Universidad Zaragoza
1542

Trabajo Fin de Grado

Análisis de un ballbar telescópico de alta precisión basado en multilateración simultánea y del soporte necesario para anclar el sistema en el cabezal de una máquina herramienta

Analysis of a high-precision telescopic ballbar based on simultaneous multilateration and the support required to anchor the system to a machine tool spindle

Autor:

Jaime Serrano Bernad

Director/es

Francisco Javier Brosed Dueso

Juan José Aguiar Martín

INGENIERÍA MECÁNICA

ESCUELA DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

2024

RESUMEN

Este trabajo de fin de grado se centra en el modelado y estimación de la incertidumbre de medición de un instrumento telescópico de alta precisión (High Precision Telescopic Instrument, HPTI) y el utillaje utilizado para colocarlo en la máquina herramienta.

Se ha realizado un estudio de los elementos y el funcionamiento del sistema de verificación. Se analizará el sistema de utillajes colocado en la máquina herramienta para conocer su comportamiento.

Se buscará reducir los errores de medición introducidos por los utillajes, para ello, se realizarán simulaciones mediante software de elementos finitos y ensayos de repetibilidad en el taller para conocer el comportamiento del sistema.

Realizaremos una simulación de los ensayos cuya finalidad es conocer la incertidumbre de medida de nuestro HPTI por medio del método de Monte Carlo. Para ello, se introducirán los errores de posición obtenidos por medio de ensayos de repetibilidad.

Para finalizar, se realizará un análisis de los resultados obtenidos por medio del software en los que compararemos las diferentes configuraciones utilizadas para rigidizar el utillaje.

ÍNDICE

1. Introducción……5
   1.1. Marco teórico……...5
   1.2. Objetivo……5
   1.3. Alcance……5
   1.4. Estructura de la memoria……...6
2. Equipos utilizados……7
   2.1. Sistema de medición……...7
      2.1.1. Hardware……7
         2.1.1.1. Inicialización del equipo y calibración……..9
      2.1.2. Software……11
         2.1.2.1. Programa de adquisición de datos……..11
         2.1.2.2. Simulti Capture……...12
   2.2. Utillajes de sujeción……...13
   2.3. Comparativa con otros equipos similares……..15
3. Análisis de la rigidización y diferentes propuestas……...17
   3.1. Simulación por elementos finitos……17
   3.2. Implementación de la mejora seleccionada y ensayos…..……..22
      3.2.1. Repetibilidad de la distancia entre nidos de la estrella……26
         3.2.1.1. Ensayo de análisis general de la estructura……26
         3.2.1.2. Repetibilidad distancia nidos estrella……28
      3.2.2. Repetibilidad de posición en cada nido……...29
      3.2.3. Efecto de las condiciones ambientales……...30
4. Modelado y estimación de la incertidumbre de medición con HPTI y el utillaje utilizado……32
   4.1. Presentación del software y las fórmulas utilizadas……32
   4.2. Estimación de la incertidumbre……35
5. Análisis de resultados……40
6. Conclusiones y líneas de trabajo futuras……41

BIBLIOGRAFÍA

ANEXO

1. INTRODUCCIÓN

1.1. MARCO TEÓRICO

Los sistemas de medición son herramientas clave en múltiples campos, como la ingeniería, la medicina y la física, pues nos permiten obtener datos precisos para realizar una toma de decisiones adecuada. En este contexto, la evolución de las tecnologías de la medición siempre ha buscado una mayor precisión, rapidez y facilidad de uso.

El sistema de medición utilizado fue diseñado por el departamento de Diseño y Fabricación de la Escuela de Ingeniería y Arquitectura y se detectaron carencias durante su diseño. Estas carencias provocan errores de medida que se buscarán corregir más adelante.

Dicho sistema HPTI se basa en el principio de interferometría óptica, que permite realizar medidas precisas por medio de la interferencia de ondas de luz. La interferometría óptica se basa en un principio físico en el que dos ondas de luz que coinciden en fase se amplifican mientras que dos ondas en oposición se cancelan. Esto nos permite realizar la medición de la cancelación o amplificación de dos haces laser.

Al tratarse de un sistema de multilateración láser simultánea, se realiza la adquisición de datos en un solo ciclo, disminuyendo los errores debido a variación de temperatura y la repetibilidad de la máquina entre ciclos.

1.2. OBJETIVO

El objetivo de este Trabajo de Fin de Grado consiste en el análisis y mejora de los resultados obtenidos por un ballbar telescópico de alta precisión, HPTI. Se analizará la repetibilidad en la colocación del sistema en los apoyos del utillaje. A continuación, se procederá diseñar una configuración que nos permita mejorar su rigidez para posteriormente, modelar y estimar la incertidumbre del HPTI colocado en el utillaje.

1.3. ALCANCE

Para la realización de este trabajo es fundamental la reducción de la incertidumbre de medición del utillaje. Esto se debe a que este utillaje permite utilizar el sistema en la verificación de la MH con ejes giratorios y platos divisores colocados en la bancada.

Uno de los principales hechos que repercuten en esta incertidumbre son los errores de repetibilidad debido a la rigidez del utillaje. Esto es porque se producen desplazamientos de este al aplicar fuerzas puntuales, como el golpe al colocar el HPTI y los desplazamientos del cabezal de la MH durante los ensayos. La mejora en los resultados va de la mano con la rigidez estructural del utillaje, especialmente en ensayos donde la repetibilidad es muy importante.

Para la reducción de los errores de posición de la máquina se ha realizado un análisis por elementos finitos para determinar la configuración más adecuada para el equipo. Los resultados obtenidos en estas simulaciones se compararán con los obtenidos en los ensayos y para finalizar, se introducirán los errores de posición del utillaje, conseguidos durante los ensayos, y se estimará la incertidumbre que presenta el equipo.

1.4. ESTRUCTURA DE LA MEMORIA

En el capítulo 2 se describe el sistema utilizado y las problemáticas del mismo.

En el capítulo 3 se presenta una propuesta de métodos de rigidización. Se realiza un análisis de la repetibilidad de colocación en los utillajes, por medio de simulación y ensayos.

En el capítulo 4 se realiza el modelado y la estimación de la incertidumbre del conjunto utilizado.

En el capítulo 5 se hace un resumen y comparativa de resultados obtenidos.

En el capítulo 6 se presentan las conclusiones obtenidas y posibles líneas de trabajo futuras.

2. EQUIPOS UTILIZADOS

En este capítulo conoceremos los instrumentos y el utillaje empleados. Los elementos utilizados durante la realización de los ensayos se pueden dividir en dos grupos:

- Sistema de medición: Se explicará brevemente el funcionamiento de los elementos que lo componen.
- Utillajes de sujeción: Se explicará la colocación del utillaje en el cabezal de la MH, así como la colocación del HPTI en él.

2.1. SISTEMA DE MEDICIÓN

2.1.1. HARDWARE

El sistema de medición utilizado fue diseñado por el departamento de Diseño y Fabricación de la Escuela de Ingeniería y Arquitectura, se utiliza para realizar verificaciones volumétricas en MH porque se trata de un equipo de multilateración simultánea.

Este equipo está compuesto por tres brazos telescópicos de fibra de carbono, en cuyo interior se encuentra colimador que transmite un haz láser que será devuelto por el reflector.

Los brazos se han construido con cinco cilindros de fibra de carbono con un diámetro de tamaño escalonado para que encajen uno dentro de otro. Se han colocado unos casquillos en la parte baja de cada cilindro que permiten que se muevan longitudinalmente dentro del siguiente cilindro, pero evitan que se salgan del interior y se desmonten durante la toma de mediciones. Esta configuración telescópica permite que los brazos consigan una largura máxima de 1 metro y una extensión mínima de 0,4m.

Los principales elementos de unión de los brazos son la esfera y el tridente. La parte más pesada del brazo se trata de una esfera lisa de acero inoxidable 420 G20 y en el lado contrario se encentra el tridente, este posee tres dedos con imanes en cada una de las puntas, orientados de manera que permiten el anclaje en una esfera metálica para poder realizar rotaciones sin que se suelten.

Ilustración 1. Brazo telescópico

Dentro del tridente se encuentra el reflector. Este elemento permite la redirección del haz laser porque está construido con materiales altamente reflectantes y con una

superficie extremadamente plana, lo que permite evitar pérdida de luz y distorsiones en la señal de medida.

El haz laser se transfiere hasta el brazo por medio de un cable de fibra que se conecta con el interferómetro (IDS3010), el cual procesa las señales ópticas del detector permitiendo observar la interferencia de los dos haces que al comparar sus ondas nos permiten conocer los resultados de las mediciones.

Este interferómetro modula la longitud de onda con una frecuencia de 12,5 MHz. De la señal general recibida se extraen dos componentes: una componente de paso bajo (f< 10MHz), el cual es el componente estándar del interferómetro, y un componente desfasado. Ambas señales se encuentran en fase cuadrada, lo que permite superar los puntos de baja sensibilidad y la imposibilidad de definir una dirección de desplazamiento habituales en los interferómetros Fabry-Pérot.

Ilustración 2. Interferómetro y sus compentes

El interferómetro cuenta a su vez con una sonda de temperatura que nos permite conocer a tiempo real las condiciones ambientales de trabajo para tener en cuenta la dilatación térmica de los materiales del brazo y el comportamiento del haz laser respecto de los diferentes valores de presión y temperatura.

Ilustración 3. Sonda de temperatura

Otro elemento fundamental del equipo de medición es el switch. Este equipo se encarga de obtener las mediciones de cada interferómetro por medio de tres cables ethernet y convertirlo en un único cable USB para conectarlo al ordenador.

Ilustración 4. Switch genérico

2.1.1.1 INICIALIZACIÓN DEL EQUIPO Y CALIBRACIÓN

Para utilizar los brazos telescópicos es necesario conectar los interferómetros a la corriente, conectar las sondas de temperatura a los interferómetros y conectar el equipo al switch para mostrar los datos en la pantalla del ordenador.

Debemos calibrar los brazos al inicio de cada ensayo o si se produce un error en el interferómetro, si nos encontramos realizando un ensayo en medición absoluta, es recomendable volver a inicializar el equipo si se produce un error.

Para evitar que se corte la señal o que disminuya la calidad de señal es necesario evitar golpes, movimientos bruscos y enredos en el cable de la fibra.

En caso de tener una mala calidad de señal se debe revisar la orientación del colimador o incluso se puede llegar a cambiar el reflector, porque se va degradando con el tiempo y el uso, aunque nos suele ocurrir.

Para el proceso de calibración se posiciona el calibrador sobre una superficie lisa y nivelada. Primero se coloca el brazo en la posición más comprimida (D_3), se anotan los valores de posición y temperatura, este será el offset (731,27mm) para las mediciones relativas, a continuación, se extiende el brazo hasta la posición más alejada y repetimos la toma de valores (D_5), por último, se regresa al punto inicial y se repite vuelve a tomar valores.

Con estos valores obtenidos se podrá realizar un ajuste de medidas en función de las condiciones ambientales de trabajo, para conseguir este ajuste, al resultado de la vuelta a D_3 se le resta el valor obtenido en la primera medición.

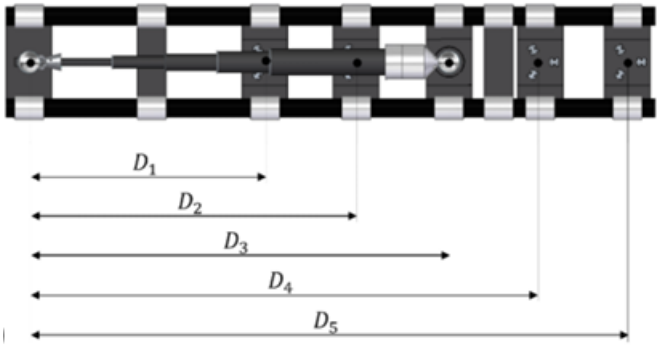


Ilustración 5. Armazón de calibrado

Si se va a realizar el ensayo desde la bancada de la MH, posicionados como en la ilustración 6, después del proceso de calibración, hay que realizar una medición de la distancia entre nidos para realizar una posterior triangulación en la que se obtendrá el valor del desplazamiento en XYZ a partir de la distancia entre nidos y la longitud de los brazos en el punto que se desea triangular.

Ilustración 7. Brazos midiendo desde la bancada

Ilustración 6. Brazos midiendo distancia nidos bancada

Esta es la hoja de ajuste que se debe rellenar cada vez que se calibra el equipo.

	[ºC]	pm	pm	pm	microm
	Temperatura	L ajuste	L comprobaci	Repetición L ajuste	
IDS10	21,7783200	17000	1,5789E+11	45000	0,028
IDS20	21,9308900	-10000	1,57877E+11	-80000	-0,07
IDS30	22,06675	-8000	1,57896E+11	-55000	-0,047
	L [mm]	IDS	Temperatura [ºC]		
L12	790,026842	IDS10	21,7869		
L23	788.290.713	IDS20	21,91356		
L31	795,355646	IDS30	22,1533		

En ella se debe apuntar el valor de temperatura y las longitudes D_3 (L ajuste) y D_5 (L comprobación) anteriormente mencionadas. Por medio de una diferencia entre la repetición de L ajuste y L ajuste inicial, se obtiene el ajuste del equipo.

La segunda parte de la tabla se utiliza para apuntar la distancia entre nidos, apuntando también la temperatura

Tanto para el proceso de calibración como para la propia utilización del instrumento de medición, se han de tener una serie de factores en cuenta que permitirán obtener una correcta medición.

Para asegurar el correcto asentamiento del brazo en el calibrador, se debe realizar una pequeña fuerza vertical cada vez que se coloca la esfera. En caso de no realizar esta comprobación podemos obtener valores incorrectos durante el proceso de calibración.

Para la utilización del HPTI se deben tener en cuenta una serie de consideraciones para conseguir la mejor calidad de señal durante las mediciones:

- No se pueden generar nudos en el cable de la fibra, para ello se dispone de unos elementos impresos en 3D que facilitan el almacenaje de del cable de fibra sobrante.
- Se debe evitar estirar el brazo por completo porque se puede quedar encasquillado y no permitir el desplazamiento de los cilindros de fibra de carbono. Al desencajar los cilindros se puede producir una pérdida de señal que desemboque en un error en la medición, que provocaría volver a calibrar el brazo afectado.
- Cuando se están realizando medidas de gran tamaño el brazo puede combar y reducir la calidad de señal, para corregir este problema hay que girar los

cilindros para conseguir dejar la posición en la que el brazo se encuentre más firme.

2.1.2. SOFTWARE

Para la realización de los ensayos se ha utilizado el software Simulti Capture para la captura de datos y el software attocube para realizar las calibraciones e introducir la compensación ambiental a los resultados obtenidos durante los ensayos.

2.1.2.1. PROGRAMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS

Para realizar las calibraciones y controlar las pérdidas de señal en el interferómetro utilizamos el software integrado de attocube, los ensayos se realizarán mediante medidas relativas, por lo que hay de introducir el offset respecto del que tomar medidas.

Este punto inicial se define con el software attocube durante el proceso de calibrado anteriormente mencionado. Si se produce un error durante la realización del ensayo, se indicará en este software por medio de recuadro rojo de error al lado de la medición del brazo en el que se ha producido este. Como hemos mencionado anteriormente, se debe repetir el proceso de calibrado tras un error en cualquiera de los brazos.

El proceso de inicialización del software attocube parte desde su menú de configuración donde se pueden realizar actualizaciones del software. La primera pestaña a tener en cuenta es la de alineación, donde se puede observar la calidad de señal de cada uno de los brazos a tiempo real.

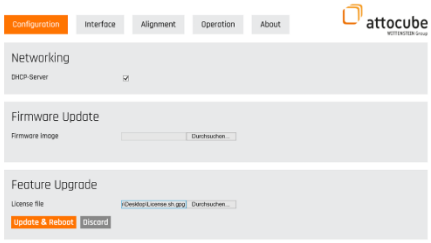


Ilustración 9. Menú de configuración

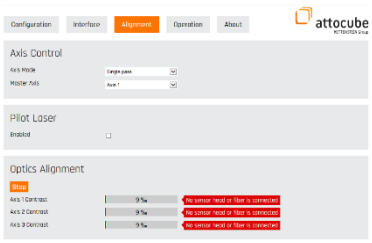


Ilustración 8. Menú de alineación

La siguiente pestaña a utilizar durante el proceso de calibración es la de operaciones. En ella se encuentra la pestaña para seleccionar el método de medida (absoluta o relativa), la distancia que está midiendo cada uno de los brazos a tiempo real y por último, aparecen todos los resultados relevantes acerca de las condiciones ambientales que pueden afectar al proceso de medición, estos valores son utilizados por el programa para compensar los resultados en la medición y que estén acordes con las condiciones ambientales. Esta última pestaña es la que se utiliza durante el proceso de calibración para conocer la temperatura a la que vamos a realizar el ensayo y seleccionar el offset para realizar mediciones relativas.

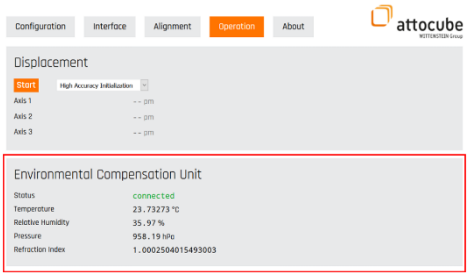


Ilustración 10. Menú de operaciones

2.1.2.2. SIMULTI CAPTURE

Para realizar los ensayos se va a utilizar el software de Simulti Capture, este software genera un fichero de texto con la IP de cada brazo y el nombre del ensayo en la cabecera, aparecen también varios valores como las medidas tomadas, el periodo de tiempo, la temperatura, la presión y la humedad.

Dentro de su interfaz se puede consultar la señal de los tres brazos en tiempo real si seleccionamos la opción de “Show SQ” (1), esta herramienta permite evitar los errores por perdida de señal en el interferómetro.

Para la toma de valores en un momento determinado tenemos la opción “Discrete Capture”, es muy útil para la realización de ensayos de repetibilidad como el de este trabajo de fin de grado porque después de cada acople y desacople permite tomar los valores en ese instante, como si se tratara de una fotografía.

Por último, tenemos el botón de “MT Capture” (3) el cual permite tomar valores automáticamente según un periodo de tiempo indicado, este modo es interesante para conocer una evolución de medidas durante un periodo de tiempo, en nuestro caso, la hemos utilizado para realizar el tercero de los ensayos que mencionaremos en el capítulo 3, para que genere un fichero con todas las medidas tomadas durante un cierto periodo de tiempo.

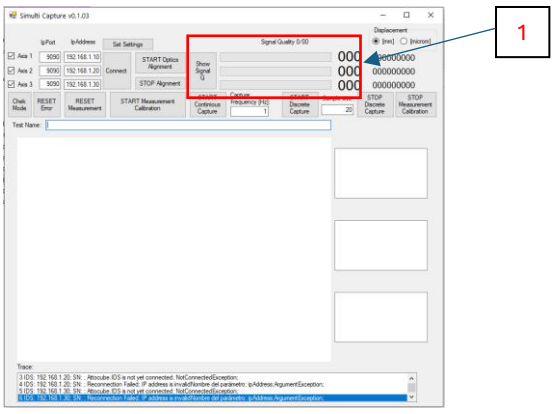


Ilustración 12. Calidad de señal

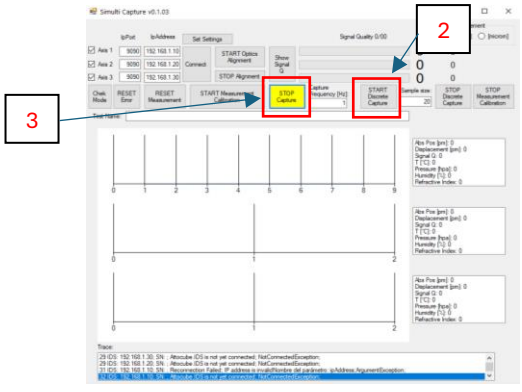


Ilustración 11. Captura discreta y continua

2.2. UTILLAJES DE SUJECCIÓN

Para la realización de los ensayos se han utilizado dos utillajes diferentes, uno para la realización de los ensayos desde la mesa y otro para la colocación del HPTI en el propio cabezal de la máquina.

Para los ensayos realizados desde la mesa hemos utilizado tres apoyos cinemáticos (Ilustración 16) que permiten el giro de los brazos, pero no su desplazamiento, van unidos a la mesa por medio de tuercas ranuradas colocadas a una distancia de 80 cm de separación entre ellas. En los soportes cinemáticos tenemos un imán y sistemas centradores para que la esfera se sitúe siempre en la misma posición.

Ilustración 14. Colocación del equipo para realizar ensayo desde la bancada

Ilustración 13. Medición de distancia entre nidos de la bancada

Se requiere una distancia entre nidos mayor que el tamaño de la bancada, por lo que se coloca un perfil de aluminio unido a esta mediante mordazas.

Ilustración 15. Prolongador de bancada

Para los ensayos de repetibilidad desde el cabezal hemos usado un utillaje con tres brazos que se coloca en el cabezal de la MH. Se trata de una estructura de acero amarrada por un anillo a la MH que impide el giro del cabezal para reducir los errores de posición que este pueda introducir, además, cuenta con un soporte cinemático en cada una de las puntas de los brazos del utillaje. Los soportes cinemáticos son similares a los que se sitúan en la mesa, pero con pequeñas diferencias en el sistema de sujección.

Los brazos van asegurados a la estrella por medio de un alambre que hace la función de paracaídas en caso de realizar algún movimiento brusco durante el ensayo que pueda hacer que la esfera se suelte del imán del nido.

Ilustración 16. Colocación del sistema paracaídas

La estrella tiene una distancia de 692mm entre cada una de sus puntas. Se coloca por medio portaherramientas cónico al cabezal de la MH, lo que proporciona un anclaje firme. Este utillaje presenta carencias, sobre todo, cuando se le aplican fuerzas laterales.

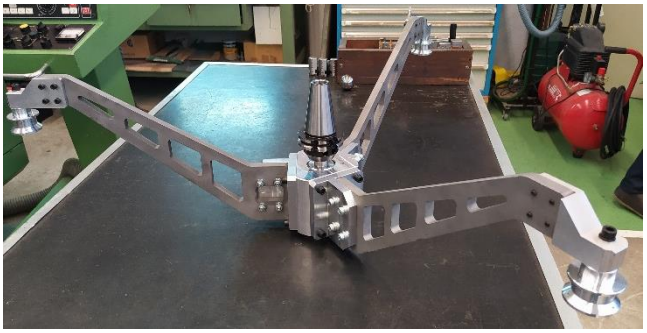


Ilustración 18. Estrella

Ilustración 17. Brazos midiendo desde estrella

Ambos utillajes tienen los mismos soportes en la parte que está en contacto con la esfera, pero se diferencian en su parte trasera, porque los soportes cinemáticos que van a la mesa tienen un avellanado con rosca interior de latón que permiten un centrarlos adecuadamente al atornillarlos, mientras que los soportes cinemáticos que van en la estrella tienen un casquillo que se introduce en el propio brazo de la estrella y un agujero roscado que permite sujetarlo al brazo con un tornillo y una arandela.

Ilustración 19. Soportes cinemáticos

2.3. COMPARATIVA CON OTROS EQUIPOS SIMILARES

En la actualidad existen diferentes sistemas para la medición de alta precisión, a continuación, les presento algunos con sus respectivas ventajas y desventajas respecto de nuestro HPTI que nos permitirá poner en contexto el funcionamiento del equipo utilizado:

- ETALON X-AX LASERBAR: Sistema de medición láser diseñado para aplicaciones industriales de alta precisión. Permite realizar alineaciones de maquinaria y ejes de manera rápida y sencilla, con un rango de medición de entre 270mm-1050mm. Posee una incertidumbre de +- 1 micras y su principal desventaja es que solo permite medir en un eje.

Ilustración 20. Equipo ETALON X-AX LASERBAR

- ETALON LASERTRACER-NG: Se trata de un sistema de medición por rastreo automático de alta precisión. Este sistema presenta una incertidumbre de medición en el rango de nanómetros, además, elimina la necesidad de alineación precisa de las piezas, reduciendo así, los errores humanos. Este sistema permite realizar mediciones tridimensionales. La principal desventaja es su sensibilidad a condiciones ambientales, como temperatura y vibraciones.

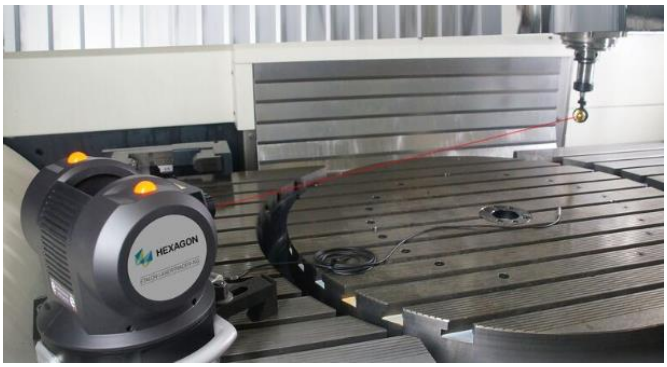


Ilustración 21. Equipo ETALON LASERTRACER-NG

- RENISHAW XL-80: Se trata de un interferómetro laser de alta precisión con una alta resolución lineal y un sistema de compensación ambiental. Este sistema de compensación ambiental compensa de manera automática las variaciones de temperatura, humedad y presión. Otra de sus principales características es su velocidad de muestreo, de unos 50kHz, que nos permite

incluso realizar análisis de vibración y estabilidad. Su principal desventaja es que se trata de un sistema de medición lineal.

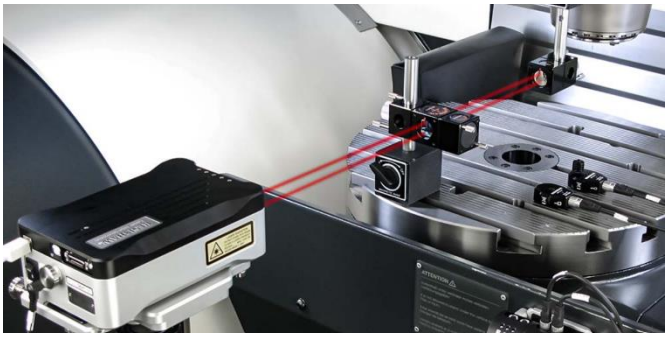


Ilustración 22. Equipo RENISHAW SL-80

3. ANALISIS DE LA RIGIDIZACIÓN Y DIFERENTES PROPUESTAS

Para analizar el comportamiento de la estrella se van a realizar varios ensayos y simulaciones hasta conseguir la configuración adecuada con la que reducir el error de posición que este introduce en el proceso de medición.

3.1. SIMULACIÓN POR ELEMENTOS FINITOS

Para conseguir la mejor configuración de nuestro sistema de rigidización vamos a realizar varias simulaciones por medio de software de cálculo por elementos finitos.

La simulación por elementos finitos es un método numérico utilizado para resolver problemas relacionados con la mecánica estructural. El principio en el que se basa este método consiste en dividir un problema complejo en un número de partes finito para poder resolverlo de manera aproximada. Las dos principales ventajas que nos otorga este método son la capacidad de gestionar geometrías y condiciones de contorno complicadas y también, que nos permite obtener análisis detallados de puntos específicos de una estructura.

En estos ensayos se tendrán en cuenta los errores de repetibilidad producidos por la fuerza vertical del golpe que produce el imán al introducir la esfera del brazo, una posible fuerza horizontal debida al movimiento del cabezal, la gravedad y por último, el peso de cada brazo del HPTI. Se ha ido variando tanto la fuerza vertical como la horizontal para ver cómo se comportaría bajo diferentes acciones.

Para todas las simulaciones se realizará un estudio estático con la aplicación de una malla tetraédrica.

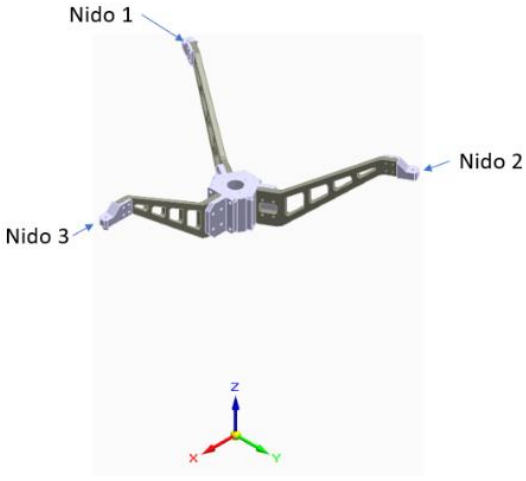


Ilustración 23. Utillaje respecto ejes coord. simulación

La configuración de la rigidización se planteó por medio de tensores que se colocan entre los nidos de la estrella. Estos elementos permiten la regulación mediante el acortamiento del tensor del cable. Para la realización de un modelo que se asemeje a estos tensores se han diseñado unos casquillos que se introducen en el tornillo más

próximo al extremo del brazo y de ellos sale un cable de acero que se une con el casquillo del brazo contiguo.

Para conseguir el acortamiento en los cables se han realizado cortes en el cable que simulan la posición en la que se situaría el tensor. Desde la superficie resultante de estos cortes aplicaremos un desplazamiento que permitirá simular el acortamiento del tensor.

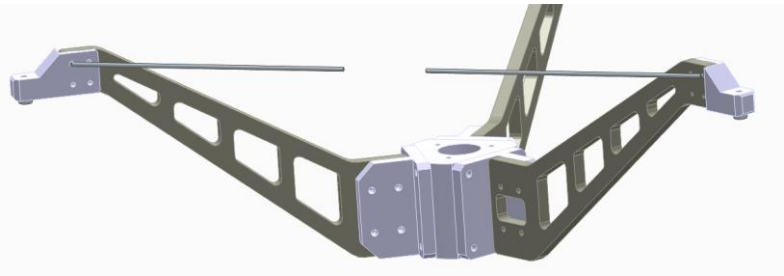


Ilustración 24. Diseño y colocación de tensores en simulación

Esta manera de simular los tensores genera un inconveniente, a la hora de realizar las simulaciones aplicando la carga, no se logra diferenciar el desplazamiento ejercido por la fuerza aplicada y el ejercido por el tensor. Para poder diferenciar el origen de los desplazamientos, primeramente, se van a realizar los ensayos solamente aplicando desplazamiento a los tensores, es decir, sin aplicar ninguna fuerza en los nidos, luego se aplicará la fuerza en los nidos y el desplazamiento de los tensores, para comparar ambas simulaciones y lograr conocer el desplazamiento producido por la fuerza que hemos introducido.

Otro factor a tener en cuenta es el punto donde se va a obtener el valor de los desplazamientos, porque en los ensayos físicos se miden las distancias desde el centro de la esfera de los brazos del HPTI, por lo que hay que simular la posición en la que se encuentra el centro de la esfera, que es la posición en la que se deben tomar los valores de variación de la posición.

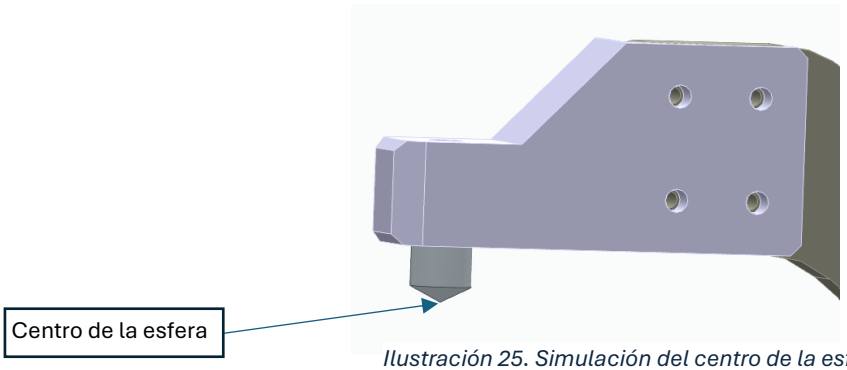


Ilustración 25. Simulación del centro de la esfera

Estas son las cuatro configuraciones de utillaje posibles:

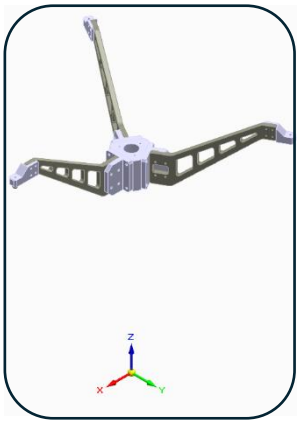


Ilustración 26. 0 tensores

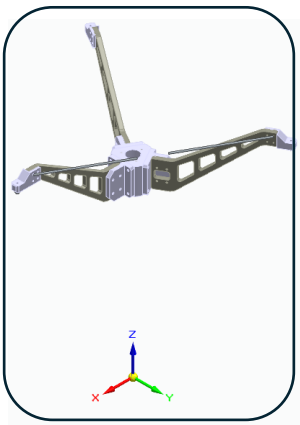


Ilustración 27. 1 tensor

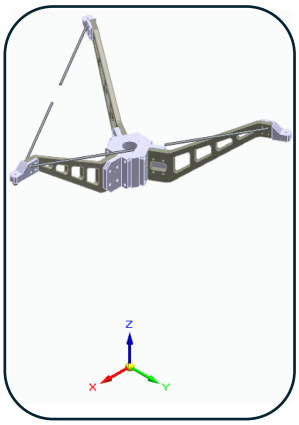


Ilustración 28. 2 tensores

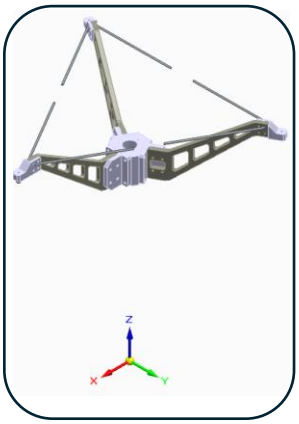


Ilustración 29. 3 tensores

La secuencia de colocación de tensores va ser siempre la misma: para un tensor, se coloca el que se encuentra entre los nidos 2 y 3, para 2 tensores, se coloca uno entre los nidos 2 y 3 y otro entre los nidos 1 y 3, para la configuración con tres tensores se ponen todos los tensores. La numeración de los nidos aparece indicada en la Ilustración 23. A todos los tensores se les va aplicar un desplazamiento de 2,5mm en cada lado.

Se van a realizar dos simulaciones diferentes, una aplicando la fuerza en el eje Z que simularía el peso que ejercen los brazos en el utillaje y otra aplicando una fuerza perpendicular al brazo del utillaje, que nos permita conocer su comportamiento ante estas fuerzas laterales.

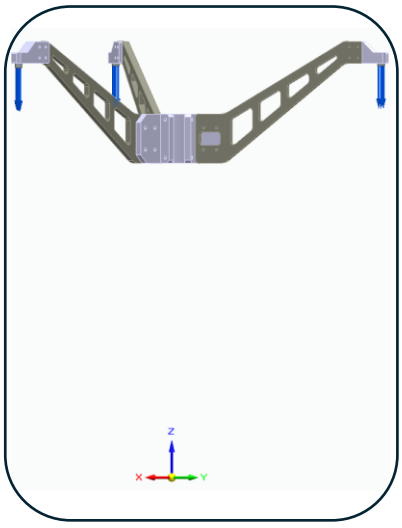


Ilustración 30. Aplicación de fuerza vertical

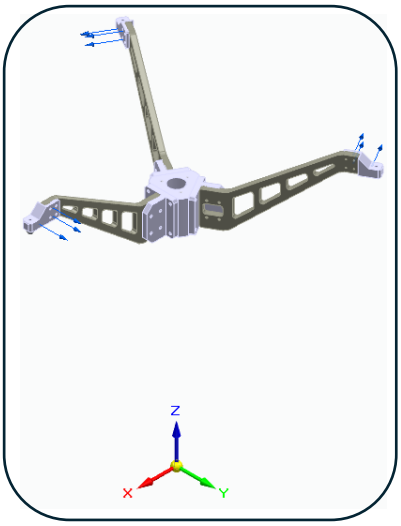


Ilustración 31. Aplicación de fuerza horizontal

Las cargas utilizadas para los ensayos verticales y horizontales van a se de 7 y 10 N respectivamente.

La primera simulación realizada consiste en introducir 7 N de fuerza vertical en Z negativa con el utillaje sin ningún elemento de rigidización para establecer un punto de partida y poder comparar más adelante.

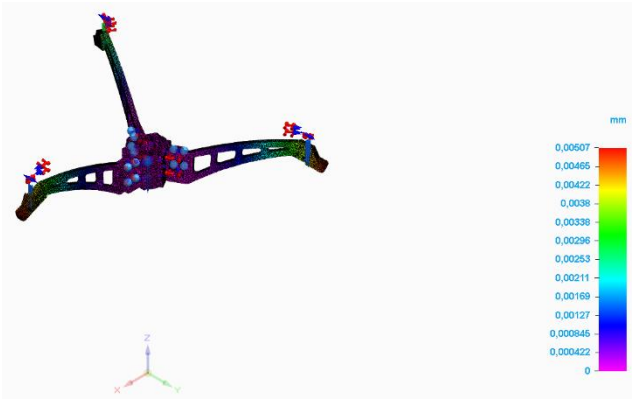


Ilustración 32. Deformada resultante de 7N verticales y 0 tensores

A continuación, se introduce un tensor con un acortamiento de 2,5 mm por cada lado entre los nidos 2 y 3, aplicando la misma fuerza en dirección vertical al utillaje.

Pero primero se calcula el desplazamiento provocado por el tensor sin aplicar ninguna fuerza en el utillaje.

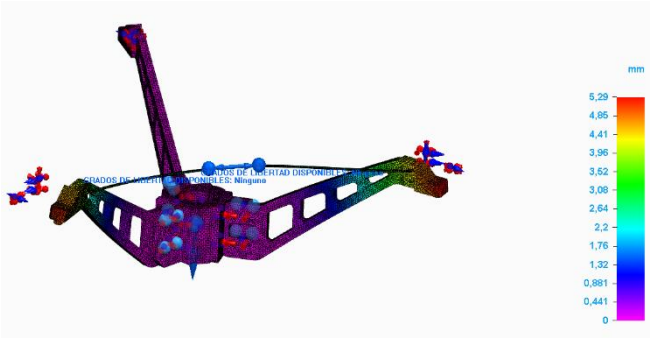


Ilustración 33. Deformada resultante de colocar 1 tensor

A continuación, se calculan los desplazamientos que provocan las acciones combinadas de la fuerza vertical y el desplazamiento del tensor.

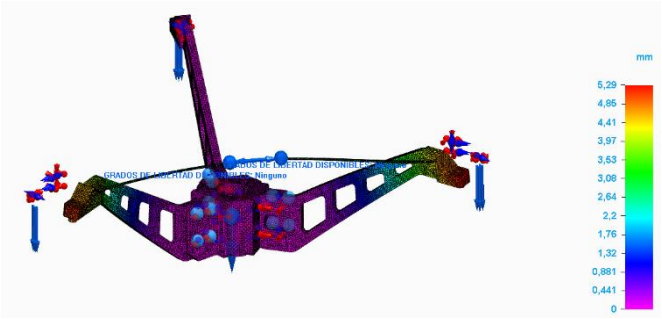


Ilustración 34. Deformada resultante de 7N verticales y 1 tensor

Por último, la se realiza diferencia de ambas medidas y se obtiene el desplazamiento ejercido por la fuerza.

1 TENSOR								
NIDO 3			NIDO 2			NIDO 1		
0,0009	0,01	-0,0025	-4,25	2,24	-0,0166	0,105189	-0,060868	-0,00017

Tabla 1. Resultados variación de posiciones para 1 tensor y 7 N verticales

Los resultados obtenidos en siguientes simulaciones ya tendrán aplicado este cálculo que nos permite aislar el desplazamiento producido por la fuerza aplicada.

A continuación, se realizan las simulaciones con las dos configuraciones restantes.

7 N									
0 TENSORES									
	NIDO 3			NIDO 2			NIDO 1		
	Δx	Δy	Δz	Δx	Δy	Δz	Δx	Δy	Δz
	0,00116	0,000197	-0,0043	-0,000826	0,00102	-0,00443	-0,000469	-0,00122	-0,0042
1 TENSOR									
	0,0006	0	-0,0026	0,01	0,01	-0,002	-0,000264	-0,000608	-0,00258
2 TENSORES									
	0,001	-0,001	0	-0,06	0,06	0,032	0	0	-0,0044
3 TENSORES									
	0,001	0	0	-0,002	0,001	0	0	0,1	0

Tabla 2. Resultados variación posición con 7 N

Los resultados obtenidos por simulación con este método de rigidización han sido favorables porque la tendencia de los tres nidos ha sido ir reduciendo el desplazamiento al aplicarle la fuerza vertical.

Ahora se realizan las mismas simulaciones con la carga de 10 N con dirección de aplicación perpendicular al brazo del utillaje para ver cómo reacciona con esta.

10 N									
0 TENSORES									
	NIDO 3			NIDO 2			NIDO 1		
	Δx	Δy	Δz	Δx	Δy	Δz	Δx	Δy	Δz
	0,000665	0,121	-0,00195	-0,106	-0,0606	-0,00198	0,105	-0,0615	-0,00198
1 TENSOR									
	0,0009	0,01	-0,0025	-4,25	2,24	-0,0166	0,105189	-0,060868	-0,00017
2 TENSORES									
	0	0,004	0	-0,06	-0,05	-0,009	-2,02	0	-0,0043
3 TENSORES									
	0	0,004	0	-0,006	-0,002	0,01	0,0043	-0,002	0

Tabla 3. Resultados variación de posición con 10 N

Como se puede observar, se ha obtenido una mejoría progresiva en el nido 3 en todas las direcciones, pero en cambio, para el nido 2 hemos obtenido mejores resultados con cero que con uno, pero esto no se repite en el resto de configuraciones, por lo que puede ser un error en la toma de mediciones. El nido 1 presenta una progresión escalonada también, pero destaca el valor obtenido con dos tensores, que como el anterior, puede deberse a un error puntual. Estos errores puntuales pueden deber a cómo está construida la simulación, que no nos permite separar adecuadamente los distintos incrementos de las fuerzas en determinadas situaciones.

Estas simulaciones no son una certeza de lo que va a ocurrir en los ensayos, pero permiten visualizar previamente como se comportará el utillaje al introducirle un elemento de rigidización.

3.2. IMPLEMENTACIÓN DE LA MEJORA SELECCIONADA Y ENSAYOS

Para comprobar los resultados obtenidos por simulación se van a recrear las diferentes configuraciones de rigidización en el taller. Trabajaremos sobre una fresadora ANAYAK VH1800.

La configuración elegida para rigidizar el utillaje se compone de un tensor, un alambre y unas sujetacables estribo para amarrarlo. El alambre se dividirá en dos partes para introducir un tensor entre ambas partes. En ambas puntas del alambre se hará un giro como en el que se ve en la ilustración 37 por un lado irá amarrado al utillaje con una arandela plana y el tornillo que fija el soporte cinemático a la estrella y por el otro lado se unirá a un tensor con un guardacabos que protege el alambre.

Se ha escogido esta manera de rigidizar el utillaje porque nos permite variar la tensión que se ejerce sobre el utillaje, girando la rosca del tensor para acortar el cable. Se ha buscado colocar el cable lo más cercano posible a la esfera para lograr controlar mejor los desplazamientos que se produzcan en esta.

Ilustración 39. Tensor colocado en la estrella

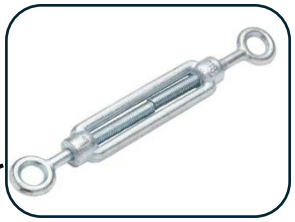


Ilustración 38. Tensor

Ilustración 37.

Ilustración 35. Sujetacables

Ilustración 36. Guardacabos

Con estos elementos de rigidización se van a realizar un total de tres ensayos, dos de ellos para conocer los desplazamientos que se producen en el utillaje cuando se realiza la colocación los equipos de medición en los nidos y un tercer ensayo para conocer cómo afectan las condiciones ambientales a los equipos de medida y al utillaje.

Primero se va a realizar un ensayo de repetibilidad que consiste en colocar las tres esferas de los brazos en los tres soportes cinemáticos del utillaje y los tridentes en la esfera del brazo contiguo, por lo que los tres brazos se quedan midiendo la distancia entre los nidos de la estrella. Se realizarán diez acoples y desacoples en cada uno de los nidos de la estrella, para cada una de las diferentes configuraciones. Con este ensayo se obtendrá la variación de distancia entre los brazos de la estrella.

Ilustración 40. Colocación ensayo distancia nidos

El segundo ensayo realizado consiste en colocar las esferas de los tres brazos en la bancada de la MH y colocar los tres tridentes en un nido del utillaje unidas entre sí por una esfera de metal completamente lisa. Se realizan diez acoples y desacoples de esta esfera en cada uno de los nidos, para las diferentes configuraciones. El objetivo de este ensayo es conocer el error de posición que introduce el utillaje a las mediciones de nuestro HPTI. Los resultados que serán recopilados son los de la longitud que está midiendo cada brazo, pero posteriormente estos datos serán tratados por medio del software MATLAB, que, mediante triangulación de la medida de los tres brazos, nos dará la posición de la esfera respecto de X, Y y Z respecto de nuestro sistema de referencia.

Ilustración 41. Configuración ensayo de repetibilidad de posición de cada nido

Tanto para el primer ensayo como para el segundo se han realizado los acoples y desacoples de las esferas del mismo modo, para conseguir una homogeneidad en la toma de valores e intentar reducir lo máximo posible el error humano en la obtención de los resultados.

El tercer ensayo consiste en colocar los brazos midiendo las distancias de los nidos, como en el primer ensayo, y dejar el sistema tomando medidas durante tres días para observar la variación debida a la acción térmica.

Un factor a tener en cuenta con este equipo durante la realización de los ensayos han sido las condiciones ambientales, deben ser lo más estables posibles evitando variaciones térmicas durante la medición. Estas se pueden producir como consecuencia de gradientes de temperatura debido a corrientes de aire, instalaciones como calefacción o sistemas de iluminación. Es necesario procurar tener una temperatura se mantenga los más constate posible durante la realización de los ensayos tanto en los componentes estructurales de la máquina como en los instrumentos de medición. En el caso de producirse variaciones significativas de temperatura los elementos estructurales modifican sus dimensiones, dilatándose o contrayéndose, haciendo que la máquina no se posicione en el mismo punto al principio y al final de la toma de datos frente a una misma coordenada nominal.

Para la realización de ensayos en el taller hay que tener monitoreadas continuamente la calidad de señal de cada uno de los brazos, para esta tarea, como se ha mencionado en capítulos anteriores, se consigue mediante software Simulti Capture conectando los interferómetros al ordenador.

En los dos primeros ensayos que son los de repetibilidad, para realizar la captura de datos después de cada repetición utilizamos la opción de captura discreta, esta opción nos permite tomar captura de los datos que están midiendo los brazos en un momento en concreto, como si hiciéramos una fotografía.

Para la captura de datos del tercer ensayo se ha utilizado la opción de captura continua, que va tomando fotos de manera automática en el intervalo que le programes.

En los tres ensayos se va a nombrar de la misma manera a cada uno de los nidos y cada uno de los tensores se va a poner en el mismo orden. Primero se coloca el tensor entre los nidos 2 y 3, para la configuración de un tensor, después se coloca el tensor que se sitúa entre los nidos 1 y 3, por último, para la configuración con tres nidos se va a colocar entre los nidos 1 y 2.

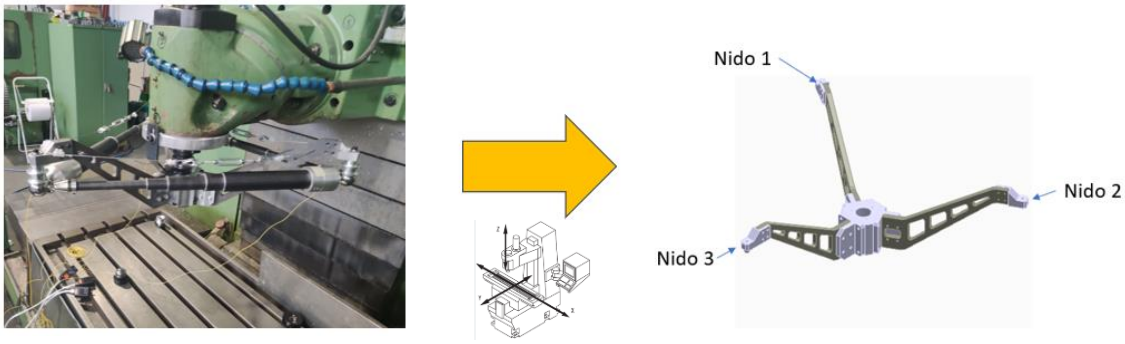


Ilustración 42. Definición de nidos y ejes para ensayos de repetibilidad

3.2.1. REPETIBILIDAD DE LA DISTANCIA ENTRE LOS NIDOS DE LA ESTRELLA

Para realizar los ensayos de repetibilidad de la estrella el brazo 1 está colocado entre los nidos 1 y 2, el brazo 2 está colocado entre los nidos 2 y 3, y el brazo 3 se situará entre los nidos 3 y 1.

Se realizará un análisis de resultados que comparará el rango entre la medida máxima y la mínima de las diez medidas tomadas de cada nido.

Pese a contrar con un anillo que ancla el utillaje al cabezal, durante la realización de los ensayos hemos podido ver que la MH introduce un error de posición debido a juegos internos y al incorrecto asentamiento del utillaje, los cuales se han intentado corregir manualmente acomodando vertical y horizontalmente el utillaje antes de cada medida. Este acomodamiento del utillaje consiste en empujar hacia arriba y en sentido horario el utillaje. Se trata de una técnica de asentamiento que se suele utilizar y que suele dar buenos resultados. Para comprobar si este método de ensayo es efectivo, se realizará un ensayo previo para conocer si mejoran los resultados corrigiendo con esta técnica.

3.2.1.1 ENSAYO DE ANÁLISIS GENERAL DE LA ESTRUCTURA

Para comprobar si se produce una mejora al forzar el utillaje para intentar asentarlo, se van a realizar ensayos midiendo longitudes entre nidos, con diez repeticiones en cada uno de los nidos y en cada una de las configuraciones.

Para asentar el equipo se empuja hacia arriba el nido y se mueve hacia la izquierda, como si se intentara girar el utillaje en sentido horario.

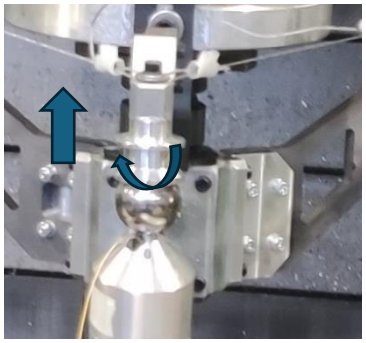


Ilustración 43. Ajuste para asentar equipo

Se realiza el primer ensayo con la configuración cero tensores tomando medidas forzando y sin forzar el utillaje cada vez que volvemos a colocar la esfera.

0 Tensores	NIDO 3			NIDO 1			NIDO 2		
micrómetros	L1	L2	L3	L1	L2	L3	L1	L2	L3
Forzando	23,4	60,5	24,6	123,0	11,7	8,0	44,0	510,7	85,6
Sin forzar	8,8	20,1	18,8	99,5	10,0	33,0	23,3	14,8	13,3

Tabla 4. Resultados en micrómetros de la variación de longitud con 0 tensores para ensayo forzar/no forzar

Se puede observar que hay una cierta mejoría si no fuerza el utillaje a la hora de realizar la toma de medidas. Los resultados del nido tres han sido los más homogéneos al contrario que los del nido dos, que han sido los que mas variación han tenido entre un método y otro e incluso entre un brazo y otro. Estas variaciones en el nido 2 pueden deberse a la posición de este con respecto a la máquina, que provoca que no se pueda acceder bien para poder realizar el ajuste y que no se pueda realizar el ensayo forzando de una manera homogénea.

A continuación, se realiza el mismo ensayo, pero colocando un tensor. El tensor introducido es el situado entre los nidos 2 y 3. En esta ocasión solo se ha realizado el ensayo en el nido 3 porque, como se puede observar en el ensayo anterior, es el nido en el que se presenta una menor diferencia entre ambos métodos y en el que los resultados han sido más homogéneos entre los tres brazos.

1 Tensor	NIDO 3		
micrómetros	L1	L2	L3
Forzando	27,3	53,0	30,8
Sin forzar	25,8	30,8	27,8

Tabla 5. Resultados en micrómetros de la variación de longitud con un tensor en el nido 3

Como se puede observar sigue habiendo una mejora de los resultados sin forzar el utillaje.

Por último, se colocan dos tensores. El tensor entre los nidos 2 y 3 junto con el tensor entre los nidos 3 y 1.

2 Tensores	NIDO 3		
micrómetros	L1	L2	L3
Forzando	22,5	90,3	18,0
Sin forzar	8,3	9,6	7,8

Tabla 6. Resultados en micrómetros de la variación de longitud con dos tensores en el nido 3

Como podemos apreciar, se ha obtenido la mayor diferencia entre métodos hasta el momento y se ha vuelto a obtener una menor variación de toma de medidas realizando el ensayo sin forzar el utillaje sin forzar el utillaje.

Tras los resultados obtenidos en este ensayo, se toma la decisión de realizar los siguientes ensayos sin forzar el utillaje entre cada repetición, porque al forzar el utillaje estamos introduciendo una fuente de error humano debido a que es muy complicado realizar siempre la misma fuerza y dirección en cada repetición. Además, se puede ver que con forme el sistema va incrementando la rigidez responde peor que el sistema libre, porque en la configuración rígida estos errores de ajuste ya han sido corregidos por los tensores y al realizar la fuerza lo que se consigue es introducir error a las mediciones.

3.2.1.2. REPETIBILIDAD DISTANCIA NIDOS ESTRELLA

Para realizar el primero de los ensayos de repetibilidad se colocan los tres brazos midiendo la distancia entre los tres nidos del utillaje.

La primera de las mediciones se realiza con cero tensores midiendo la repetibilidad en cada uno de los tres nidos y continuación, se van introduciendo cada uno de los tensores, siguiendo el orden de colocación de tensores explicado con anterioridad. Se analizarán el rango máximo de los valores de longitud obtenidos por cada brazo.

Nido 3	L1	L2	L3
0 Tensores	8,83E-03	2,01E-02	1,88E-02
1 Tensor	2,58E-02	3,08E-02	2,78E-02
2 Tensores	8,34E-03	9,57E-03	7,78E-03
3 Tensores	2,81E-03	7,90E-03	6,35E-03

Tabla 7. Repetibilidad distancia nidos estrella nido 3 en milímetros

Podemos observar una mejoría de repetibilidad del nido 3 con tres tensores, cumpliendo con la premisa. Sin embargo, presenta peores resultados son un tensor, esto puede deberse a que la tensión es aplicada en solo uno de los lados del nido por lo que no compensa los desplazamientos del nido correctamente.

Nido 1	L1	L2	L3
0 Tensores	9,95E-02	1,00E-02	3,30E-02
1 Tensor	2,86E-02	3,78E-03	2,57E-02
2 Tensores	2,43E-02	5,07E-03	1,76E-02
3 Tensores	2,41E-02	3,12E-03	1,08E-02

Tabla 8. Repetibilidad distancia nidos estrella nido 1 en milímetros

En el nido 1 podemos observar la mejoría al incrementar el número de tensores, a destacar los resultados del brazo 1 con tres tensores en la que no se ha conseguido obtener tanta mejoría, como se puede observar en el siguiente gráfico, se ha obtenido un escalón entre las tres primeras medidas y el resto, esto puede ser debido a un error humano en la colocación de la esfera.

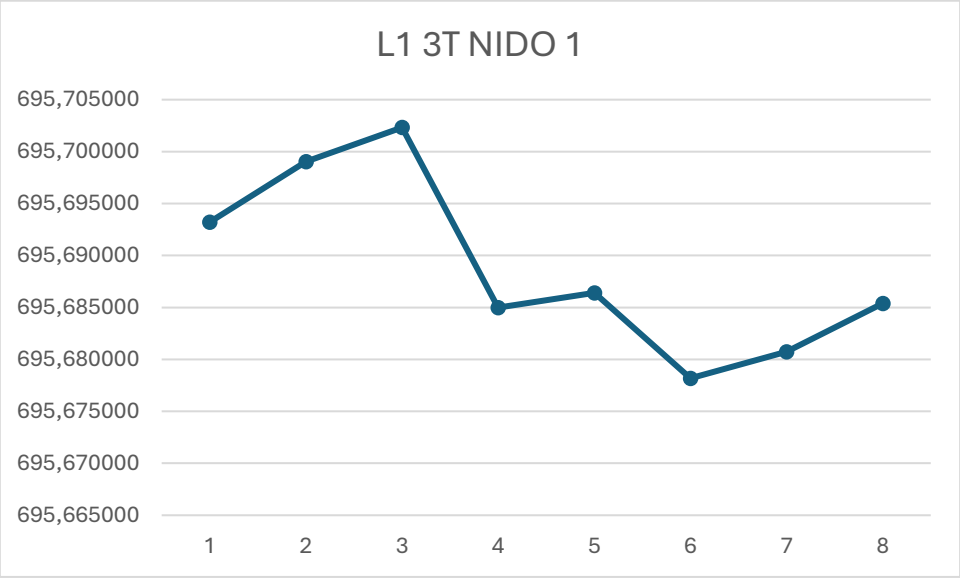


Ilustración 44. Gráfica de la toma de medidas para la longitud del brazo 1 con 3 tensores sobre el nido 1

Por último, repetimos el ensayo para conseguir los resultados en el nido 2.

Nido 2	L1	L2	L3
0 Tensores	2,33E-02	1,48E-02	1,33E-02
1 Tensor	2,49E-02	1,72E-02	1,87E-02
2 Tensores	1,17E-02	1,59E-02	5,80E-03
3 Tensores	1,08E-02	1,22E-02	2,65E-03

Tabla 9 . Repetibilidad de distancia nidos nido 2 en milímetros

Como se puede observar, se ha cumplido la premisa previa al estudio en este nido también, obteniendo así, una reducción de la variación de la toma de resultados. A destacar que la configuración con peores resultados es la de un tensor, esto confirma que lo que ocurría en el nido 1 con un tensor era debido a que la tensión solo se está aplicando en uno de los lados por lo que no compensa completamente la variación de longitudes.

3.2.2. REPETIBILIDAD DE POSICIÓN EN CADA NIDO

Para la realización de este ensayo se han calibrado nuevamente los brazos y las esferas de los brazos se han colocado en cada uno de los soportes cinemáticos de la mesa de la fresadora. Se coloca una esfera suelta en el nido en el que se va a realizar el ensayo y se colocan en ella los tridentes de los tres brazos. Es necesario colocar adecuadamente los tridentes porque durante la realización de los ensayos pueden colisionar entre sí y soltarse de la esfera, haciendo que caiga el brazo y provocando una pérdida de señal teniendo que volver a calibrarlo para comenzar a medir nuevamente.

Para la realización de este ensayo hay que medir previamente la distancia de los nidos situados en la bancada, esto se debe a que en este ensayo lo que estamos midiendo es la variación de posición de cada nido, para ello es necesario realizar una triangulación, procedimiento explicado en anteriores capítulos, para la que son imprescindibles los datos de distancia entre nidos de la bancada y las medidas que vayan tomando los tres brazos. Este procedimiento se ha mostrado anteriormente en la Ilustración 13.

Para la realización de este ensayo solo se van a evaluar dos configuraciones, la de partida, es decir, con el utillaje sin tensores y la que previamente ha obtenido mejores resultados de repetibilidad, la configuración con tres tensores.

Se comienza realizando medidas en los tres nidos sin tensores y se continua directamente con la toma de medidas con tres tensores.

Nido 1	X	Y	Z
0 Tensores	1,19E+00	1,06E+00	3,09E-01
3 Tensores	1,29E-01	8,48E-01	2,98E-01

Nido2	X	Y	Z
0 Tensores	1,27E-01	6,35E+00	3,34E-01
3 Tensores	7,08E-02	3,83E-01	5,93E-01

Nido 3	X	Y	Z
0 Tensores	3,87E+00	2,97E+00	4,94E+00
3 Tensores	5,28E-02	3,33E-01	5,76E-01

Tabla 10. Repetibilidad de posición en cada nido con 0 y 3 tensores

Como se puede ver, en caso de tomar las medidas sin tensores estamos teniendo una incertidumbre en las medidas de casi 5mm, resultado que se ve claramente reducido si se colocan los tres tensores, reduciéndose en el peor de los casos, casi un orden de magnitud.

Para el nido 1 se han obtenido resultados poco homogéneos para la configuración con cero tensores, pero la variación en cada una de las direcciones sigue siendo mejor con tres tensores.

Para este último nido, se han conseguido los mejores resultados con cero tensores, esto puede deberse a una mayor rigidez del brazo o a que el cabezal de la máquina presenta un menor juego en esta posición. Para el eje Z se ha conseguido una mayor precisión con cero tensores, Esta diferencia se debe a dos medidas que se salen de la media, tanto la primera como la última, esto provoca que se incremente la incertidumbre final, pero la mayor parte de las repeticiones tienen resultados muy constantes reduciendo el rango en esas ocho repeticiones centrales del ensayo, como se puede observar en el siguiente gráfico.

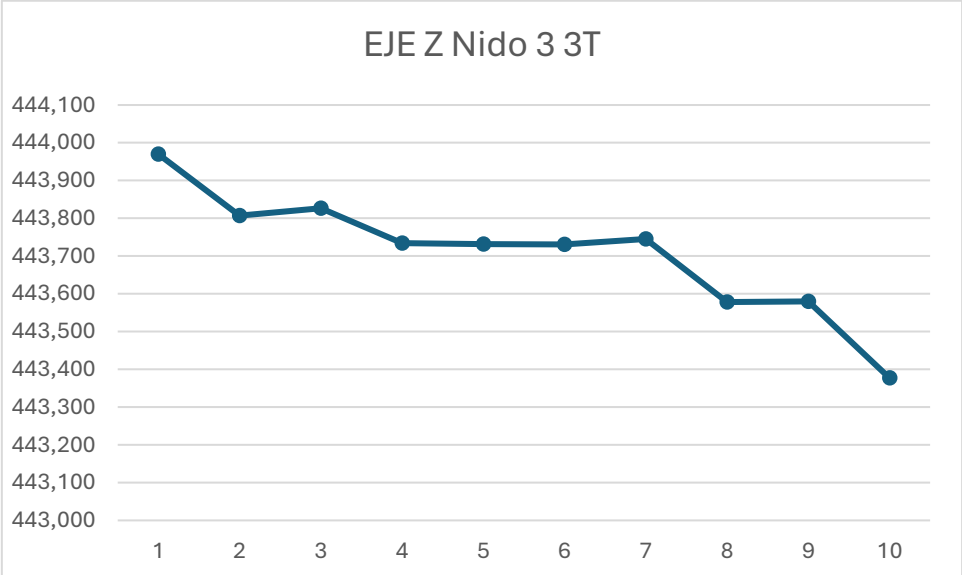


Ilustración 45 Grafica de la toma de medidas para el eje Z con 3 tensores en el nido 3

3.2.3. EFECTO DE LAS CONDICIONES AMBIENTALES

Para el tercer y último ensayo, se ha colocado el utillaje con la configuración de tres tensores y lo hemos dejado durante tres días tomando medidas cada 0,02 Hz, es decir, cada 50 segundos. Podemos observar una variación de las medidas pese a haber estado completamente en reposo, estas variaciones son debidas a los cambios térmicos producidos en el taller a lo largo de los días, que producen una dilatación o contracción de los brazos del utillaje, así como una variación de medida en los propios brazos porque debido a estos cambios de tamaño en los materiales puede modificar la trayectoria de la óptica, incluso se puede producir un cambio en el índice de refracción del aire, puesto que a mayor temperatura el aire tiende a ser menos denso,

disminuyendo el índice de refracción. Este índice es directamente proporcional a la velocidad de propagación del haz laser, modificando la longitud de onda y afectando a la toma de medidas.

Se han realizado un total de 4788 mediciones, que en relación con la temperatura han descrito los siguientes gráficos para cada uno de los brazos.

Como se puede observar, se establece una relación clara entre la gráfica dibujada por las longitudes (azul) y la gráfica pintada por las temperaturas (naranja). Midiendo las mayores longitudes en los puntos de mayor temperatura. Estos puntos de mayor temperatura se han dado en las horas centrales del día porque hace una mayor temperatura en el taller.

La mayor variación de longitudes se ha dado en el brazo 1 y ha sido de 9,9 micrómetros, donde también se ha producido la mayor variación de temperaturas.

Las temperaturas están expresadas en grados centígrados y las distancias en milímetros.

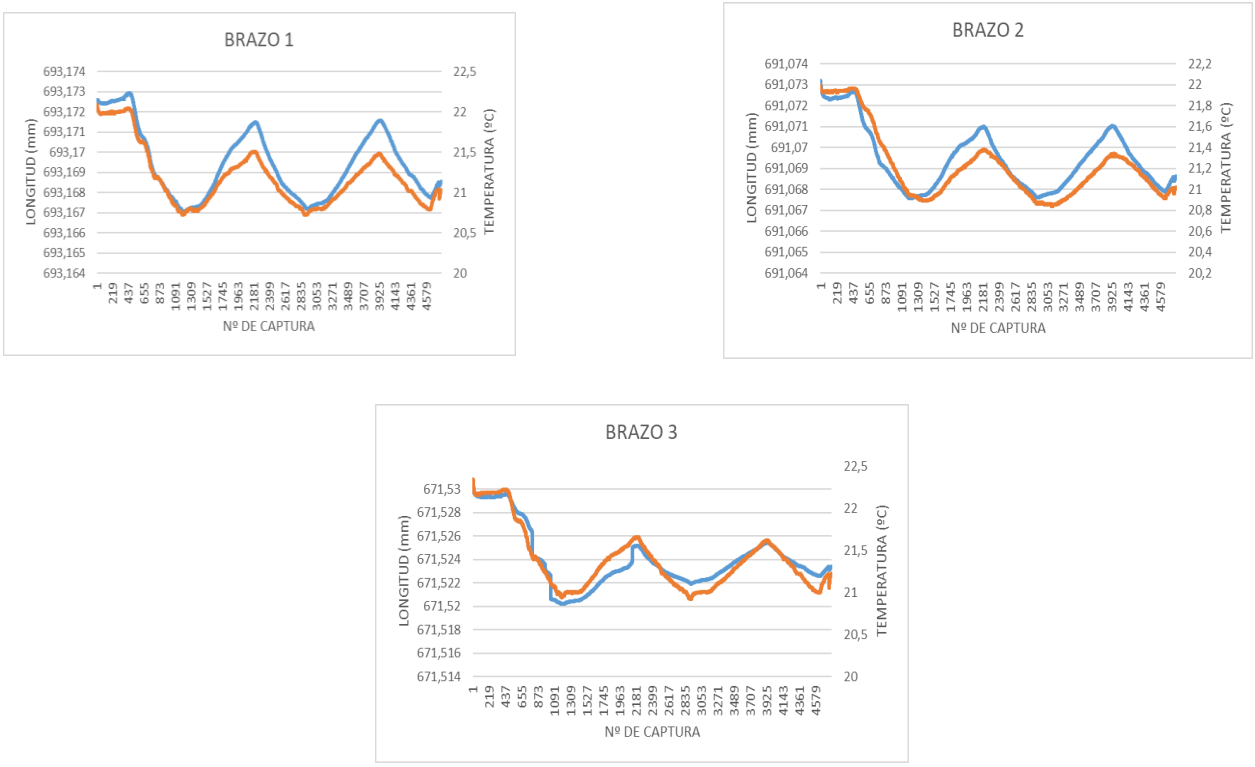


Ilustración 46. Graficas evolución temperatura y medición en el ensayo ambiental

	BRAZO 1		BRAZO 2		BRAZO 3	
	L	T	L	T	L	T
MAX	693,172935	22,0877	691,073182	21,9915	671,530174	22,34366
MIN	693,167045	20,71955	691,06755	20,847	671,520197	20,92265
DELTA	0,00588938	1,36815	0,00563189	1,1445	0,00997691	1,42101

Tabla 11. Máximos y mínimos de temperatura y distancia obtenidos durante el ensayo ambiental

4. MODELADO Y ESTIMACIÓN DE LA INCERTIDUMBRE DE MEDICIÓN DEL HPTI Y EL UTILLAJE UTILIZADO

A continuación, vamos a realizar una estimación de la incertidumbre de nuestro HPTI, pero primero una breve introducción del concepto de incertidumbre.

Toda medición física está asociada con cierto grado de imprecisión, debido a que los instrumentos de medida no presentan valores de medida exactos. Esta imprecisión puede venir provocada por el método de medida utilizado, las condiciones de temperatura, presión y humedad durante el ensayo e incluso de la cualificación del operario que realiza las mediciones. Para obtener resultados de medición significativos, debemos conocer la incertidumbre asociada a los resultados. Para la determinación de la incertidumbre debemos consultar la guía para la expresión de la incertidumbre de medida o GUM por sus siglas en inglés, Guide to the expression of Uncertainty in measurements.

Durante la realización de los ensayos por simulación se va a utilizar el software MATLAB. Nos hemos basado en el método de Monte Carlo para determinar la incertidumbre de medición, dicho método se basa en la generación aleatoria de números para la resolución de problemas donde no existe una solución analítica exacta o donde el cálculo directo sería muy complicado. Cuanto mayor número de simulaciones se realicen, más precisa será la estimación, dado que, los resultados de estas simulaciones se promedian para aproximar la solución del problema. Una vez obtenido todos los valores aplicaremos un intervalo de confianza del 95% para descartar los valores más alejados.

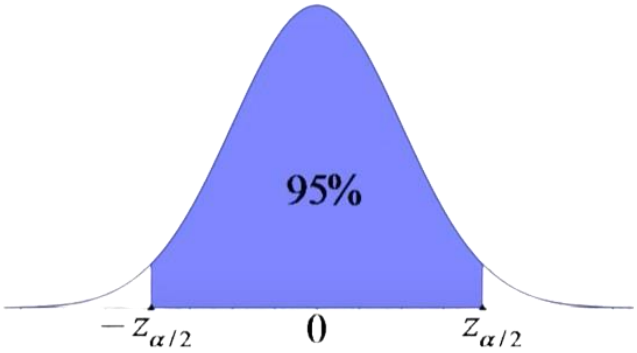
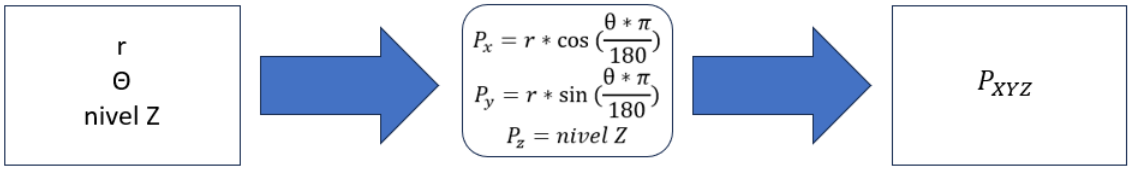


Ilustración 47. Intervalo de confianza

4.1. PRESENTACIÓN DEL SOFTWARE Y LAS FÓRMULAS UTILIZADAS

Para la realización de la simulación vamos a definir una serie de posiciones de la esfera y de los nidos de la estrella nominales, estos valores son exactos y no poseen ninguna desviación a la hora de calcularlos.
Comenzamos definiendo el modelo matemático nominal del eje de giro, es decir, el recorrido que va a realizar la esfera durante el ensayo, para ello definimos el radio de giro de la circunferencia (r) a realizar, la altura sobre el eje Z (nivel Z) respecto al eje de coordenadas inferior y el número de puntos en los que se tomarán valores durante la medición. Para el cálculo de coordenadas nominales de cada punto generamos un bucle que va incrementando el ángulo (θ) en cada ciclo para ir calculando las coordenadas de la esfera en las diferentes posiciones de la esfera negra ($P_{xyz)}$.

Dibujamos el resultado e incluimos el origen de coordenadas respecto del patrón de puntos en donde vamos a tomar las medidas.



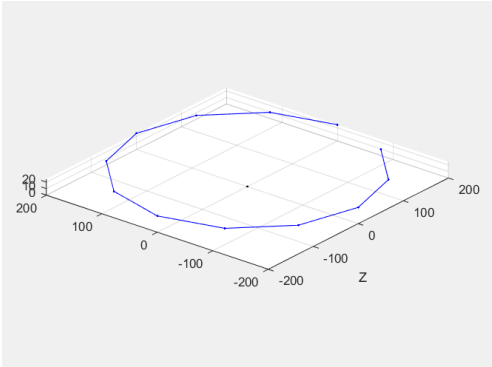


Ilustración 48. Puntos nominales del modelo matemático

Continuamos definiendo la posición nominal del HPTI, por medio de trigonometría y las dimensiones del utillaje conocemos la posición de cada una de las esferas de nuestro soporte. Este será el modelo del sistema de medición.

```
% POSICIONAMIENTO HPTI
KC1_NOM=[    -346     199.7631931 550 ];
KC2_NOM=[    346 199.7631931 550 ];
KC3 NOM=[    0    -399.5263863     550 ];
```

Ilustración 49. Posicionamiento del HPTI

A continuación, se calcula la distancia nominal de cada uno de los nidos, para ello se utiliza la fórmula de la distancia euclidiana. Utilizaremos las coordenadas de cada uno de los nidos y las de su nido colindante. Graficamos los resultados de nuestro sistema de medición.

$$d_{12} = \sqrt{(x_1 - y_1)^2 + (x_2 - y_2)^2 + (x_3 - y_3)^2},$$

Ilustración 50. Fórmula euclidiana

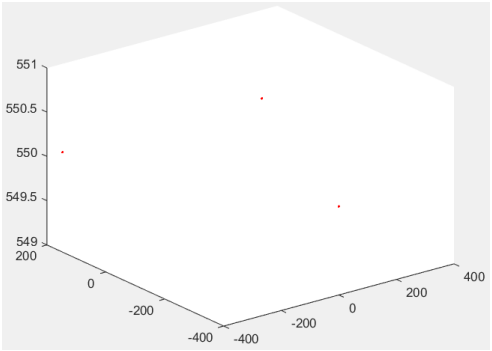
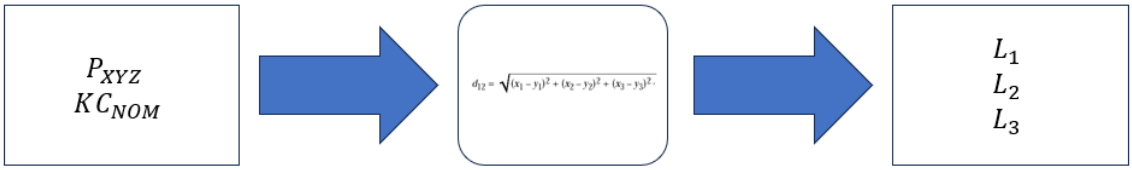


Ilustración 51. Posicionamiento del HPTI respecto del sistema de medición

Utilizando la misma fórmula, con los valores de entrada de los puntos de la esfera de posición (P_{xyz}) y las coordenadas del utillaje (KC_{nom}) se obtiene la longitud de cada uno de los brazos en cada una de las posiciones de la simulación. Realizamos una triangulación con la distancia entre nidos y la longitud de los brazos y por medio de un cambio de base sacamos la posición de la esfera negra desde el origen de coordenadas en uno de los nidos (XYZ_{nom}), es decir, tiene como referencia el origen de nuestro sistema.



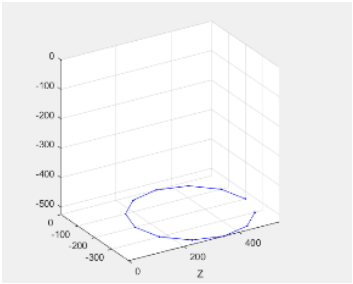


Ilustración 52. Recorrido de la esfera posición respecto del HPTI

Una vez definido nuestro sistema nominal, se comienza a calcular la incertidumbre de medida. Para ello, hay que tener en cuenta que nuestro HPTI presenta dos fuentes de desviación: el ruido procedente del utillaje debido a su rigidez y la incertidumbre de medida de los brazos.

Primero se define el valor del ruido procedente del utillaje, para ello, utilizamos los valores de rangos del nido que haya presentado que haya presentado mayor homogeneidad de resultados para X, Y y Z.

Con estos rangos definimos los valores de recorrido para las tres coordenadas.

Después definimos los valores de incertidumbre obtenidos por medio de la calibración de nuestro HPTI en ensayos de taller.

D_{NOM}= [400 , 410.9101 , 570.0097 , 731.27 , 889.1806 , 1041.8136]

U_{NOM}=[2.94 , 2.94 , 3.19 , 2.93 , 3.86 , 2.28]

Con estos valores de incertidumbre, calculamos por interpolación la incertidumbre en la longitud de los brazos y la distancia entre nidos. A su vez, seleccionamos un factor de cobertura para la incertidumbre con un valor de K=2, de acuerdo con el GUM.

El análisis se va a realizar con un número de iteraciones del orden de 1E6 para conseguir un mayor muestreo, que, gracias a la ley de los grandes números, con mayor número de iteraciones, mayor será la precisión de los resultados.

Para calcular el ruido producido en el utillaje generamos un número aleatorio por medio de la función “randn” y lo se multiplica por la incertidumbre de distancia entre

nidos divida por el factor de cobertura de incertidumbre. El valor de ruido se graba solo una vez en cada uno de los puntos del patrón.

Por último, calculamos de nuevo las posiciones del utillaje, la distancia entre nidos y la longitud de los brazos, por medio de la ecuación euclidiana anteriormente mencionada, añadiéndole el ruido del utillaje a la posición de los nidos y agregándole la incertidumbre de medida a los brazos y distancia entre nidos.

Una vez obtenidos todos los valores procedemos a calcular la incertidumbre del centro del patrón circular descrito por la esfera negra y en el vector director del plano que contiene los puntos del patrón generado por esta. Para ello, se utiliza un ajuste por mínimos cuadrados con unos valores de factor de cobertura k=2 y un intervalo de cobertura nfk=0955.

4.2. ESTIMACIÓN DE LA INCERTIDUMBRE

Los primeros resultados que obtenidos son los puntos nominales de la simulación, es decir, la longitud de los brazos en cada punto del patrón, las coordenadas de cada punto y la distancia que separa cada uno de los brazos del utillaje.
Estos valores no contemplan ningún ruido ni incertidumbre y nos permitirán comparar con los resultados obtenidos al incluirle la incertidumbre. Todos los resultados están expresados en milímetros.

	X	Y	Z
1	546,000	-199,763	-525,000
2	519,205	-99,763	-525,000
3	446,000	-26,558	-525,000
4	346,000	0,237	-525,000
5	246,000	-26,558	-525,000
6	172,795	-99,763	-525,000
7	146,000	-199,763	-525,000
8	172,795	-299,763	-525,000
9	246,000	-372,968	-525,000
10	346,000	-399,763	-525,000
11	446,000	-372,968	-525,000
12	519,205	-299,763	-525,000

Tabla 12. Coordenadas puntos nominales de la esfera posición

L12	L23	L13
692	692	692

Tabla 13. Longitud entre nidos estrella

Una vez calculados los valores nominales se procede a introducir los valores de ruido y de incertidumbre. Estos valores estarán definidos por los resultados obtenidos en el segundo ensayo de repetibilidad y se seleccionan los más homogéneos para cada configuración.

Para comenzar, se seleccionan los valores de los ensayos con cero tensores, concretamente los obtenidos en nido 3 porque es el caso que mejor han salido los resultados y en el que más se nota la diferencia entre ambas configuraciones.
Los valores de incertidumbre que se van a introducir aparecen en la Tabla 10.

El primer análisis a realizar se trata de la configuración sin tensores. Al introducir los valores de incertidumbre en el utillaje estos son las doce posiciones medias de los puntos medidas que hemos obtenido:

XYZ	X	Y	Z
1	545,9997	-199,7625	-525,0003
2	519,2044	-99,763	-525
3	445,9993	-26,5581	-525,0001
4	346,0005	0,2368	-524,9999
5	245,9999	-26,5573	-524,9996
6	172,7942	-99,7633	-524,9997
7	145,9995	-199,7634	-524,9996
8	172,7951	-299,7628	-525,0009
9	246,0003	-372,9666	-525,0002
10	346,0012	-399,7626	-525,0006
11	445,9996	-372,9687	-524,9995
12	519,2047	-299,7642	-525,0002

Tabla 14. Media de posiciones de la esfera posición para 0 tensores

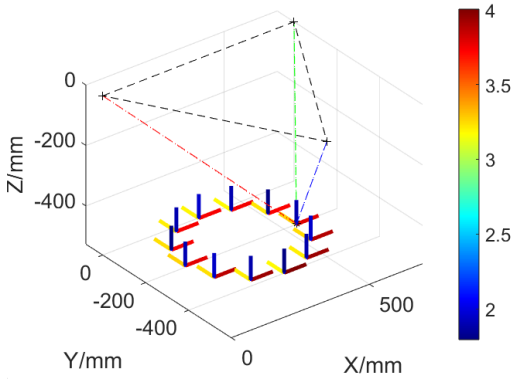


Ilustración 53. Incertidumbre medida para la configuración de 0 tensores

I0_XYZ	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
X	3,800	3,737	3,749	3,740	3,742	3,747	3,791	3,872	3,946	4,004	3,947	3,891
Y	3,272	3,228	3,178	3,186	3,205	3,237	3,270	3,244	3,203	3,183	3,209	3,246
Z	1,889	1,794	1,886	1,949	1,887	1,796	1,895	1,946	1,880	1,797	1,885	1,949

Tabla 15. Incertidumbre por coordenada y punto para la configuración de 0 tensores

Hemos obtenido un intervalo de cobertura máximo de ±4,003 para el eje X, ±3,271 para el eje Y y ±1,949 para el eje Z. Estos valores máximos son los de color rojo, se trata de una escala de color por cada línea.
Esta incertidumbre conseguida es demasiado elevada.

Para intentar reducir esta incertidumbre en las mediciones se procede a realizar la simulación con los valores obtenidos con tres tensores.

XYZ	X	Y	Z
1	546,0016	-199,7638	-524,9867
2	519,1903	-99,7697	-525,006
3	446,0139	-26,5614	-524,9897
4	345,9906	0,2405	-524,9949
5	245,9999	-26,5573	-524,9918
6	172,8032	-99,7635	-525,0061
7	146,0094	-199,7614	-524,9959
8	172,7818	-299,7667	-524,9835
9	246,0222	-372,9662	-524,9931
10	346,0081	-399,7562	-524,9978
11	446,0017	-372,9651	-524,9958
12	519,1973	-299,7654	-524,9974

Tabla 16. Media de posiciones de la esfera posición para 3 tensores

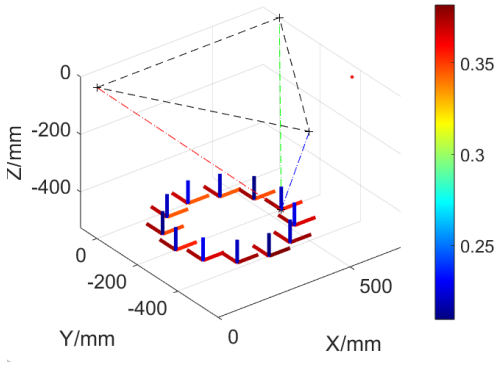


Ilustración 54. Resultados de incertidumbre para configuración con 1 tensor

I0_XYZ	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
X	0,354	0,347	0,345	0,345	0,345	0,349	0,354	0,366	0,376	0,382	0,377	0,366
Y	0,378	0,376	0,372	0,369	0,371	0,376	0,378	0,375	0,372	0,371	0,371	0,375
Z	0,220	0,210	0,220	0,226	0,220	0,210	0,220	0,227	0,220	0,210	0,220	0,227

Tabla 17. Incertidumbre por coordenada y punto para la configuración de 3 tensores

Como se puede observar a simple vista, los valores de cada posición son más parecidos a nos nominales que con la configuración de cero tensores.
Ahora estamos consiguiendo un intervalo de cobertura en el peor de los puntos de ±0,381 para el eje X, ±0,377 para el eje Y y ±0,227 para el eje Z.

Otra de las incertidumbres a tener en cuenta son la del centro del patrón descrito por las doce posiciones y el vector normal (Vdz) del plano que contiene el centro y el punto de cada posición del plano. A partir de ellas podemos conseguir el error angular producido durante las medidas.

Para la configuración con cero tensores hemos obtenido unos valores de incertidumbre en el centro y en el vector director de:

I0_Vdz (mm)	X	Y	Z
	0,004	0,004	0,000

I0_centro (mm)	X	Y	Z
	1,519	1,405	0,582

Estos son los resultados que obtenidos para la posición del centro y los cosenos directores del vector normal del plano resultante.

Vdz (mm)	X	Y	Z
	-0,002	0,001	-1,000

Comparando el vector normal obtenido con el vector normal nominal, conseguimos el error angular producido durante las mediciones, respecto del plano YZ con α y del plano XZ con β.

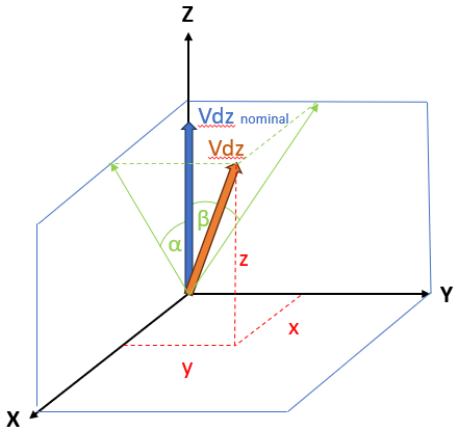
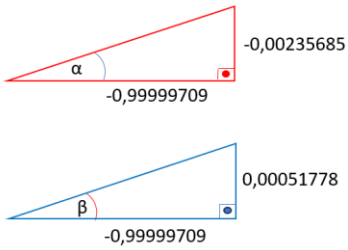


Ilustración 55. Ángulos entre vector nominal y vector normal

Para obtener el valor de estos ángulos hay que aplicar trigonometría de triángulo rectángulo formado por los cosenos directores.



Para calcular el ángulo calculamos la tangente.

$$\alpha = \arctan\left(-\frac{0{,}00235685}{-0{,}99999709}\right) = 0{,}135^{o}$$

$$\beta = \arctan\left(\frac{0{,}0051778}{-0{,}99999709}\right) = -0{,}296^{o}$$

Por último, se van a calcular los valores de error angular máximo y mínimo aplicando la incertidumbre a los valores nominales.
El vector normal nominal es:

Vdz (mm)	X	Y	Z
	0,000	0,000	-1,000

Y los valores superior e inferior para la configuración con cero tensores son:

Isup_Vdz (mm)	X	Y	Z
	0,004	0,004	-1,000

Iinf_Vdz (mm)	X	Y	Z
	-0,004	-0,004	-1,000

$$\alpha_{max} = \arctan\left(\frac{0{,}00408903}{-0{,}99998708}\right) = -0{,}23428^{o}$$

$$\beta_{max} = \arctan\left(\frac{0{,}00407906}{-0{,}99998708}\right) = -0{,}23371^{o}$$

$$\alpha_{min} = \arctan\left(\frac{-0{,}00412965}{-1}\right) = 0{,}23661^{o}$$

$$\beta_{max} = \arctan\left(\frac{-0{,}00413533}{-1}\right) = 0{,}23693^{o}$$

Tal y como ha sucedido con la incertidumbre de las posiciones, para la configuración con tres tensores se han conseguido unos valores de incertidumbre menores que la con la configuración de cero tensores.
Los valores de incertidumbre obtenidos con tres tensores han sido de:

I0_centro (mm)	X	Y	Z
	0,151	0,154	0,068

I0_Vdz (mm)	X	Y	Z
	0,0005	0,0005	0,0000

Estos son los cosenos directores del vector normal al plano para esta configuración.

Vdz (mm)	X	Y	Z
	-0,0002	0,0003	-1,0000

Si calculamos el error angular con el método utilizado en el apartado anterior, obtenemos unos valores de:

$$\alpha=0,011192^{o}$$
$$\beta=-0,01653^{o}$$

Por último, se calculan los valores de error angular máximo y mínimo aplicando la incertidumbre a los valores nominales. Para ello se utilizan los valores de cobertura para esta configuración:

Isup_Vdz (mm)	X	Y	Z
	0,0005	0,0005	-1,0000

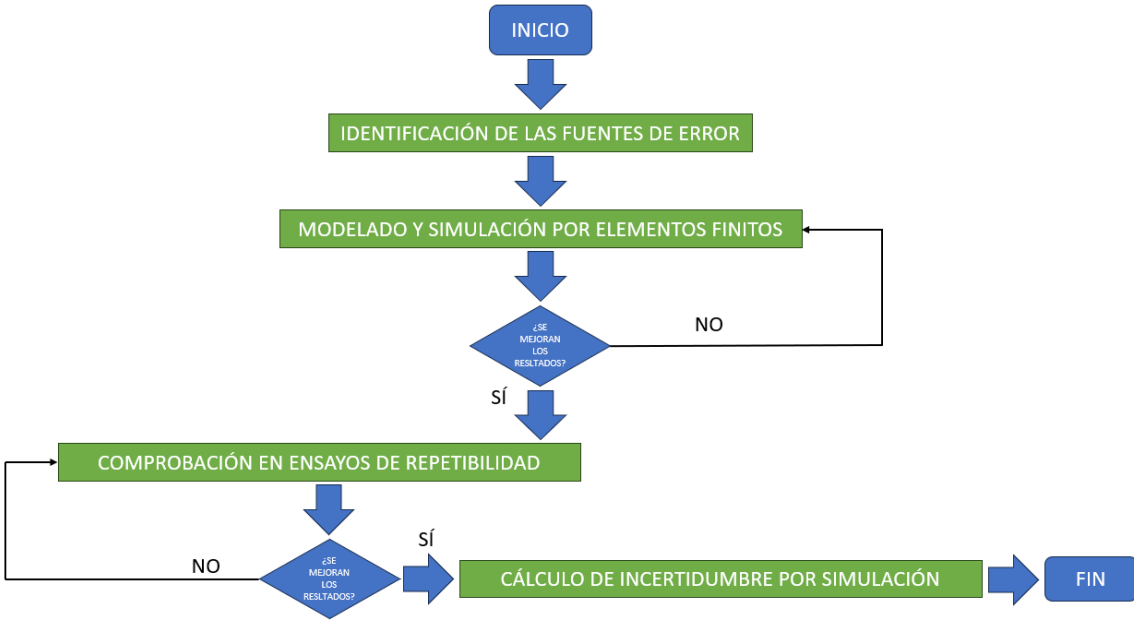
Iinf_Vdz (mm)	X	Y	Z
	-0,0005	-0,0005	-1,0000

$$\alpha_{max} =-0,02707^{o}$$
$$\beta_{max}= -0.02788^{o}$$
$$\alpha_{min} =0,0277^{o}$$
$$\beta_{max}=0,027729^{o}$$

Como se puede observar, se ha obtenido un menor error angular en la segunda de las configuraciones, es decir, con tres tensores. Con estos resultados se puede afirmar que se ha conseguido reducir el error angular con nuestro sistema de rigidización.

5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Como se ha comentado al inicio de este trabajo de fin de grado, se pretendía realizar un estudio de la incertidumbre del HPTI colocado en la estrella, para ello debíamos mejorar la rigidez de la estrella porque en ensayos realizados previamente no se obtenían valores de incertidumbre adecuados. Este ha sido el diagrama de flujo que se ha seguido este trabajo, en caso de no conseguir los resultados esperados se ha vuelto al paso anterior para intentar lograrlos.



Al realizar la simulación se ha obtenido una configuración que mejora de resultados, posteriormente aplicando la configuración optima hemos conseguido la mejora de los resultados en los ensayos de repetibilidad. Con esta mejora de los resultados de repetibilidad se ha conseguido reducir el error introducido por la estrella durante la realización de los ensayos, lo que ha derivado en la reducción de la incertidumbre de medida de nuestro equipo durante la el análisis mediante iteración.

6. CONCLUSIONES Y LÍNEA DE TRABAJO FUTURAS

El principal motivo de este trabajo ha sido analizar y mejorar el sistema de medición HPTI. Para ello se han realizado diferentes ensayos y simulaciones.
Se ha comenzado elaborando simulaciones mediante software de elementos finitos.
Se ha implementado un nuevo método para la mejora de la rigidización del utillaje y se han efectuado ensayos de repetibilidad con diferentes configuraciones.
Se trata de un sistema de medición muy delicado por lo que se necesita tener mucho cuidado para obtener resultados fiables.
Por último, se ha realizado una simulación mediante software de cálculo para conocer la incertidumbre de medida conseguida introduciendo los valores de incertidumbre en los utillajes obtenidos en los ensayos físicos.
Se pude afirmar que se ha obtenido una mejora en la rigidez del utillaje y que el HPTI posee una precisión de medida adecuada para la realización de futuros ensayos.

Para líneas de trabajo futuras se pueden realizar ensayos en la MH realizando movimientos en los ejes XYZ con una nube de puntos que se introduce en la máquina. Este proceso se conoce como verificación volumétrica. Con estos ensayos se consigue obtener la compensación de medidas necesaria a introducir en la MH.
El modelo desarrollado de verificación volumétrica permite la caracterización de los distintos errores geométricos presentes en una máquina-herramienta mediante la medición indirecta de los mismos. Por medio de este método conseguimos reducir el tiempo empleado en la verificación, especialmente si lo comparamos con los métodos tradicionales de medición directa de los errores.
Al tratarse de una compensación matemática y no física, el resultado de este proceso será una compensación matemática del efecto conjunto de todos los errores geométricos en todo el volumen de trabajo, y no una compensación de cada uno de ellos de manera independiente.

Otra de las posibles líneas de trabajo a seguir en un futuro podría consistir en realizar una programación de una serie de puntos en la máquina para confeccionar una toma de medidas lineales para comparar los resultados con otros instrumentos de medida, como un interferómetro -Renishaw XL-80.

BIBLIOGRAFÍA

https://www.interempresas.net/MetalMecanica/Articulos/123197-Verificacion-volumetrica-solucion-real-verificacion-maquina-herramienta-grandes.html

https://www.kistler.com/INT/es/incertidumbre-de-medicion/C00000124

https://www.cem.es/sites/default/files/gum20digital1202010.pdf

https://www.modelreef.com/montecarlo-poker

ANEXOS

ANEXO I: RESULTADOS ELEMENTOS FINITOS

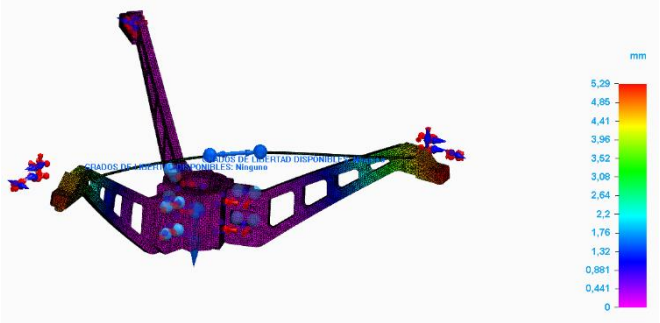


Ilustración 56. 1 tensor

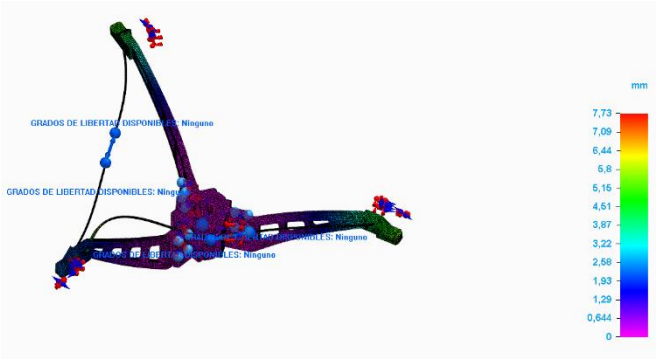


Ilustración 57. 2 Tensores

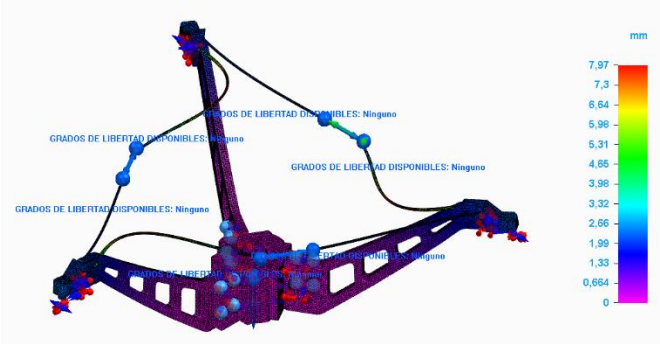


Ilustración 58. 3 Tensores

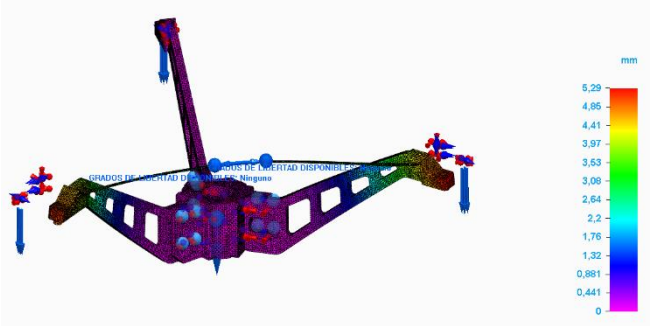


Ilustración 59. 7 Vertical 1 Tensor

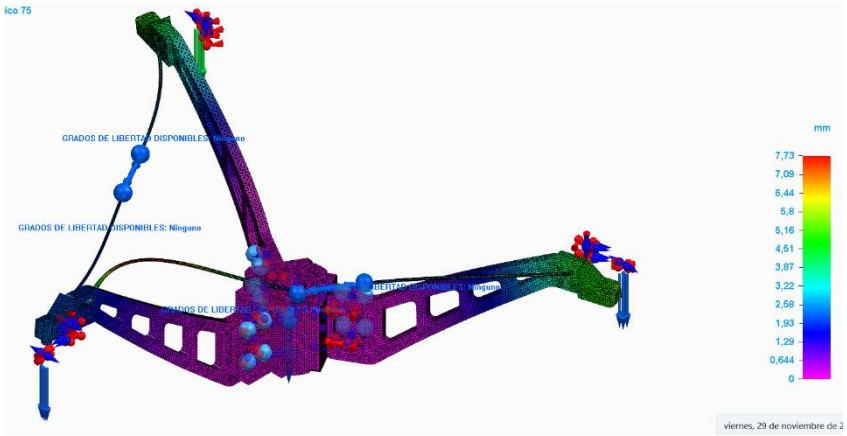


Ilustración 60. 7 Vertical 2 Tensores

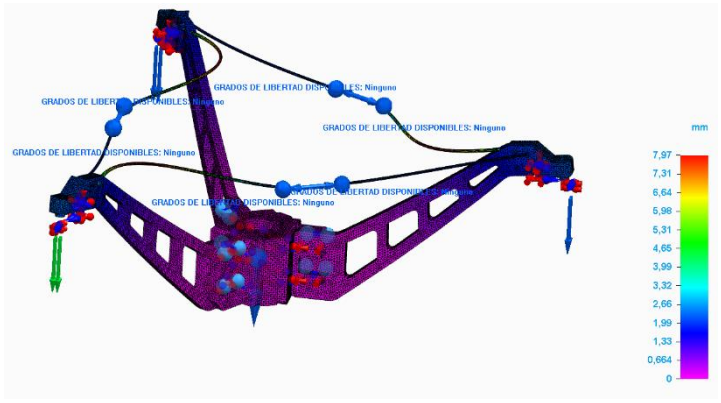


Ilustración 61. 7 vertical 3 Tensores

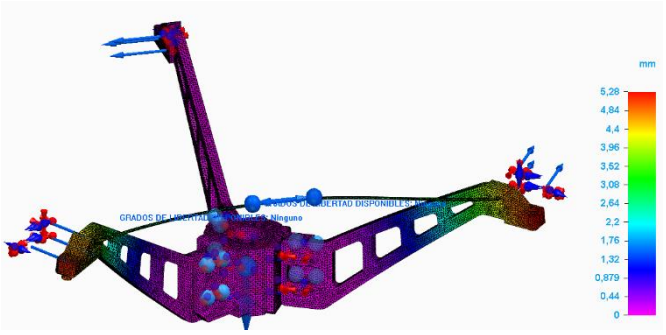


Ilustración 62. 10 Horizontal 1 Tensor

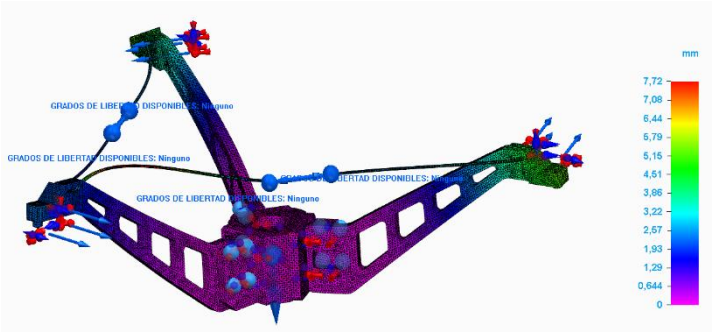


Ilustración 63. 10 Horizontal 2 Tensores

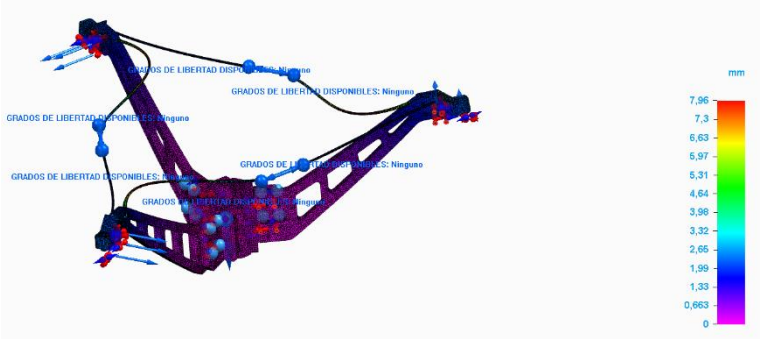


Ilustración 64. 10 Horizontal 3 Tensores

ANEXO II: RESULTADOS ENSAYOS REPETIBILIDAD

2 Tensores		
Forzando		
Nido3		
2,25E-02	9,03E-02	1,80E-02
I1	I2	I3
697,495825	688,743772	690,705162
697,474418	688,748368	690,718044
697,470091	688,748831	690,722215
697,468108	688,748121	690,725603
697,464996	688,748809	690,727680
697,462851	688,752273	690,727677
697,458625	688,727884	690,729451
697,456920	688,754273	690,732727
697,452451	688,664350	690,736160
697,451948	688,663947	690,736873
697,447548	688,665236	690,740175
697,449574	688,668674	690,739798
697,443274	688,670062	690,743277
697,447526	688,666916	690,740634
697,445317	688,601990	690,741670

Tabla 19. Resultados nido 3 2 tensores forzand

1 Tensor		
Forzando		
Nido3		
2,73E-02	5,30E-02	3,08E-02
I1	I2	I3
696,15	687,330468	693,516068
696,152794	687,354252	693,484879
696,120946	687,346845	693,522067
696,150546	687,358886	693,483107
696,148534	687,360873	693,482625
696,147057	687,346698	693,482609
696,126876	687,321692	693,501313
696,124121	687,350019	693,502071
696,119709	687,339561	693,510367
696,126022	687,365774	693,497455
696,140160	687,364656	693,490464
696,122532	687,368909	693,497276
696,123513	687,363429	693,506095
696,144851	687,369528	693,479580
696,126149	687,374681	693,501509

Tabla 18. Resultados con 1 tensor forzando

0 Tensores		
Forzando		
Nido3		
2,34E-02	6,05E-02	2,46E-02
I1	I2	I3
694,958148	690,762992	691,991166
694,958143	690,762984	691,991172
694,980004	690,758821	691,977467
694,982281	690,764620	691,971179
694,985817	690,763200	691,970945
694,999408	690,767371	691,976680
694,986440	690,758200	691,972064
694,982872	690,762766	691,965543
694,978066	690,769501	691,972698
694,976601	690,768512	691,968756
694,981114	690,768915	691,971027
694,976038	690,771458	691,973365
694,977895	690,769103	691,989209
694,977898	690,771825	691,990182
694,979550	690,818656	691,975834
Nido 1		
1,23E-01	1,17E-02	8,05E-03
I1	I2	I3
694,979514	690,768458	691,975984
694,941145	690,749419	692,033144
694,944467	690,740825	692,037084
694,941764	690,745897	692,034784
694,935416	690,753394	692,035732
694,929335	690,741389	692,039691
694,808843	690,742402	692,039955
694,808938	690,739083	692,041135
694,810286	690,738149	692,04189
694,81072	690,740017	692,040829
694,810763	690,738882	692,038019
694,806304	690,747049	692,038845
694,809107	690,749852	692,03384
694,813526	690,740515	692,035641
694,814375	690,741549	692,035672
Nido 2		
4,40E-02	5,11E-01	8,56E-02
I1	I2	I3
694,822867	690,741762	692,024368
694,873903	690,710627	692,011648
694,878768	690,380171	692,012101
694,87202	690,383897	692,016001
694,879205	690,383836	692,007064
694,877641	690,696503	692,009411
694,878417	690,699538	692,006037
694,878865	690,697465	692,007144
694,85021	690,697785	692,008598
694,877655	690,190815	692,010296
694,880355	690,190675	692,007826
694,894239	690,191839	692,014034
694,876395	690,188887	692,014708
694,865738	690,19155	692,014409
694,874738	690,362928	692,091682

Sin forzar		
Nido3		
8,83E-03	2,01E-02	1,88E-02
I1	I2	I3
694,60	690,45	692,01
694,571814	690,473784	692,026460
694,573961	690,458920	692,039839
694,574735	690,458800	692,039309
694,578086	690,464806	692,032497
694,578064	690,453656	692,041155
694,578029	690,456261	692,038577
694,574428	690,465483	692,033196
694,580645	690,472505	692,022306
694,572096	690,469244	692,031703
694,572565	690,468536	692,031054
694,568522	690,479450	692,023971
694,575316	690,471978	692,026273
694,567933	690,481972	692,020858
694,579564	690,469051	692,025264
Nido 1		
9,95E-02	1,00E-02	3,30E-02
I1	I2	I3
694,5843412	690,472551	692,014282
694,5730544	690,479578	692,021724
694,5860563	690,47026	692,018714
694,5737916	690,473216	692,026105
694,4806375	690,469338	692,040446
694,5108534	690,472986	692,00617
694,4846666	690,473391	692,024554
694,4754931	690,47587	692,033108
694,426801	690,4728	692,023896
694,4113129	690,475104	692,037537
694,443998	690,476044	692,004512
694,4392195	690,469896	692,015859
694,4210349	690,475865	692,028112
694,4340864	690,4799	692,011798
694,4305423	690,473889	692,019138
Nido 2		
2,33E-02	1,48E-02	1,33E-02
I1	I2	I3
694,4305638	690,473873	692,019103
694,4222963	690,47471	692,027446
694,4049623	690,486951	692,034285
694,4266025	690,471467	692,0279
694,4093353	690,484224	692,033038
694,4318428	690,468248	692,024881
694,4111219	690,477581	692,036398
694,4246149	690,476123	692,027036
694,4252528	690,475511	692,025297
694,4344459	690,468869	692,024176
694,4190999	690,480098	692,027082
694,418575	690,478492	692,029318
694,4298097	690,470719	692,027764
694,4282917	690,465288	692,035018
694,4314851	690,474333	692,023089

Tabla 20. Resultados sin forzar con 0 tensores nidos 1 2 3

Sin forzar		
Nido3		
8,34E-03	9,57E-03	7,78E-03
I1	I2	I3
696,741211	688,854421	691,352463
696,721434	688,862348	691,365008
696,726346	688,858222	691,367582
696,729107	688,855006	691,366853
696,729402	688,855685	691,368066
696,732818	688,859603	691,362272
696,733279	688,860471	691,362037
696,728947	688,863416	691,360284
696,729941	688,861122	691,360634
696,724941	688,862378	691,365256
696,725640	688,860627	691,365477
696,727193	688,864581	691,361315
696,730467	688,860823	691,364039
696,730202	688,861360	691,360717
696,732535	688,863203	691,358901
Nido 1		
2,43E-02	5,07E-03	1,76E-02
I1	I2	I3
696,737840	688,862823	691,353699
696,736884	688,860888	691,359493
696,728444	688,864784	691,358831
696,716922	688,862201	691,369577
696,726899	688,862153	691,364379
696,716471	688,863230	691,373367
696,728026	688,861256	691,364041
696,714467	688,861737	691,375432
696,721689	688,861938	691,367812
696,738793	688,858162	691,357799
696,726163	688,862909	691,362975
696,728128	688,862919	691,362555
696,730303	688,861974	691,359410
696,737810	688,860536	691,356677
696,730470	688,863098	691,361017
Nido 2		
1,17E-02	1,59E-02	5,80E-03
696,730585	688,863064	691,360956
696,724081	688,868018	691,361589
696,728425	688,865452	691,363415
696,735021	688,854156	691,359289
696,723324	688,869786	691,361253
696,728229	688,868179	691,359954
696,727558	688,865261	691,363934
696,734947	688,865800	691,358132
696,725435	688,867535	691,363189
696,728428	688,868139	691,363194
696,726647	688,870061	691,360160
696,734241	688,864443	691,360285
696,733441	688,866185	691,361030

Tabla 21. 2 tensores sin forzar I 2 3

Sin forzar		
Nido3		
2,58E-02	3,08E-02	2,78E-02
I1	I2	I3
690,454834	696,146813	693,516068
690,473784	696,152794	693,484879
690,458920	696,120946	693,522067
690,458800	696,150546	693,483107
690,464806	696,148534	693,482625
690,453656	696,147057	693,482609
690,456261	696,126876	693,501313
690,465483	696,124121	693,502071
690,472505	696,119709	693,510367
690,469244	696,126022	693,497455
690,468536	696,140160	693,490464
690,479450	696,122532	693,497276
690,471978	696,123513	693,506095
690,481972	696,144851	693,479580
690,469051	696,126149	693,501509
Nido 1		
2,86E-02	3,78E-03	2,57E-02
I1	I2	I3
695,507757	688,553700	692,957177
695,492457	688,552537	692,969455
695,513385	688,552646	692,953703
695,518328	688,550672	692,947949
695,504653	688,553018	692,957066
695,505702	688,552780	692,957952
695,490275	688,553782	692,969816
695,495541	688,553706	692,967623
695,494465	688,552365	692,966718
695,489733	688,551919	692,973663
695,502556	688,550980	692,962544
695,504380	688,554454	692,957606
695,500067	688,552453	692,961689
695,518020	688,551431	692,950382
695,526535	688,551133	692,940387
Nido 2		
2,49E-02	1,72E-02	1,87E-02
I1	I2	I3
695,526528	688,551129	692,940403
695,511323	688,558748	692,948082
695,488385	688,560114	692,969271
695,499549	688,553178	692,963251
695,500259	688,552266	692,963669
695,509688	688,556440	692,949941
695,516996	688,549133	692,947283
695,501261	688,558709	692,957915
695,492105	688,558623	692,965955
695,498653	688,541547	692,962152
695,506227	688,556113	692,955001
695,498238	688,555558	692,964009
695,507161	688,558628	692,951643
695,509047	688,556654	692,955111
695,496321	688,555943	692,961409