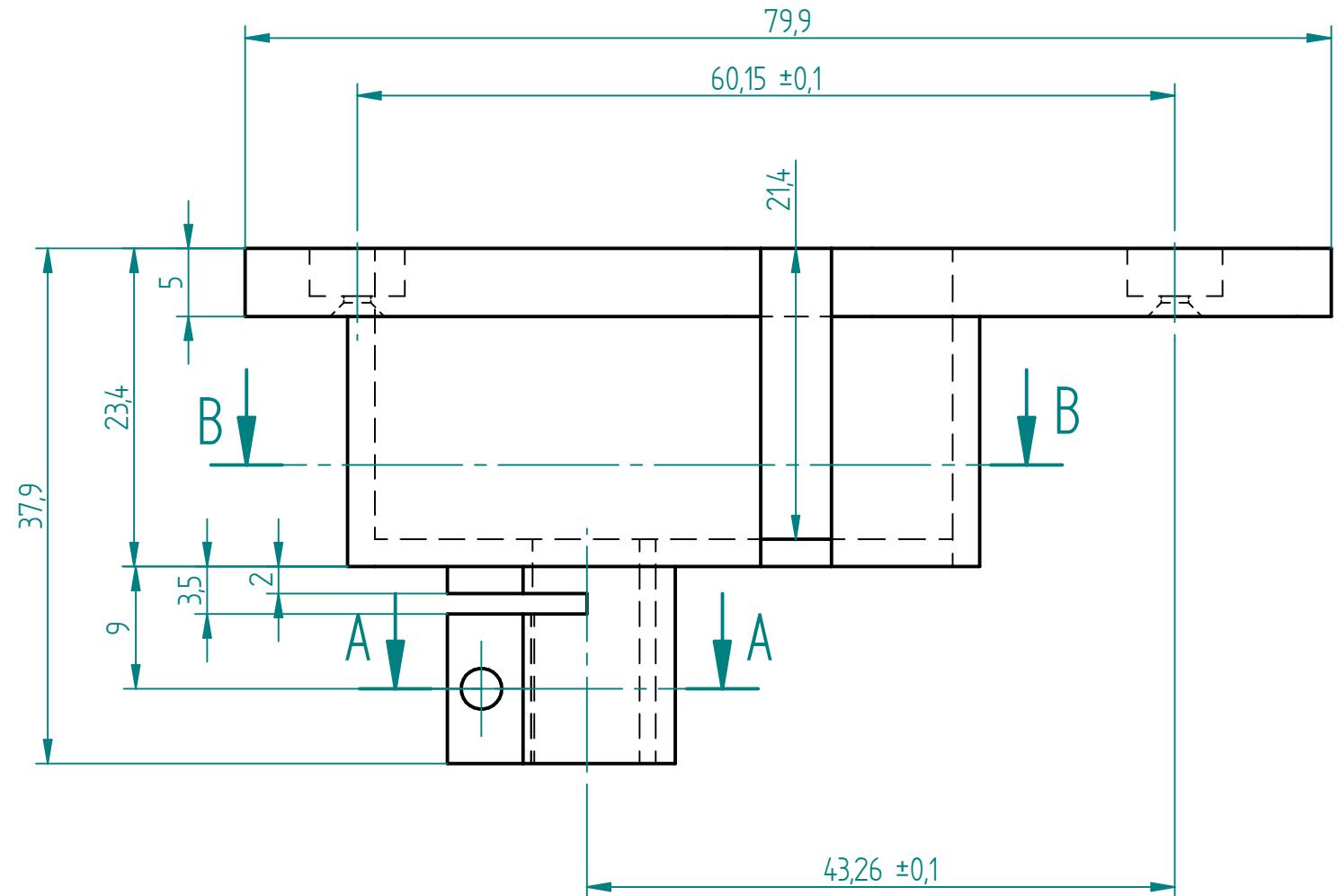
SOLID EDGE ACADEMIC COPY



Material	Aluminio 7075 - T6		<b>Solid Edge</b> Siemens PLM	
	Nombre	Fecha		
Dibujado	Laura Muro	25/10/2021	Título <i>Adaptador sensor confocal</i>	
Comprobado				
Aprobado 1			A3 Plano 2 Rev	
Aprobado 2				
Salvo indicación contraria cotas en milímetros ángulos en grados tolerancias ±0,5 y ±1°			Archivo: Plano Adaptador confocal.dft	
Escala 2:1	Peso 88 g	Hoja 1 de 2		

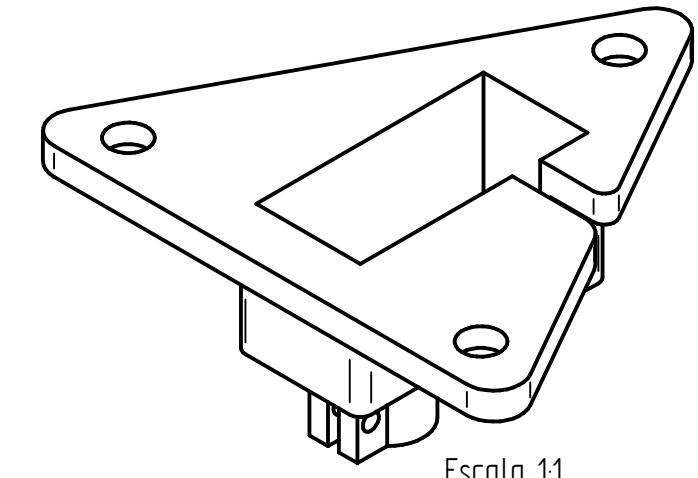
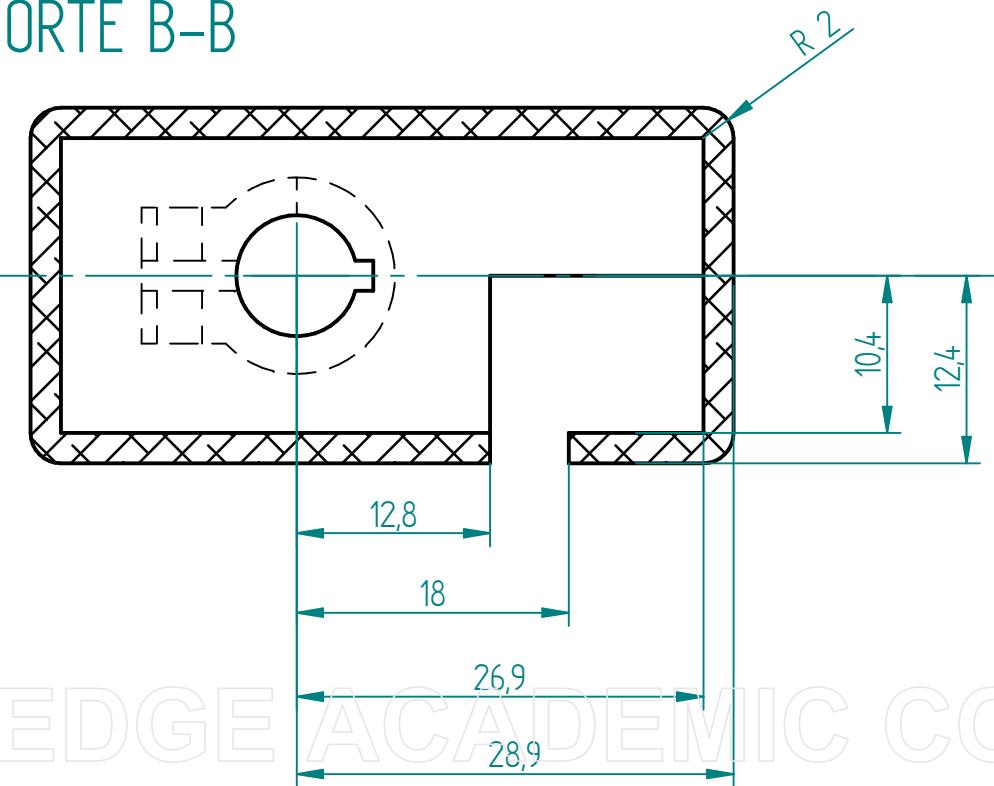
SOLID EDGE ACADEMIC COPY





CORTE A-A

CORTE B-B

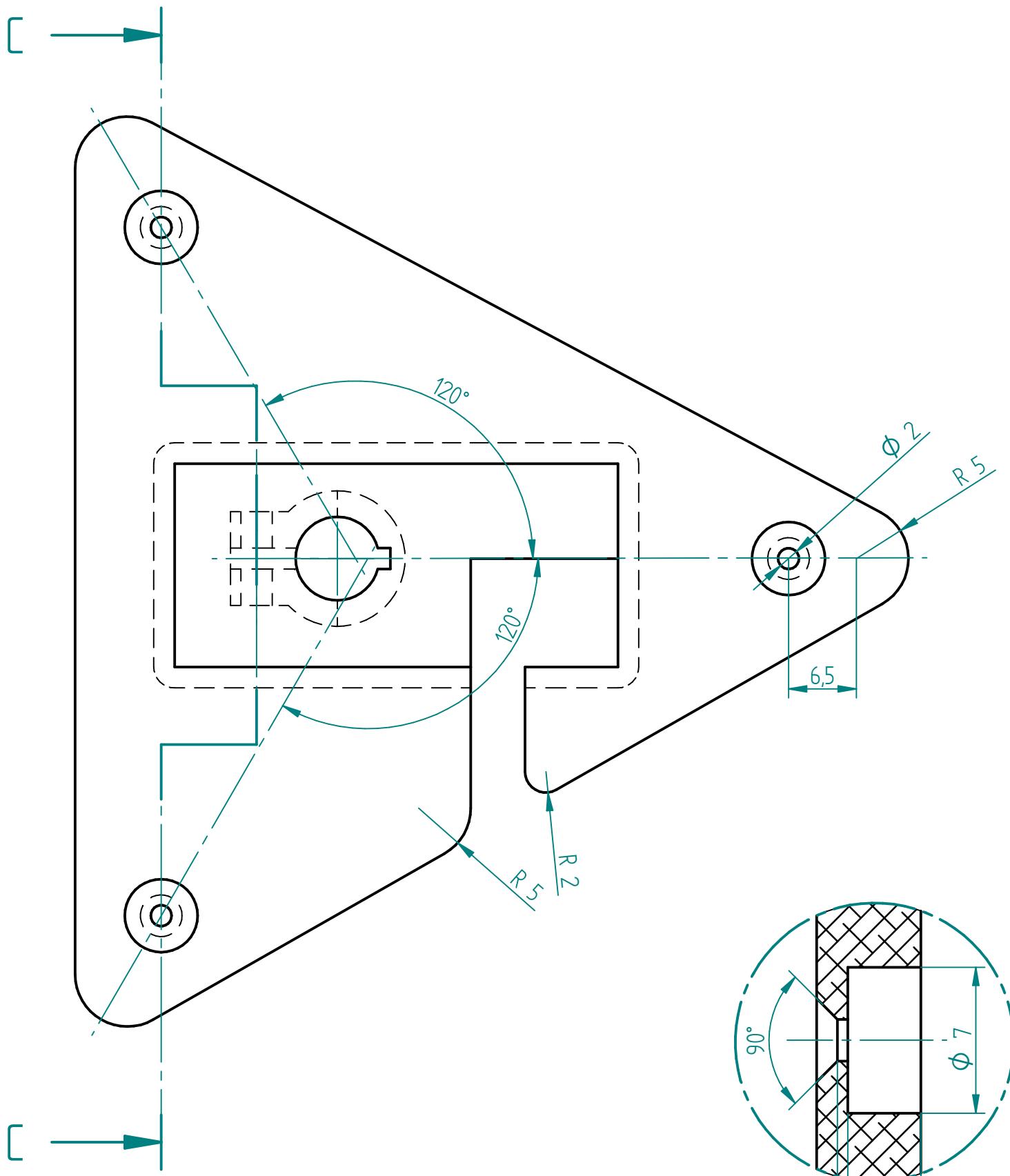


SOLID EDGE ACADEMIC COPY

Material	Aluminio 7075 - T6	
Nombre	Laura Muro	Fecha
Dibujado	25/10/2021	
Comprobado		
Aprobado 1		
Aprobado 2		
Salvo indicación contraria cotas en milímetros ángulos en grados tolerancias ±0,5 y ±1°		
A3	Plano	Rev 3
Archivo: Plano_Adaptador_tactil.dft		
Escala 2:1	Peso 60 g	Hoja 1 de 2

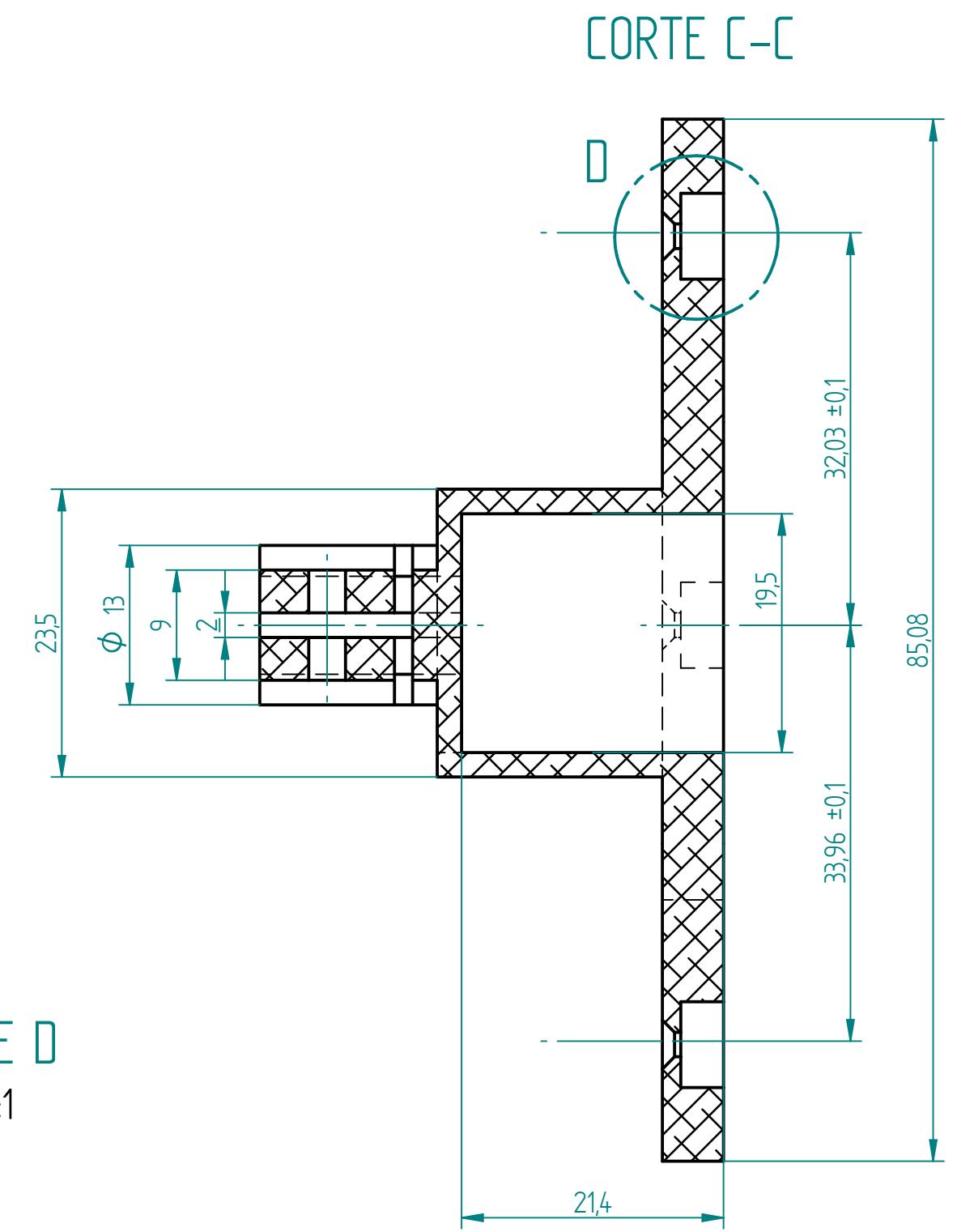
Solid Edge  
Siemens PLM

Título  
Adaptador sensor táctil

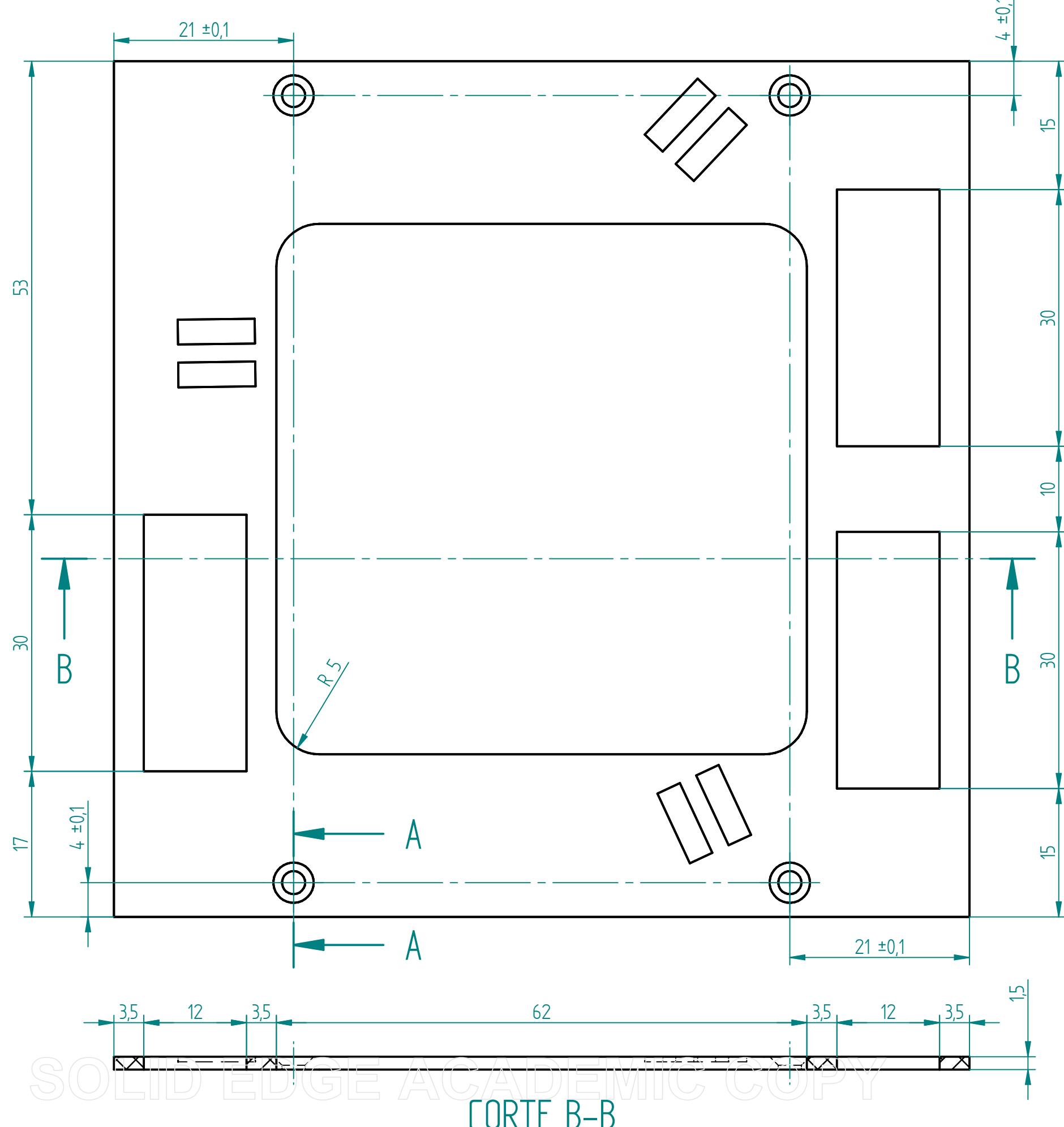


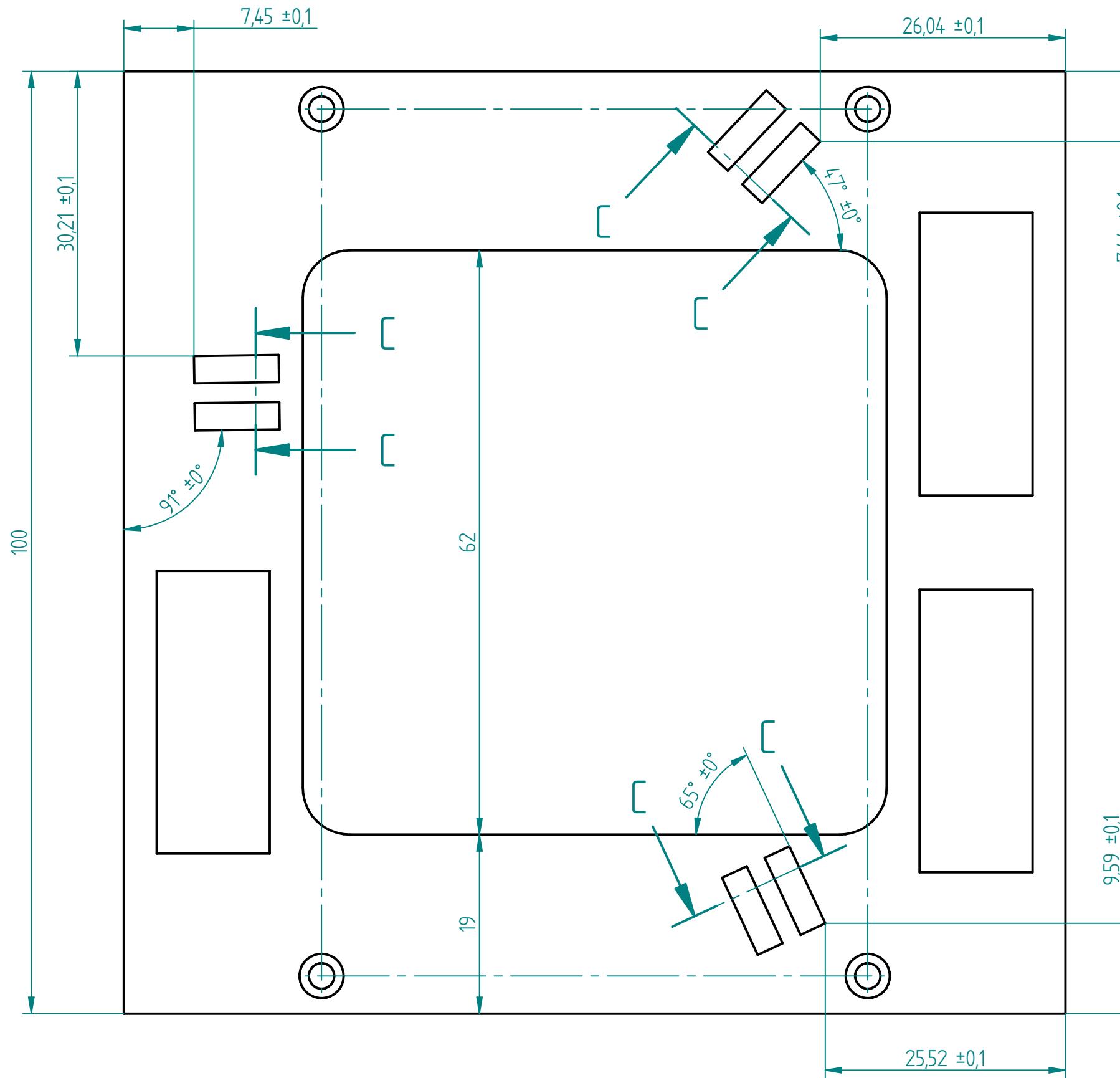
SOLID EDGE ACADEMIC COPY

DETALLE D  
Escala 4:1



Material	Aluminio 7075 - T6		Solid Edge	
Nombre		Fecha	Siemens PLM	
Dibujado	Laura Muro	25/10/2021		
Comprobado			Título	
Aprobado 1			Adaptador sensor táctil	
Aprobado 2				
Salvo indicación contraria cotas en milímetros ángulos en grados tolerancias ±0,5 y ±1°			A3	Plano 3 Rev
			Archivo: Plano Adaptador tactil.dft	
			Escala 2:1	Peso 60 g Hoja 2 de 2





### CORTE C-C

Escala 5:1

Material	Aluminio 7075 - T6	
Nombre		Fecha
Dibujado	Laura Muro	25/10/2021
Comprobado		
Aprobado 1		
Aprobado 2		

Solid Edge		
Siemens PLM		
Título		
Salvo indicación contraria cotas en milímetros ángulos en grados tolerancias ±0,5 y ±1°	Plano	Rev
A3	4	
Archivo: Plano soporte nPoint.dft		
Escala 2:1	Peso 20 g	Hoja 2 de 2

SOLID EDGE ACADEMIC COPY