



## Trabajo Fin de Máster

Título del trabajo:

Análisis de un sistema telescopico de alta precisión  
basado en interferometría láser para verificación  
volumétrica de máquina-herramienta

Autor

Pablo González Gambau

Directores

Francisco Javier Brosed Dueso  
Juan José Aguilar Martin

Titulación del autor

Máster en Ingeniería Industrial

Escuela de Ingeniería y Arquitectura  
2020-2021

## Resumen

El desarrollo de este Trabajo Fin de Master consiste en el análisis de funcionamiento de un sistema de medición de alta precisión basado en la tecnología de interferometría láser.

El principal objetivo es comprender los elementos que intervienen en el sistema y como estos influyen en la medición real.

El equipo fue diseñado por el grupo de investigación GIFMA del Departamento de Ingeniería de Diseño y Fabricación de la Universidad de Zaragoza y en este trabajo se ha ido progresando sobre la identificación de los errores de la medición y se han propuesto medidas de mejora.

Se ha analizado cómo funciona el equipo, los elementos que lo forman y los utilajes que el sistema necesita para su uso. Para poder conocer como son los errores que comete el sistema, se ha ensayado ante diferentes situaciones para ver el grado de influencia tienen los elementos internos y externos al sistema.

Los resultados y la experiencia del uso del sistema han permitido crear un procedimiento que intente suplir las deficiencias del procedimiento inicial. Para desarrollar el nuevo procedimiento se ha necesitado implementar nuevos utilajes. Estos han estado enfocados en el diseño y simulación mediante el software Solid Edge.

Para concluir, se ha realizado una comparación con un interferómetro láser para saber si existe viabilidad para aplicar este sistema de medición en la verificación volumétrica.

# Índice

1.	Introducción .....	8
1.1.	Objeto.....	8
1.2.	Alcance .....	8
1.3.	Estructura de la memoria.....	9
2.	Material utilizado .....	10
2.1.	Sistema de medición .....	10
2.1.1.	Funcionamiento del software .....	12
2.1.1.1.	Calidad de señal .....	12
2.1.1.2.	Modos de medida .....	13
2.1.1.3.	Inicialización de parámetros .....	15
2.2.	Calibrador.....	16
2.3.	Asientos cinemáticos.....	16
2.4.	Utilajes auxiliares de sujeción .....	17
3.	Ánalisis del procedimiento de funcionamiento .....	19
3.1.	Datos necesarios .....	19
3.2.	Procedimiento inicial de funcionamiento .....	19
3.3.	Propuesta de ensayos .....	21
4.	Ensayos en el laboratorio .....	23
4.1.	Ensayos de reflector .....	23
4.2.	Ensayos para evaluar los modos de medida .....	25
4.2.1.	Medición sin manipulación.....	26
4.2.2.	Medición con pérdida de señal sin cambio de posición .....	28
4.2.3.	Medición con pérdida de señal y cambio de posición.....	29
4.3.	Ensayos de comportamiento ante el movimiento .....	31
5.	Ensayos en máquina herramienta: Distribución en bancada vs distribución en estrella .....	33
5.1.	Repetibilidad en la colocación de un brazo telescopico .....	34
5.2.	Repetibilidad de la colocación en el asiento cinemático .....	36
5.3.	Repetibilidad de la colocación del tridente en la esfera de referencia.....	39

6.	Propuesta de procedimiento de uso y sus mejoras .....	41
6.1.	Utilajes para fibra óptica .....	43
6.2.	Diseño de un patrón para su utilización en planta.....	45
6.3.	Plataforma para el sistema de verificación .....	48
7.	Comparación entre equipos.....	50
8.	Conclusiones.....	52
9.	Bibliografía .....	53

## Anexos

Anexo I: Resultados de ensayos en laboratorio .....	54
Anexo II: Resultados en ensayos en máquina herramienta .....	59

## Índice de ilustraciones

Ilustración 1. Brazo telescopico .....	10
Ilustración 2. Tridente del brazo .....	11
Ilustración 3. Interferómetro con los equipos conectados [3].....	11
Ilustración 4. Switch genérico [4].....	12
Ilustración 5. Menu de los modos de medida del sistema [6] .....	13
Ilustración 6: Parametros del modo HSSL [5].....	14
Ilustración 7. Parametros de AquadB [5] .....	14
Ilustración 8: Proceso de la función RP .....	16
Ilustración 9. Conjunto de diversos asientos cinematicos .....	17
Ilustración 10. Sujeción en ensayos de laboratorio .....	17
Ilustración 11. Sujeción en la bancada de la máquina herramienta [8].....	18
Ilustración 12. Perfil de aluminio .....	18
Ilustración 13. Utilaje para mh "estrella" [10].....	18
Ilustración 14. Sujeción esfera en estrella (izquierda) y bancada (derecha) .....	19
Ilustración 15. Medición de distancia entre bases. Disposición en bancada (Arriba). Disposición en estrella (Abajo).....	20
Ilustración 16. Distribución en bancada (arriba) y distribución en estrella (abajo).....	21
Ilustración 17. Utilaje para el ensayo de reflectores.....	23
Ilustración 18. Utilaje para medición de calidad con esfera .....	25
Ilustración 19. Colocación del brazo en el ensayo para evaluar los modos de medida.....	25
Ilustración 20. Resultados de la variabilidad de la medición sin manipulación.....	26
Ilustración 21. Temperatura y calidad de señal de medición sin manipulación .....	27
Ilustración 22. Gráfica en medidas absolutas del ensayo de perdida de señal sin cambio de pos .....	28
Ilustración 23. Gráfica en medidas relativas del ensayo de perdida de señal sin cambio de pos. ....	28
Ilustración 24. Gráfica de medición en absolutas de perdida de señal con cambio de pos. ....	30
Ilustración 25. Gráfica de medición en relativas de perdida de señal con cambio de pos. ....	30
Ilustración 26. Disposición para realizar ensayos de comportamiento ante el movimiento.....	31
Ilustración 27. Gráfica de la medición de L .....	32
Ilustración 28. Disposición en estrella con identificación de los brazos .....	33
Ilustración 29. Disposición en bancada con identificación de los brazos .....	34
Ilustración 30. Sistema de medición con el calibrador .....	35
Ilustración 31. Gráfica de opción RP y medir en disp. bancada .....	35
Ilustración 32. Gráfica de la función RP y medir en disp. estrella .....	35
Ilustración 33. Esquema del ensayo en estrella de quitar la esfera .....	37
Ilustración 34. Esquema del ensayo en bancada de quitar la esfera .....	37
Ilustración 35. Repetibilidad de la colocación en el asiento cin. en disp. bancada. ....	38
Ilustración 36. Repetibilidad de la colocación en el asiento cin. en disp. estrella .....	38
Ilustración 37. Esquema de quitar y poner tridente en la bancada .....	39
Ilustración 38. Esquema de quitar y poner tridente en la estrella.....	40
Ilustración 39. Gráfica de variabilidad del asentamiento del tridente en la disp. bancada.....	40
Ilustración 40. . Gráfica de variabilidad del asentamiento del tridente en la disp. estrella .....	40
Ilustración 41. Esquema de la propuesta de uso final .....	42
Ilustración 42. Almacenamiento fibra óptica .....	43

Ilustración 43: Diseño del carrete pequeño .....	43
Ilustración 44. Carrete pequeño .....	44
Ilustración 45. Carrete pequeño .....	44
Ilustración 46. Carrete de fibra grande .....	45
Ilustración 47. Diseño del patrón.....	46
Ilustración 48. Perspectiva del diseño del patrón.....	46
Ilustración 49. Esquema de la simulación de patrón .....	47
Ilustración 50. Simulación en solid Edge del patrón del perfil de 40x40 .....	47
Ilustración 51. Diseño de la plataforma final .....	48
Ilustración 52, Simulación en Solid Edge de la plataforma .....	49
Ilustración 53. Interferómetro láser [12] .....	50
Ilustración 54. Diferencia del sistema de verificación respecto al interferómetro .....	51
Ilustración 55. Gráfica de la repetibilidad en la colocación de un brazo telescopico del Brazo 2 en bancada .....	59
Ilustración 56. Gráfica de la repetibilidad en la colocación de un brazo telescopico del Brazo 2 en estrella.....	59
Ilustración 57. Grafica del ensayo de repetibilidad en la colocación de un brazo telescopico del Brazo 3 en bancada .....	60
Ilustración 58. Grafica de repetibilidad en la colocación de un brazo telescopico del Brazo 3 en estrella.....	60
Ilustración 59. Gráfica de repetibilidad de la colocación en el asiento cinemático en el Brazo 2 en bancada .....	61
Ilustración 60. Gráfica de repetibilidad de la colocación en el asiento cinemático en el Brazo 2 en estrella.....	61
Ilustración 61. Grafica de repetibilidad de la colocación en el asiento cinemático del Brazo 3 en bancada .....	62
Ilustración 62. Gráfica de Repetibilidad de la colocación en el asiento cinemático del Brazo 3 en estrella.....	62
Ilustración 63. Gráfica de repetibilidad de la colocación del tridente en la esfera de referencia del Brazo 2 en bancada .....	63
Ilustración 64 Gráfica de repetibilidad de la colocación del tridente en la esfera de referencia del Brazo 2 en estrella.....	63
Ilustración 65. Gráfica de repetibilidad de la colocación del tridente en la esfera de referencia del Brazo 3 en bancada .....	64
Ilustración 66. Gráfica de repetibilidad de la colocación del tridente en la esfera de referencia del Brazo 3 en estrella.....	64

## Índice de tablas

Tabla 1. Resultados de distintos reflectores .....	24
Tabla 2. Calidad de señal de los brazos inicialmente .....	24
Tabla 3. Variación de calidad de señal dependiendo de la disposición .....	24
Tabla 4. Resultados de calidad de señal con esfera .....	25
Tabla 5. Rangos de la medición sin manipulación.....	27
Tabla 6. Rango en medición con pérdida de señal sin cambio de pos.....	29
Tabla 7. Rango de la medición de pérdida de señal con cambio de pos. ....	31
Tabla 8. Rango de L .....	32
Tabla 9. Comparación de rangos entre disposiciones en el ensayo de repetibilidad en la colocación de un brazo telescópico .....	36
Tabla 10. Rangos de la medición de la colocación en asientos cin.....	39
Tabla 11. Rango de mediciones del asentamiento de tridente .....	41
Tabla 12. Resultados de las posiciones del brazo .....	48
Tabla 13. Parámetros de la comparación entre equipos .....	50
Tabla 14. Resultados del interferómetro vs disposición en bancada .....	51
Tabla 15.Resultados del interferómetro vs disposición en estrella .....	51
Tabla 16. Resultados de medición sin manipulación en absolutas.....	54
Tabla 17. Resultados de medición sin manipulación en relativas.....	54
Tabla 18. Resultados medición con pérdida de señal sin cambio de posición de medición en absolutas .....	55
Tabla 19. Resultados medición con pérdida de señal sin cambio de posición de medición en relativas .....	55
Tabla 20. . Resultados medición con pérdida de señal con cambio de posición de medición en absolutas .....	56
Tabla 21. Resultados medición con pérdida de señal con cambio de posición de medición en relativas .....	56
Tabla 22. Resultado de medición de L con una opción RP y mov manual .....	57
Tabla 23. Resultado de medición de L reseteo de la opción RP y mov manual.....	57
Tabla 24. Resultado de medición de L con una opción RP y mov esfera .....	58
Tabla 25. Resultado de medición de L reseteo de la opción RP y mov esfera .....	58

## 1. Introducción

### 1.1. Objeto

El objeto de este Trabajo de Fin de Master consiste en el análisis de la medición de distancias de un sistema telescopico de alta precisión. Para ver los principales factores que repercuten en la medida, se estudia tanto el software interno del sistema como sus componentes. También los utillajes de sujeción del sistema de medición, así como el entorno de trabajo.

Además, se realizan ensayos de repetibilidad para ver la estabilidad de los resultados con la interacción del sistema con el entorno de medición. Tras el análisis de los resultados de los ensayos, para que este sistema sea preciso y repetible, se ha desarrollado un procedimiento para la disminución de errores en la medición. También se diseñan utillajes que mejoran y facilitan el correcto funcionamiento del sistema y del procedimiento.

Con ello, se estudia la fiabilidad de su uso en verificación volumétrica de la máquina herramienta (MH).

### 1.2. Alcance

En este trabajo es fundamental la búsqueda de los elementos que produzcan errores en la medición de las distancias. Para ello se ha realizado ensayos de repetibilidad en diferentes configuraciones del sistema, tanto hardware como software, y en dos ambientes diferentes: un laboratorio de metrología y en una máquina herramienta, ubicada en el taller de mecanizado del Departamento de Ingeniería de Diseño y Fabricación. Con estos escenarios, lo que se quiere ver es la diferencia que hay entre un entorno controlado como es el laboratorio respecto a un entorno industrial como es la máquina herramienta.

La influencia de las variables que repercuten desfavorablemente en el proceso de medición ha hecho necesario la implementación de utillajes. Estos utillajes, diseñados en el software Solid Edge, permitirán al usuario del sistema una mayor comodidad en el desarrollo de las mediciones. Se ha partido del diseño del sistema de medición para realizar utillajes auxiliares necesarios para un mejor uso.

Los ensayos realizados han ayudado a conseguir un procedimiento que facilite al usuario final tener un equipo preciso. Para finalizar se ensaya comparando con otro sistema de interferometría láser para que ver si es posible realizar una verificación volumétrica de la máquina herramienta.

### 1.3. Estructura de la memoria

La estructura que seguirá la memoria es la siguiente:

- En el Capítulo 2 se explica que materiales son utilizados para poder realizar la verificación volumétrica.
- En el Capítulo 3 se realiza un análisis del procedimiento de funcionamiento de cuando empieza el trabajo. Con ese análisis, se hace la propuesta de los ensayos a hacer.
- El Capítulo 4 consta de los ensayos realizados en el laboratorio donde se comprueban la influencia de elementos propios o ajenos al sistema
- El Capítulo 5 alberga los ensayos realizados en máquina herramienta para ver el sistema en el ámbito real de utilización
- En el Capítulo 6 se plantea una propuesta de procedimiento para la utilización del sistema junto a unas mejoras
- En el Capítulo 7 se hace una comparación del sistema de verificación con un equipo de interferometría láser comercial.
- Por último, en el Capítulo 8 se exponen las conclusiones finales a las que se han llegado en este proyecto y posibles vías de desarrollo futuras.

## 2. Material utilizado

En este capítulo se va a ir explicando los instrumentos que se han utilizado tanto en los ensayos como el necesario para un uso real del sistema de medición. El material que se ha descrito es el siguiente:

- Sistema de medición: Se profundizará de los elementos que lo componen y del funcionamiento del software que tiene.
- Asientos cinemáticos: Elemento de apoyo para el sistema de medición que permite un punto fijo.
- Calibrador: Instrumento utilizado para tener una referencia repetible
- Utilajes auxiliares de sujeción: Utilajes que aseguran una correcta función de los asientos cinemáticos impidiendo su movimiento.

### 2.1. Sistema de medición

El sistema de medición del que se va a realizar el análisis fue ideado y creado en la Universidad de Zaragoza en el departamento de Diseño y Fabricación de la Escuela de Ingeniería y Arquitectura. [1] [2]

El sistema consta, principalmente, de tres brazos telescopicos de fibra de carbono y de sus tres interferómetros láser.



*Ilustración 1. Brazo telescopico*

Cada brazo está formado por 6 cilindros de fibra de carbono lo que hace que el brazo se pueda estirar hasta 1m de longitud. Una limitación es que su longitud mínima al recogerse es de 0,4m.

El tridente permite acoplarse a esferas, ya que tiene un imán en cada dedo del tridente. El acoplamiento de una esfera en el tridente es importante ya que lo que pretende el equipo es poder medir la distancia entre esferas, la del tridente y la del cabezal. Esto se debe a que es más fácil posicionar el centro de una esfera que medir un punto por sí.



Ilustración 2. Tridente del brazo

Por otro lado, el cabezal permite colocación en los diferentes asientos gracias a la esfera. También permite que se puedan medir entre si los brazos.

En cada brazo, va alojado en el interior del cabezal un colimador láser mientras que, en el otro extremo, el del tridente, está colocado un reflector. El colimador debe estar alineado con el reflector para que se pueda hacer la interferometría y el sistema mida distancia entre centros de esfera.

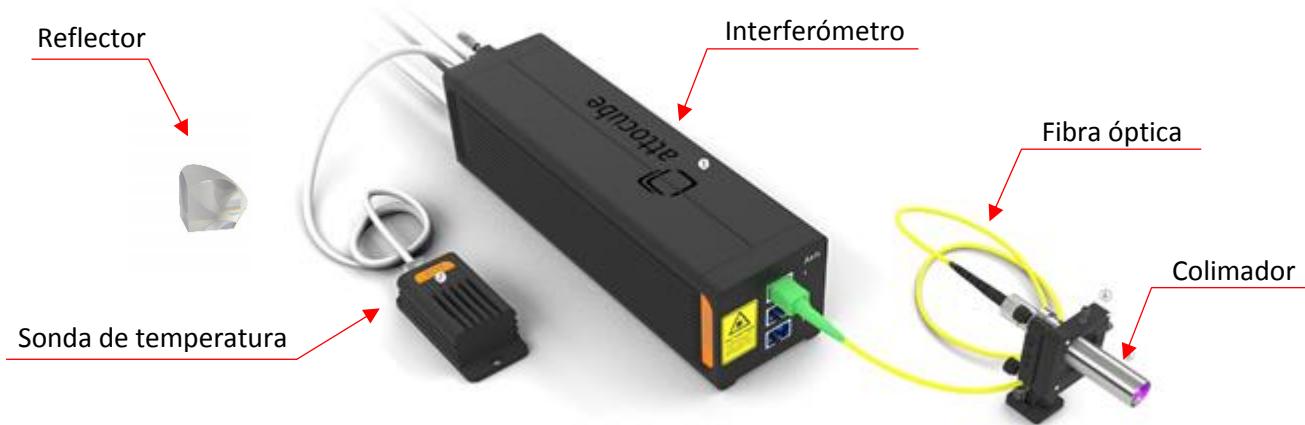


Ilustración 3. Interferómetro con los equipos conectados [3]

El colimador que está en el brazo está conectado, mediante fibra óptica, al interferómetro, como se puede apreciar en la Ilustración 3. Conectado al interferómetro también está una sonda de temperatura que permite calcular los coeficientes de dilatación del brazo.

Para conectar los tres interferómetros al ordenador, es necesario conectar los tres equipos desde el interferómetro a un switch de puertos para que mediante un solo cable de ethernet conectar el sistema al ordenador.



Ilustración 4. Switch genérico [4]

### 2.1.1. Funcionamiento del software

Los interferómetros son de los modelos **IDS3010 de attocube** [5]. Este apartado se procede a explicar su funcionamiento, configuración y diferentes modos de medición.

#### 2.1.1.1. Calidad de señal

Tras la conexión de los interferómetros al ordenador, hay que ver si los equipos tienen alineados el colimador y el reflector ya que es esto lo que permite que se puedan medir las distancias.

Dentro del menú del interferómetro, existe un apartado de alineamiento del láser. En él se aprecia unas barras que indica la calidad de señal, en tanto por mil, que vuelve al colimador. Dependiendo del rango donde se mueva la calidad de señal se puede saber varias cosas:

- Calidad 0% : El equipo no está encendido.
- Calidad 9-190% : El equipo esta encendido, pero no está bien alineado y la señal no es la correcta para poder medir. El software no te deja seguir con los siguientes pasos.
- Calidad 190-1000% : El equipo esta encendido y alineado. Conforme más calidad señal mejor ya que eso permitirá que mediante el movimiento del brazo sea más difícil perder la señal por debajo de 190.

Cuando un equipo con la calidad correcta para medir de repente pierde calidad de señal, ya sea por un movimiento brusco, por rotura o excesivo rizo de la fibra óptica, se debe reiniciar el equipo. Dependiendo del modo de medición se hará de una manera o de otra.

### 2.1.1.2. Modos de medida

Existen 4 modos de medición con el interferómetro: HSSL, AquadB, SinCos y Linear. Cada uno de los modos tiene dos subcategorías: LVTTL y LVDS.

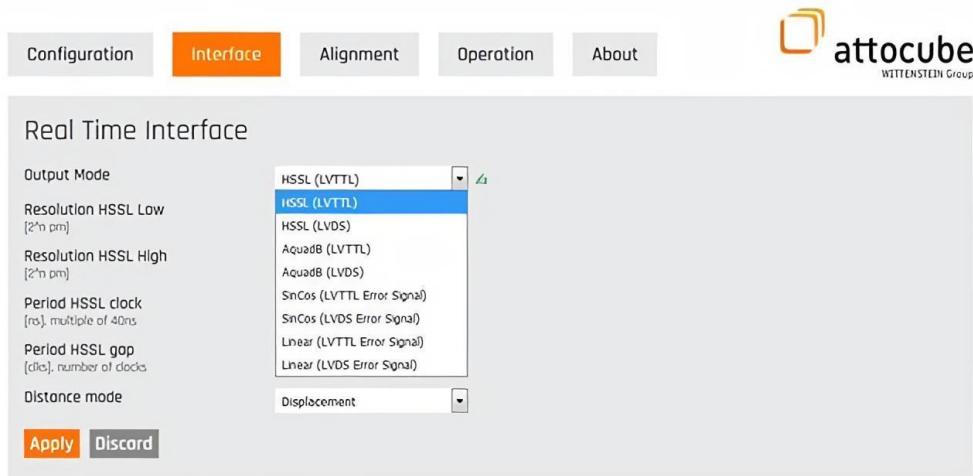


Ilustración 5. Menú de los modos de medida del sistema [6]

Estas subcategorías se refieren al método de comunicación de los datos binarios del interferómetro. "LVTTL" significa "Lógica de Transistor-Transistor de Bajo Voltaje". Por otro lado, "LVDS" significa "Señalización diferencial de bajo voltaje" y es una descripción bastante precisa de la forma en que transmite información. Esta es también la principal diferencia entre LVDS y LVTTL. LVDS utiliza dos cables con la diferencia de voltaje entre los dos determinando si es un "0" o un "1". En contraste, LVTTL usa la presencia o ausencia de un voltaje con respecto a tierra para indicar un "1" y un "0" respectivamente.

#### Modos de medición:

- **HSSL:** En el modo HSSL (Enlace en serie de alta velocidad), el valor absoluto de desplazamiento actual se transfiere periódicamente utilizando un formato de serie binario basado en una resolución de 1 pm. El protocolo HSSL se define por su resolución, tiempo de reloj e intervalo. El tiempo de reloj representa la velocidad de salida de bits y la resolución define la configuración de bits binarios, que proporciona la información de posición.

Permite especificar el bit más bajo de 48 bits. Por tanto, la resolución de la posición viene dada por Resolución =  $2^{\text{Resolución HSSL baja}} * 1 \text{ pm}$ . El valor más bajo es 0. La resolución HSSL alta especifica el bit más alto que se utilizará del valor de distancia de 48 bits. El valor más alto es 47. Por lo tanto, el tamaño de la palabra HSSL viene dado por Tamaño de palabra = resolución HSSL alta - resolución HSSL baja +1

El reloj define el período de tiempo en el que se emiten los bits de la palabra en serie (inverso de la tasa de bits). El reloj es programable en múltiplos enteros de nanosegundos de 40 ns.

El gap de HSSL son los períodos de reloj HSSL que se omiten y especifica el espacio entre el final de una palabra HSSL y el comienzo de la palabra HSSL subsiguiente.

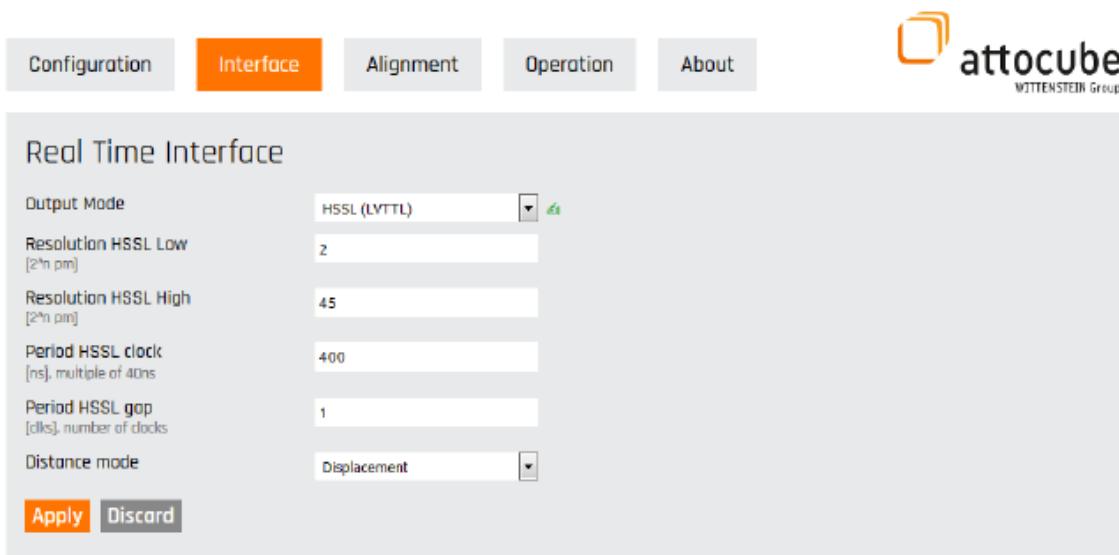


Ilustración 6: Parámetros del modo HSSL [5]

- **AquadB:** A diferencia de HSSL, el protocolo AquadB es un protocolo incremental que solo transfiere información sobre el cambio de la posición medida. Con este método, se pueden lograr anchos de banda más altos en comparación con HSSL. Sin embargo, el usuario debe seguir leyendo continuamente la posición, ya que no hay información sobre el valor absoluto de la posición actual.

La resolución define la resolución de posición de la interfaz en tiempo real. La resolución de la interfaz AquadB es ajustable por el usuario y varía de 1 pm a 64,93 nm.

El reloj define el período mínimo en el que se puede emitir el incremento de la señal en cuadratura. El ajuste de reloj más rápido posible es 40 ns (25 MHz). El ajuste más lento es 1298 ms (770 Hz). El reloj es programable en múltiplos enteros de 40 ns.

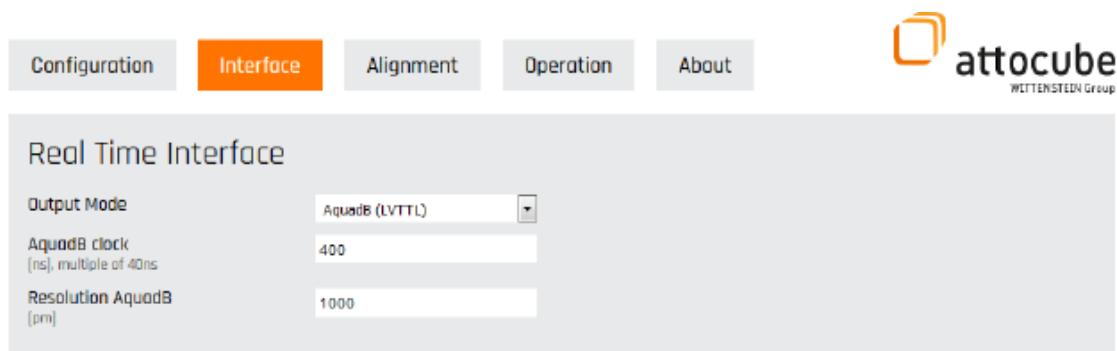


Ilustración 7. Parámetros de AquadB [5]

- **Sin-Cos:** Utiliza dos señales analógicas en cuadratura. Cada incremento / decremento de canal representa un cambio de señal de un valor de Resolución. Un cambio de posición del tamaño de Resolución da como resultado un incremento o decremento de las señales A y B, dependiendo de la dirección del cambio. Esto permite la determinación de la dirección de la señal y el valor con una unidad de paso de Resolución. En este

modo, solo se puede mostrar un cambio en la distancia mediante un par de señales analógicas en cuadratura.

- Linear: El modo de salida analógica lineal devuelve un nivel de voltaje, que es proporcional al desplazamiento relativo realizado. Esta salida analógica lineal es una función IDS opcional a pedido, que se puede activar con un archivo de licencia attocube. En general, esta salida proporciona dos funciones diferentes, "Desplazamiento" y "Vibrometría". Por un lado, el desplazamiento está representado directamente por el voltaje dado, por otro lado, el filtrado de paso alto se puede aplicar adicionalmente al desplazamiento para excluir perturbaciones poco frecuentes. El ancho de banda máximo de la señal es de 10 MHz, por lo que se pueden realizar análisis de frecuencia de forma regular hasta 5 MHz, con respecto al teorema de Nyquist.

Por tanto, al estar utilizando un ordenador y no es viable una salida analógica para el interferómetro, se utilizarán los modos HSSL y el AquadB. En diversos ensayos se comprobará cual es mejor para la verificación volumétrica ya que tiene la diferencia de que un modo mide el desplazamiento absoluto y el otro el desplazamiento relativo.

#### 2.1.1.3. Inicialización de parámetros

Cuando se encienden los interferómetros del sistema, se tiene que hacer una inicialización de los parámetros internos para empezar la medición. Este proceso se llama *Start Measurement Calibration* (SMC). El tiempo estimado es de unos 2 minutos. Este proceso solo es posible si existe una correcta alineación del equipo por lo que es recomendable comprobarla antes.

Una vez ya han transcurrido los dos minutos del SMC, el interferómetro ya está listo para poder medir.

Cuando se produce un error en el interferómetro se recomienda detener la medición y reiniciar una nueva medición. Si el modo de medida se produce en medición absoluta, hay que volver a inicializar el equipo.

En cambio, si se está midiendo en coordenadas relativas es posible reiniciar el equipo mediante otro protocolo. Este método, llamado **reset error**, tarda unos pocos segundos, pero tras ello se necesita tomar otra vez la posición de referencia, normalmente dada por un calibrador, y tomar esa medición. Este proceso se llama **reset position** (RP). En la Ilustración 8, se puede apreciar cómo se resetea la posición de referencia del brazo, donde la referencia dada por el calibrador es conocida para poder saber si el equipo lo está tomando bien el dato.

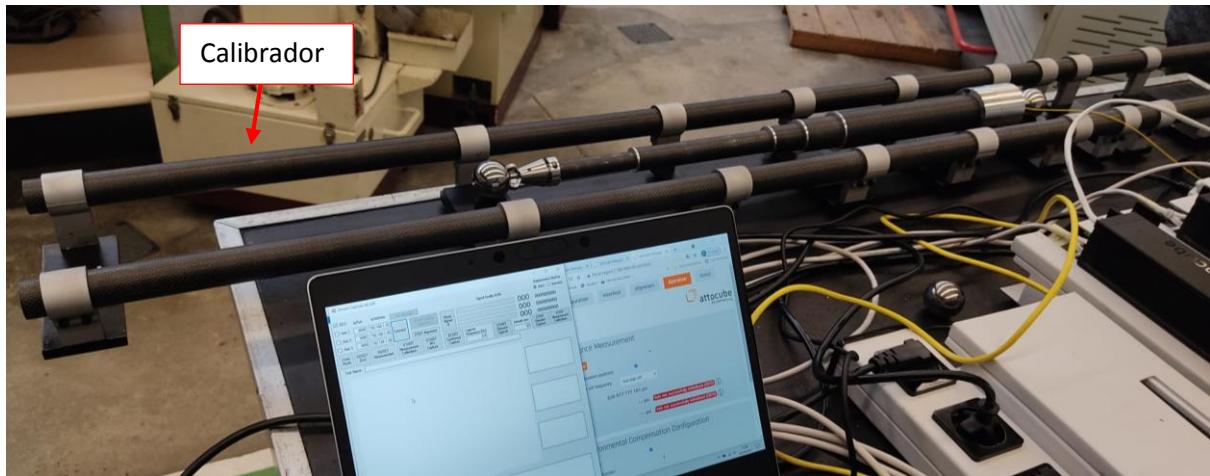


Ilustración 8: Proceso de la función RP

Estas son variables que se estudian y desarrollan en los ensayos para comprobar su funcionamiento y saber cuál es más útil a la hora de desarrollar la verificación.

## 2.2. Calibrador

Como se acaba de ver en el apartado anterior, es necesario para tener una referencia o referencias para saber que los brazos telescopicos están tomando realmente la medida correcta. El calibrador utilizado es el que se observa en la Ilustración 8, que fue diseñado en un Trabajo de Fin de Grado [7], y que permite tener varias referencias para el rango de trabajo de los brazos.

## 2.3. Asientos cinemáticos

Para que los brazos puedan medir la distancia relativa entre el cabezal y la mesa de la máquina herramienta, cada cabezal de los brazos está apoyado en un asiento cinemático que permite el giro del brazo, pero no su desplazamiento. Esto hace que al estirar el brazo ejerciendo fuerza en el tridente se puedan acoplar o desacoplar los cilindros del brazo mientras queda fijo en la base.

Los asientos cinemáticos tienen en su interior un imán de gran magnetismo para que sea articulado su movimiento pero que no permita su desplazamiento ya que esto provocaría grandes errores en la medida. Por eso, se han ido utilizando diferentes tipos de imanes, cada vez más potentes.

También provocaría errores el hecho que al situar el cabezal cada vez que se procede a medir el cabezal se situara en posiciones diferentes cada vez. Por ello, se utilizan sistemas centradores para que el cabezal siempre tenga la misma referencia.

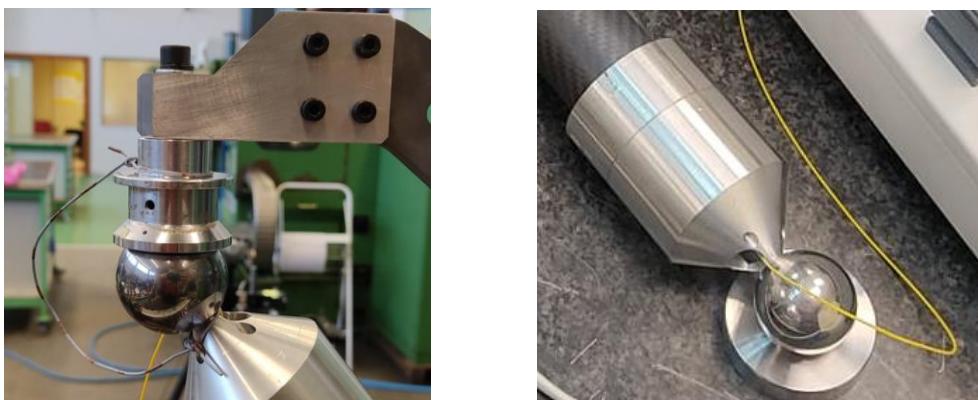


Ilustración 9. Conjunto de diversos asientos cinematicos

Se pueden colocar tanto en la mesa como en cabezal de la máquina. La colocación en estas dos disposiciones viene ayudada por diferentes utillajes ya diseñados anteriormente [8] y este trabajo permite vislumbrar qué cual puede llegar a ser más precisa. Para anclar estos dispositivos se atornilla en la bancada o el dispositivo del cabezal, que llamaremos estrella.

#### 2.4. Utilajes auxiliares de sujeción

Tanto para los ensayos como para la verificación, es imprescindible anclar los asientos cinemáticos para tener puntos de referencia fijos. Por ejemplo, se han utilizado mordazas para la sujeción en el laboratorio como se ve en la Ilustración 10. También sería un elemento de sujeción las esferas utilizadas como apoyos para los tridentes.



Ilustración 10. Sujeción en ensayos de laboratorio

Para sujetar los asientos en la bancada se atornillan pasando una tuerca T por las ranuras de la mesa como se puede observar en la Ilustración 11.

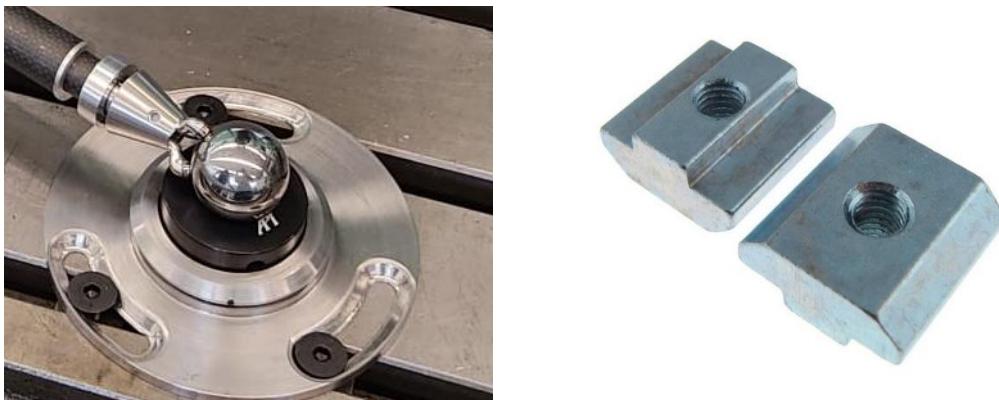


Ilustración 11. Sujeción en la bancada de la máquina herramienta [8]

Para tener más distancia entre los asientos cinemáticos en el momento de la colocación en la bancada también se utiliza un perfil de aluminio de 60x10, que se sujeta a la bancada. Esto permite un mayor rango de verificación en la zona de trabajo de la MH.



Ilustración 12. Perfil de aluminio

Otro elemento que forma parte de sujeción de los asientos cinemáticos a la hora de situarlos en la máquina herramienta es la estrella. Este utilaje permite a tener los asientos cinemáticos en la parte del cabezal de la máquina y así poder a comparar diferentes configuraciones para la verificación volumétrica. Sale representada en la Ilustración 123.



Ilustración 13. Utilaje para mh "estrella" [10]

Además de los asientos, se debe anclar el punto, en este caso esfera, de referencia que medirán los equipos. Para ello se utiliza una esfera con un agujero roscado que permite la colocación de una varilla como se ve en la Ilustración 14.



Ilustración 14. Sujeción esfera en estrella (izquierda) y bancada (derecha)

### 3. Análisis del procedimiento de funcionamiento

Una vez explicadas las características del sistema de medición y el material que se utiliza, se procede a explicar que datos se quieren recolectar en la verificación y tras ello, el procedimiento de funcionamiento de medición en MH para aclarar que variables surgen una vez llevado el sistema a la realidad.

#### 3.1. Datos necesarios

Para poder realizar la medición volumétrica de la máquina herramienta, lo que se busca es obtener una nube de puntos del espacio de trabajo de la MH para poder comparar con las coordenadas que tiene la máquina. Por tanto, para que los tres brazos telescópicos midan un punto en el espacio, es necesario que los tres brazos midan un punto común desde tres posiciones fijas diferentes ya que eso permite poder triangular geométricamente el punto medido.

#### 3.2. Procedimiento inicial de funcionamiento

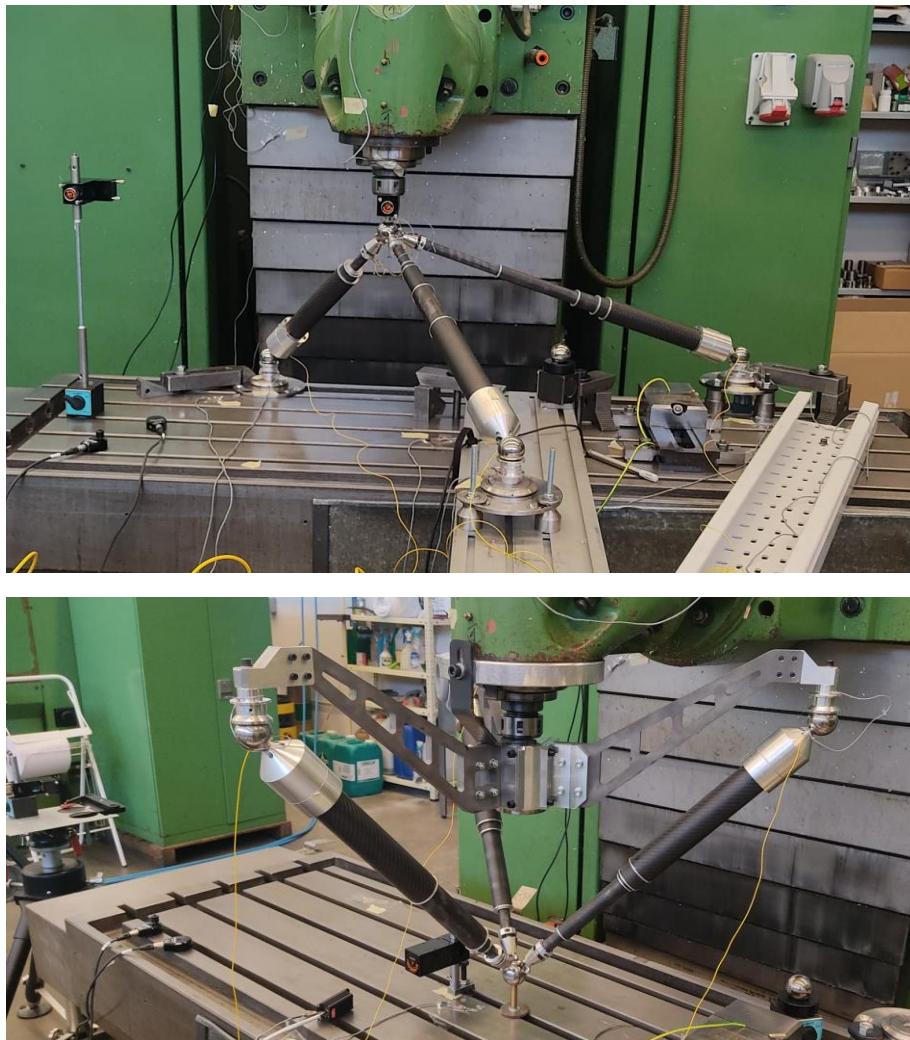
Lo primero es inicializar todos los brazos y dependiendo de qué modo de medición tengan se tendrán que llevar al calibrador para poner el 0 con la referencia y obtener un offset (medición en relativas) o simplemente saltarse este paso (medidas en absolutas).

El segundo paso es medir la distancia entre las posiciones, que debe ser menos de un metro entre ellas ya que eso permite poder medir la distancia entre las bases con los brazos. Es muy importante tener buena precisión en la obtención de las distancias entre las bases fijas ya que este es un error grave que se puede arrastrar. Se puede ver en la Ilustración 15 como se miden las bases en la dos tipos de disposiciones: bancada y estrella



Ilustración 15. Medición de distancia entre bases. Disposición en bancada (Arriba).  
Disposición en estrella (Abajo)

Tras la medición entre posiciones de los brazos ya se procede a medir el punto común. Para medirlo se colocan los tridentes en una misma esfera. Esta esfera puede estar colocada en el cabezal o en la bancada depende de la distribución como se ve en la Ilustración 16.



*Ilustración 16. Distribución en bancada (arriba) y distribución en estrella (abajo)*

Una vez colocados, ya se puede iniciar la medición y mover la MH para poder recolectar distintos puntos del espacio de trabajo.

También hay que procesar los datos recogidos para poder sacar el punto a través de las tres distancias de los brazos y de los puntos fijos de las bases.

### 3.3. Propuesta de ensayos

Como se han explicado en los apartados anteriores, este sistema de medición es complejo y con multitud de variables a controlar: interferómetros, cables, modos de medida, colimador, reflector, asientos, etc...

Por ello, se ha ido haciendo ensayos con los equipos para saber la repercusión que tienen las diferentes variables dentro de las mediciones. Estos ensayos han ido evolucionando de lo primigenio, que es alineamiento de láser dentro del brazo, hasta el funcionamiento en una situación real en la máquina-herramienta.

En esta evolución se han ido repasando la fluctuación que hay en la repetibilidad de la medida del equipo, así como los errores que ha ido acumulando los equipos. Viendo los resultados de los ensayos, se ha realizado un procedimiento estándar para la utilización del sistema de medición en un ámbito real para el usuario final. Además, al saber las fuentes de los posibles errores, se ha implementado una serie de mejoras posibles en los equipamientos para perfeccionar y facilitar el uso.

Cabe destacar que los problemas en la realización de los ensayos también se han podido conclusiones para poder desarrollar otros ensayos o para poder encontrar mejoras que implantar.

Los ensayos se han organizado de la siguiente manera:

- **Ensayos en el laboratorio:** Ensayos que se hacen en un entorno controlado para ver el funcionamiento de los brazos. Solamente se ensayarán un solo brazo para extraer su funcionamiento a los demás. Estos ensayos son los siguientes:
  - **Ensayos de reflector:** Se estudia cómo afecta en la calidad de señal los diferentes tipos de reflectores y sus posibles alternativas.
  - **Ensayos para evaluar los modos de medida:** Comprobación de qué modo de medida es mejor para la repetibilidad de las mediciones. Además, se prueba como afecta la perdida de señal y el reseteo del equipo en las dos situaciones.
  - **Ensayos de comportamiento ante el movimiento:** Se ensaya como la toma de datos entre varias posiciones mediante la manipulación manual del brazo puede repercutir en los resultados. Se verifica como afecta las calibraciones a la hora de la repetibilidad.
- **Ensayos en máquina-herramienta:** En un ámbito real, se ensaya los elementos y las situaciones que puede causar errores a la hora de tomar las dimensiones.
- **Comparación entre equipos:** Se compara los resultados de la verificación de una línea entre el sistema de medición y un interferómetro láser

## 4. Ensayos en el laboratorio

En esta colección de ensayos se realiza íntegramente en el laboratorio de metrología para comprobar como caracteriza diversos elementos del brazo la medición. Este es un lugar con temperatura y ambiente controlado, esto conlleva que sean ensayos donde la variable del entorno no afecta.

Este capítulo desarrolla el funcionamiento necesario para que el sistema mida que es que el haz láser deba salir del colimador, refleje en el retrorreflector y vuelva la señal al colimador. Tras ello, se irán ensayando otros aspectos del sistema como son los modos de medida, la respuesta ante el error y el movimiento.

### 4.1. Ensayos de reflector

Los primeros ensayos que se realizaron fueron el estudio de los reflectores, parte primordial para que se pueda llegar a recibir de vuelta la señal láser del colimador. Se ensayaron diferentes reflectores iguales y de distintos materiales para comprobar sus propiedades.

El experimento consistió en enfrentar el colimador y el reflector a una distancia muy cercana para ver qué calidad de señal era capaz el sistema de recibir. Así se sabrá cual el punto máximo que se podría alcanzar en cada equipo. Es una comprobación para ver la viabilidad que tendrían los reflectores una vez instalados en el brazo ya que dentro del brazo habrá una calidad menor al estar a una distancia superior.

El utilaje utilizado para el ensayo es el siguiente:

- Una mordaza: Para sujetar el reflector en una posición fija
- Una sujeción para el colimador: Esto permite una posición perpendicular al colimador. Además, tiene unos tornillos que permiten al colimador mover en decimas de milímetro para poder centrar el haz láser.
- Casquillo para el reflector: Permite la sujeción del reflector con la mordaza sin que el reflector quede dañado o rayado
- Junta tórica: Permite un ajuste entre el reflector y el casquillo para su centrado.

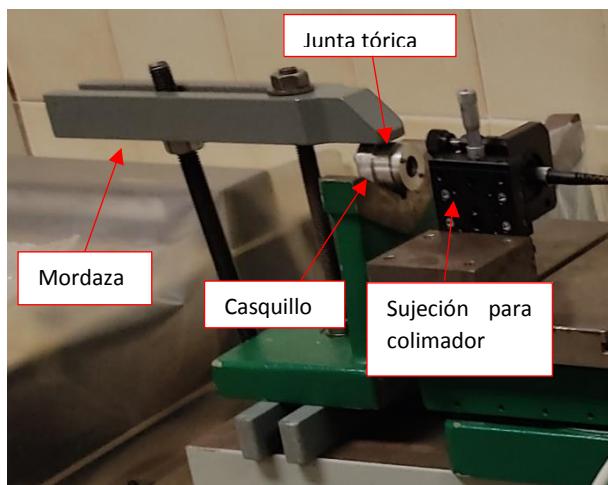


Ilustración 17. Utillaje para el ensayo de reflectores

En una primera serie de experimentos, se va a utilizar el interferómetro 1 con diferentes reflectores: un reflector de cristal usado (C1), dos reflectores de cristal nuevos (C2 y C3), un reflector con recubrimiento de plata usado (P1) y un reflector con recubrimiento de plata nuevo (P2). El montaje es el de la Ilustración 17, ajustando para que la calidad sea máxima. También se hace diferenciación entre las juntas tóricas para saber si existe influencia en la calidad de la señal.

Los resultados fueron los siguientes:

	Interferómetro	Reflector	Montaje	Disposición	Junta tórica	Calidad (%)
1	1	C1	Utilaje	Ajustado	Pequeña	340-350
2	1	P2	Utilaje	Ajustado	Grande	620-640
3	1	C1	Utilaje	Ajustado	Grande	340
4	1	C3	Utilaje	Ajustado	Grande	430
5	1	P1	Utilaje	Ajustado	Grande	430-450
6	1	C2	Utilaje	Ajustado	Grande	430

Leyenda: C1: Cristal C2: Cristal 2 C3: Cristal 3 P1: Plata 1 P2: Plata 2

Tabla 1. Resultados de distintos reflectores

Se ve que el mejor reflector es el P2, que da de 620 a 640%. Este reflector de plata fue extraído de otro prototipo de sistema de medición, pero era bastante nuevo. Esa es la diferencia entre los dos reflectores de plata ya que P1 era más viejo y había perdido sus propiedades ópticas.

Con las conclusiones sobre la Tabla 1, se procede a ver cuál de los reflectores de los brazos funciona peor para poder mejorar el equipo. Con los registros que había de experimentos anteriores a este trabajo, que se reflejan en la Tabla 2, se estudia que reflector cambiar .

	Interferómetro	Reflector	Montaje	Disposición	Junta tórica	Calidad (%)
1	1	F1	Fibra 1	Registro	Fibra 1	280-300
2	2	F2	Fibra 2	Registro	Fibra 2	340
3	3	F3	Fibra 3	Registro	Fibra 3	450

Leyenda: F1: Refl. Cristal F2: Refl. Cristal F3: Refl. Plata

Tabla 2. Calidad de señal de los brazos inicialmente

Como se aprecia en la Tabla 2, es el equipo 1 el que peor calidad de señal da. Por lo que se cambia su reflector por el reflector que mejor calidad había dado en los experimentos (Tabla 1).

Una vez colocado el reflector en el equipo 1, se prueba cual es la disposición del brazo óptima para alinear el colimador con el reflector. Colocando el brazo en tres posiciones se obtienen los siguientes resultados:

	Interferómetro	Reflector	Montaje	Disposición	Junta tórica	Calidad (%)
1	1	P2	Fibra 1	Ajustado estirado	Fibra 1	530
2				Ajustado corto		400
3				Montado		460

Tabla 3. Variación de calidad de señal dependiendo de la disposición

Se observa en Tabla 3 que la mejor disposición para la alineación es con el brazo completamente estirado. Así se sabrá, si algún equipo se desalinea por culpa de un golpe o mala utilización o si se deteriora el reflector, cual es la mejor colocación del brazo.

Otro ensayo que se hizo fue el estudio de si era posible la sustitución del retroreflector por el reflejo de una esfera pulida. El montaje fue el de la Ilustración 18.

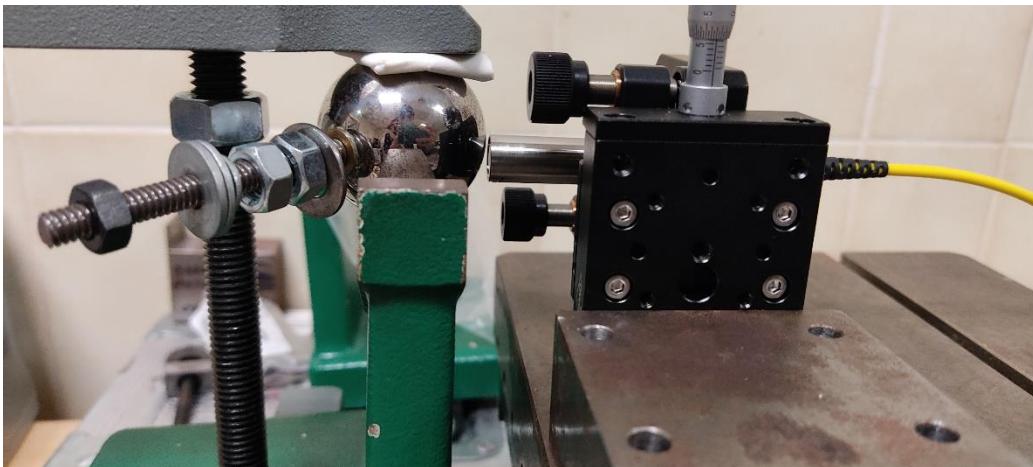


Ilustración 18. Utilaje para medición de calidad con esfera

Los resultados esclarecieron que no era posible esa posible sustitución ya que esos 30%, que se ven en la Tabla 4, es como si no llegara señal al colimador.

	Interferómetro	Reflector	Montaje	Disposición	Junta tórica	Calidad (%)
1	3	Bola 1	Utilaje	Ajustado	-	30
2	3	Bola 2	Utilaje	Ajustado	-	30

Tabla 4. Resultados de calidad de señal con esfera

#### 4.2. Ensayos para evaluar los modos de medida

En este ensayo, se acondiciono una mesa de metrología con diferentes utilajes para anclar los asientos cinemáticos en dos posiciones: una posición fija (POS FIJA) y la posición de referencia(REF).



Ilustración 19. Colocación del brazo en el ensayo para evaluar los modos de medida

El fin de estos ensayos es ver las diferencias entre los ensayos realizados con el equipo en medición en distancias absolutas y en relativas. Se comprueba en varias circunstancias:

- Medición sin manipulación.
- Medición con pérdida de señal sin cambio de posición.
- Medición con pérdida de señal y cambio de posición.

La condición de perdida de señal se debe a que es un error muy grande ya que el equipo pierde la referencia de la medida cuando esto pasa. Por lo que importante ver como se acotan este tipo de errores en referencia a la medición.

Todos los datos recolectados se pueden ver en el Anexo I. En este apartado se centrará en los datos más significativos.

#### 4.2.1. Medición sin manipulación

En primer lugar, para ver la comparativa entre el SMC de la medición en absolutas y función RP de las relativas se hace este experimento. El procedimiento del ensayo consiste en tomar 10 datos de una posición fija entre dos esferas mediante una captura de discreta que hace la media de 20 puntos en cada captura. Cada vez que se coge la medición se realiza el SMC, en el caso de la medición en absolutas, o la opción RP, en el caso de las relativas. Para que los resultados puedan compararse entre modos de medición, las medidas absolutas se representan con la desviación respecto a la media. Los resultados se pueden ver en la Ilustración 20.

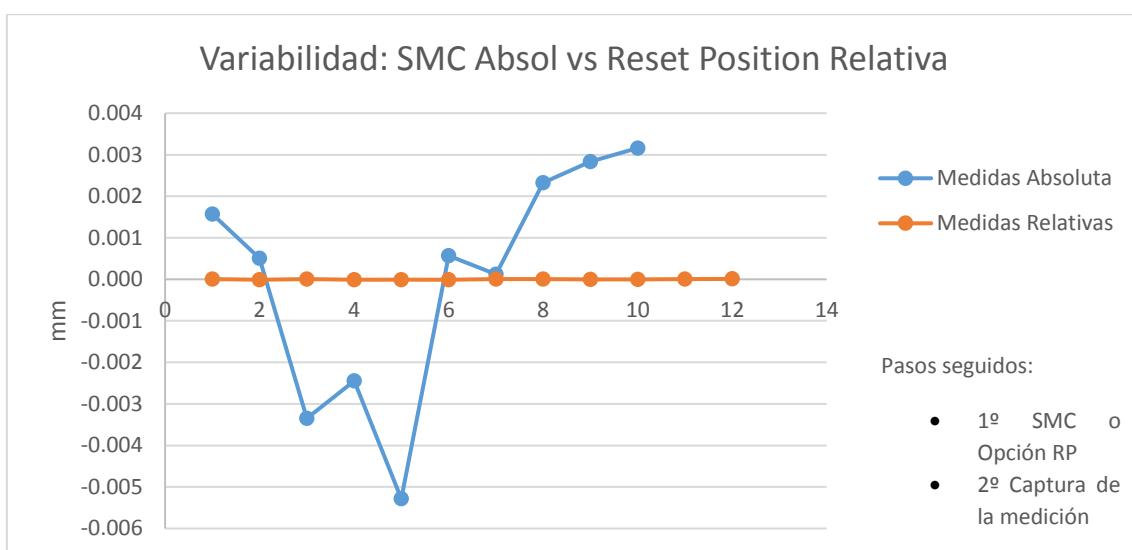


Ilustración 20. Resultados de la variabilidad de la medición sin manipulación

Comparando los dos ensayos con sus repeticiones se puede apreciar una diferencia considerable en la gráfica entre el SMC y la función RP que permite la medición en distancia relativa. Esto es debido a la inicialización de todos los parámetros que cada vez que se hace el interferómetro toma una referencia diferente. La opción RP permite que repetir prácticamente la misma referencia. Además, el SMC tiene un tiempo de 2 min mientras que la opción RP unos pocos segundos, por lo que es mucho más rápido a la hora de trabajar.

Para ver que ningún parámetro, interno o externo, ha influido en las mediciones se han tomado los datos de la temperatura y de la calidad de señal se ha graficado en la Ilustración 21 para que se pueda ver que son datos homogéneos.

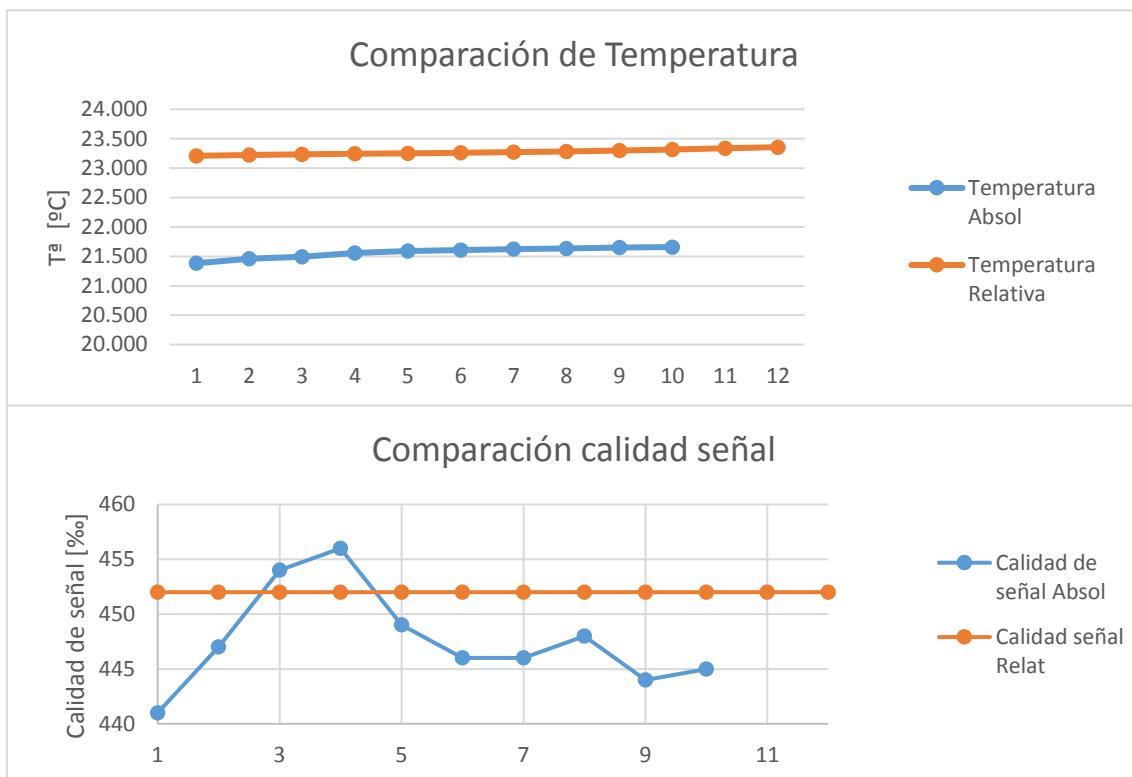


Ilustración 21. Temperatura y calidad de señal de medición sin manipulación

La temperatura es estable y diferente debido al ensayo en el laboratorio. Mientras que la calidad de señal cambia tanto al medir en absolutas debido al reinicio del equipo y en al medir en relativas se mantiene constante al mantener la configuración.

Para concluir este ensayo, en la Tabla 5 se pueden ver los rangos entre las variables que se acaban de hablar.

	Rango de medición [ $\mu\text{m}$ ]	Rango de calidad de señal [%]	Rango de temperatura [°C]
Medida Absoluta	8.40	15	0.27
Medida Relativa	0.01	0	0.14

Tabla 5. Rangos de la medición sin manipulación

#### 4.2.2. Medición con pérdida de señal sin cambio de posición

Para ver cómo influye la perdida de señal en la toma posterior de los datos, se realiza este ensayo donde se toman datos antes y después del error. Para causar ese error el movimiento del brazo es mínimo, simplemente para desalinear el colimador del reflector, sin levantarla de las dos bases.

El procedimiento consiste en realizar 10 ciclos de toma de datos en lo que se quiere ver cómo cambia las medidas tras realizar un reset del error por la pérdida de la señal del láser. Al principio de cada ciclo se hace el SMC en las medidas absolutas y opción RP en las medidas relativas y se captura las medidas (Medidas pre reset). Después, sin mover el brazo de posición (rotando el brazo, cambiando la disposición de los tubos, haciendo fuerza, ...), se hace perder la señal. Para finalizar el ciclo, se coloca en la posición original, se hace el resetea el error y se captura (Medidas post reset).

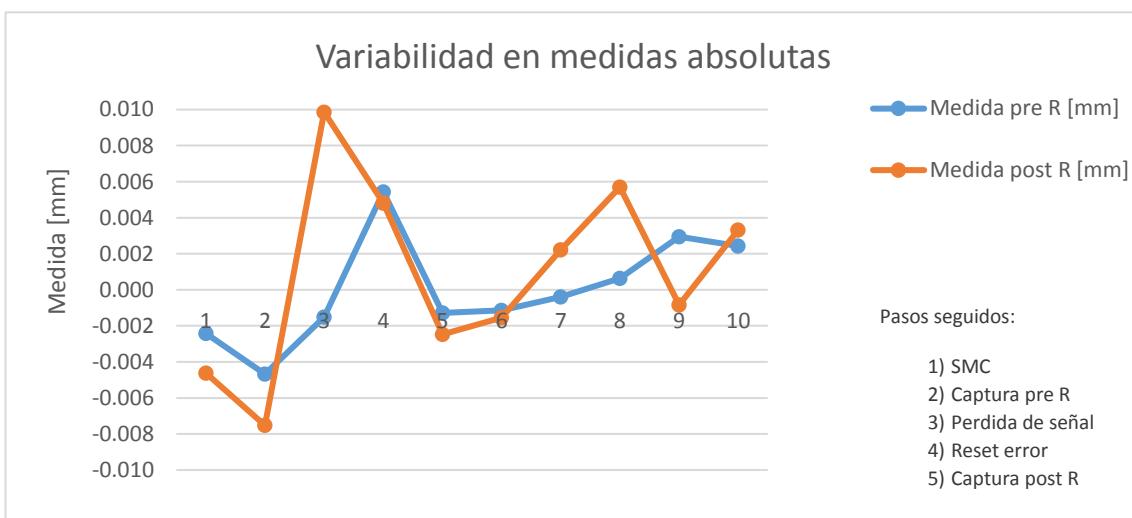


Ilustración 22. Gráfica en medidas absolutas del ensayo de perdida de señal sin cambio de pos

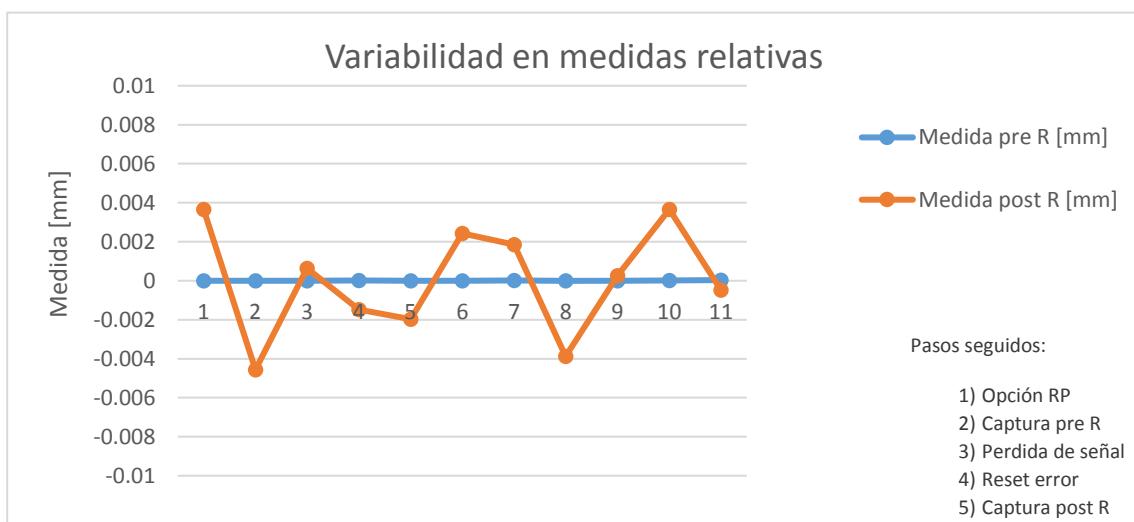


Ilustración 23. . Gráfica en medidas relativas del ensayo de perdida de señal sin cambio de pos.

El fin de este experimento era saber cómo los métodos de medida se comportaban ante el corte de la señal de interferómetro y como repercutía en la medición. Este corte de la señal producirá un error que si se resetea alterará la distancia medida

Como se vio en el ensayo anterior, la repetibilidad de la opción SMC es mucho peor que la repetibilidad de la opción RP. En este caso pasa lo mismo si se compara la Ilustración 232 y la Ilustración 243. Esto constata y reafirma que las medidas relativas dan resultados más repetibles como se ve en la Tabla 6.

	Rango Medidas Pre Error [μm]	Rango de medidas Post Error [μm]
Medidas absolutas	10.11	17.38
Medidas relativas	0.04	8.22

Tabla 6. Rango en medición con pérdida de señal sin cambio de pos

Frente al cambio de las Medidas Pre Error y Post Error, la comparación entre métodos da que ambos rangos presentan un incremento del rango muy similar. Lo único que lo diferencia es que la medición absoluta arrastra consigo la diferencia de los diferentes SMC.

Las temperaturas y la calidad de señal muestran poca variabilidad por eso no se grafican. Para acceder a estos datos se pueden ver en el Anexo I.

#### 4.2.3. Medición con pérdida de señal y cambio de posición

Este ensayo es una variante del anterior, pero en este caso el brazo se mueve de la referencia para causar el error y se devuelve a la posición original. El fin de este ensayo es ver la diferencia que hay al causar la perdida de medición fuera de la posición de referencia.

El procedimiento consiste en realizar 10 ciclos de toma de datos en lo que se quiere ver cómo cambia las medidas tras realizar un reset por la pérdida de la señal del láser. Al principio de cada ciclo se hace el SMC en medidas absolutas o la opción RP en medidas relativas y se captura las medidas (Medidas pre reset). Después, moviendo el brazo y poniéndolo en máxima extensión, se hace perder la señal. Para finalizar el ciclo, se coloca en la posición original, se hace el reset error y se captura (Medidas post reset).

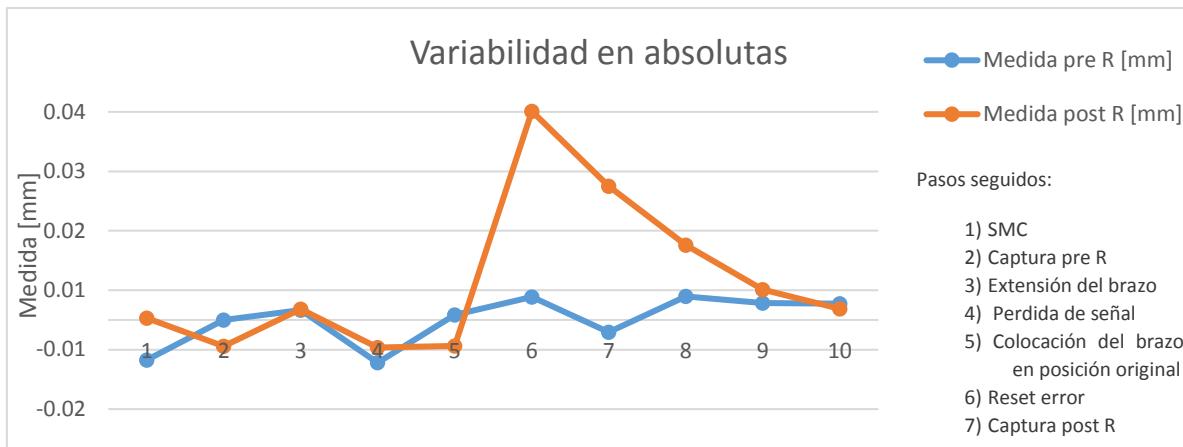


Ilustración 24. Gráfica de medición en absolutas de perdida de señal con cambio de pos.

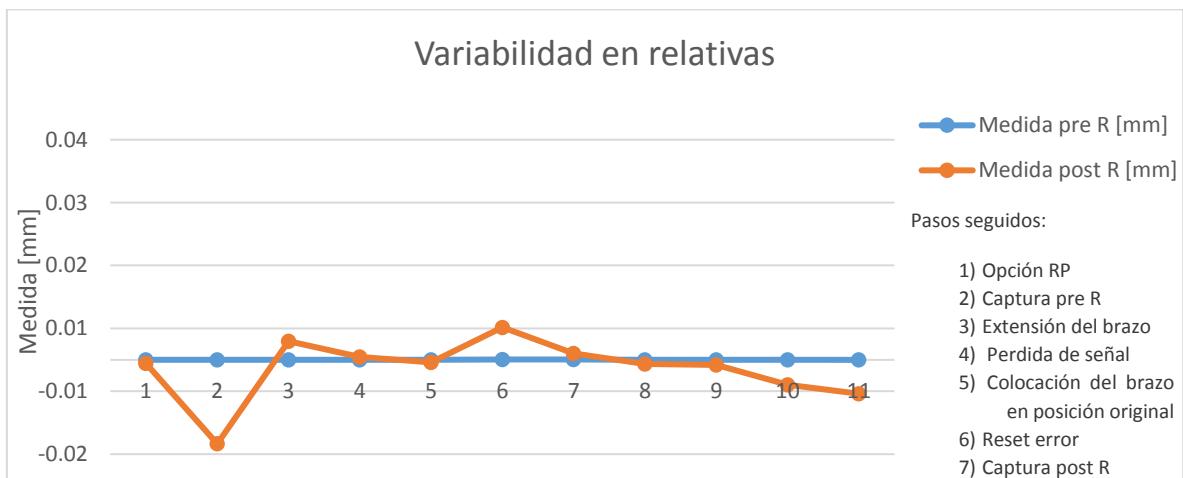


Ilustración 25. Gráfica de medición en relativas de perdida de señal con cambio de pos.

Este ensayo, como se puede observar en la Ilustración 24 y la Ilustración 25, permite ver cómo se comporta el sistema cuando se realiza el error fuera de una posición fija, a diferencia con el ensayo anterior. Esto es lo que podría ocurrir en un funcionamiento real del sistema en una verificación volumétrica.

Al producirse el error fuera del punto de referencia, las mediciones salen con peor repetibilidad, que con lleva a un rango más alto, y a tener datos lejanos de la media, caso que ocurre con la repetición 6 de la medición con absolutas. Esto se puede deber a que cuando se pierde la señal con el brazo extendido el sistema pierda precisión por no captar cambios de posición del brazo.

En el caso de medición relativa también se ve un aumento del rango de las medidas causado por producirse el error en un punto indeterminado y luego coger medidas en otro punto.

Por estos motivos, es muy importante que tras un error de señal realizar SMC o la opción RP en un punto estable para luego poder realizar una medición real.

En la Tabla 7 se puede consultar los rangos de los modos de medición antes y después del error. Se aprecia una gran diferencia entre los modos de medición

	Rango Medidas Pre Error [ $\mu\text{m}$ ]	Rango de medidas Post Error [ $\mu\text{m}$ ]
Medidas absolutas	11.14454845	39.7518
Medidas relativas	0.0580677000	18.52125685

Tabla 7. Rango de la medición de pérdida de señal con cambio de pos.

Viendo que las mediciones en relativas tienen mucha más repetibilidad a lo largo de estos tres ensayos, se establece a partir de aquí que todos los ensayos se realice con en este método de medición. Una vez establecido esto se pasa a comprobar cómo afecta el cambio de posición a los equipos de medición.

#### 4.3. Ensayos de comportamiento ante el movimiento

En esta serie de ensayos se añade a un asiento cinemático en la mesa para poder ver cómo que variabilidad hay cuando existe un movimiento del brazo de una posición a otra.

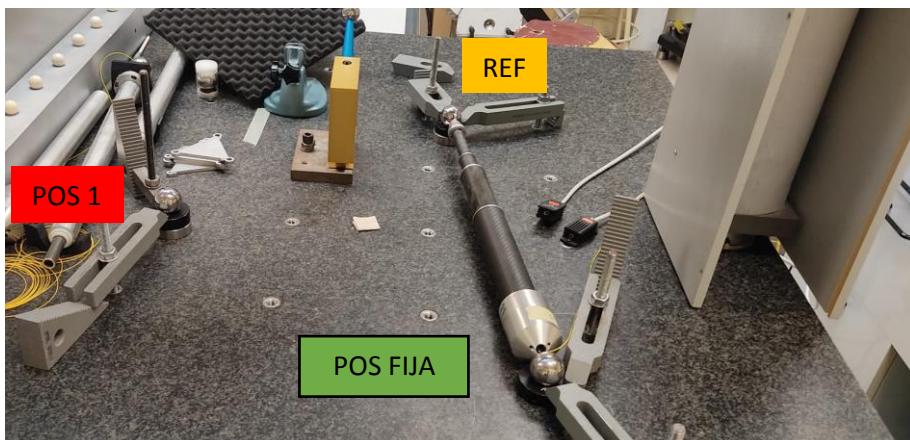
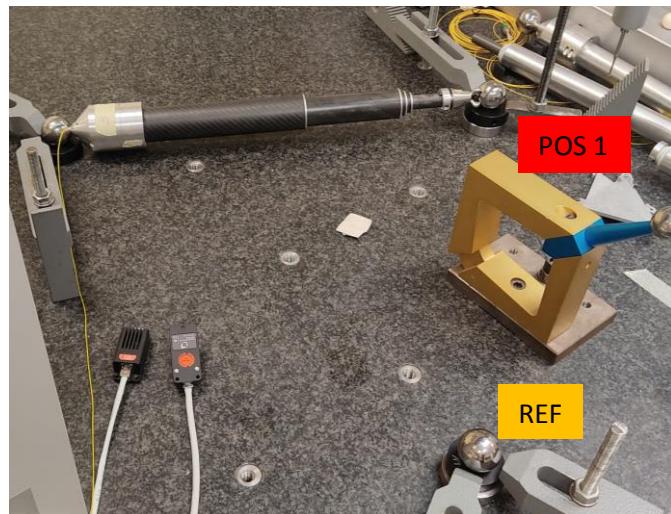


Ilustración 26. Disposición para realizar ensayos de comportamiento ante el movimiento

En esta serie de experimentos se tendrán tres posiciones como se muestra en la Ilustración 26: La referencia (REF), la posición fija (POS FIJA) y la posición 1 (POS1).

POS FIJA será la posición donde se colocará el cabezal del brazo y no se moverá. Mientras que el tridente se podrá colocar en REF para el reseteo de posición para tener el cero de la medición y la POS1 será donde se llevará el brazo mediante el movimiento del tridente o mediante el movimiento de la esfera pegada al tridente.

Estos ensayos mostraran la repetibilidad y la diferencia de medida cuando entra en juego la manipulación del equipo ya que en un ambiente real el equipo tendrá que llegar a ser colocado en la máquina herramienta por una persona.

Para ver cómo se va variando la medición, se replican los ensayos reseteando el cero en la posición de referencia cada vez que se pasa por ella o solo una vez. Además, se prueba la colocación del equipo en REF y en POS1 movimiento el brazo desde el tridente directamente o con la esfera, pegada al tridente, que podría ser una representación de lo que sería el movimiento de la verificación volumétrica.

Por tanto, se obtiene cuatro variantes del ensayo:

- Ensayo cogiendo el cero solo una vez con movimiento del tridente.
- Ensayo reseteando cero por REF con movimiento del tridente.
- Ensayo cogiendo el cero solo una vez con movimiento del tridente y la esfera.
- Ensayo reseteando cero por REF con movimiento del tridente y la esfera.

La variable que se utiliza para la comparación de estos ensayos será la L, que será la resta entre la medición de REF y la medición de POS1. Aunque no es geométricamente correcto, se utiliza para ver como de repetible es el sistema. Los resultados se pueden ver en la Ilustración 27 y en la Tabla 8.

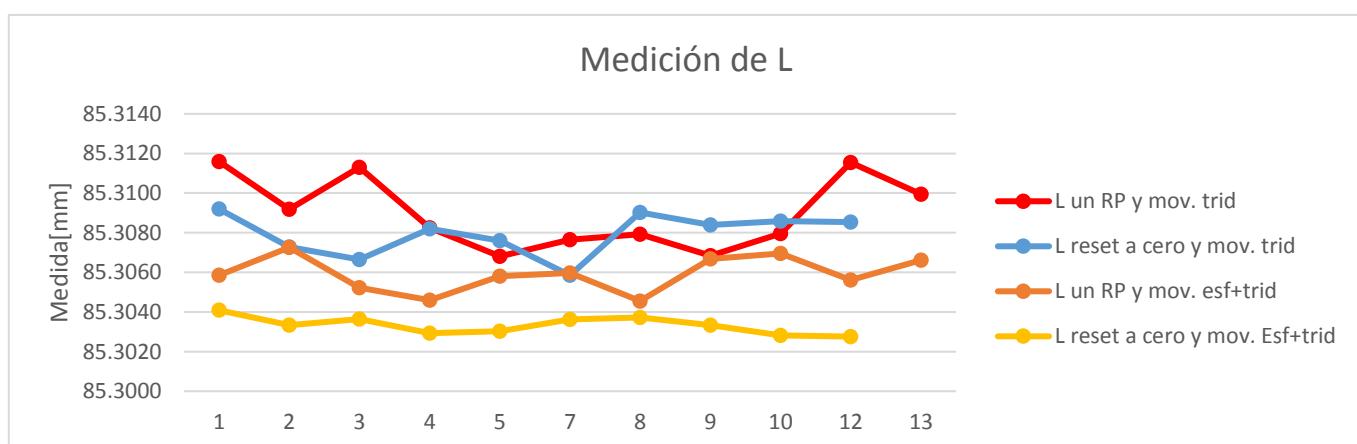


Ilustración 27. Gráfica de la medición de L

	Rango L [μm]
Medida con un RP y mov. tridente	4.78953
Medida reseteo a cero y mov. tridente	3.34703
Medida con un RP y mov esf+trid	2.70313
Medida reseteo a cero y mov. Esf+trid	1.33117

Tabla 8. Rango de L

## 5. Ensayos en máquina herramienta: Distribución en bancada vs distribución en estrella

Como se aprecia en los resultados, al mover con el tridente con una sola RP es el resultado con mayor variabilidad de todos y mayor media. Esto es debido al error acumulado que produce el movimiento manual del operario y a la colocación del tridente cada vez que se mueve posición.

Con el reseteo, disminuye el rango de L ya que solo mide la repetibilidad de una medición entre REF y POS1 y no de las 10 repeticiones.

Manejando el movimiento de la referencia a la posición 1 desde una esfera pegada al tridente y colocando la esfera en el asiento cinemático de cada posición, se obtiene resultados más repetibles que los anteriores.

La razón principal es que al coger el tridente con la mano puede desviarse el haz láser que está dentro del brazo. Mientras que el movimiento con la esfera es mucho más rígido y estable.

Destacar también, como ya ha ocurrido con la serie de movimiento manual, la repetibilidad con reseteo del 0 es mejor debido al borrado del error al pasar por la referencia.

## 5. Ensayos en máquina herramienta: Distribución en bancada vs distribución en estrella

Una vez caracterizado cómo mide el brazo ante sus características y ante situaciones simuladas de funcionamiento, se pasa al entorno donde de verdad el sistema funcionará.

En este apartado se van llevar los equipos al taller del Departamento de diseño y fabricación para ver su funcionamiento con los utilajes y los elementos del brazo influencian en la medición volumétrica. Se experimenta tanto con la disposición de los brazos en estrella, Ilustración 28, como en la bancada, Ilustración 29, y se comparan.

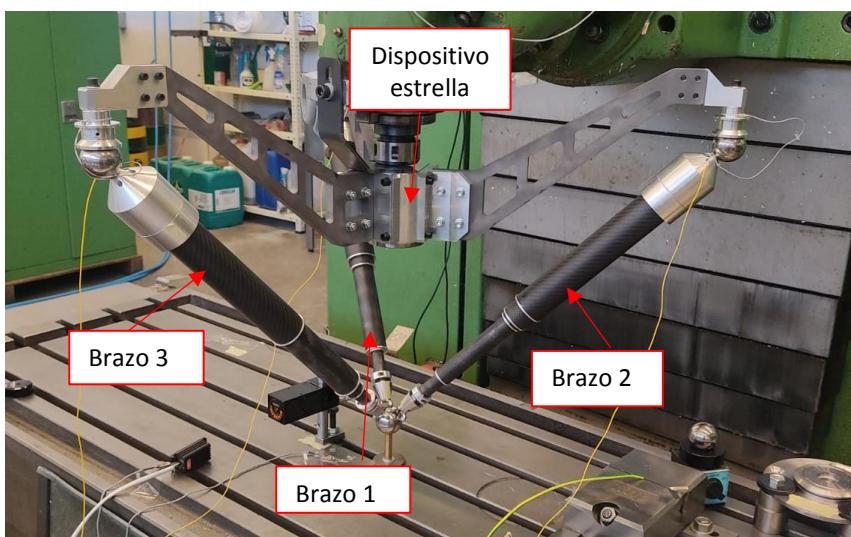


Ilustración 28. Disposición en estrella con identificación de los brazos

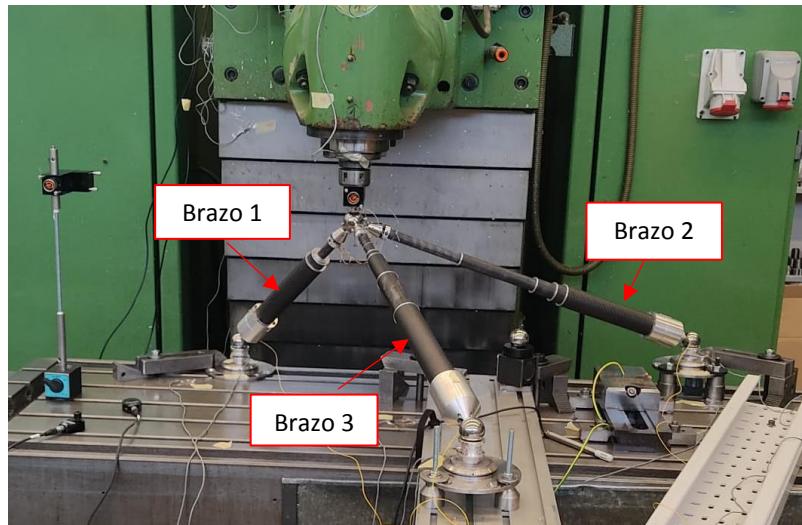


Ilustración 29. Disposición en bancada con identificación de los brazos

Esta serie de ensayos constará de los siguientes:

- Repetibilidad en la colocación del brazo telescopico:
- Repetibilidad de la colocación en el asiento cinemático
- Repetibilidad de la colocación del tridente en la esfera de referencia

Se replicará cada experimento en cada brazo y se verá cómo repercute ese ensayo en los demás. Como el funcionamiento de los brazos es muy parecido, al igual que los resultados obtenidos, se cogerá los resultados obtenidos con el brazo 1, el resto de resultados se adjuntan en el Anexo II.

Se realizarán los mismos ensayos para poder comprobar la rigidez de las disposiciones y cuál son las cualidades que tienen.

Como los brazos estarán colocados con diferentes longitudes, para una mejor visualización de los resultados se mostrará la variabilidad que tienen respecto a la media de la medición.

### 5.1. Repetibilidad en la colocación de un brazo telescopico

En este ensayo se lleva un equipo para su opción RP en el calibrador que está ubicado fuera de la bancada como se muestra en la Ilustración 30. Posteriormente se hace el RP en el calibrador, se coloca en la posición original en la bancada y se captura la posición. Se recogen los movimientos que se ejercen en los otros brazos que se quedan en la bancada.



Ilustración 30. Sistema de medición con el calibrador

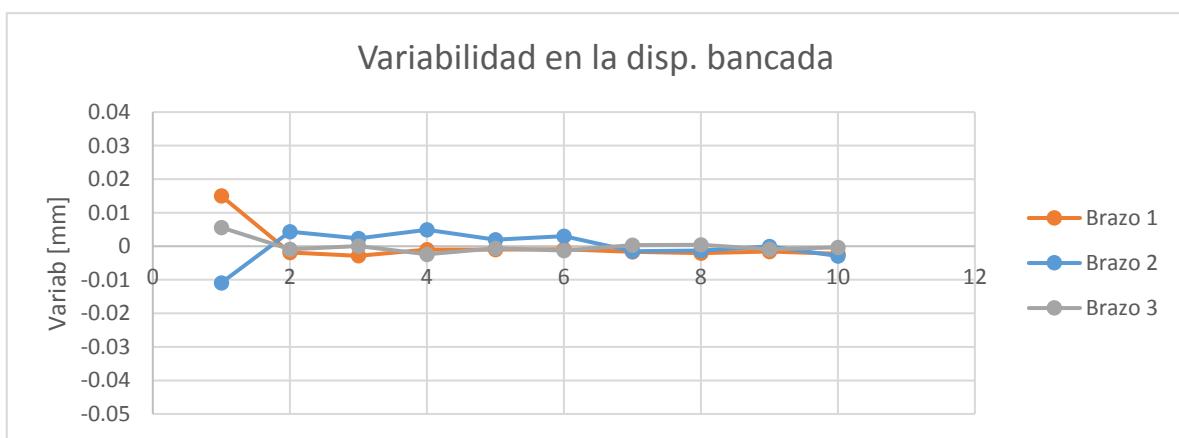


Ilustración 31. Gráfica de opción RP y medir en disp. bancada

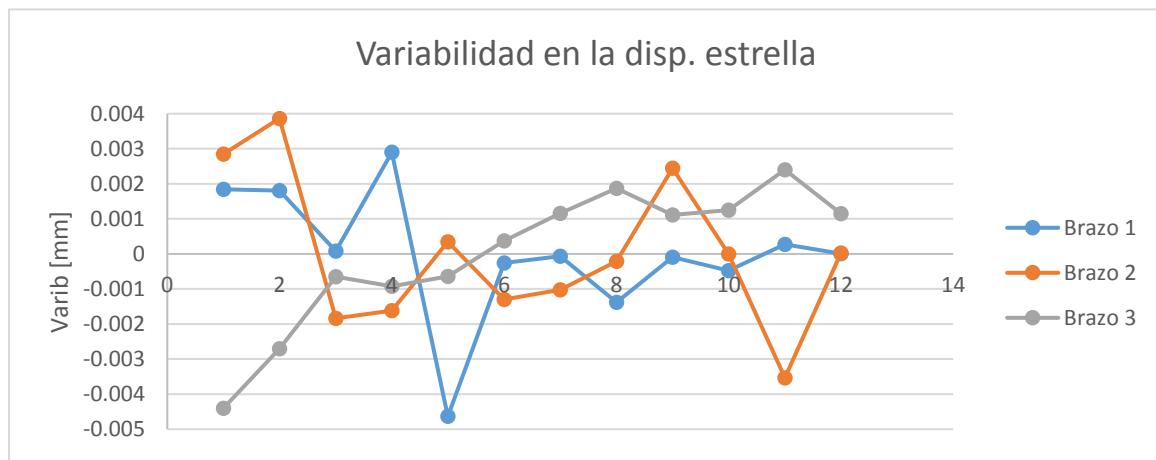


Ilustración 32. . Gráfica de la función RP y medir en disp. estrella

En la Ilustración 31 y la Ilustración 32 se pueden ver los resultados obtenidos. En la disposición en bancada, si se quita el primer punto cogido, que esta significativamente alejado de los otros datos, salen unos resultados muy repetibles. Que el primer dato sea muy diferente a los demás se puede deber a que los brazos se acomodan a una posición y al moverlos cambia su medición.

Destaca que el brazo 2 sea el que tenga la mayor variabilidad siendo que se ha movido el brazo 1, esto puede ser debido a que el brazo 1 se ha ido realizado la función RP mientras que error del brazo 2 se ha ido acumulando a lo largo del experimento.

Respecto a la distribución en estrella salen resultados más dispares que en la bancada, como se ve en las gráficas o con datos en la

Tabla 9, no existe un claro ejemplo de dato erróneo. Se puede apuntar que conforme se ha ido haciendo los ensayos existe un menor rango que puede ser achacado a una mayor soltura del operario a la colocación del equipo del calibrador a la estrella.

	Rango bancada [ $\mu\text{m}$ ]		Rango estrella [ $\mu\text{m}$ ]
	Total	Sin el primer dato	Total
Brazo 1	17.8573	1.9595	7.5350
Brazo 2	15.8152	7.7850	7.3980
Brazo 3	7.9835	2.8497	6.8025

Tabla 9. Comparación de rangos entre disposiciones en el ensayo de repetibilidad en la colocación de un brazo telescopico

Para ver que la colocación de los brazos en los utilajes propicia estas desviaciones, se ha querido mirar los dos elementos que anclan al brazo en sus utilajes: el tridente y el cabezal del brazo.

## 5.2. Repetibilidad de la colocación en el asiento cinemático

Lo que se busca de este ensayo es como los asientos cinemáticos utilizados para el trabajo en máquina herramienta afectan cada vez que se coloca el sistema en ellos.

El procedimiento ha sido la repetición del acople y desacople del cabezal al soporte como se puede ver en Ilustración 34 (en la bancada) y en Ilustración 33 (en el sistema estrella).

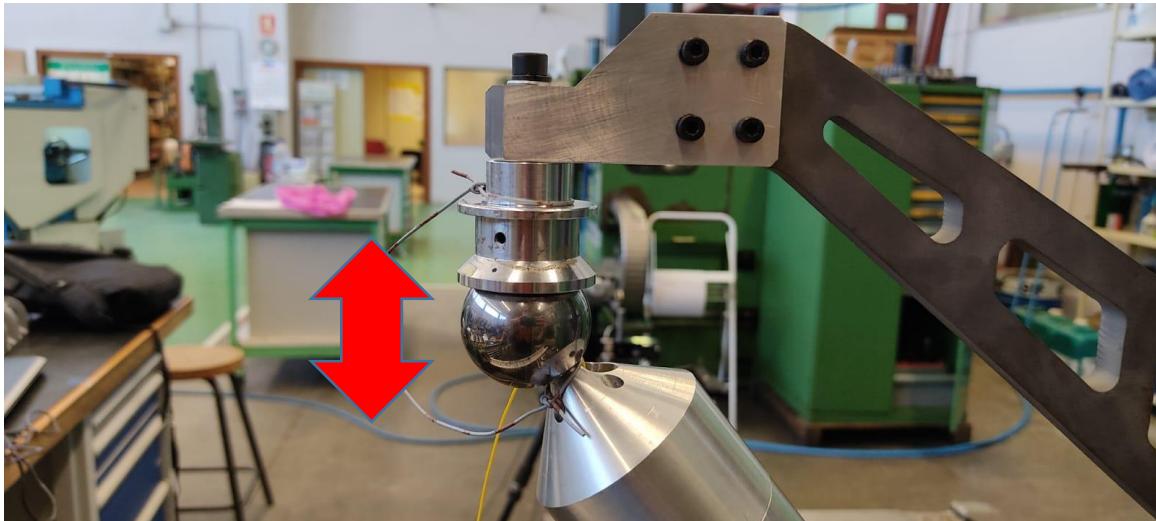


Ilustración 33. Esquema del ensayo en estrella de quitar la esfera

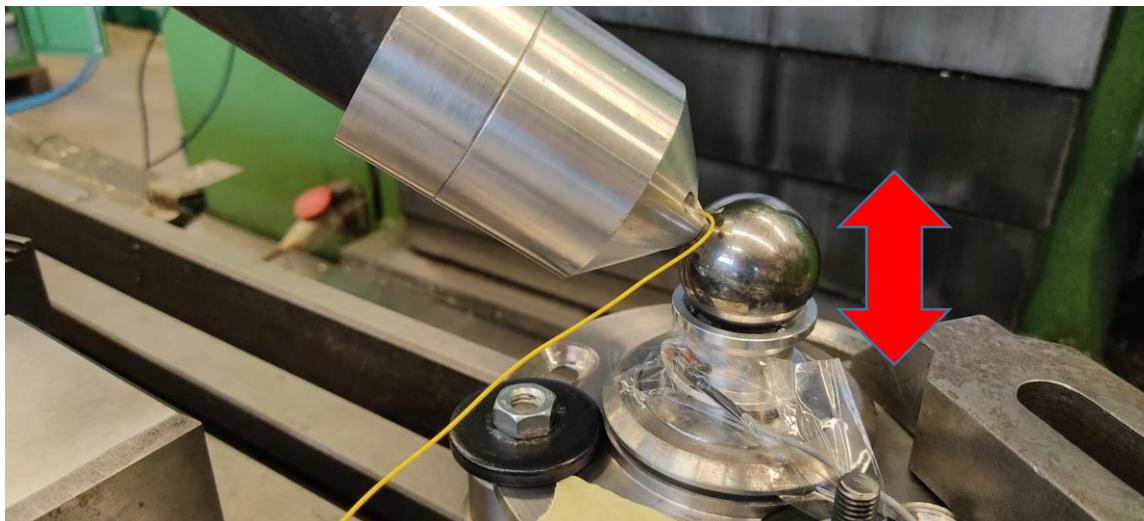


Ilustración 34. Esquema del ensayo en bancada de quitar la esfera

Para que hubiera una homogeneidad en cada repetición del ensayo, se realizaba la extracción de la esfera del mismo modo. Además, se apretaba la esfera hacia el asiento al asentar el cabezal para que siempre quedara el brazo en la misma posición.

En la Ilustración 35 y en la Ilustración 36, se han graficado los resultados de este ensayo

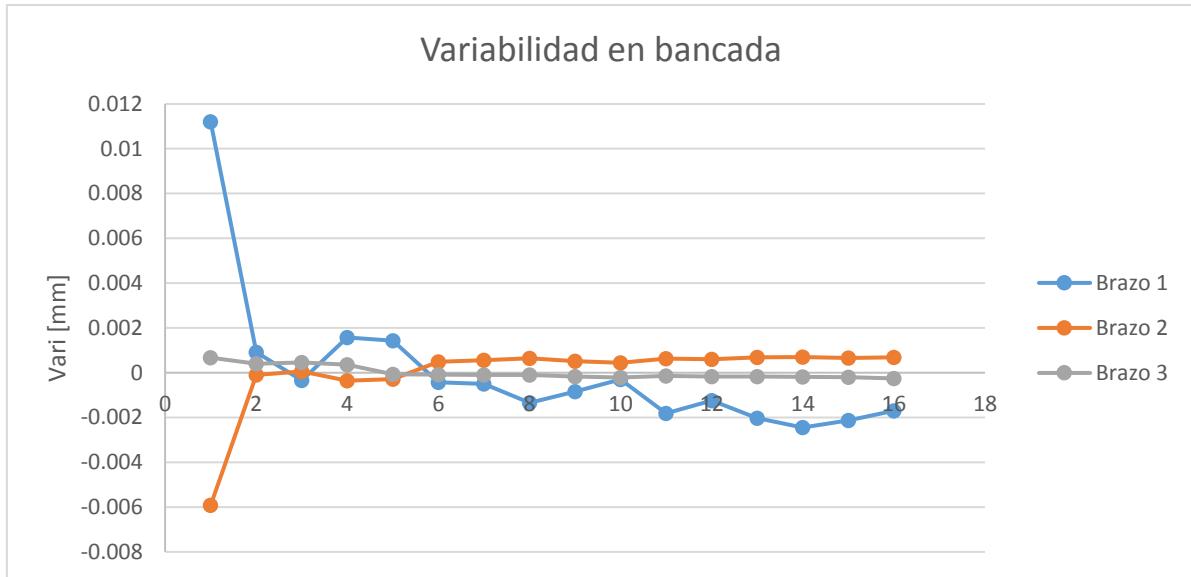


Ilustración 35. Repetibilidad de la colocación en el asiento cin. en disp. bancada.

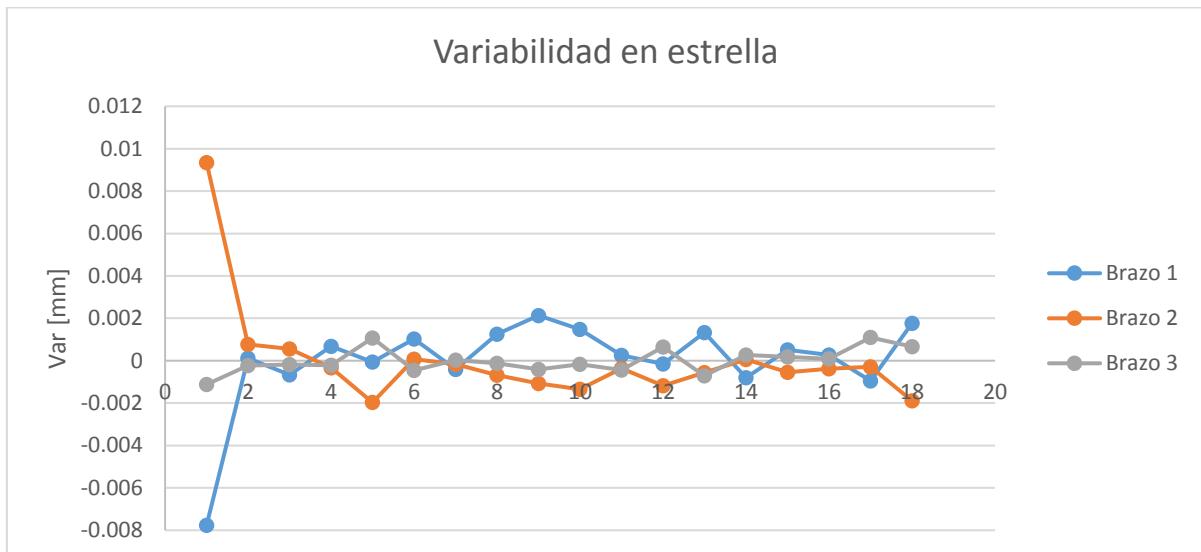


Ilustración 36. Repetibilidad de la colocación en el asiento cin. en disp. estrella

Como ocurría en la serie de ensayos anterior, el primer dato de la disposición en bancada se sale muy fuera del valor de los demás. Esto es la recurrencia de que el brazo se acomoda en una posición y distorsiona el valor real que tiene.

Respecto al resto de resultados, salen en el brazo 1 un rango de poco más de 2  $\mu\text{m}$  mientras que los otros dos brazos es una variabilidad mínima. Esto es porque ya no se recoloca todo el brazo sino solamente el cabezal de él. Además, la bancada es muy rígida por lo que es muy difícil que pueda transmitir la fuerza de colocación del brazo.

Como ocurre recurrentemente, los primeros datos de la disposición en estrella también son muy dispersos. Esto refleja la importancia de no tener los equipos quietos y de tener que movilizarlos cuando pasan un tiempo inmovilizados.

En contraposición a la bancada, la estrella está fabricada de aluminio y enlaza a los brazos con el cabezal de la máquina herramienta. Esto hace, como se pueda ver en las gráficas, que los 3 brazos se muevan al colocar el cabezal del brazo 1 en el asiento cinemático, cosa que en la disposición en bancada no se aprecia tan claro. Además, los asientos están en voladizo lo que hace que sea más difícil que se quede perfectamente pegado al imán. De momento, solo ha hecho desviarse la medición 2,7 $\mu\text{m}$  (quitando los primeros datos).

Para ver los rangos que se presentan, se puede la siguiente tabla:

	Rango bancada [ $\mu\text{m}$ ]			Rango estrella [ $\mu\text{m}$ ]		
	Total	Sin el primero	6 últimos	Total	Sin el primero	6 últimos
Brazo 1	13.65	4.01	2.14	9.87	2.93	2.27
Brazo 2	6.62	1.06	0.25	11.31	2.74	1.40
Brazo 3	0.92	0.70	0.14	2.13	1.78	1.35

Tabla 10. Rangos de la medición de la colocación en asientos cin.

### 5.3. Repetibilidad de la colocación del tridente en la esfera de referencia

Otro elemento que se tiene que permite la colocación del sistema entre el cabezal de la máquina herramienta y la bancada es el tridente. Para ver como influencia la correcta colocación del tridente, se quita y se vuelve a poner en la misma posición para ver cómo afecta este movimiento al sistema de medición.

El procedimiento para este ensayo constará de la repetición de la colocación y el retiro del tridente de la esfera de la medición. Hay que realizar esta colocación aplicando una fuerza similar para que se coloque siempre en la misma posición.

En el sistema de bancada se realizará el movimiento enseñado en la Ilustración 37 mientras que en el sistema estrella se hará el de la Ilustración 38.

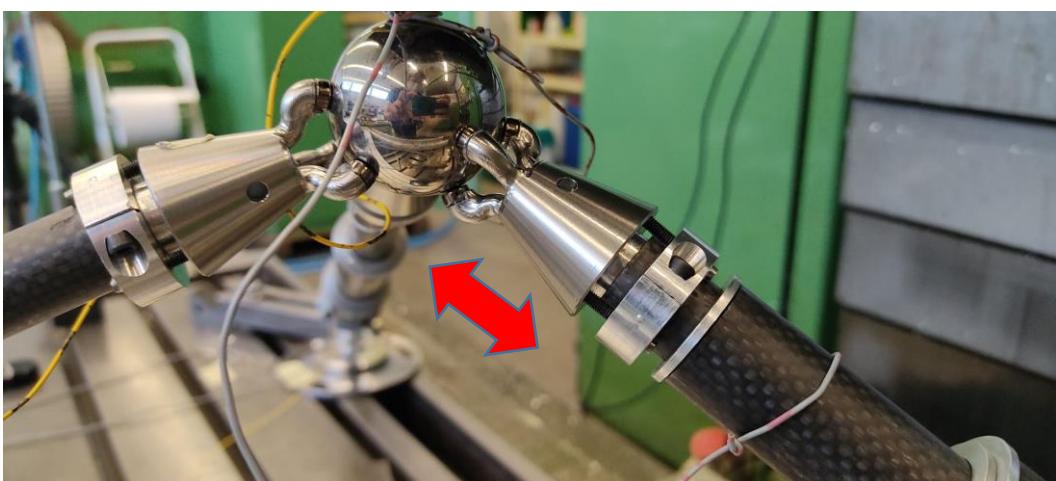


Ilustración 37. Esquema de quitar y poner tridente en la bancada

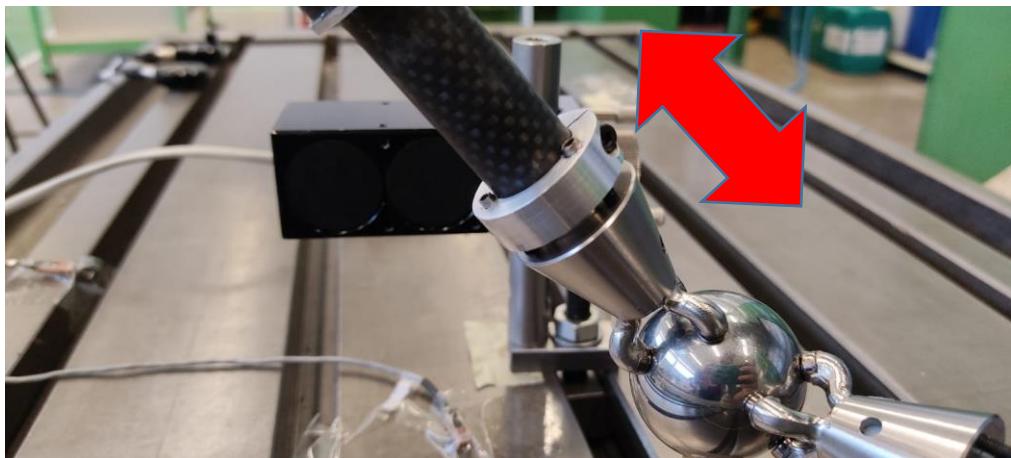


Ilustración 38. Esquema de quitar y poner tridente en la estrella

En la Ilustración 39 y la Ilustración 40, se grafican los resultados en bancada y en estrella.

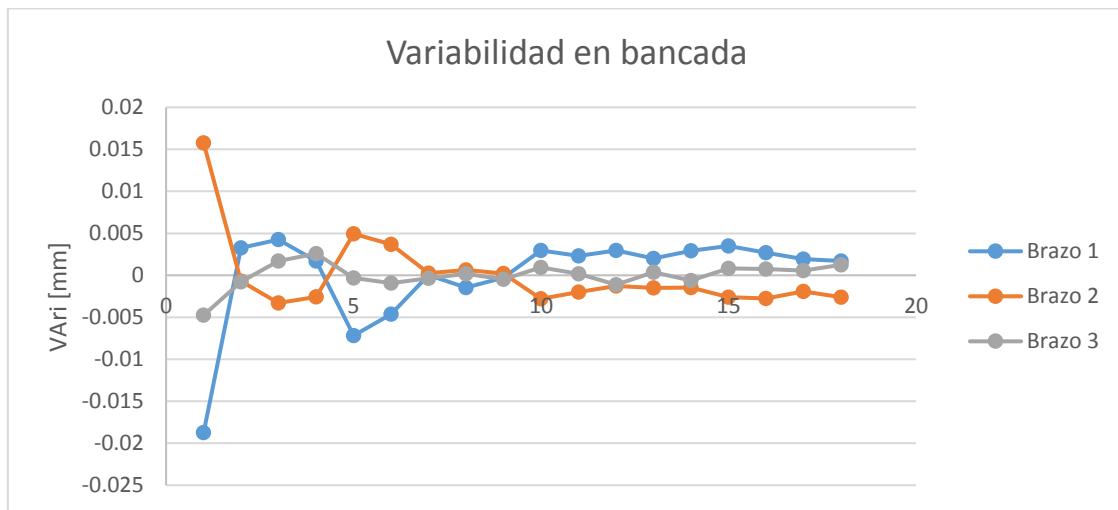


Ilustración 39. Gráfica de variabilidad del asentamiento del tridente en la disp. bancada

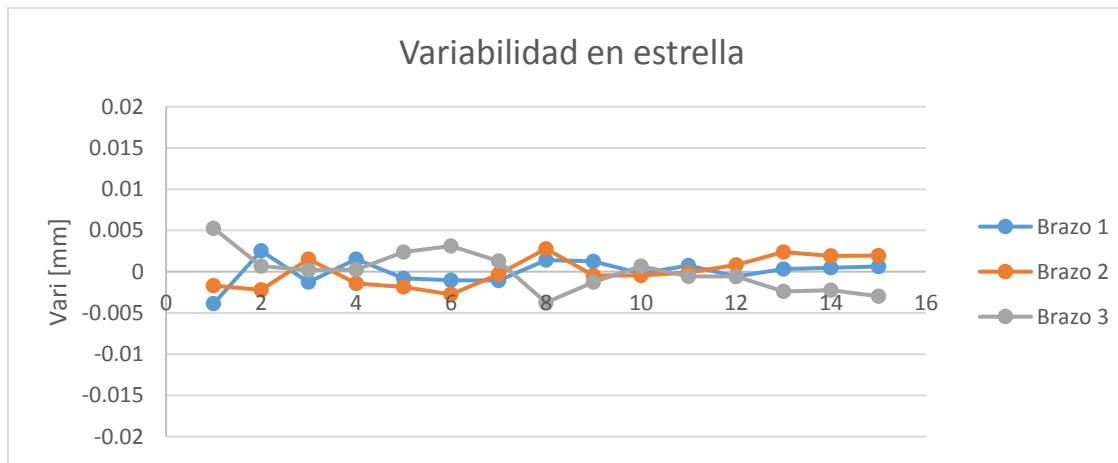


Ilustración 40. . Gráfica de variabilidad del asentamiento del tridente en la disp. estrella

Analizando la Ilustración 39, la esfera de medición, donde los tridentes se colocan, parece ser que es muy sensible al apoyo de los tridentes por eso en la primera parte aparece mucha variabilidad mientras que se suceden las repeticiones se va estabilizando. Puede ser debido a la práctica que va cogiendo el operario en la consecución de los ensayos. Hay que tener cuidado con elementos que no son del todo rígidos como pasaba con la estrella.

Como pasa con la esfera en la bancada, en la estrella (Ilustración 40) la rigidez del utilaje donde esta enroscada la esfera hace que la repetición del ensayo tenga un rango de entorno a la micra. En general salen mediciones más acotadas que el de la bancada salvo el brazo 3, como se puede apreciar en la Tabla 11.

	Rango en bancada [ $\mu\text{m}$ ]		Rango en estrella [ $\mu\text{m}$ ]	
	Total	Sin el primero	Total	Sin el primero
Brazo 1	22.99	11.41	6.40	3.78
Brazo 2	19.07	8.24	5.54	5.54
Brazo 3	7.33	3.72	9.01	6.86

Tabla 11. Rango de mediciones del asentamiento de tridente

La variabilidad es más homogénea en la estrella debido a que siempre las bases están más o menos a la misma distancia. En cambio, la bancada puede variar mucho la distancia entre asientos. El brazo 3 se quedaría muy recogido en la disposición en bancada lo que disminuiría su rango.

Tras ver el funcionamiento de los brazos en situaciones reales y ver qué elementos causan la desviación de la repetibilidad, se reevalúa el procedimiento inicial para crear uno nuevo.

## 6. Propuesta de procedimiento de uso y sus mejoras

Después de la presentación de los ensayos para caracterizar el funcionamiento del sistema y ver cuáles son los puntos a mejorar para que se pueda desarrollar correctamente la medición, se ha realizado un procedimiento para controlar todas esas variables que provocaban esos cambios en la medida.

Se han ido dando pequeños detalles de las problemáticas que han ido surgiendo tras analizar los resultados de los ensayos, como son los siguientes:

- Medición más repetible en relativas.
- Cuanto menor manipulación manual, mejor.
- Importancia de la correcta colocación de los brazos en los utilajes.

Pero también se han encontrado otros elementos de los que no se realizaba un uso correcto y necesitaban ser revisados el modo en el que se utilizaban. Este es el caso de la fibra óptica y el calibrador.

Sabiendo las necesidades que se tienen, ya se puede proceder a describir la propuesta de procedimiento.

El procedimiento consiste en primera instancia, como se ve en Ilustración 41, en la preparación antes de cualquier medición. Hay que comprobar que los interferómetros de los 3 brazos telescopicos están conectados a la corriente y al switch para que se pueda medir, así como la

sonda de temperatura que es necesaria para tener en cuenta el factor térmico. Tras ello, hay que ver que la fibra óptica este sin ningún nudo y sin ningún rizo muy pequeño ya que eso impediría el funcionamiento de los equipos. En caso que esto ocurriese, habría que desanudar la fibra o cambiar la fibra por si hubiera alguna rotura. Por ultimo en esta fase de preparación, es primordial comprobar que tienen una buena calidad de señal ya que eso disminuiría los posibles errores de desconexión. Si tuviera mala calidad o nula habría que abrir el brazo para reorientar el colimador hacia el reflector.

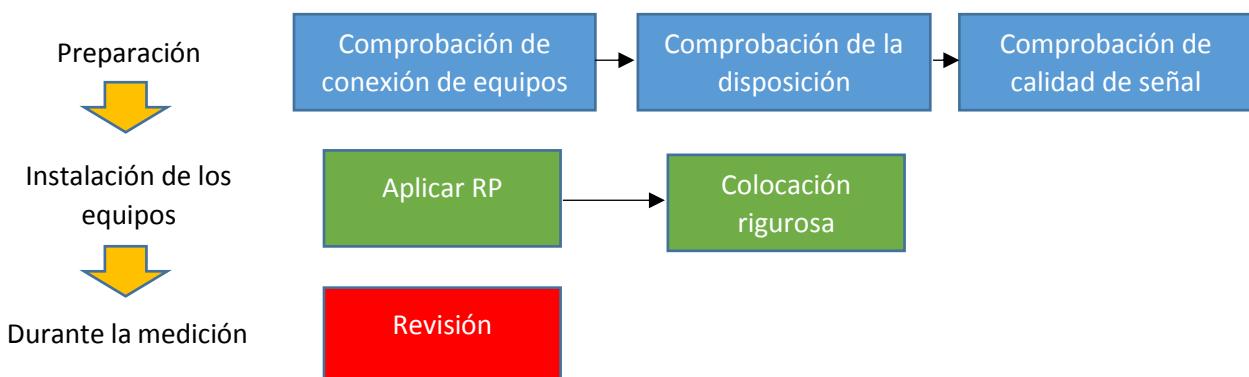


Ilustración 41. Esquema de la propuesta de uso final

En la fase de instalación del equipo, ya se procede a usar la función RP de los equipos en el calibrador. Cabe destacar que, tras coger la referencia, se coge una posición del calibrador, una anterior o posterior a la referencia, para la comprobación de que siempre se hace el mismo cero o lo que es lo mismo, que siempre se coloca perfectamente los brazos en la medida de referencia. Para ello, hay que colocar tanto el cabezal, en el asiento cinemático, como el tridente, en la esfera del calibrador, de forma que acople perfectamente. Se consigue aplicando fuerza sobre estas partes del brazo hacia los utilajes hasta que queden inmovilizadas.

Después, ya solo habría que colocar con cuidado el brazo en los asientos cinemáticos de la MH, también colocándolo haciendo presión para conseguir ese acople.

Para finalizar, el equipo ya podría ser usado para la verificación, pero para un correcto uso hay que revisar la calidad de señal de todos los brazos cuando están funcionando porque pueden girarse con el movimiento de la MH y perder su situación óptima de señal. También puede ocurrir que, con el desplazamiento de la MH, se enganche o se cree un nudo en la fibra lo que causaría la desconexión del láser. Si esto ocurriera habría que arreglar el problema y volver a resetear el cero.

Para ayudar al usuario en el correcto funcionamiento del sistema de verificación se han implementado diferentes mejoras:

- Carrete para la fibra óptica
- Un patrón para su uso en planta
- Plataforma para el transporte del sistema de verificación

## 6.1. Utilajes para fibra óptica

La fibra óptica es un elemento muy delicado y fundamental para la correcta marcha del sistema. En sistema hay dos tipos de fibra: una de 1mm de diámetro y otra de 3mm. Ambas están conectadas pero la más pequeña está conectada al colimador, para que sea más móvil, y la otra está conectada al interferómetro. Se almacenaban formando un rollo y se iba recogiendo o soltando según se necesitara como se puede ver en la Ilustración 42 . El problema radicaba que cuando no estaba ordenado el rollo y aparecía cualquier nudo o se reducía mucho el radio se podía producir la perdida de señal láser o la rotura de la fibra.



Ilustración 42. Almacenamiento fibra óptica

Esto es crítico sobre todo en la fibra más pequeña, ya que tiene mucha más facilidad para liarse, por eso fue prioritario su diseño y su fabricación. El utilaje de la otra fibra simplemente se diseñó para su fabricación más adelante.

Estos utilajes son un carrete donde poder enrollar la fibra, para que mantengan un radio de curvatura correcto para su utilización.

Se buscaba un diseño sencillo y de fácil fabricación para poder ponerlo en marcha cuanto antes. Se utilizó el software Solid Edge [9] para hacer el diseño que se muestra en la Ilustración 43. Posteriormente con el software Ultimaker Cura [10], se creó el código para su fabricación mediante impresora 3D con los siguientes parámetros:

- **Material:** PLA
- **Altura de capa:** 0.15 mm
- **Relleno:** 20%
- **Peso:** 33 g

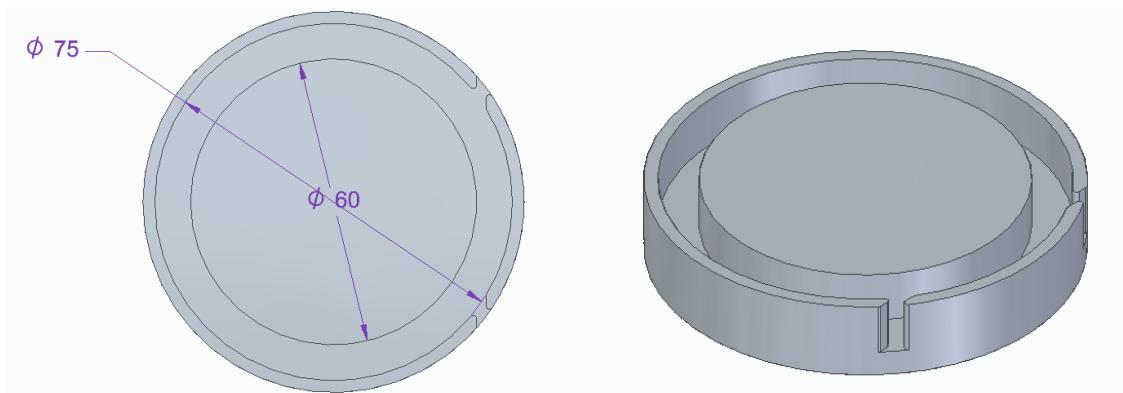
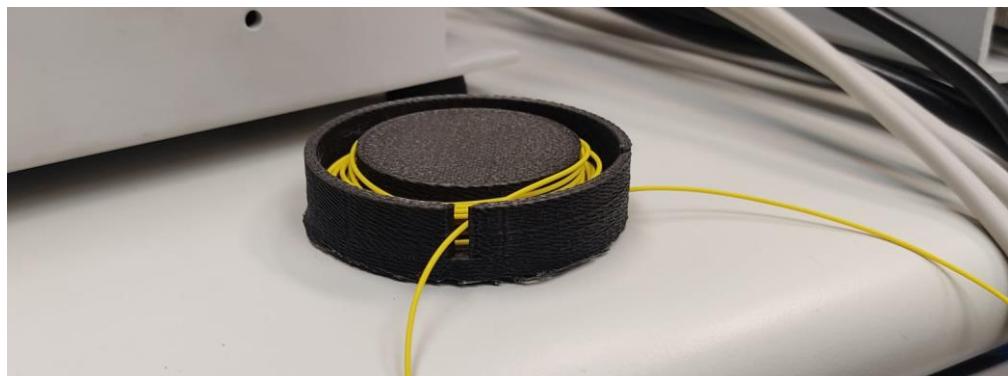


Ilustración 43: Diseño del carrete pequeño

El resultado de la impresión fue el que refleja la Ilustración 45, donde se ve que cumple perfectamente las necesidades que se habían descrito. El cableado queda dentro del carrete y evita que se puedan formar nudos que perjudiquen al equipo.



*Ilustración 44. Carrete pequeño*



*Ilustración 45. Carrete pequeño*

También se ha realizado un diseño para la fibra grande. Este diseño se hizo pensando en la posibilidad de tenerlo junto al interferómetro, teniendo solamente que moverla fibra pequeña para la manipulación de los equipos.

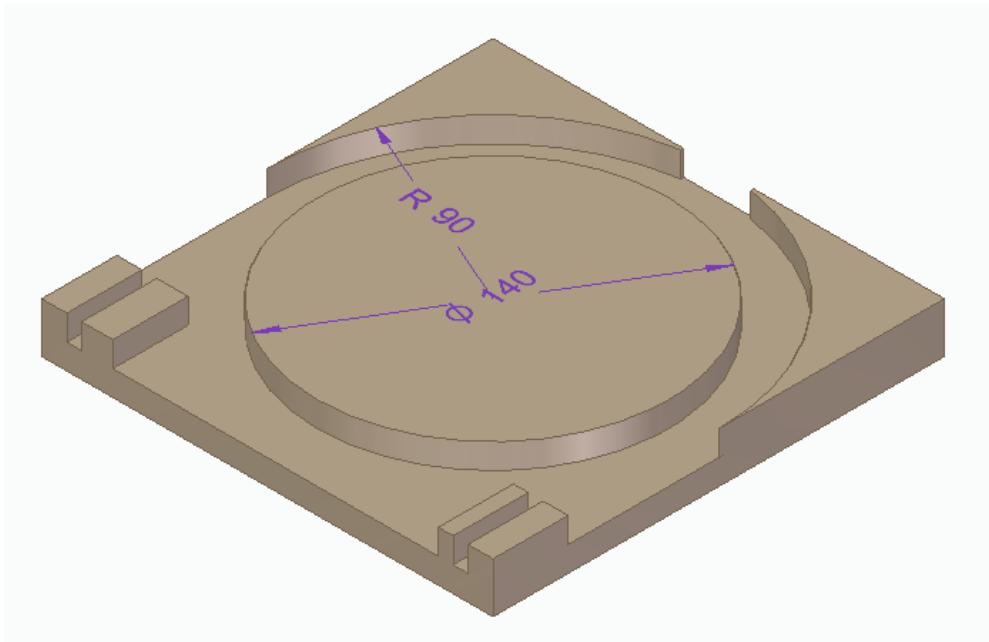


Ilustración 46. Carrete de fibra grande

La diferencia con el anterior carrete radica en que la fibra más grande apenas se manipulará y se quedará aquí almacenada. A parte, tiene un mayor grosor y radio critico

## 6.2. Diseño de un patrón para su utilización en planta

El calibrador es un instrumento fundamental para los equipos porque permite al interferómetro tener una referencia precisa. Por ello es necesario que, tras hacer los ceros en los equipos, haya la menor manipulación entre el calibrador y la colocación del equipo en la posición para la verificación.

Se piensa en diseñar un patrón que más manejable que el calibrador que ya se tiene y que se pudiera colocar directamente en la bancada de la máquina herramienta, ya que el calibrador es muy grande y se coloca en una mesa auxiliar. Así si hubiera algún tipo de problema de medición, se podría hacer de forma rápida y sin tener que con los brazos.

Surge la idea que con un rediseño de los asientos cinemáticos y un perfil extruido de aluminio se podría llegar a conseguir una barra rígida que apenas se deformara. Esto daría una longitud fija para poder calibrar el equipo siempre en la misma medida. Además, tener dos posibles de posiciones para contrastar la opción RP, como se mencionado en el procedimiento. Se prueba con perfil de 40x40 con el que se obtiene el resultado de la Ilustración 47 y la Ilustración 48 .

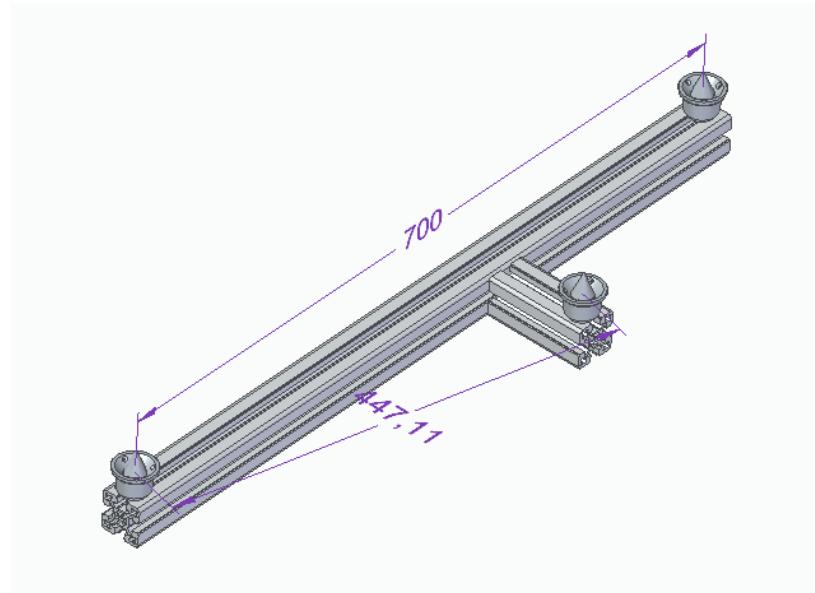


Ilustración 47. Diseño del patrón.

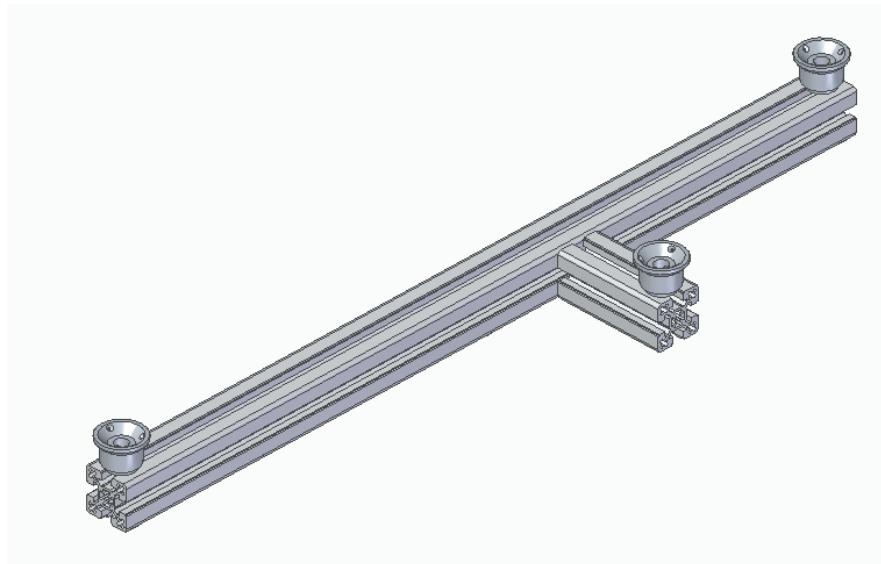


Ilustración 48. Perspectiva del diseño del patrón

Para ver la deformación que sufriría el diseño ante el peso de un brazo, se decide hacer una simulación por elementos finitos. Así se sabría que error se está metiendo al equipo debido a la deformación de la barra y si es asumible.

En la Ilustración 49 se realiza un esquema sobre la distribución de fuerzas y los apoyos se ha simulado en la situación más desfavorable, el apoyo del brazo en la longitud más larga. Se hace una simplificación del brazo, sustituyendo este elemento por el peso que ejerce sobre la barra y colocando unos conos para conocer la posición en la que estaría el centro de las esferas, posición de referencia de las medidas. A parte, se pone una componente trasversal a la barra debido a la colocación del brazo por el operario y la fuerza gravitatoria.

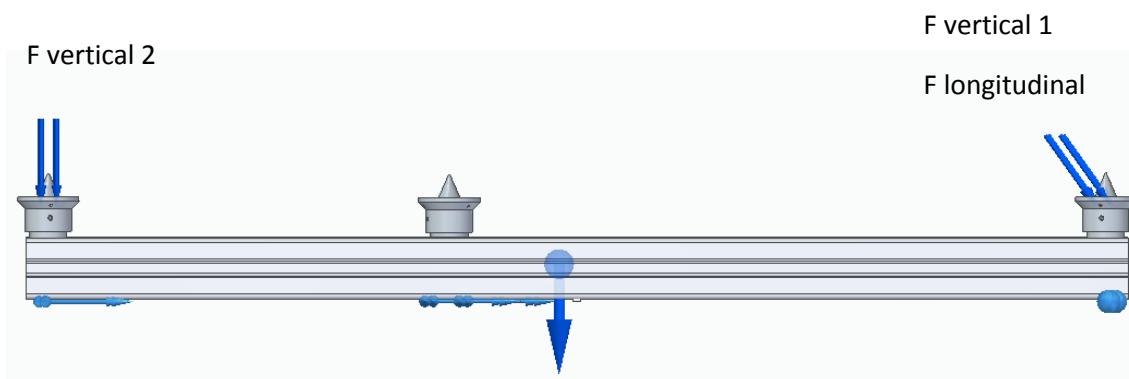


Ilustración 49. Esquema de la simulación de patrón

Se realiza un ensayo estático con un apoyo fijo y 2 deslizantes, que están debajo de los asientos cinemáticos.

Las características de la simulación son las siguientes:

- Estudio estático iterativo
- Los elementos de la malla son triangulares de 17 mm de lado
- Elementos mínimos en el borde: 1
- Máxima tolerancia de ángulo: 25º
- Se realizó una malla mucho más fina en los conos para tener más precisión en la desviación del centro de las esferas del brazo.

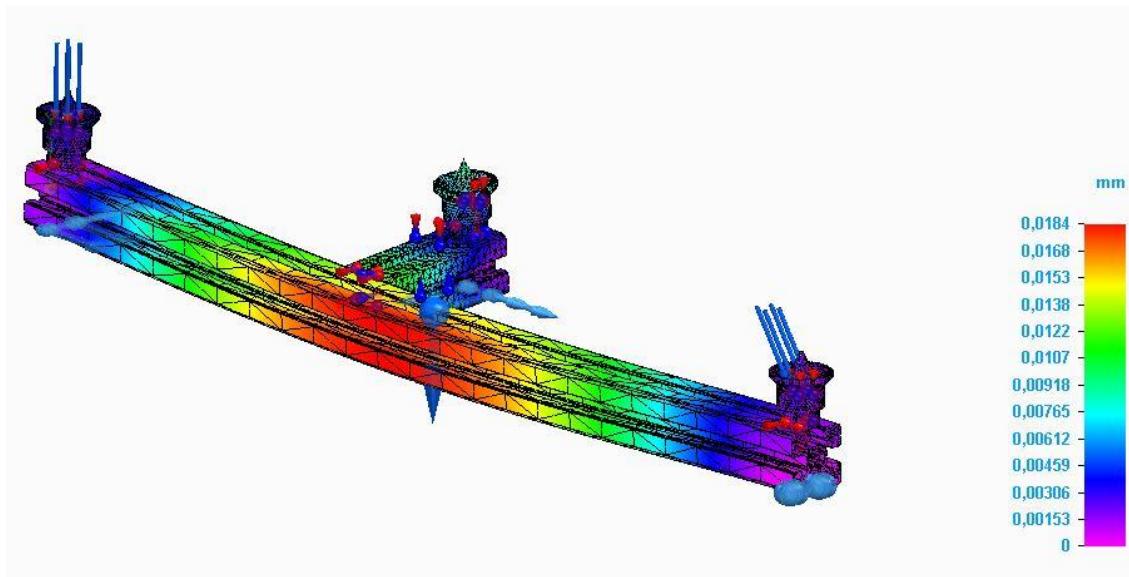


Ilustración 50. Simulación en solid Edge del patrón del perfil de 40x40

Se puede apreciar en la Ilustración 50, que la mayor deformación es el centro de la barra de unas 18 µm. Pero lo realmente importante es la deformación en las posiciones donde están asentado el brazo. Para ello se sacaron los resultados numéricos en la Tabla 12.

	F. vertical 1 [N](eje Y)	F. vertical 2 [N](eje Y)	F. longitudinal [N](eje Z)	Distancia entre centros [mm]	Desv X [μm]	Desv Y [μm]	Desv Z [μm]
Referencia 1	7	3	10	700	-0.09400	0.254	0.5140
Referencia 2	7	3	10	449.11	-0.00101	0.815	0.3489

Tabla 12. Resultados de las posiciones del brazo

Se ha escogido este perfil debido a que aportaba rigidez al patrón y su peso era asumible, 2kg. Existe una desviación de  $0.254\mu\text{m}$  en Y que podría ser menor con un perfil más robusto o acercando los apoyos. Al ser un valor conocido se puede llegar a asumir aplicando una corrección a las medidas que se tomen posteriormente.

### 6.3. Plataforma para el sistema de verificación

Para poder transportar los brazos telescopicos y sus demás elementos (interferómetro, fibra óptica, utillajes, etc.), se ha decidido crear una plataforma que pueda albergar todos los elementos. Así también sería muy fácil poder colocarlo en cualquier sitio.

Se ha pensado en utilizar una plancha de PVC y perfiles de aluminio para crear una estructura. Además de añadir una malla de poco espesor para rigidizar la plataforma. Para colocar los brazos, se hacen unos pequeños asientos cinemáticos para poder apoyar los brazos. También se hace un ensayo por elementos finitos para saber si la estructura es capaz de soportar el peso.

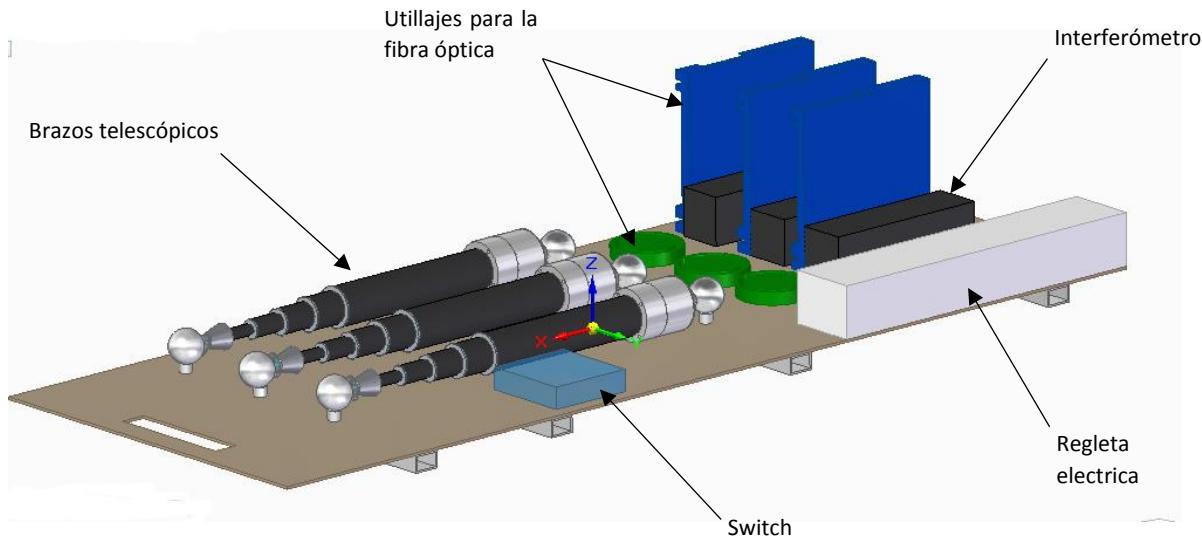


Ilustración 51. Diseño de la plataforma final

La Ilustración 51 es el diseño final que se ha realizado, donde se hace unas pequeñas hendiduras para poder agarrar la plataforma. Los perfiles de aluminio, que son de 30x20 de un espesor de 2 mm, se han puesto justo debajo de los asientos para que así evite la deformación debida al peso de estos.

Las características de la plataforma diseñada son las siguientes:

- Placa de PVC de 1200x450
- Malla de aluminio de  $e=1\text{mm}$
- \$ perfiles de 30x20 de  $e=2\text{mm}$

Para la simulación de la plataforma se ha tenido en cuenta los pesos de todas la herramientas descritas en la Ilustración 51, también la fuerza gravitatoria. Los pesos son:

- Brazos telescopicos: 1kg/brazo
- Interferómetros: 0.5kg/interferómetro
- Regleta eléctrica:0.3 kg
- Switch:0.2kg
- Utillajes:0.4kg entre todos

Las características del ensayo en elementos finitos es el siguiente:

- Estudio estático iterativo
- Fijaciones en los dos extremos de la plancha
- Los elementos de la malla son triangulares de 27 mm de lado
- Elementos mínimos en el borde: 1
- Máxima tolerancia de ángulo: 25º

Los resultados que se muestran en la Ilustración 52, da que la deformación máxima es de 5mm en la parte central de la plataforma. Esta es la parte más desfavorable que sería el transporte. Es admisible teniendo en cuenta que la plataforma tiene un peso aproximado de 4kg para llevar un material de 5.7kg. Se podría rigidizar más, pero acosta de aumentar el peso. Por tanto, es un desplazamiento admisible y podría cumplir perfectamente su función.

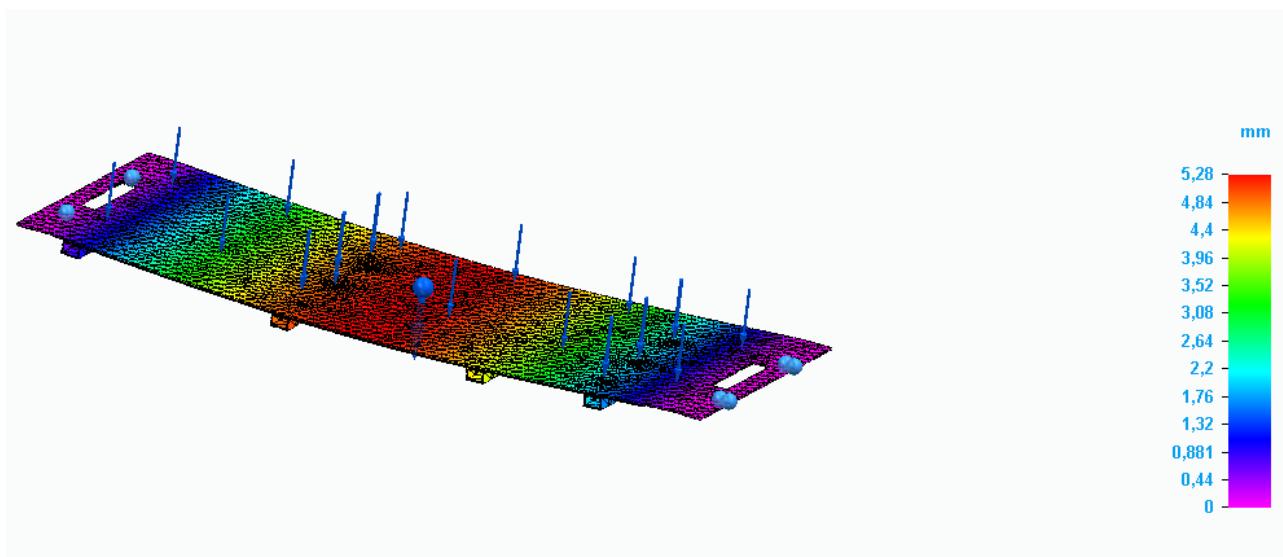


Ilustración 52, simulación en Solid Edge de la plataforma

## 7. Comparación entre equipos

Para la comprobación de que el sistema de verificación que se ha utilizado a lo largo de este trabajo tiene una viabilidad real, se ha querido comprobar las mediciones con otro sistema de medida, en este caso un interferómetro láser como el de la Ilustración 53.

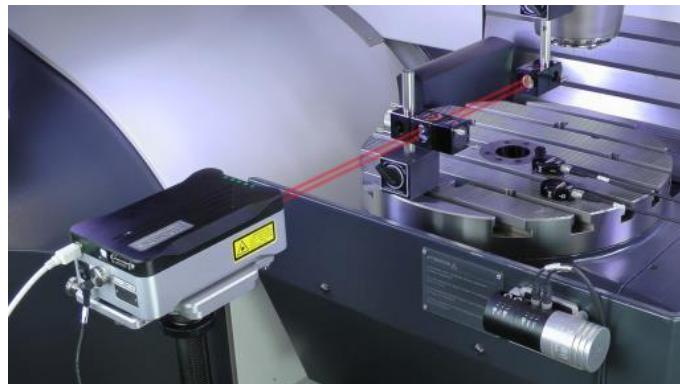


Ilustración 53. Interferómetro láser [12]

Como es un instrumento que solamente mide distancias en línea recta, se ha procedido a capturar una línea en una dimensión para así poder comparar los resultados obtenidos con el sistema de verificación. Esta línea no se captura en un rango continuo, sino que toman 10 puntos. Para sacarlos con el sistema de verificación es necesario tratar los datos ya que se tiene que hacer la triangulación del punto respecto a los asientos cinemáticos.

El código que se usa para llegar a obtener los puntos de la línea se basa en la trilateración que consiste determinar la posición mediante 3 referencias conocidas, en este caso los asientos cinemáticos que se pueden medir sus distancias con los brazos, y la distancia entre los asientos y el punto que se quiere hallar.

Estos puntos se toman siempre en el mismo sentido para que el juego que existe en la bancada sea el mismo.

Los parámetros del ensayo son los siguientes:

	Dist Ref1-Ref3 [mm]	Dist Ref1-Ref2 [mm]	Dist Ref2-Ref3 [mm]	Long máx [mm]	Long min [mm]
Estrella	691.98	693.70	692.17	731.90	473.19
Bancada	1002.15	972.87	963.21	776.02	443.11

Tabla 13. Parámetros de la comparación entre equipos

En la Tabla 13 se pueden apreciar la distancia que existe entre las referencia, es decir, entre los asientos cinemáticos. También se ha querido enseñar que las extensiones máximas y mínimas son muy parecidas en ambas distribuciones.

Se han graficado, Ilustración 54, los resultados en la disposición en bancada y en la estrella respecto al valor que se obtiene con el interferómetro.

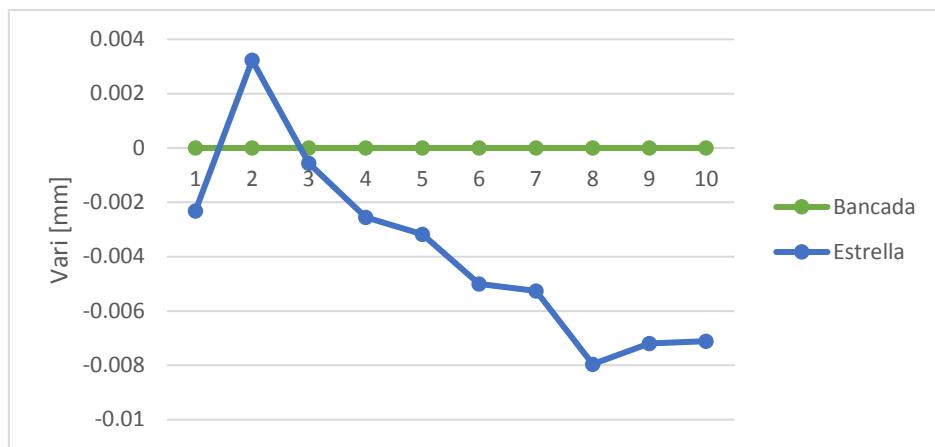


Ilustración 54. Diferencia del sistema de verificación respecto al interferómetro

Como se aprecia en la Ilustración 54, la disposición en bancada sale mucho más pareja al interferómetro que en el caso de la estrella. Esto se debe a la falta de rigidez del utilaje utilizado, pero aun así no tiene una gran desviación.

Al ser la comparativa entre equipos de la misma tecnología es fácilmente comparable y de averiguar su incertidumbre de medida.

Para ver los datos brutos de la gráfica y las distancias nominales del ensayo, se pueden ver la Tabla 14 y la Tabla 15.

	Medición [mm]									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Nominal	40.5	81.0	121.5	162.0	202.5	243.0	283.5	324.0	364.5	405.0
Interf. láser	40.497	80.994	121.488	161.989	202.486	242.979	283.476	323.974	364.472	404.970
Sist de verif.	40.498	80.996	121.490	161.990	202.487	242.978	283.477	323.975	364.474	404.972
Diferencia	-0.0009	-0.0017	-0.0024	-0.0002	-0.0010	0.0012	-0.0005	-0.0009	-0.0017	-0.0018

Tabla 14. Resultados del interferómetro vs disposición en bancada

	Medición [mm]									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Nominal	40.5	81.0	121.5	162.0	202.5	243.0	283.5	324.0	364.5	405.0
Interf. láser	40.498	80.996	121.494	161.993	202.490	242.981	283.480	323.980	364.479	404.977
Sist. de verif.	40.500	80.993	121.495	161.995	202.493	242.986	283.485	323.988	364.486	404.984
Diferencia	-0.0023	0.0032	-0.0006	-0.0026	-0.0032	-0.0050	-0.0053	-0.0080	-0.0072	-0.0071

Tabla 15. Resultados del interferómetro vs disposición en estrella

El equipo de verificación está en una fase de desarrollo y que tenga tan poca variabilidad respecto del interferómetro en la medición, sobre todo en la disposición en bancada, es algo alentador para seguir progresando en las mejoras del equipo.

## 8. Conclusiones

El principal objetivo de este trabajo ha sido el análisis del funcionamiento del sistema de medición y para ello se han ido realizando diferentes ensayos para ver el comportamiento de cada elemento que forma parte del sistema, como son el reflector o los modos de medida, y también los elementos o acciones externas a él, como son los asientos cinemáticos o el movimiento. Con el análisis de estos ensayos se ha implementado un nuevo procedimiento de uso que ha necesitado de nuevos utilajes (carrete de fibra, el patrón y la plataforma). Para finalizar el trabajo, se ha querido ver la fiabilidad del sistema contrastando sus resultados con otro sistema de medición láser. Con lo que se ha desarrollado en este trabajo se han extraído las siguientes conclusiones:

- Es un sistema de medición muy sensible y su manipulación debe ser mínima y precisa para que se obtengan resultados repetibles y fiables. Es primordial el seguimiento del procedimiento para asegurar que los elementos del sistema, o de su entorno, no repercuten negativamente, afectando a la precisión del equipo. Es una manera de tener la certeza del correcto uso del sistema.
- La medición en coordenadas relativas es necesaria para tener repetibilidad en los datos. La función RP es el primer paso para tener una buena repetibilidad ya que es la base de la medición relativa. Por eso, es necesario tener un calibrador o un patrón que permita tener varias referencias, para asegurar que siempre se hace el mismo cero.
- Se necesita de utilajes rígidos y que permitan una colocación única de los brazos en ellos para tener resultados repetibles. La deformación o el movimiento de los utilajes causan grandes errores.
- Es un prototipo que es viable para la verificación volumétrica en MH.

Además, después de la realización del proyecto, se quedan temas abiertos que pueden llegar a ser líneas de investigaciones futuras como son los siguientes:

- Realizar ensayos de reproducibilidad permitiría conocer como replicaría la medida cuando lo utilizan los usuarios.
- Repetir los ensayos en otras máquinas herramienta permitiría ver cómo cambia la adaptabilidad que tiene el sistema de medición.
- Rediseñar o rigidizar la estrella para evitar los errores de medición y así tener un utilaje universal de medición para estandarizar los ensayos.
- Para concluir, el fin de estos prototipos, el estudio de una nube de puntos para la verificación volumétrica.

## Bibliografía

- [1] J. P. Bazán, *Diseño de utilajes para un sistema de medición de longitudes para la verificación volumétrica de máquinas-herramientas y simulación del comportamiento del conjunto*, Universidad de Zaragoza, 2019-2020.
- [2] J. I. B. Pérez, *Desarrollo de un brazo telescopico de fibra de carbono para verificación volumétrica de máquina herramienta*, Universidad de Zaragoza, 2020.
- [3] «Attocube IDS 3010,» [En línea]. Available: [https://www.attocube.com/application/files/7115/5360/4707/IDS3010\\_brochure.pdf](https://www.attocube.com/application/files/7115/5360/4707/IDS3010_brochure.pdf). [Último acceso: Septiembre 2021].
- [4] tp-link, «Switch de Sobremesa de 5 Puertos Gigabit con 4 puertos PoE TL-SG1005P,» [En línea]. Available: <https://www.dmi.es/tplink/producto/switch-de-sobremesa-de-5-puertos-gigabit-con-4-puertos-poe-tl-sg1005p/>. [Último acceso: Octubre 2021].
- [5] Attocube Wittenstein group , «Displacement measuring interferometer,» [En línea]. Available: <https://www.attocube.com/en/products/láser-displacement-sensor/displacement-measuring-interferometer>. [Último acceso: Septiembre 2021].
- [6] Attocube Wittenstein group, «User Manual IDS3010 v1.5.3,» 2018.
- [7] M. H. Torres, *Diseño y desarrollo del calibrador de un sistema de guiado telescopico para verificación volumétrica de máquina herramienta*, Universidad de Zaragoza, 2018.
- [8] M. C. Panait, *Diseño de sistema de anclaje para equipo telescopico de verificación volumétrica de maquina herramienta*, Universidad de Zaragoza, 2020.
- [9] I+D electrónica, «Tuerca en T deslizante,» [En línea]. Available: <https://www.didacticaselectronicas.com/index.php/cnc-e-impresoras-3d/tuercas-y-tornillos/tuercas-tipo-t/tuerca-en-t-deslizante-para-perfil-ob4040,-m8,-20mm-x-20mm-tc-gb40x8mm-tuercas-tipo-t-m8-deslizantes-corredizas-para-perfiles-de-aluminio-ob40-detail>. [Último acceso: Noviembre 2021].
- [10] Siemens, «Solid Edge,» [En línea]. Available: <https://solidedge.siemens.com/es/solutions/products/complete-product-development-portfolio/solid-edge-2022/>. [Último acceso: Octubre 2021].
- [11] Ultimaker, «Ultimaker Cura,» [En línea]. Available: <https://ultimaker.com/es/software/ultimaker-cura>. [Último acceso: Octubre 2021].
- [12] Renishaw, «Sistema láser XL-80,» [En línea]. Available: <https://www.renishaw.es/es/sistema-láser-xl-80--8268>.

## Anexos

## Anexo I: Resultados de ensayos en laboratorio

	Distancia [mm]	T <sup>a</sup> [°C]	Calidad señal [%]
1	606.884	21.383	441
2	606.883	21.460	447
3	606.879	21.495	454
4	606.880	21.559	456
5	606.877	21.589	449
6	606.883	21.606	446
7	606.882	21.621	446
8	606.885	21.632	448
9	606.885	21.649	444
10	606.886	21.658	445
Rango	0.00845	0.275	15
Promedio	606.882	21.565	447.6

Tabla 16. Resultados de medición sin manipulación en absolutas

	Distancia [mm]	T <sup>a</sup> [°C]	Calidad señal [%]
1	4.9938E-06	23.209	452
2	-6.9058E-06	23.225	452
3	2.96085E-06	23.234	452
4	-7.8514E-06	23.244	452
5	-8.6743E-06	23.251	452
6	-7.78565E-06	23.263	452
7	3.97635E-06	23.270	452
8	1.61515E-06	23.285	452
9	-2.22905E-06	23.297	452
10	9.5805E-07	23.315	452
11	3.3794E-06	23.335	452
12	8.82835E-06	23.356	452
Rango	1.75E-05	0.146	0
Promedio	-5.61E-07	23.274	452

Tabla 17. Resultados de medición sin manipulación en relativas

## MEDIDAS ABSOLUTAS

	Medida pre R [mm]	T <sup>a</sup> pre R[°C]	Calidad señal pre R [%]	Medida tras R[mm]	T <sup>a</sup> tras R[°C]	Calidad señal tras R [%]
1	606.8767	21.7353	446	606.8745	21.7611	435
2	606.8745	21.7697	435	606.8716	21.7869	443
3	606.8776	21.7895	450	606.8890	21.8020	431
4	606.8846	21.8093	442	606.8840	21.8213	435
5	606.8779	21.8213	443	606.8767	21.8299	457
6	606.8780	21.8299	457	606.8776	21.8385	446
7	606.8788	21.8471	452	606.8814	21.8518	441
8	606.8798	21.8557	450	606.8849	21.9159	421
9	606.8821	21.9017	424	606.8783	21.9846	436
10	606.8816	21.9502	433	606.8825	21.9799	427

Rango	0.01011753	0.21492	33	0.01738	0.22349	36
Media	606.8791595	21.8309668	443.2	606.8800525	21.8571845	437.2

Tabla 18. Resultados medición con pérdida de señal sin cambio de posición de medición en absolutas

## MEDIDAS RELATIVAS

	Medida pre R [mm]	T <sup>a</sup> pre R[°C]	Calidad señal pre R [%]	Medida tras R[mm]	T <sup>a</sup> tras R[°C]	Calidad señal tras R [%]
1	-1.39E-06	21.95	442	3.66E-03	21.9674	441
2	3.22E-06	21.99	443	-4.56E-03	22.0104	448
3	1.55E-06	22.03	455	6.41E-04	22.0396	463
4	1.42E-05	22.03	474	-1.48E-03	22.0362	467
5	5.67E-06	22.04	473	-1.97E-03	22.0448	468
6	-1.75E-06	22.04	440	2.44E-03	22.0534	461
7	1.13E-05	22.04	479	1.85E-03	22.0619	461
8	-4.52E-06	22.06	465	-3.88E-03	22.0705	445
9	5.45E-06	22.06	471	2.67E-04	22.0791	453
10	7.98E-06	22.07	455	3.66E-03	22.0877	458
11	3.59E-05	22.08	459	-4.80E-04	22.0963	457

Rango	4.04E-05	0.13	39	0.008	0.1289	27
Media	7.05E-06	22.04	459.64	1.32E-5	22.0497	456.5455

Tabla 19. Resultados medición con pérdida de señal sin cambio de posición de medición en relativas

## MEDIDAS ABSOLUTAS

	Medida pre R [mm]	T <sup>a</sup> pre R[°C]	Calidad señal pre R [%]	Medida tras R[mm]	T <sup>a</sup> tras R[°C]	Calidad señal tras R [%]
1	606.8847	22.8688	438	606.8917	22.8774	439
2	606.8914	22.8907	448	606.8870	19.4676	386
3	606.8931	22.9117	463	606.8932	22.9117	451
4	606.8842	22.9035	461	606.8868	22.9100	445
5	606.8923	22.6853	446	606.8870	22.4905	453
6	606.8953	21.9425	454	607.1865	21.7349	446
7	606.8894	21.0745	456	606.8939	20.9362	453
8	606.8954	20.8488	463	606.8940	20.9048	457
9	606.8943	21.1322	463	606.8965	19.0869	399
10	606.8942	21.4528	457	606.8933	21.5552	450

Rango	0.011144548	2.06291	25	0.2998	3.824821	71
Media	606.8914036	22.0710751	454.9	606.9209928	21.48751445	437.9

Tabla 20. . Resultados medición con pérdida de señal con cambio de posición de medición en absolutas

## MEDIDAS RELATIVAS

	Medida pre R [mm]	T <sup>a</sup> pre R[°C]	Calidad señal pre R [%]	Medida tras R[mm]	T <sup>a</sup> tras R[°C]	Calidad señal tras R [%]
1	1.24E-06	22.0963	463	-0.0006	22.0946	464
2	1.52E-05	22.0791	476	-0.0134	22.0791	470
3	1.35E-05	22.0791	479	0.0030	22.0838	479
4	1.00E-05	22.0877	487	0.0005	22.0791	461
5	2.72E-05	21.8007	471	-0.0004	21.6128	469
6	5.93E-05	21.0473	472	0.0052	20.8652	452
7	3.84E-05	20.4794	463	0.0010	20.3070	462
8	2.75E-05	20.3315	465	-0.0006	20.3574	467
9	2.92E-05	20.6084	466	-0.0008	20.6597	443
10	1.50E-06	20.8858	450	-0.0040	20.9423	450
11	2.80E-08	21.1111	456	-0.0054	21.1503	444

Rango	5.8068E-05	1.76479	37	0.01852126	1.7876335	36
Media	2.2307E-05	21.3495402	469.2	-0.00100996	21.3080861	461.7

Tabla 21. Resultados medición con pérdida de señal con cambio de posición de medición en relativas

	REF [mm]	Pos 1 [mm]	L [mm]
1	7.54049E-05	-85.3091	85.3092
2	4.00905E-05	-85.3072	85.3073
3	6.30729E-05	-85.3066	85.3066
4	2.79461E-05	-85.3082	85.3082
5	9.01096E-05	-85.3075	85.3076
6	0.000110425	-85.3057	85.3058
8	8.8406E-05	-85.3089	85.3090
9	6.50403E-05	-85.3083	85.3084
10	5.08648E-05	-85.3085	85.3086
11	4.49744E-05	-85.3085	85.3085

Rango	8.24787E-05	0.0034	0.0033
Promedio	6.56334E-05	-85.3079	85.3079

Tabla 22. Resultado de medición de L con una opción RP y mov manual

	REF [mm]	Pos 1 [mm]	ΔL [mm]
1	6.7992E-06	-85.3116	85.3116
2	-0.0010	-85.3102	85.3092
3	0.0006	-85.3107	85.3113
4	-0.0028	-85.3110	85.3083
5	-0.0030	-85.3098	85.3068
7	-0.0002	-85.3079	85.3077
8	-0.0034	-85.3113	85.3079
9	-0.0017	-85.3086	85.3068
10	-0.0017	-85.3097	85.3080
12	0.0001	-85.3114	85.3115
13	-0.0022	-85.3121	85.3099

Rango	0.0040	0.0042	0.0048
Promedio	-0.0014	-85.3104	85.3090

Tabla 23. Resultado de medición de L reseteo de la opción RP y mov manual

	REF [mm]	Pos 1 [mm]	L [mm]
1	5.38E-06	-85.3059	85.3059
2	6.35E-05	-85.3072	85.3073
3	-1.45E-03	-85.3067	85.3052
4	-1.17E-03	-85.3058	85.3046
5	1.21E-04	-85.3057	85.3058
6	-9.99E-05	-85.3061	85.3060
7	-2.34E-04	-85.3048	85.3046
8	-1.98E-04	-85.3069	85.3067
9	-2.80E-04	-85.3072	85.3070
10	-7.42E-04	-85.3064	85.3056
11	4.40E-05	-85.3066	85.3066

Rango	0.00158	0.0024	0.0027
Promedio	-0.00036	-85.3062	85.3059

Tabla 24. Resultado de medición de L con una opción RP y mov esfera

	REF [mm]	Pos 1 [mm]	ΔL [mm]
1	2.80E-04	-85.3038	85.3041
2	1.67E-04	-85.3032	85.3033
3	2.15E-05	-85.3036	85.3036
4	1.99E-05	-85.3029	85.3029
5	1.84E-05	-85.3030	85.3030
6	1.91E-05	-85.3036	85.3036
7	2.01E-05	-85.3037	85.3037
8	1.99E-05	-85.3033	85.3033
9	-5.77E-07	-85.3028	85.3028
10	-1.60E-04	-85.3029	85.3028

Rango	0.0004	0.0010	0.0013
Promedio	4.06E-05	-85.3033	85.3033

Tabla 25. Resultado de medición de L reseteo de la opción RP y mov esfera

## Anexo II: Resultados en ensayos en máquina herramienta

### Repetibilidad en la colocación de un brazo telescopico del Brazo 2

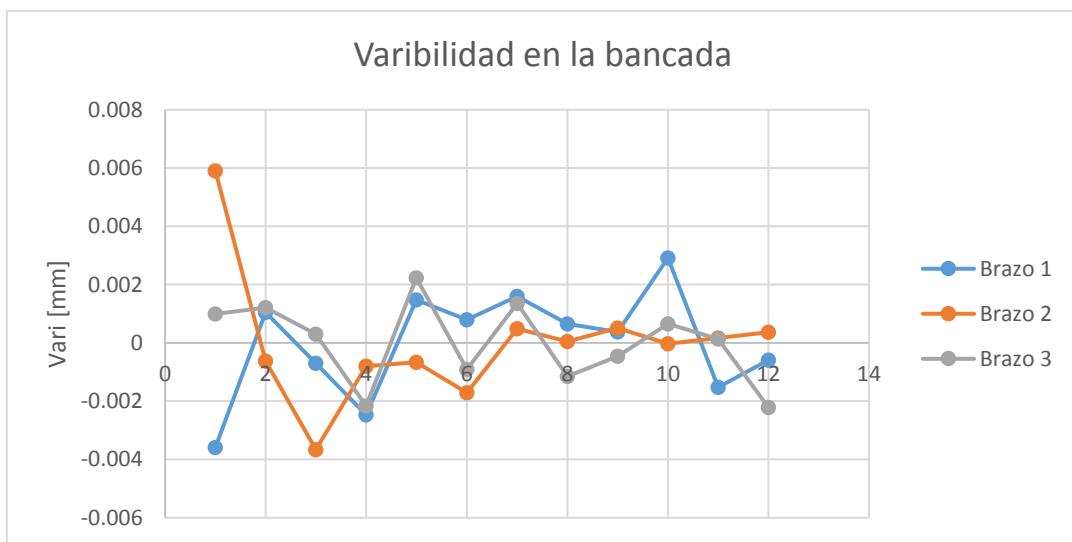


Ilustración 55. Gráfica de la repetibilidad en la colocación de un brazo telescopico del Brazo 2 en bancada

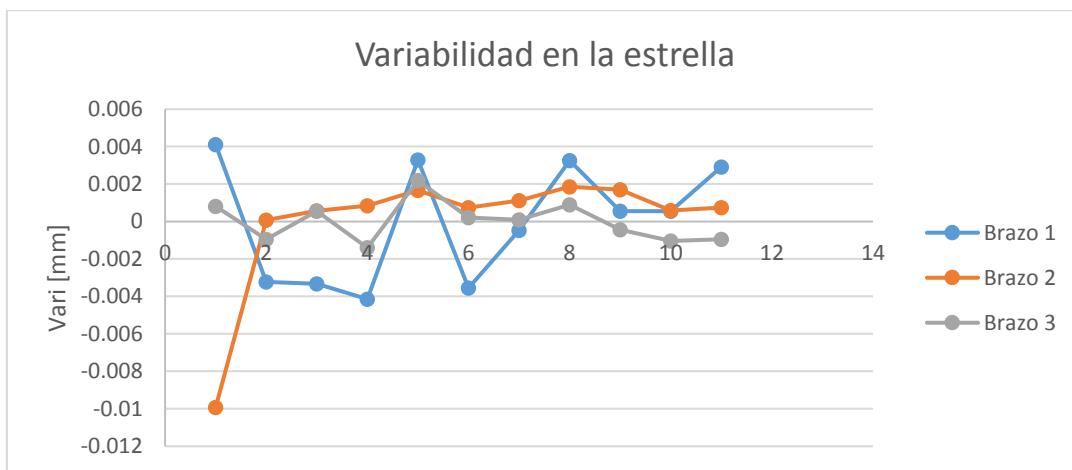


Ilustración 56. Gráfica de la repetibilidad en la colocación de un brazo telescopico del Brazo 2 en estrella

### Repetibilidad en la colocación de un brazo telescopico del Brazo 3

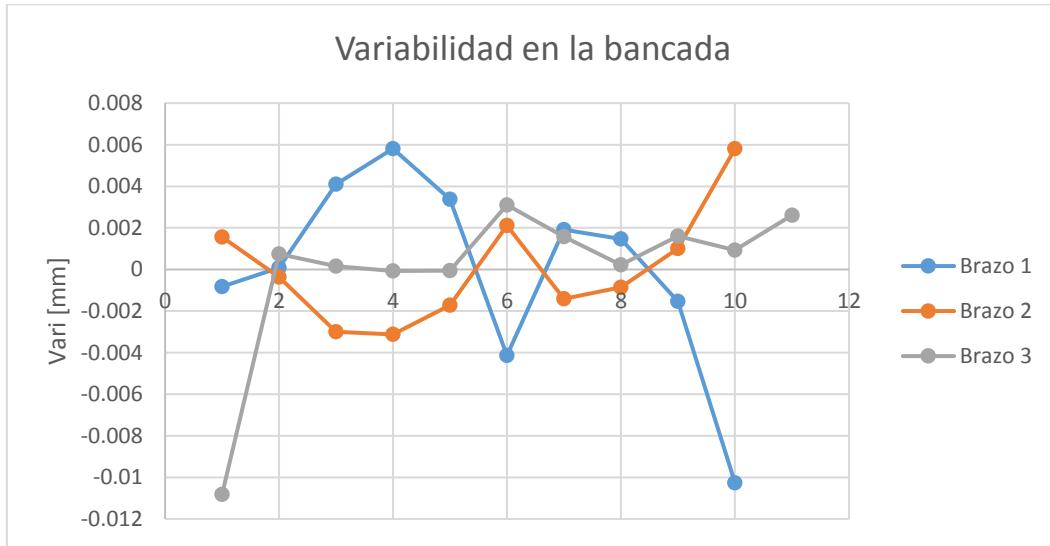


Ilustración 57. Grafica del ensayo de repetibilidad en la colocación de un brazo telescopico del Brazo 3 en bancada

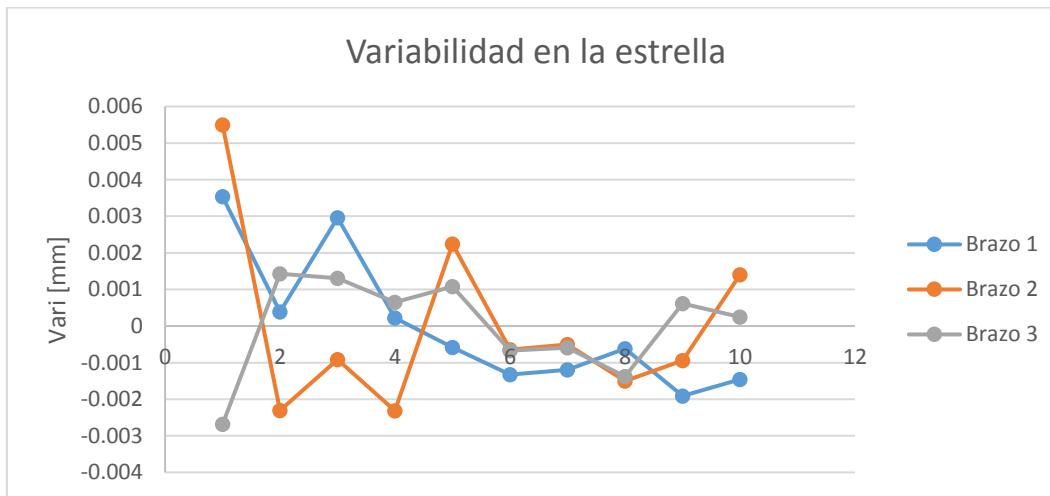


Ilustración 58. Grafica de repetibilidad en la colocación de un brazo telescopico del Brazo 3 en estrella

## Repetibilidad de la colocación en el asiento cinemático en el Brazo 2

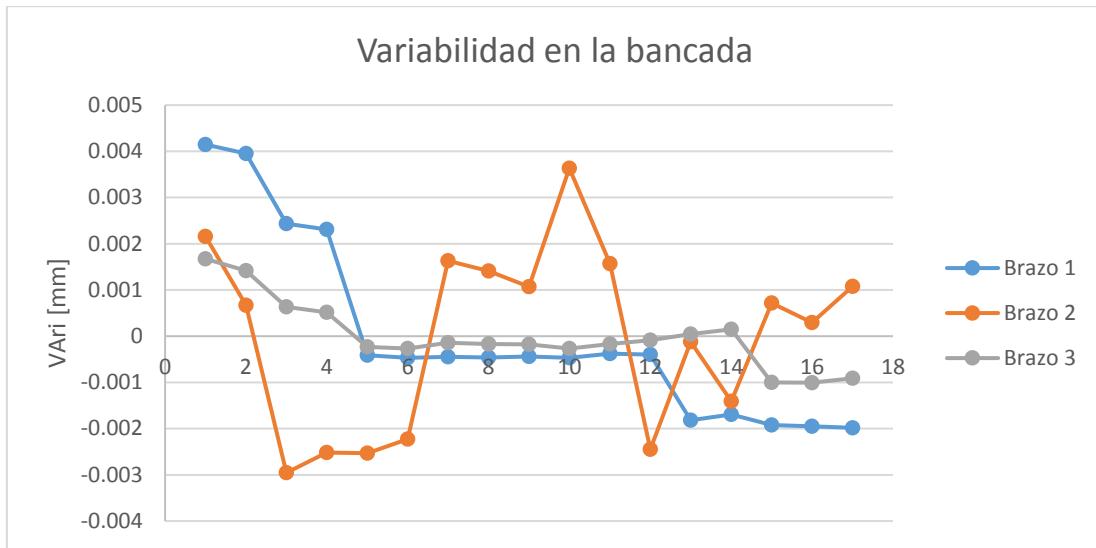


Ilustración 59. Gráfica de repetibilidad de la colocación en el asiento cinemático en el Brazo 2 en bancada

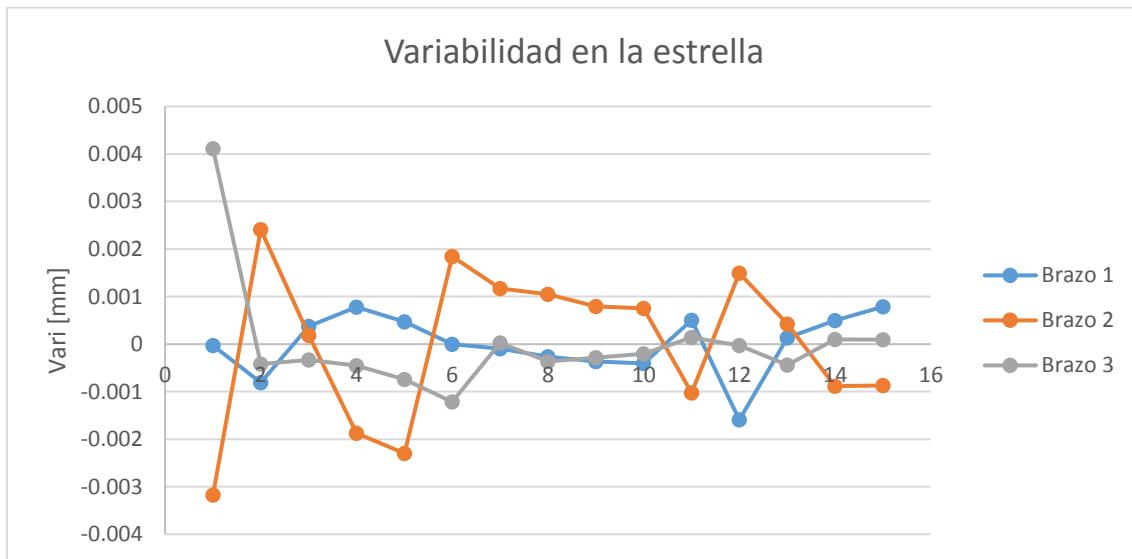


Ilustración 60. Gráfica de repetibilidad de la colocación en el asiento cinemático en el Brazo 2 en estrella

### Repetibilidad de la colocación en el asiento cinemático del Brazo 3

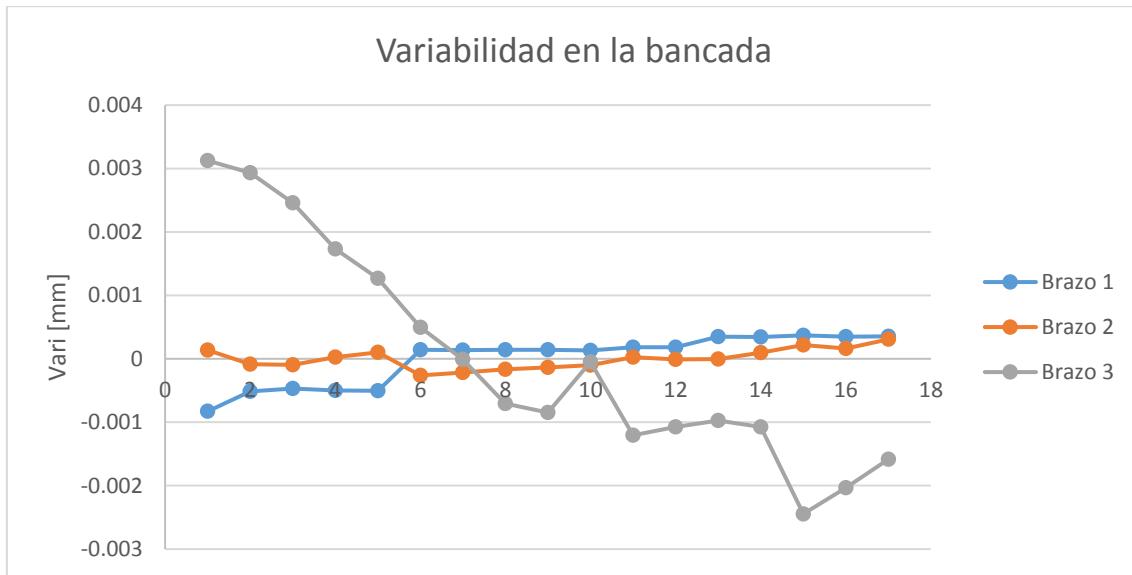


Ilustración 61. Grafica de repetibilidad de la colocación en el asiento cinemático del Brazo 3 en bancada

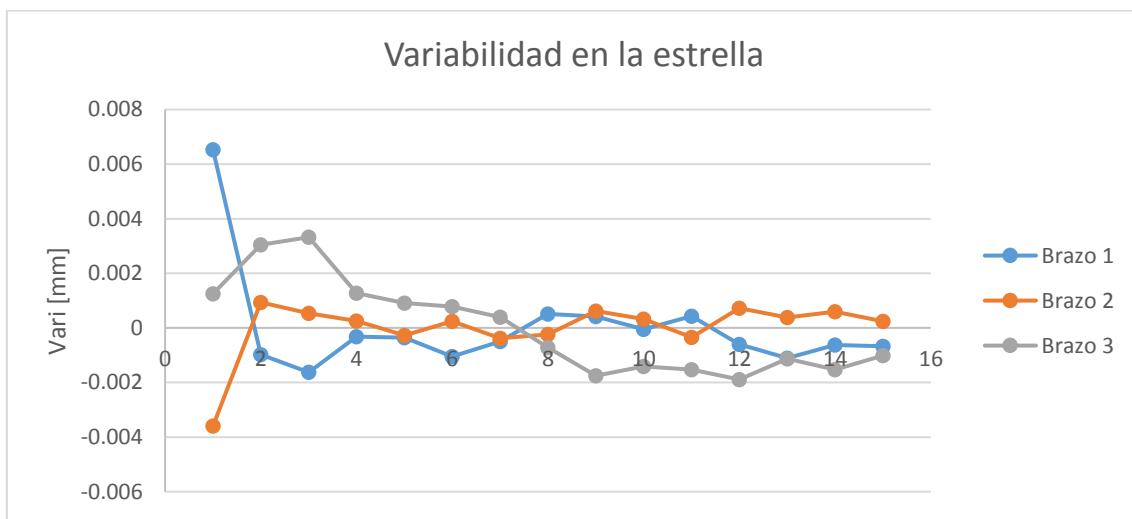


Ilustración 62. Gráfica de Repetibilidad de la colocación en el asiento cinemático del Brazo 3 en estrella

Repetibilidad de la colocación del tridente en la esfera de referencia del Brazo 2

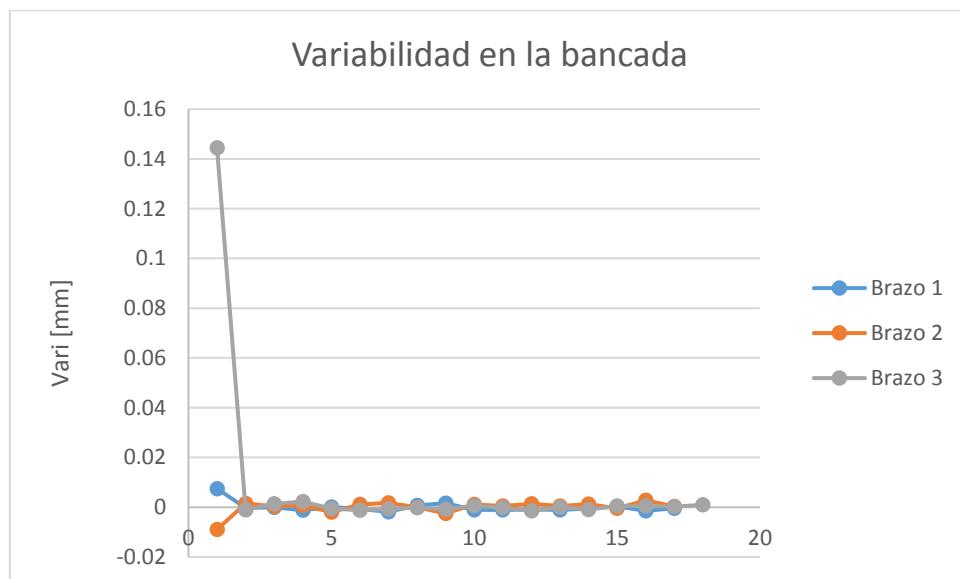


Ilustración 63. Gráfica de repetibilidad de la colocación del tridente en la esfera de referencia del Brazo 2 en bancada

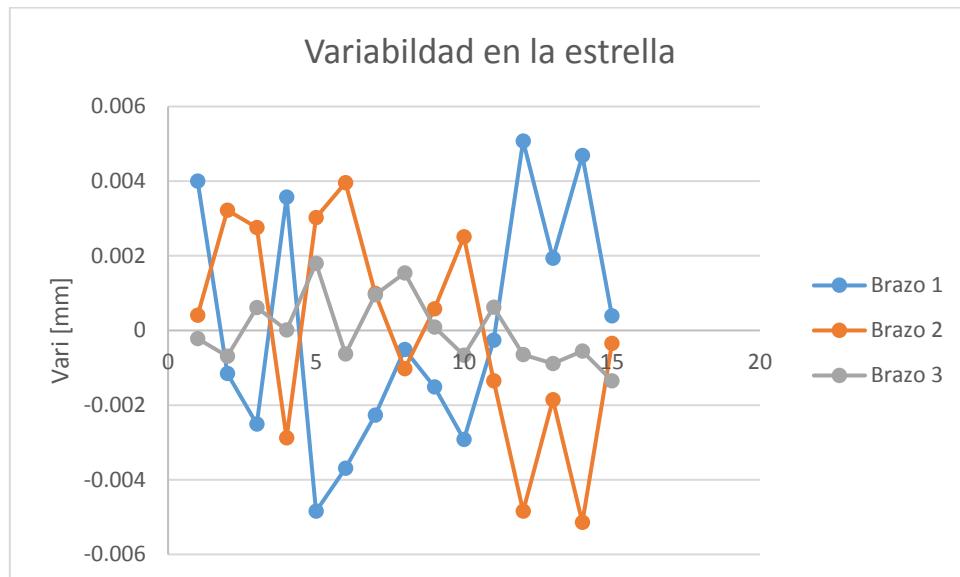


Ilustración 64 Gráfica de repetibilidad de la colocación del tridente en la esfera de referencia del Brazo 2 en estrella

Repetibilidad de la colocación del tridente en la esfera de referencia del Brazo 3

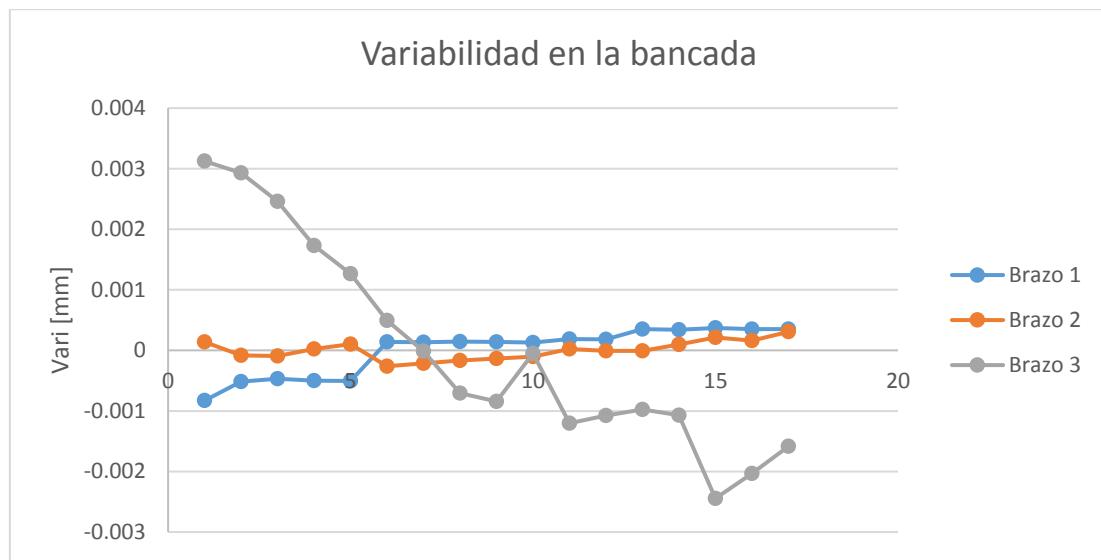


Ilustración 65. Gráfica de repetibilidad de la colocación del tridente en la esfera de referencia del Brazo 3 en bancada

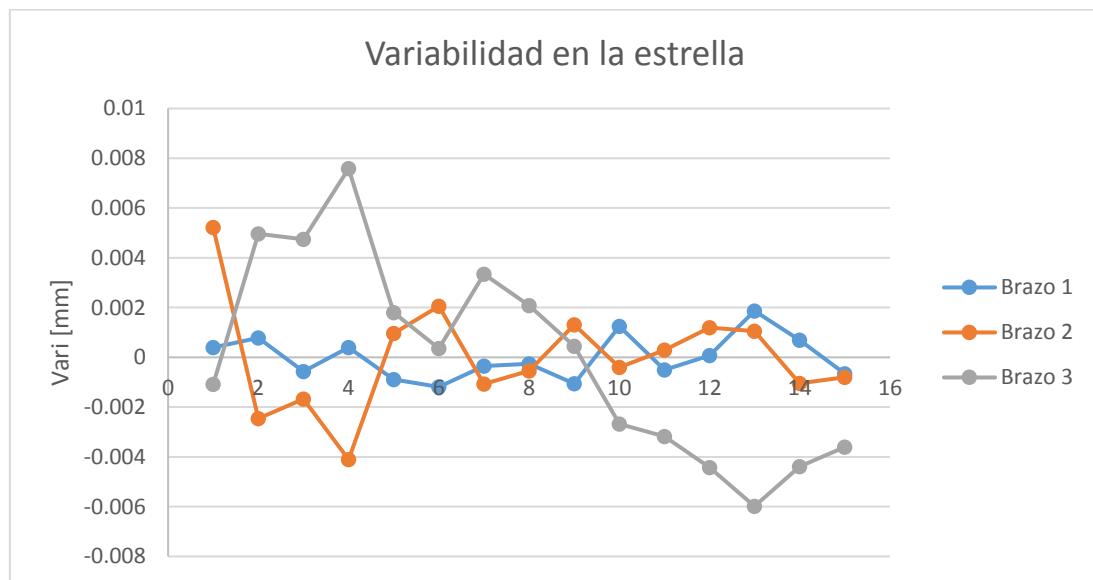


Ilustración 66. Gráfica de repetibilidad de la colocación del tridente en la esfera de referencia del Brazo 3 en estrella