



Universidad
Zaragoza

Trabajo Fin de Máster

OPTIMIZACIÓN DE UN BRAZO TELESCÓPICO
PARA VERIFICACIÓN VOLUMÉTRICA DE
MAQUINA HERRAMIENTA

OPTIMIZATION OF A TELESCOPIC ARM FOR
MACHINE TOOL VOLUMETRIC
VERIFICATION

Autor

Carmen Fernández Manero

Director

Juan José Aguilar Martín

Escuela de Ingeniería y Arquitectura
2018

OPTIMIZACIÓN DE UN BRAZO TELESCÓPICO PARA VERIFICACIÓN VOLUMÉTRICA DE MAQUINA HERRAMIENTA

RESUMEN

Este Trabajo Fin de Grado “OPTIMIZACIÓN DE UN BRAZO TELESCÓPICO PARA VERIFICACIÓN VOLUMÉTRICA DE MAQUINA HERRAMIENTA” se sitúa enmarcado dentro del Área de Ingeniería de los Procesos de Fabricación de la Escuela de Ingeniería y Arquitectura de la Universidad de Zaragoza y ha sido dirigido por el Dr. Juan José Aguilar Martín.

Se encuentra dentro del proyecto de la escuela DESARROLLO DE UN INSTRUMENTO TELESCÓPICO DE ALTA PRECISIÓN BASADO EN MULTILATERACIÓN LÁSER SIMULTÁNEA PARA VERIFICACIÓN DE SISTEMAS PRODUCTIVOS (DPI2017-90106-R), aprobado en este año 2018.

Partiendo de la necesidad ya presentada en anteriores trabajos de la escuela, en el sector productivo es necesario incorporar sistemas de verificación de las máquinas herramienta que simplifiquen las tareas involucradas y mejoren la precisión de las piezas mecanizadas.

Es por esta razón que resulta un proyecto de interés para el Departamento de Diseño y Fabricación de la Universidad de Zaragoza, el realizar una continuación del estudio del diseño y desarrollo un sistema de guiado telescópico para la verificación volumétrica de máquina herramienta pequeña y mediana, que ha de trabajar de forma similar al Laser Tracer pero de forma simultánea para reducir los tiempos de medición.

Partiendo de hipótesis y sistemas planteados anteriormente en el trabajo “Diseño y desarrollo de un brazo telescópico para verificación volumétrica de máquina herramienta” se han planteado unas primeras opciones para la realización de un prototipo completo y sistemas de unión entre los distintos elementos que lo conforman. Para la realización del diseño se ha utilizado la herramienta Solid Edge, y para la realización de las pruebas de los tridentes las impresoras 3D disponibles en el departamento. Algunos de los elementos de compra ya han sido comprados y se han realizado pequeñas pruebas.

(Este documento debe acompañar al Trabajo Fin de Grado (TFG)/Trabajo Fin de Máster (TFM) cuando sea depositado para su evaluación).

D./Dña. CARMEN FERNÁNDEZ MANERO

con nº de DNI 73159754C en aplicación de lo dispuesto en el art.

14 (Derechos de autor) del Acuerdo de 11 de septiembre de 2014, del Consejo de Gobierno, por el que se aprueba el Reglamento de los TFG y TFM de la Universidad de Zaragoza,

Declaro que el presente Trabajo de Fin de (Grado/Máster)
MÁSTER, (Título del Trabajo)

OPTIMIZACIÓN DE UN BRAZO TELESCÓPICO PARA VERIFICACIÓN
VOLUMÉTRICA DE MAQUINA HERRAMIENTA

es de mi autoría y es original, no habiéndose utilizado fuente sin ser citada debidamente.

Zaragoza, 23 de Noviembre de 2018



Fdo: Carmen Fernández Manero

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN	6
1.1. Problemática	6
1.2. Objeto y alcance.....	7
2. ESTADO DEL ARTE.....	8
3. SELECCIÓN DE LÁSER Y REFLECTOR	14
4. DEFINICIÓN DE ESTRUCTURA EXTENSIBLE	17
5. DESARROLLO DE SISTEMAS ESPECIALES	20
5.1. Desarrollo de costillas.....	20
5.2. Desarrollo de sistema elástico.....	24
5.3. Desarrollo de uniones	28
5.4. Desarrollo de tridentes	30
6. CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO.....	39
Referencias	41
ANEXO A	
ANEXO B	
ANEXO C	

Ilustración 1. Laser Tracer MT (ETALON)	6
Ilustración 2. Descripción del Laser Tracer MT.....	6
Ilustración 3. Esquema del sistema Laser Tracer.	10
Ilustración 4. Laser Tracer-NG, ETALON.....	10
Ilustración 5. Esquema láser Tracer	11
Ilustración 6. Interferómetro láser - Funcionamiento.....	11
Ilustración 7. Interferómetro laser XL-80 Renishaw.....	12
Ilustración 8. Ball-Bar telescópico	13
Ilustración 9. Renishaw RLD10 0° Detector Head.....	14
Ilustración 10. Dimensiones del Renishaw RLD10 0°	15
Ilustración 11. SIOS SP-5000 NG.....	15
Ilustración 12. Características técnicas SIOS SP-5000 NG	15
Ilustración 13. Reflector BGR-6.35 Newport.....	16
Ilustración 14. Relector 50326-0505 Newport	16
Ilustración 15. Reflector recomendado para Láser SIOS SP-5000 NG.....	16
Ilustración 16. Sistema telescópico de un solo eje	17
Ilustración 17. Sistema telescópico de tres ejes.....	18
Ilustración 18. Posición del láser.....	19
Ilustración 19. Sistema elástico con tridente	19
Ilustración 20. Costilla (primera versión) con láser centrado en posición favorable al peso.....	20
Ilustración 21. Costilla (primera versión) con láser centrado en posición desfavorable a peso.....	20
Ilustración 22. Incremento de diámetro necesario para colocación de láser a favor de peso.....	21
Ilustración 23. Agujero pasante para tornillo-tuerca M2.....	21
Ilustración 24. Costilla (segunda versión)	22
Ilustración 25. Agujero roscado para tornillo M2	22
Ilustración 26. Costilla (tercera versión)	22
Ilustración 27. Agujero roscado para tornillo M3	22
Ilustración 28. Sistema elástico	24
Ilustración 29. Eje exterior mecanizado	25
Ilustración 30. Roscado parte inferior eje exterior	25
Ilustración 31. Rodamientos tipo LBBR SFK.....	25
Ilustración 32. Muelle superior e inferior.....	26
Ilustración 33. Anillo de sujeción.....	26
Ilustración 34. Tapón alineación muelle.....	27
Ilustración 35. Tapón para costilla inicial- sistema elástico.....	28
Ilustración 36. Unión para costilla inicial-sistema elástico + registro tapón muelle.....	28
Ilustración 37. Copa magnética	29
Ilustración 38. Tapón costilla final-Bola mesa MH	29
Ilustración 39. Unión costilla final-Bola mesa MH.....	29
Ilustración 40. Tridente - Primera versión.....	31
Ilustración 41. Componentes tridente primera versión.....	31
Ilustración 42. Colisiones primer prototipo tridente.....	31
Ilustración 43. Tridente - Segunda versión - Tres alturas de tridente.....	32
Ilustración 44. Colisiones segundo prototipo tridentes tres alturas	32
Ilustración 45. Tridente - Tercera versión	32
Ilustración 46. Criterios de diseño para facilitar encaje de tridentes.....	33
Ilustración 47. Tridente - Prototipo cuarto	33

Ilustración 48. Características prototipo cuarto tridente.....	34
Ilustración 49. Tridente - Prototipo Quinto - Reducida anchura dedos en la base	34
Ilustración 50. Tridente - Prototipo Sexto - Reducida anchura y espesor dedo en la base	34
Ilustración 51. Prototipo sexto impresión 3D.....	35
Ilustración 52. Tridentes - Prototipos del séptimo al décimo	35
Ilustración 53. Tridente final- Prototipo seleccionado	37
Ilustración 54. Opciones de desviador interior y exterior para favorecer el giro	38
Ilustración 55. Mejores tridentes impresos en Objet 3D	38
Ilustración 56. Peso estimado estructura en material acero.....	39
Ilustración 57. Tubos capilares	39

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Problemática

En el sector productivo es necesario incorporar sistemas de verificación de las máquinas herramienta que permitan simplificar las tareas involucradas y mejorar la precisión de las piezas mecanizadas. En este proyecto se plantea la necesidad de calibrar una máquina-herramienta de cinco ejes.

Utilizando equipos de medición convencionales, la determinación de las desviaciones geométricas de una máquina de 5 ejes requiere grandes esfuerzos, pudiendo demorar el proceso varios días.

Después de que el sistema activo Laser Tracer estableciera nuevos estándares en la calibración de máquinas, algunos fabricantes como ETALON están empezando a ampliar su gama de productos con una versión pasiva del Laser Tracer. Se tratan de diseños sofisticados que hacen uso de un método de guía de interferómetro láser, consiguiendo así crear nuevos sistemas de tamaño y peso reducidos. Se puede ver una sencilla representación de su composición a continuación:



Ilustración 1. Laser Tracer MT (ETALON)

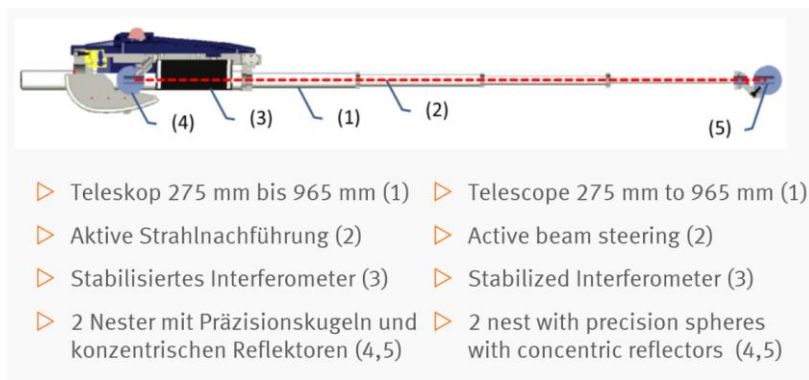


Ilustración 2. Descripción del Laser Tracer MT

Partiendo de una idea similar a este sistema, pero adaptándolo a los recursos del proyecto vigente, en este proyecto se busca continuar desarrollando el diseño de un sistema telescópico de seguimiento automático que, junto con una técnica similar al Láser Tracer., facilite y agilice el proceso de verificación. El LaserTracer-MT es guiado mecánicamente por juntas esféricas altamente precisas y etapas con un deslizamiento muy suave. También hace uso de un método de guía de haz metrológico del interferómetro laser. [1]

La principal función de este brazo telescópico será guiar al láser y facilitar la medición de las distancias recorridas por el cabezal de la máquina, favoreciendo la comprobación de los errores y acelerando el proceso de mejora de la precisión en la máquina. [2]

1.2. Objeto y alcance

El objetivo de este trabajo de fin de máster es plantear mejoras en el diseño de un sistema de guiado telescópico para medición de distancias que pueda ser utilizado para la verificación volumétrica de máquinas herramienta pequeñas y medianas. En el sector productivo es necesario incorporar sistemas de verificación de las máquinas herramienta que simplifiquen las tareas involucradas y mejoren la precisión de las piezas mecanizadas. El sistema ha de trabajar se forma similar al Laser Tracer pero de forma simultánea para reducir los tiempos de medición.

La prioridad es buscar un diseño robusto donde el parámetro más importante para la toma de decisiones es la variable de la rigidez, de modo que se obtenga como resultado un sistema con la mayor precisión en la medida.

El estudio se ha planteado en diferentes fases, partiendo siempre de las hipótesis y sistemas planteados en el trabajo anteriormente citado. [2]

En primer lugar se ha realizado una selección de materiales y configuraciones comerciales, los cuales van a formar gran parte de la estructura estándar del prototipo.

En segundo lugar se han realizado los elementos que requerían de un diseño y desarrollo en 3D, para posteriormente poder ser fabricados en el taller.

Se pueden dividir estos elementos que requieren diseño en 3D en dos grupos, por un lado aquellos que formarán parte de la estructura del brazo, y por otro el tridente, el cual se ha estudiado más en profundidad para buscar un sistema lo más adecuado posible a las necesidades que posteriormente se detallaran. A todos los elementos incluidos en este segundo grupo se les ha aplicado un estudio de simulación en desplazamientos para asegurar su funcionamiento, ya que se trata de uno de los sistemas más críticos en este punto del proyecto.

A partir de este punto se ha realizado una selección de los componentes más adecuados, y prototipado las mejores propuestas de tridentes para poder realizar alguna prueba de colisiones.

2. ESTADO DEL ARTE

La evolución de las exigencias de la industria moderna hace que día a día se presente una tendencia hacia medios productivos más flexibles y precisos. La búsqueda de precisión se traduce en que el resultado final cumpla con las condiciones y propiedades que se imponen en el diseño. Por ello, se buscan máquinas cuyas principales capacidades estén basadas en un rendimiento lo más elevado posible.

Sin conocer el estado y el rendimiento de las máquinas no se podría llegar a detectar rápidamente cualquier tipo de problemas mecánicos o eléctricos para poder solucionarlos lo antes posible.

Verificando las máquinas se puede [3]:

1. **Mejorar la precisión de mecanizado.**
Analizando y corrigiendo la precisión, se pueden lograr unos mecanizados más precisos y con una mejor calidad global.
2. **Minimizar el desperdicio de material.**
Al tener la máquina verificada se evitan rechazos, problemas de imagen y de plazos de entrega.
3. **Conseguir pedidos de mecanizado.**
Los gráficos de calibración actualizados, son pruebas fiables de que se pueden realizar trabajos de precisión y calidad.
4. **Cumplir la norma ISO 9000.**
La norma de calidad ISO 9000 requiere que los equipos de fabricación e inspección sean calibrados, monitorizados y controlados.
5. **Conocer el rendimiento real de máquina.**
Se podrán clasificar según sus capacidades de mecanizado. Esto ayudará a asignar trabajos con tolerancias específicas, a máquinas capaces de cumplir estas tolerancias.
6. **Alargar la vida útil de máquina.**
Cierta tipo de errores de máquina pueden producir un excesivo desgaste en el sistema de transmisión y sistema de guías de la máquina. Al localizar y eliminar estos errores en una etapa temprana, puede alargar la vida útil de la máquina.
7. **Minimizar el tiempo muerto de las máquinas.**
Obteniendo una visión detallada de como varía en el tiempo, cada característica del rendimiento de una máquina, es posible prever los trabajos de mantenimiento.
8. **Validar la calidad de una máquina nueva en el momento de la entrega.**
El transporte y la instalación pueden tener un efecto pernicioso sobre la precisión de una máquina. Una comprobación de rendimiento de la máquina inmediatamente después de su entrega, confirma que está preparada para comenzar a trabajar.

En un entorno de alta competitividad en un sector como el de la máquina-herramienta (MH), la precisión y la posibilidad de compensación de los errores es una diferencia competitiva entre fabricantes y usuarios de las mismas, adquiriendo especial relevancia en el mecanizado de precisión.

De las distintas fuentes de error que afectan a la precisión de una máquina-herramienta [4] [5], son los errores geométricos los que mayor contribución realizan al error total de la máquina con un 60-70% del error total [6]. Estos pueden dividirse en errores cuasi-estáticos, causados por la estructura de la máquina, y dinámicos, causados por el movimiento de los husillos o vibraciones de la estructura. Su caracterización y posterior compensación vendrá determinada por la configuración estructural, volumen de trabajo y software de control de cada MH.

Tradicionalmente, la verificación geométrica ha sido ampliamente utilizada en la verificación de MH y máquinas de medir por coordenadas (MMC). Ésta se basa en la caracterización de los errores de cada eje por separado, independientemente del modelo cinemático de la máquina y de su secuencia de movimientos mediante la medición directa de los errores a compensar en unos posiciones determinadas de la máquina [7]. La verificación volumétrica mediante ‘laser Tracer’ (LT) proporciona grandes ventajas frente a la verificación geométrica.

La verificación volumétrica trabaja a partir de la medición del efecto conjunto de los errores geométricos en cada punto a partir del modelo cinemático de la máquina y el movimiento multieje de la misma [8] [9]. Esto se traduce en una reducción significativa del tiempo necesario en la captura de información frente a la verificación geométrica. Del mismo modo, la verificación volumétrica proporciona una corrección homogénea de los errores geométricos en todo el volumen de trabajo de la MH como consecuencia del fuerte desarrollo experimentado en los controles de CN de arquitectura abierta, los cuales permiten una mayor flexibilidad en la aplicación de las funciones de corrección, como son las funciones paramétricas de compensación obtenidas mediante el principio de identificación intensiva de parámetros, base de la verificación volumétrica.

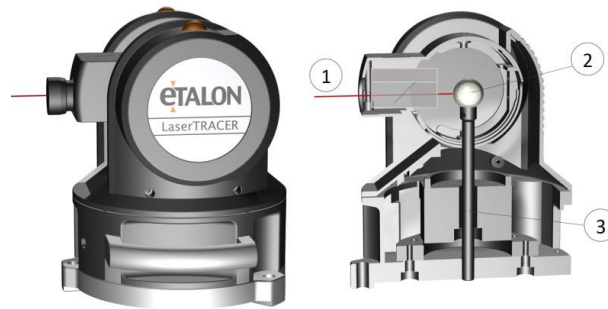
La fuerte demanda de mecanizado de piezas de grandes dimensiones con gran valor añadido, experimentado por el auge de sectores como el aeronáutico, eólico, ferroviario o naval, hacen de la verificación volumétrica mediante LT la técnica idónea de verificación y mejora de precisión en MH de grandes dimensiones, presentando una reducción de tiempo y costes frente a otros métodos de verificación. [10]

A continuación se van a exponer brevemente las técnicas más utilizadas de verificación actuales. Todas estas técnicas son soluciones novedosas, incorporan nuevos procedimientos y permiten reducir tiempos así como aumentar productividad, precisión y fiabilidad en los procesos asociados.

- **Láser Tracer**

El láser Tracer es el sistema a partir del cual se quiere diseñar nuestro sistema. Ha de trabajar de forma similar a él, pero simultáneamente para reducir los tiempos de medición.

Es uno de los instrumentos de seguimiento por interferometría láser que existen actualmente en el mercado.



- (1) Measurement beam with nanometer resolution / Messstrahl mit Nanometer-Auflösung
 (2) Reference sphere with form errors < 50 nm / Referenzkugel mit Formabweichungen < 50 nm
 (3) Low thermal coefficient material stem / Halterung aus Material mit geringer Wärmedehnung

Ilustración 3. Esquema del sistema Laser Tracer.

En el centro del sistema se encuentra la esfera de referencia (2), centro de rotación. Esta esfera sirve como reflector del interferómetro ya que permanece aislada mecánica y térmicamente. Esto hace que las mediciones de la máquina en movimiento sean más estables. La posición es determinada cuando el haz del láser (1) incide sobre el retroreflector al moverse la máquina en una trayectoria predeterminada.

Este método es más rápido que los métodos tradicionales, ya que cuenta con un ciclo de medición adecuado al ensayo de cada máquina herramienta. Con él se determinan todos los errores geométricos de los ejes de la máquina con gran precisión.



Ilustración 4. Laser Tracer-NG, ETALON

Se compone de:

- ✓ Un interferómetro donde se encuentra el origen de coordenadas del sistema.
- ✓ Un medidor absoluto de distancias.
- ✓ Retroreflectores para reflejar el rayo en la misma dirección que el rayo incidente.
- ✓ Un detector de posición que permite “rastrear” al reflector, con dos motores con ejes a 90° que se encargan de reorientar al rayo.
- ✓ Sendos encoders acoplados a los motores anteriores.

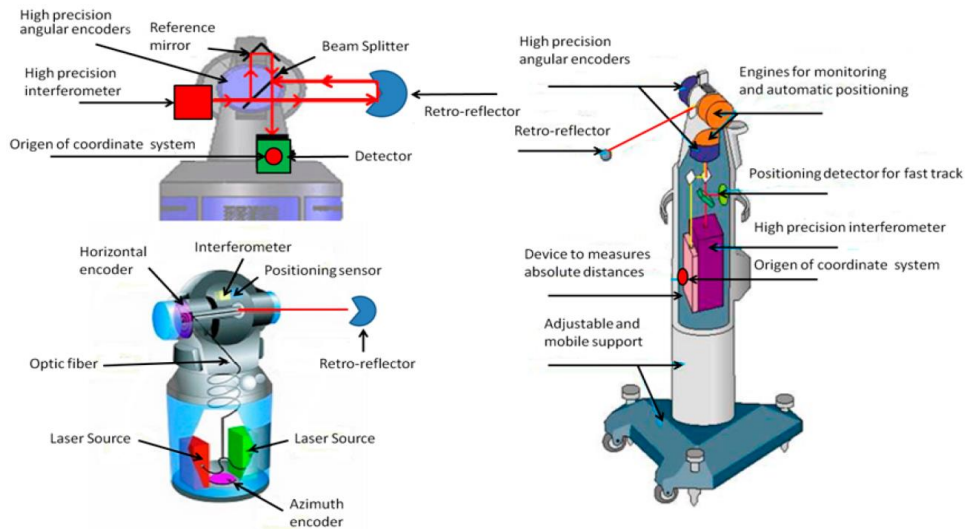


Ilustración 5. Esquema láser Tracer

Una de las principales aplicaciones es la medición de piezas de gran tamaño como, por ejemplo, las del sector aeronáutico. La característica esencial de este sistema es su capacidad de medir en tiempo real la posición del reflector. Por ello, sus ventajas son la capacidad que tiene para recopilar cientos de datos, su versatilidad (pudiendo ser montado en cualquier sitio) y su enorme rango operativo, alcanzando distancias de hasta 80 metros con alta precisión.

- **Láser convencional**

Uno de los mayores cambios en la metrología dimensional es el uso del láser como instrumento de medida. A lo largo de los años esta mejora ha supuesto un avance en láseres para poder ser usados en calibración de máquinas herramientas, llegando a alcanzar las mejores prestaciones de precisión.

El interferómetro láser está basado en el método de interferometría, que consiste en la comparación del haz de luz emitido con el haz de luz reflejado y recibido de nuevo por la cabeza emisora. El rayo emitido es monocromático y conserva su frecuencia y longitud de onda. Al llegar al interferómetro, es dividido en dos partes (un rayo de medición y otro de referencia). Éstos últimos son reflejados en un retroreflector; es decir, en dos lentes ópticas (espejos), una fija (referencia) y otra móvil con la mesa de la máquina. Así, al variar la distancia entre el emisor y la lente reflectora, se puede medir la distancia recorrida como la diferencia entre longitud de ondas.

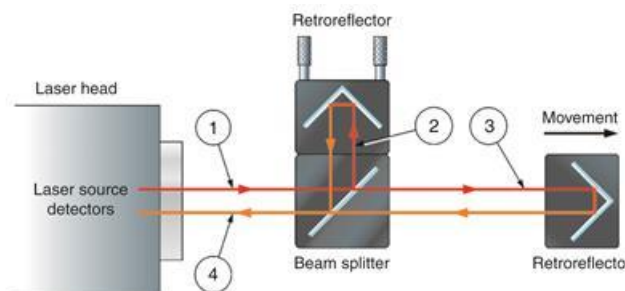


Ilustración 6. Interferómetro láser - Funcionamiento

Es el método más utilizado para determinar los errores geométricos. Se denomina láser de una dimensión porque mide el error de forma discreta en la dirección del eje de movimiento, es decir, es capaz de determinar los errores geométricos de modo independiente e individual. Se trata de un sistema muy preciso, con bajas incertidumbres de medición, aunque factores ambientales como la humedad, presión del aire, temperatura... pueden influir en la longitud de onda del láser y pueden aparecer errores adicionales debidos a las variaciones de esos parámetros.

La mayor desventaja de esta técnica es la larga duración de verificación completa de la máquina y la gran cantidad de tiempo invertida en la alineación del rayo y montaje de las lentes que conllevan el inconveniente de tener que realizar paradas productivas, disminuyendo así el rendimiento del sistema.



Ilustración 7. Interferómetro láser XL-80 Renishaw

- **Láser volumétrico**

La problemática del interferómetro convencional que solo se mueve paralelamente al eje de movimiento y, por lo tanto, necesita al menos tres ensayos diferentes para hallar los errores en los tres ejes, se consigue mejorar con el láser volumétrico.

El láser volumétrico consta de un cabezal láser que genera el rayo y un reflector (lente óptica) que refleja el haz de luz emitida. En este caso, el láser solo tiene una apertura por donde entran tanto el rayo emitido, como el reflejado.

En este método la dirección del láser es espacial, no paralela al eje de movimiento. Así se consigue poder medir los errores de traslación y perpendicularidad de los ejes de la máquina con una única lente. Los errores rotacionales se calculan como con el láser convencional.

Al recorrer con el láser distintos puntos de tres diagonales del volumen de trabajo, se pueden medir los nueve errores de traslación y los tres errores de perpendicularidad. Por lo tanto, son necesarias únicamente dos lentes para poder llegar a medir los 21 errores geométricos, reduciendo el tiempo de verificación con respecto al láser convencional.

- **Ball-bar telescópico**

Este sistema adquiere importancia en los años 80. Permite comparar y analizar el rendimiento de la máquina realizando una comprobación rápida y sencilla del posicionamiento de la máquina mediante ensayos de circularidad.

Con esta técnica se busca:

- ✓ Garantizar la precisión de la maquina
- ✓ Reducir tiempos de inactividad, costes y desechos.
- ✓ Aumentar rendimiento y cumplimiento de estándares de calidad.

El ball-bar está compuesto por una barra telescópica de fibra de carbono con dos bolas de precisión en sus extremos. Dentro de la barra se aloja un sensor lineal telescópico de alta precisión. Las bolas se sitúan sobre montajes magnéticos de precisión (uno ajustable sujeto a la mesa y el otro al husillo/cabezal del husillo de la máquina).



Ilustración 8. Ball-Bar telescópico

Su funcionamiento es sencillo, se miden las variaciones de radio producidas al realizar las trayectorias circulares consecutivas en sentidos contrarios.

En general su uso es complementario al interferómetro láser pero las nuevas versiones como el láser ball bar que incluye un sistema de interferometría dentro de la barra telescópica, facilitan los ensayos. Su mayor inconveniente es su coste elevado.

3. SELECCIÓN DE LÁSER Y REFLECTOR

En primer lugar se deben estudiar las distintas alternativas de medición que se encuentran actualmente presentes en el mercado, de forma competitiva y a las cuales se puede optar en este proyecto, para poder definir todos los parámetros ajustados a las necesidades del mismo.

El principal requerimiento del sistema es la precisión, la cual se debe asegurar con un elemento de medición lo más adecuado para el tipo de sistema que se va a desarrollar.

Selección del Láser:

El estudio del láser se realizó entre dos opciones, por un lado el **Renishaw RLD10 0° Detector Head** [11] y por otro el **SIOS SP-5000 NG** [12].

A continuación se desarrollan brevemente las características de ambos y se podrá encontrar más información técnica en el Anexo A:

Renishaw RLD10 0° Detector Head [11]:

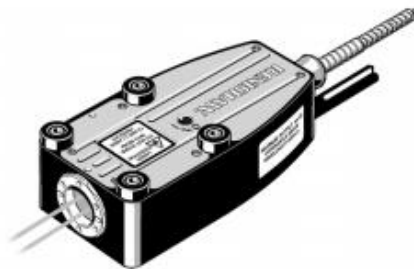


Ilustración 9. Renishaw RLD10 0° Detector Head

El sistema RLE consta de una unidad láser RLU y una o dos cabezales detectores RLD. En este caso se describe el cabezal detector RLD 0°:

- El cabezal detector es el núcleo del sistema de medición óptica. Contiene el interferómetro, óptica de referencia, detector de flecos, obturador láser y direccionada de haz.
- Solo se requiere una óptica adicional en el espejo plano o una configuración basadas en retroreflector.
- El direccionador rotatorio integral de haz permite que los ajustes finales sean hechos para optimizar la alineación del haz.
- La cabeza disipa una energía despreciable (<2 W) y está diseñada para ser térmicamente estable.

Dimensiones generales:

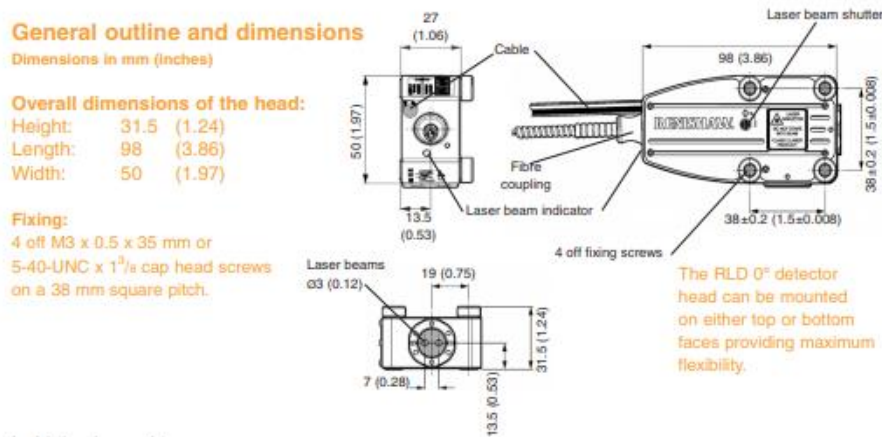


Ilustración 10. Dimensiones del Renishaw RLD10 0°

SIOS SP-5000 NG [12]:



Ilustración 11. SIOS SP-5000 NG

Características:

- Sistema de medición de longitud flexible y ultra preciso.
- Diseño robusto con carcasa a prueba de salpicaduras y forrada.
- Cable de fibra para uso industrial.
- Minimización de errores de alineación.
- Reflectores invariables en inclinación y espejos planos utilizables
- Al medir en espejos planos también es adecuado para posicionamiento x-y.
- Cabezal sensor disponible en aluminio, acero inoxidable o versión invar.
- Interfaz abierta para el software OEM compatible con Windows y Linux.
- Unidad de Electrónica compacta que permite calibración móvil.

Dimensions (L x W x H):	Sensor head with alignment base	[130 x 90 x 58] mm	max. [227 x 90 x 67] mm
	Reflector	Ø 15 mm x 15 mm	[45 x 45 x 50] mm
	Optoelectronic supply and evaluation unit (standard)		[450 x 400 x 150] mm
	Optoelectronic supply and evaluation unit (compact)		[250 x 400 x 150] mm

Ilustración 12. Características técnicas SIOS SP-5000 NG

A pesar de que las dimensiones globales son mayores, la versatilidad y el tamaño de reflectores compatibles con este sistema, además de la diferencia económica que supone utilizar este último, hace que sea el seleccionado para el planteamiento del prototipo.

Selección del reflector:

El principal criterio para la selección ha sido basado en el tamaño, y en la versatilidad a la hora de reorientar el rayo láser.

El seleccionado ha sido el **BGR-6.35 de Newport** [13]:



Ilustración 13. Reflector BGR-6.35 Newport

Otras opciones desestimadas son:



Ilustración 14. Reflector 50326-0505 Newport



Ilustración 15. Reflector recomendado para Láser SIOS SP-5000 NG

4. DEFINICIÓN DE ESTRUCTURA EXTENSIBLE

Una vez seleccionado el sistema de medición que se va a utilizar, el siguiente paso es plantear las distintas opciones de la estructura extensible.

La estructura extensible es aquella que va a permitir la mayor parte de movimientos que sucedan entre el sistema y la máquina herramienta en la que se coloque. Este sistema debe proporcionar los siguientes movimientos:

- Movimiento de traslación: Lo va a proporcionar con el sistema telescópico.
- Movimiento de rotación: El sistema será capaz de rotar en dos ejes.

En primer lugar se estudió el uso de un sistema telescópico con un eje de tubos, de manera que se registrara respecto a la bola de la base de la MH y a la bola de la herramienta mediante el tridente.

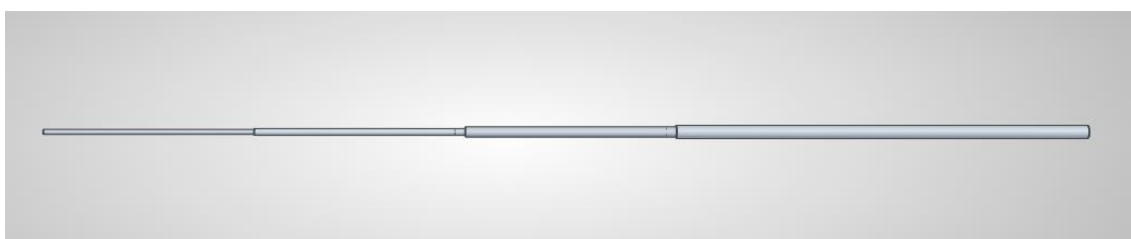


Ilustración 16. Sistema telescópico de un solo eje

Características del sistema:

Tubo aluminio				Casquillo iglidur_W300	
D int	D ext	gap radio	peso (g/m)	D int	D ext
12	14	1	110,27	14	16
16	18	1	144,20	18	20
20	22	1	178,13	22	25
25	28	1,5	337,17	28	31
31	35	2	559,83		

Tabla 1. Componentes seleccionados para sistema telescópico de un solo eje

Densidad (g/cm ³)	2,7
S lado bola(mm)	20
T lado tridente(mm)	50
Lo(mm)	330
Ltramo(mm)	200
nTramos	5
Lmin(mm)	400
Lmax(mm)	1400
Rango mvto(mm)	1000
Peso barras (g)	265,9

Tabla 2. Parámetros del sistema telescópico de un solo eje

La solución de un solo eje de tubo telescópico se desestimó principalmente debido a la selección que se realizó del láser, ya que no se puede integrar en el centro para realizar la medición. Además el peso del sistema, el cual se busca minimizar, resultaba mayor.

Para poder colocar el láser existen unos parámetros mínimos requeridos que se deben de respetar para que pueda colocarse centrado en el sistema. Por esta razón se pasó a plantear un sistema con tres ejes de tubo telescópicos, de manera que el láser se registrara en el centro y el sistema permitiera realizar los movimientos.

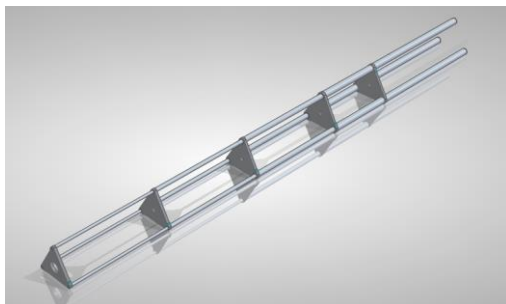


Ilustración 17. Sistema telescópico de tres ejes

Características del sistema:

Tubos de acero capilar disponibles y casquillos compatibles:

Tubo acero capilar				Casquillo ISB SF-1	
D int	D ext	gap radio	peso (g/m)	D int	D ext
1,5	2	0,25	11,00	2	3,5
3,5	4	0,25	23,56	4	5,5
5,5	6	0,25	36,13	6	8
8	9	0,5	106,81	9	12
12	14	1	326,73	14	16
16	18	1	427,26		

Tabla 3. Tubos de acero capilar y casquillos compatibles

Para la selección de los componentes en los tramos que se van a utilizar en el proyecto, para el sistema telescópico se ha realizado una comparativa en la cual se estudia, a partir de los parámetros y las dimensiones seleccionadas para cada tramo de tubo, cuánto es el mayor rango de movimiento que tendrá nuestra estructura, y también al peso que tenga todo nuestro prototipo se tomara la decisión de cuántos tramos se deben de colocar en el mismo:

Densidad (g/cm ³)	8	8	8
S lado bola(mm)	-254	-254	-254
T lado tridente(mm)	183	183	183
Lo(mm)	400	400	400
Ltramo(mm)	300	300	300
nTramos	3	4	5
Lmin(mm)	329	329	329
Lmax(mm)	929	1229	1529
Rango mvto(mm)	600	900	1200
Peso barras (g)	199,81	591,88	1104,58

Tabla 4. Parámetros del sistema telescópico de tres ejes

En vista de estos resultados, el prototipo se realizará con 4 tramos, de manera que, se tendrá un rango de movimiento total de 900 mm y un peso algo inferior a 600 gramos, estas características hacen que el sistema sea óptimo en la relación peso-rango de movimiento.

El láser quedara registrado en el último tramo entre las dos costillas y centrado por el haz de luz.

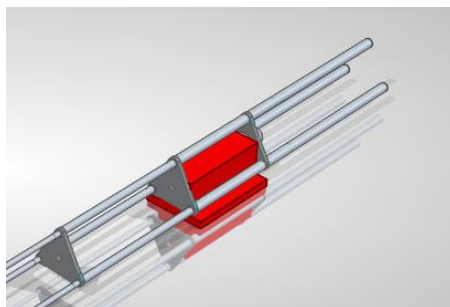


Ilustración 18. Posición del láser

Debido a que se necesitan el mayor número de grados de libertad en el sistema, para facilitar el movimiento y la medición sin colisiones o bloqueos, se pensó en que el último tramo antes del tridente debería ser un sistema que se permita el giro, además de un pequeño desplazamiento.

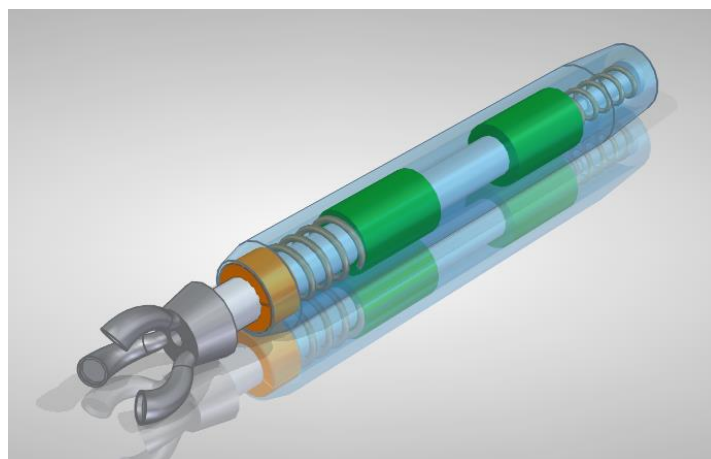


Ilustración 19. Sistema elástico con tridente

Todos estos elementos especiales serán explicados en profundidad en el próximo capítulo del trabajo. En primer lugar se seleccionaron los materiales estándar para conocer los parámetros de diseño necesarios de todos los componentes acondicionados al sistema.

5. DESARROLLO DE SISTEMAS ESPECIALES

5.1. Desarrollo de costillas

El primer elemento especial que se planteó para el desarrollo fue la costilla ya que, debe permitir la colocación del láser en su interior, mientras sustenta los tubos que formarán la estructura extensible, por tanto, es el elemento que va a dar las dimensiones mínimas de nuestro sistema.

Partiendo de las dimensiones del láser, y centrando el haz del láser en el centro del sistema se plantearon varios modelos. Es necesario desarrollar una costilla para cada diámetro de tubo, y además una costilla de cierre que permita realizar el anclaje entre el sistema y la MH.

Al comenzar el estudio del sistema se planteó colocar el láser con la base solidaria a uno de los ejes, de manera que el sistema quedara más equilibrado en pesos, esta primera idea generaba la problemática de que el volumen necesario para la estructura quedaba excesivamente sobredimensionado como se puede ver en las imágenes que se muestran a continuación:

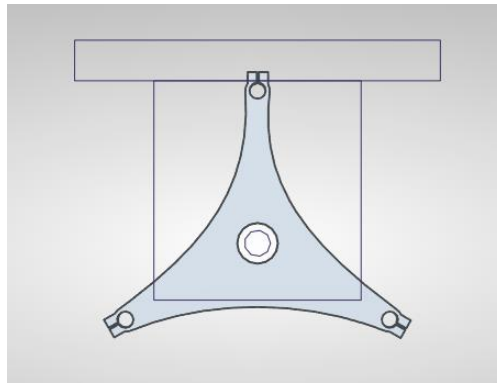


Ilustración 20. Costilla (primera versión) con láser centrado en posición favorable al peso

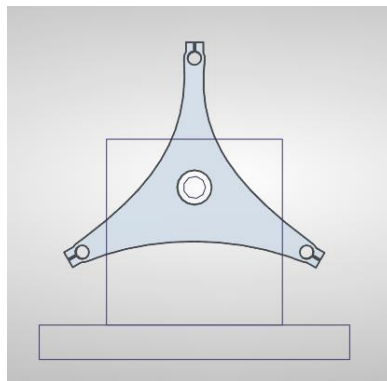


Ilustración 21. Costilla (primera versión) con láser centrado en posición desfavorable a peso

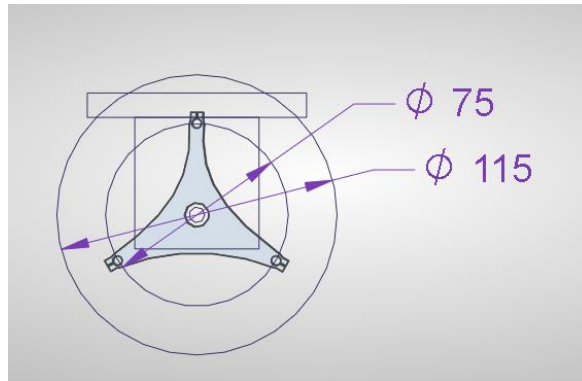


Ilustración 22. Incremento de diámetro necesario para colocación de láser a favor de peso

Debido a que priorizamos la búsqueda de un sistema lo más ligero posible y con las menores colisiones posibles entre los distintos brazos, se optó por la opción de plantear el sistema con el láser colocado entre dos de los ejes, a pesar de ser una posición desfavorable al peso. En caso de ser necesario cuando se realicen pruebas, se plantearía la colocación de un contrapeso que equilibrará el posible efecto que esto pudiera ocasionar.

Respecto al material, para esta primera versión el material planteado es chapa de 3mm de espesor. El diseño busca minimizar el material que se utiliza para reducir lo máximo el peso de la estructura. Para el sistema de fijación entre el tubo capilar y la costilla se planteó la unión mediante tornillo-tuerca de M2 en la parte exterior de la chapa.

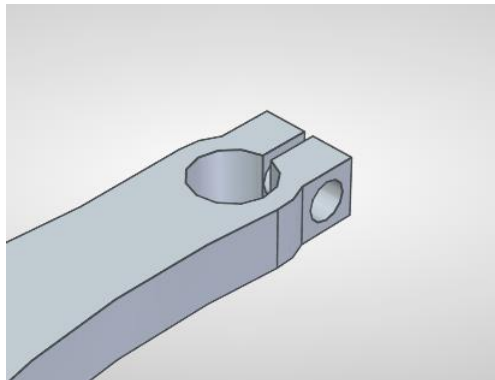


Ilustración 23. Agujero pasante para tornillo-tuerca M2

Para el planteamiento de la segunda opción se cambió la posición de las uniones para poder reducir ligeramente el volumen total de la estructura, reduciendo así las colisiones que pueden darse en el sistema. El sistema de apriete entre el tubo y la costilla se modifica y se pasa a un sistema en el que se rosca una de las zonas, para la colocación de un tornillo M2.

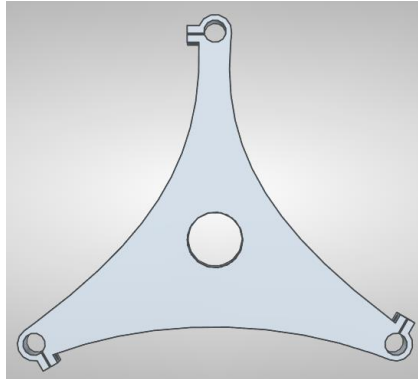


Ilustración 24. Costilla (segunda versión)

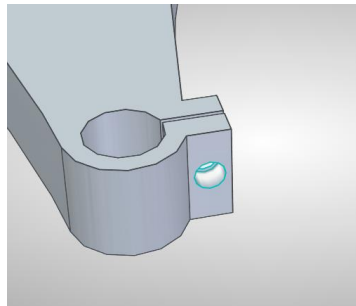


Ilustración 25. Agujero roscado para tornillo M2

Para el modelo definitivo, se ha aumentado el espesor de 3mm a 5mm, ya que trabajar con métricas tan pequeñas para las uniones era algo potencialmente problemático. También se ha cambiado el diseño, en este caso va dirigido a la mejora de la unión del sistema, frente a los anteriores donde primaba el peso. En este último caso la unión es un agujero para tornillo de M3 que se introduce en la propia costilla.

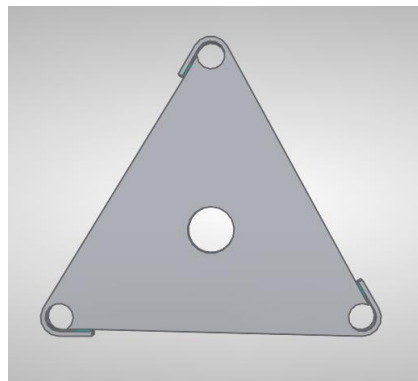


Ilustración 26. Costilla (tercera versión)

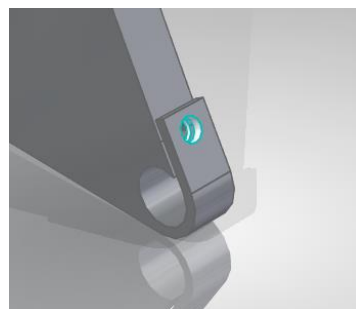


Ilustración 27. Agujero roscado para tornillo M3

	Versión 1	Versión 2	Versión 3
Criterio de Diseño	Minimizar peso	Reducir colisiones	Mejorar uniones
Espesor	3mm	3mm	5mm
Tipo de unión	Tornillo-tuerca M2	Tornillo M2	Tornillo M3
Peso	30gr	50gr	90gr

Tabla 5. Comparativa de costillas

Para todos los modelos de costillas desarrollados, el proceso de fabricación del corte perimetral debe ser mediante corte por hilo o corte por láser. Y en el caso de las costillas primera y última, dado que se ha planteado una conicidad de 5° en el vaciado central que se justificara en continuos apartados, requerirán de un mecanizado. También se realizará el roscado lateral para la unión.

5.2. Desarrollo de sistema elástico

Debido a la complejidad del sistema y a la necesidad de obtener un prototipo consistente que sea capaz de responder a los movimientos que ocurran cuando se instale sobre la máquina herramienta, es necesario desarrollar un tramo que permita más movimiento al sistema.

Para evitar bloqueos, colisiones y facilitar que el tridente se mueva con la mayor libertad posible en armonía con la máquina se ha diseñado un sistema elástico. Lo que se consigue con este accesorio entre la estructura y el tridente es permitir el giro sobre su propio eje al tridente, facilitando así la interacción entre los tridentes en la bola situada en la MH. La otra característica que posee es un desplazamiento longitudinal a lo largo de su propio eje de 10mm. Esto va a permitir poder absorber pequeños movimientos que surjan cuando el conjunto se encuentre en movimiento, hasta que se estabilice.

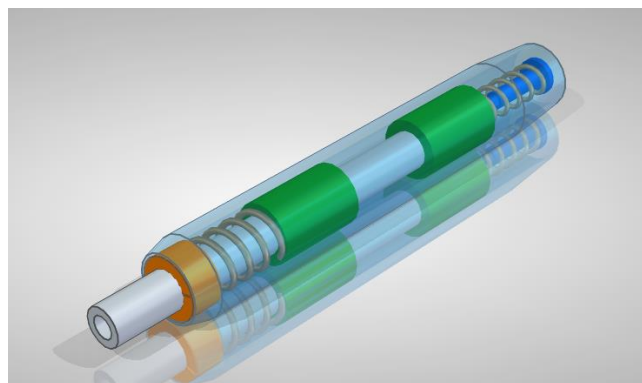


Ilustración 28. Sistema elástico

A continuación se detallan las características de los elementos que lo conforman:

- Eje interior:

\varnothing Interior [mm]	\varnothing Exterior [mm]	L [mm]	Peso/m [kg/m]	Peso [g]
8	12	145	0,89	129,05

Tabla 6. Características del eje interior

El eje comercial tiene un $\varnothing_{\text{Interior}}=4\text{mm}$ con lo cual se realizará un mecanizado al mismo para ampliar el diámetro interior hasta la medida que se ha seleccionado como óptima.

- Eje exterior

\varnothing Interior [mm]	\varnothing Exterior [mm]	L [mm]	Peso/m [kg/m]	Peso [g]
19	25	155	3,86	598,3

Tabla 7. Características eje exterior

El eje comercial tiene un $\varnothing_{\text{Interior}}=16\text{mm}$ con lo cual se realizará un mecanizado para ampliar el diámetro interior hasta la medida que se ha seleccionado como óptima. Además, tal y como se muestra en la imagen a continuación, se le han realizado dos mecanizados más.

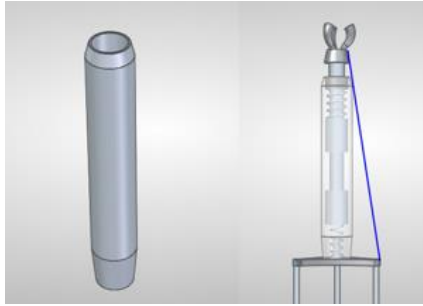


Ilustración 29. Eje exterior mecanizado

El mecanizado superior es un mecanizado para reducir la posibilidad de colisión cuando dos brazos se encuentren situados en posición contigua.

El mecanizado inferior proporciona una conicidad de 5° al tubo, esto va a permitir realizar una alineación concéntrica con la primera costilla que en su vaciado central también lleva dicha pendiente. Con este sistema se pretende conseguir una alineación del sistema lo más precisa posible.

Por la parte interior del eje, se debe realizar un roscado de M20, donde posteriormente se roscará un tapón de sujeción del sistema.

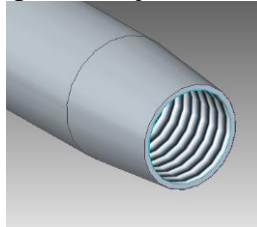


Ilustración 30. Roscado parte inferior eje exterior

- Rodamientos [14]

Los rodamientos han sido seleccionados a partir de los diámetros de los ejes que se han definido anteriormente. Las características del rodamiento que se coloca en el sistema quedan reflejadas en la tabla que se muestra a continuación:

\varnothing Interior [mm]	\varnothing Exterior [mm]	L [mm]	Peso [g]	Carga dinámica	Carga estática
12	19	28	12	695	510

Tabla 8. Características del rodamiento LBBR12

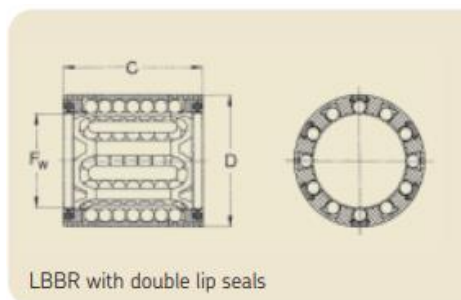


Ilustración 31. Rodamientos tipo LBBR SFK

- Muelles

Partiendo de las especificaciones del material seleccionado anteriormente, y con el desplazamiento que se ha estipulado que necesita el sistema, se han solicitado unos muelles a medida a el proveedor Muelles Díaz, S.A. [15]. Adjuntando como información para la fabricación los cinco primeros campos que se muestran en la tabla siguiente, los muelles suministrados tienen las características que se detallan:

	Desplazamiento [+/-mm]	L1 [mm]	L2 [mm]	F[N]	K[N/ mm]	Espesor [mm]	∅ Interior [mm]	L [mm]
Muelle superior	10	18	8	20	1,7	1,3	15,5	30
Muelle inferior	10	18	8	20	1,7	1	10	30

Tabla 9. Características muelles



Ilustración 32. Muelle superior e inferior

- Anillo de sujeción

∅ Interior [mm]	∅ Exterior [mm]	L [mm]	Peso [g]
11,8	19,2	10	14

Tabla 10. Características del anillo de sujeción

Se plantea un anillo a partir de tubo con las dimensiones indicadas en la tabla superior, se trata de un sistema de ajuste para que el montaje se realice por apriete y quede fijado, evitando así que el muelle superior se desplace de su posición adecuada.

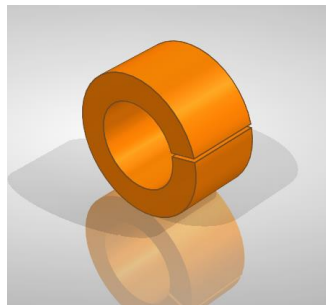


Ilustración 33. Anillo de sujeción

- Tapón de muelle inferior

La funcionalidad de esta pieza es servir de guiado al muelle inferior, de manera que siempre quede centrado en el sistema, pero permita el movimiento y encaje del resto de elementos.

El proceso de fabricación, mecanizado a partir de un tubo de la geometría que se muestra en la imagen y las dimensiones de este elemento son las siguientes:

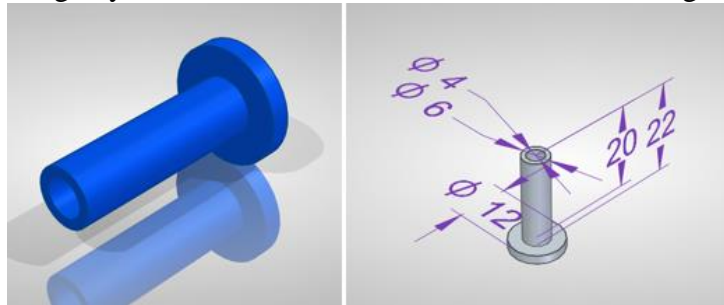


Ilustración 34. Tapón alineación muelle

5.3. Desarrollo de uniones

Para estudiar las uniones entre los distintos elementos del prototipo, aparecen con dos puntos significativos.

El primero de ellos estaría en la unión entre la primera costilla y el sistema elástico. El segundo sistema de unión que se debe de desarrollar se trata de la unión entre la bola que se registra en la mesa de la máquina herramienta y la última costilla del sistema.

En ambos casos la necesidad principal es que tengan un alineamiento perfecto, para esto se ha estudiado en ambos casos la forma óptima de alineación, de manera que al realizar el apriete el sistema se registre y quedé completamente alineado en el eje del haz de luz.

En primer lugar se desarrolló la unión entre el sistema elástico y la primera costilla, para esto, tal y como se explicó en capítulos anteriores, se realizó un sistema cónico que favorecía la alineación entre los elementos, ahora lo necesario es un tapón roscado que realice fuerza entre ambos componentes de manera que deje fijo esta alineación y la posición entre ambas piezas.

El resultado se puede ver en la siguiente imagen, se trata de un tapón con rosca, además se le ha añadido pequeño rebaje para facilitar el registro del tapón que se le prepara al muelle de manera que quede fijado y centrado y no se desvíe de su posición.

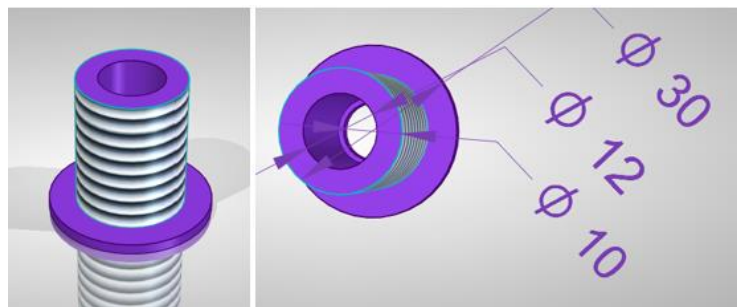


Ilustración 35. Tapón para costilla inicial- sistema elástico

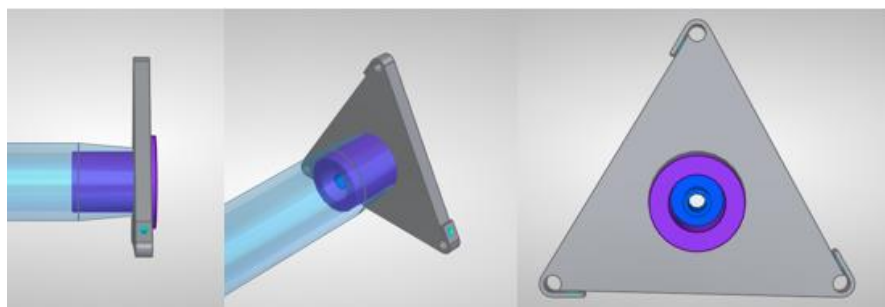


Ilustración 36. Unión para costilla inicial-sistema elástico + registro tapón muelle

Para el desarrollo entre la última costilla y la bola, en primer lugar, hay que comprender la unión entre la bola y la mesa de la máquina herramienta. Se coloca solidaria a la mesa, en la posición seleccionada, una copa magnética, cuya función es registrar la bola y sujetarla mediante imanes.



Ilustración 37. Copa magnética

La bola tendrá un mecanizado de 10mm de manera que se introduzca un casquillo de métrica 10 roscado. Con estos elementos la propuesta es realizar un tapón roscado, que se introduzca tras la última costilla. En la zona de contacto entre la costilla y el tapón presentará la misma conicidad planteada para la costilla, y para la unión con la bola un roscado de la misma métrica que el casquillo que se le ha introducido, de manera que con esto se permita realizar un ajuste perfecto.

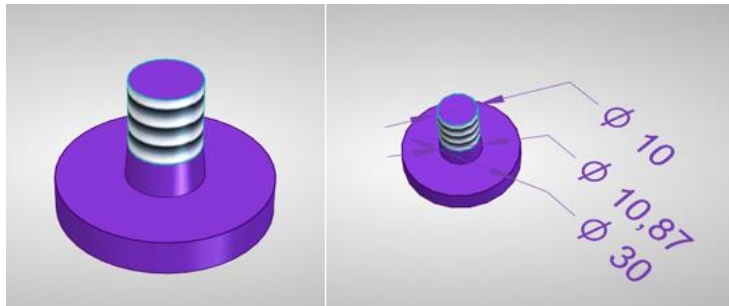


Ilustración 38. Tapón costilla final-Bola mesa MH

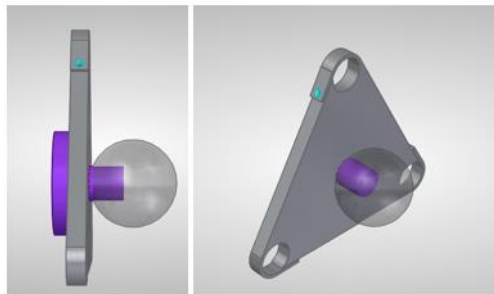


Ilustración 39. Unión costilla final-Bola mesa MH

5.4. Desarrollo de tridentes

Por último se pasa a explicar la evolución de la sujeción entre la estructura y la bola del cabezal de la MH. Esta sujeción se realiza mediante un tridente, el cual fue previamente planteado en el anterior proyecto [2].

Este componente es uno de los que mayor peso han supuesto y de los que más evolución han sufrido a lo largo del proyecto. En el punto en el que se sitúa el proyecto en la actualidad, todavía está pendiente de sufrir más cambios que se han podido ir observando tras realizar pequeñas pruebas de prototipado con las impresoras 3D del departamento, cuyas especificaciones técnicas se pueden encontrar en el Anexo B.

Como principales parámetros de diseño se encuentran el ángulo de acción del dedo; que se ha de tener en cuenta que se busca un sistema lo más reducido en tamaño posible, que permita el alojamiento de los imanes seleccionados, que además incluya una forma de sujeción al tubo y por otro lado que sea un tamaño suficientemente grande como para alojar el espejo reflector que se ha seleccionado en el capítulo 3. Todo ello con el correspondiente espacio para permitir el paso del haz del láser desde la estructura.

Otra característica importante es la forma de fabricación que se va a seguir. Esto va a definir el número de piezas que componen el tridente. También influirá en la resistencia y en la deformación que presenten estos tridentes a la hora de soportar la fuerza a la que van a estar sometidos por el imán.

Como parámetros generales de diseño, se partió de un ángulo máximo entre el eje del dedo del tridente y la bola estimado en 54° en el proyecto anterior. Para este proyecto se definió un nuevo ángulo entre el dedo y la bola de aproximadamente 30° , el cual se ha variado ligeramente durante los sucesivos estudios, para ver cómo responde el sistema.

Para el caso de los dedos la principal restricción fue el que permitiera el alojamiento del imán seleccionado, cuyas características son 6,5 mm de diámetro y 3 mm de espesor. También hay que tener en cuenta la fuerza que ejercerá dicho imán para realizar las simulaciones en el futuro, la cual asciende a unos 30N aproximadamente.

Lo ideal es que la distancia del espejo reflector a la bola sea la mínima posible de manera que la precisión sea lo mayor posible. Por esta razón los dedos debían ser lo más cortos que se pudieran y además que permitan introducirse unos dentro de otros entre varios tridentes de manera que se eviten colisiones siempre que fuera posible y facilitar el acercamiento y rango de medida entre estructuras. Para este último requerimiento se ha variado el tamaño de bola entre 1,5 pulgadas y 2 pulgadas en los distintos diseños.

Con todos estos requerimientos se planteó un primer sistema de tridentes, cuya estructura consta de una base sobre la cual se atornillan unos dedos complementarios, como se muestra en la imagen a continuación.

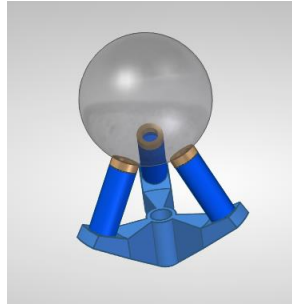


Ilustración 40. Tridente - Primera versión



Ilustración 41. Componentes tridente primera versión

En esta primera idea se desarrollaron soluciones constructivas cómo realizar en el dedo un agujero suficientemente grande para colocar un inserto roscado el cual una vez se registrara el dedo en la base se pudiera atornillar por la parte inferior. Además se desarrolló una cama para la bola, planteada en un material más blando cómo podría ser bronce o latón, y mecanizado de manera que se suavizara el roce entre el imán y la bola para que esta última no se desgastará y que gracias a la conicidad el ajuste fuera mas apurado.

A partir de este diseño se realizó un prototipo en 3D con dos tridentes independientes los cuales se colocaron sobre la bola 1,5 pulgadas, y se comprobó que aparecía una interferencia entre los elementos lo cual ocasionaba que las colisiones entre tridentes fueran entre los dedos y no entre los cuerpos, suponiendo pues, que no es posible la inserción de uno dentro de otro hasta lograr el choque entre cuerpos.



Ilustración 42. Colisiones primer prototipo tridente

Partiendo de esta idea principal y con la premisa de que los tridentes choquen cuerpo a cuerpo, se pensó que para conseguir que uno se introdujera dentro del otro, se podrían realizar tres alturas distintas de tridente, de manera que uno podría entrar en el anterior.

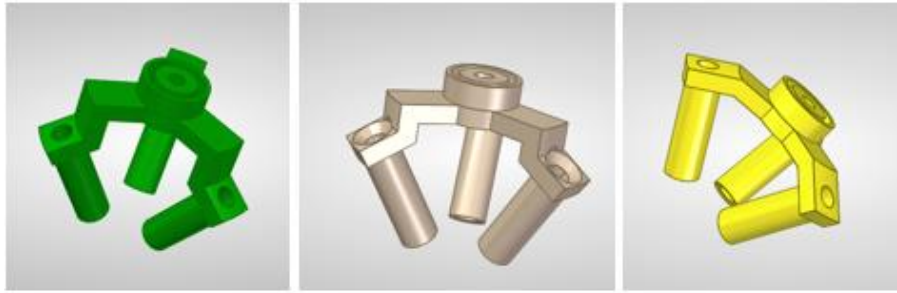


Ilustración 43. Tridente - Segunda versión - Tres alturas de tridente

Esta propuesta se desestimó una vez planteada, debido a que cuando se realizó el montaje 3D en Solid Edge se comprobó que la base con tramos tan rectangulares iban a colisionar y no permitían el giro y la introducción de un sistema dentro del otro al encontrarse en ángulos distintos. Así que a pesar cambiar las alturas de tridente, complicando así el número de referencias a fabricar, realmente no se obtenía una mejora de cara a la sincronización entre los elementos.

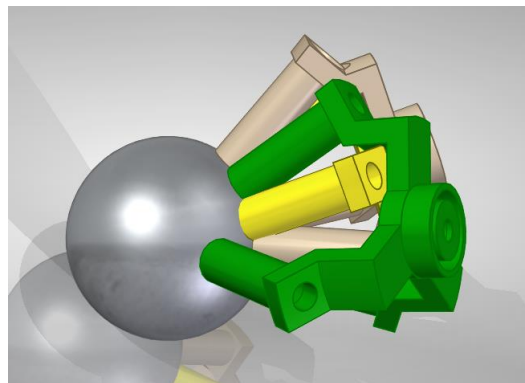


Ilustración 44. Colisiones segundo prototipo tridentes tres alturas

Es a partir de este punto cuando se pensó en que unas líneas de diseño más suaves y curvas podrían facilitar la interacción entre los tridentes, de manera que se pasó a desarrollar el siguiente diseño que se presenta en la imagen que se muestra a continuación:

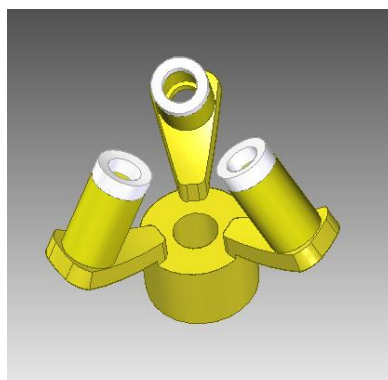


Ilustración 45. Tridente - Tercera versión

Para este último tridente se mantienen las características como en los anteriores, un sistema con uniones, que dispone de una cama para realizar el contacto con la bola y el hueco para colocar el imán además en el interior del dedo. Dispone también del agujero

para el reflector láser. Sin embargo, en este caso se partió en primer lugar de un boceto el cual fijaba la posición del cuerpo. Esto se hizo con una circunferencia del tamaño de la bola (1.5" y 2") más el tamaño del dedo; de esta forma ya se tenía posicionado en el centro donde se quería que se colocará nuestro cuerpo, así pues se a continuación siguiendo esta circunferencia lo que sería el cuerpo siguiente, de manera que quedarán los dos unidos y perpendiculares a la bola central. A partir de aquí se dio volumen al cuerpo y se desarrollaron los brazos siguiendo la curva a la que se ajustan los cuerpos. Además se ha contemplado que para que puedan entrar dentro uno de otro el tamaño del dedo debía ser menor que el tamaño que quede en el centro del tridente como se puede ver en la imagen siguiente:

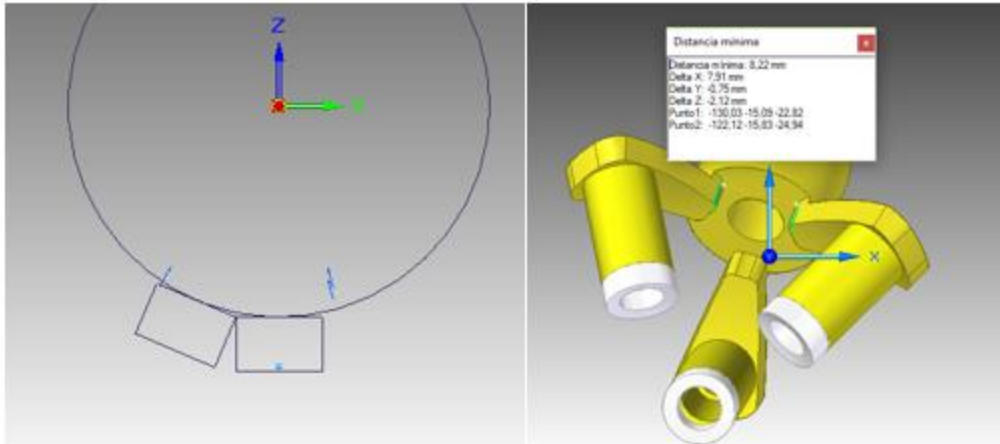


Ilustración 46. Criterios de diseño para facilitar encaje de tridentes

A pesar de resultar un sistema que aparentemente va a funcionar, ya que se tiene una medida de brazo menor que el espacio que hay entre los dedos y que cuando se colocan dos cuerpos ambos siguen la misma curvatura, se pensó que realizando una fabricación más compleja y llevando unas líneas mucho más curvas y complejas se podría conseguir que fueran unas interacciones mucho más suaves entre los tridentes, facilitando así su movimiento. Así pues se pasó a plantear el segundo bloque de tridentes propuestos, en los cuales se eliminó la unión entre el dedo y la base y además ya no se contempla la cama sino que se pospone como elemento que se pueda incluir en un futuro dependiendo de cómo responda el imán al movimiento con la bola. Se sigue manteniendo el posicionado para el imán.



Ilustración 47. Tridente - Prototipo cuarto



Ilustración 48. Características prototipo cuarto tridente

Este prototipo presentaba un método de fabricación no demasiado complejo y seguía unas líneas mucho más curvas, pero se encontraba con el problema de que al hacer el corte recto de los dedos aparecía una superficie exterior muy grande y ese arco no se puede llegar a introducir dentro de lo que es el espacio entre dedos, así pues, a partir de aquí se desarrollaron varias propuestas similares que lo que buscaban era subsanar este problema buscando siempre la menor deformación para el sistema, cambiando tan sólo la forma de corte que se aplicaba para crear los dedos.

Se presentaron dos propuestas que mejoraban este sistema, una de ellas implica solo reducir la anchura, es decir el arco exterior de los dedos en la zona de la base; la otra que implica es, además de reducir la anchura de los dedos en la base, también reduce el espesor del dedo de manera que se tiene mucha más superficie para la interacción de los dedos pero mucha menos superficie del propio dedo.

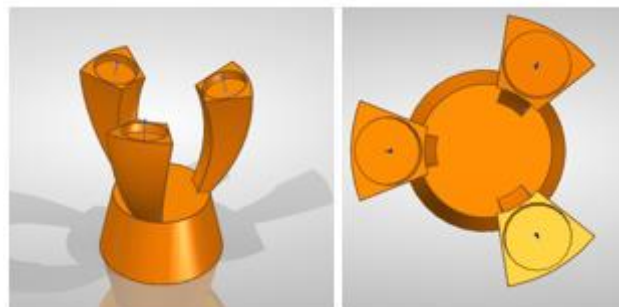


Ilustración 49. Tridente - Prototipo Quinto - Reducida anchura dedos en la base

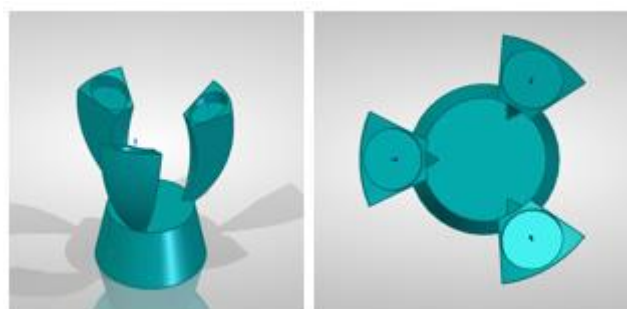


Ilustración 50. Tridente - Prototipo Sexto - Reducida anchura y espesor dedo en la base

Al realizar un prototipo con la impresora 3D de este último modelo, se observa que el modelo es demasiado frágil. La superficie de unión que queda entre la base y el dedo de es demasiado reducida; esto implica que sí sea compatible y entren unos dentro de otros, pero que sea demasiado frágil, a pesar de lo que las simulaciones muestren computacionalmente.



Ilustración 51. Prototipo sexto impresión 3D

La superficie es tan pequeña que la probabilidad de que se rompa es demasiado alta, a pesar de usar el material metálico, por tanto se pasó a realizar un nuevo diseño esta vez aún más complejo que los anteriores de cara a la fabricación de manera que todas las líneas que siguen son curvas. Se presentaron distintos modelos donde los dedos son superficies curvas que van reduciendo su diámetro desde dónde se coloca el imán hasta la base cómo se muestra en los ejemplos a continuación:



Ilustración 52. Tridentes - Prototipos del séptimo al décimo

Estos últimos prototipos se realizaron variando los distintos parámetros dimensionales que presenta nuestro sistema, para ver cómo podría afectar a los desplazamientos que aparecerán en la simulación. Todos estos datos que recogen las características dimensionales, así como los desplazamientos que se han obtenido al realizar la simulación aplicando una fuerza perpendicular en cada uno de los dedos igual a 10 Newton para cada uno de los tridentes desarrollados desde el inicio del proyecto, se muestra la tabla que aparece a continuación:


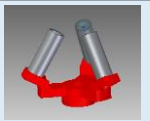



TIPO	CON UNIONES				
Diseño					
Diametro bola	38,1	38,1	38,1	38,1	50,8
Diametro iman	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5
Altura iman	3	3	3	3	3
Angulo pto contacto	30	30	30	30	30
Altura dedo	20	20	20	20	20
Radio 1 arco dedo	--	--	--	--	--
Angulo cuerpo (°)	0	0	0	0	0
Diametro sup dedo (mm)	8	8	8	8	8
Diametro inf dedo(mm)	8	8	8	8	8
Anchura sup dedo (mm)	--	--	--	--	--
Anchura inf dedo(mm)	--	--	--	--	--
Altura cuerpo (mm)	9	9	9	10,84	10,84
Altura brazo (mm)	0	4	8	2,3	2,3
Diametro agujero (mm)	--	--	--	--	--
Longitud agujero (mm)	--	--	--	--	--
Deformación (micrometros)	6,35	8,84	12,1	21,6	85,4

Tabla 11. Parámetros y resultados de simulación para diseños con uniones







TIPO	SIN UNIONES					
Diseño						
Diametro bola	38,1	38,1	50,8	38,1	38,1	38,1
Diametro iman	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5
Altura iman	3	3	3	3	3	3
Angulo pto contacto	30	30	30	30	35	35
Distancia centro-cuerpo	36,87	36,87	36,87	36,87	36,87	36,87
Altura dedo	--	--	--	--	--	--
Radio 1 arco dedo	26,55	26,55	26,55	26,55	12,7/5	12,7/5
Angulo cuerpo (°)	12	12	12	12	12	12
Diametro sup dedo (mm)	--	--	--	--	8	8
Diametro inf dedo(mm)	--	--	--	--	4	4
Anchura sup dedo (mm)	8 (arco int. 4,93)	8 (arco int. 5,26)	8 (arco int. 5,26)	8 (arco int. 4,31)	--	--
Anchura inf dedo(mm)	2 (arco int. 3,3)	2 (arco int. 4,51)	2 (arco int. 4,51)	2 (arco int. 0,2)	--	--
Altura cuerpo (mm)	10,84	10,84	10,84	10,84	10,84	10,84
Altura brazo (mm)	--	--	--	--	--	--
Diametro agujero (mm)	10	10	10	10	10	10
Longitud agujero (mm)	10	10	10	10	10	10
Deformación (micrometros)	10,7	8,19	18,6	32,1	10,5	7,32

Tabla 12. Parámetros y resultados de simulación para diseños sin uniones 1






TIPO	SIN UNIONES				
Diseño					
Diametro bola	50,8	38,1	50,8	38,1	38,1
Diametro iman	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5
Altura iman	3	3	3	3	3
Angulo pto contacto	35	35	35	45	45
Distancia centro-cuerpo	36,87	36,87	36,87	36,87	36,87
Altura dedo	--	--	--	--	--
Radio 1 arco dedo	7,4/2,83	12,7/5	10,42/5	12,7/5	12,7/5
Angulo cuerpo (°)	12	15	15	12	15
Diametro sup dedo (mm)	8	8	8	8	8
Diametro inf dedo(mm)	4	4	4	4	4
Anchura sup dedo (mm)	--	--	--	--	--
Anchura inf dedo(mm)	--	--	--	--	--
Altura cuerpo (mm)	10,84	10,84	10,84	10,84	10,84
Altura brazo (mm)	--	--	--	--	--
Diametro agujero (mm)	10	10	10	10	10
Longitud agujero (mm)	10	10	10	10	10
Deformación (micrometros)	7,46	6,21	10,1	24,5	14,6

Tabla 13. Parámetros y resultados de simulación para diseños sin uniones 2

Arriba se recogen los diseños realizados para bolas de 1,5 pulgadas, así como los diseños para bolas de 2 pulgadas. Se observa que cuando aumenta el tamaño de la bola media pulgada, aparece un incremento de la deformación en micrometros en el tridente. Además se puede observar la menor de formación se encuentra en 7,32 micrometros, con los parámetros que se muestran en la tabla. De este modelo, el cual se ha seleccionado como óptimo, se ha realizado una prueba en 3D cuyos resultados son los que se pueden ver en las siguientes imágenes, quedando comprobado que no existe interferencia al entrar uno dentro de otro y que el contacto sería entre bases teniendo una deformación mínima.



Ilustración 53. Tridente final- Prototipo seleccionado

Siguiendo la línea de continuar favoreciendo las interacciones que existen entre los tridentes cuando el sistema esté en funcionamiento, se plantearon unos desviadores tanto interior, como exterior para ver cómo reaccionarían los tridentes al interactuar. Lo que se observó es que resultaban piezas demasiado débiles y que su montaje debería ser un adhesivado para no dificultar más la fabricación del tridente. Lo que se conseguía con esto era reducir ligeramente el tamaño del dedo al no necesitar llevar un nicho sobre el que colocar el imán. Finalmente tras observar todos los desarrollos y realizar alguna pequeña prueba se ha visto que podemos reducir el tamaño del dedo pero no sería necesaria la adhesión de uno de estos desviadores ya que el propio imán cuando se acerca al resto realiza una repulsión que facilita el giro y las interacciones entre los mismos.

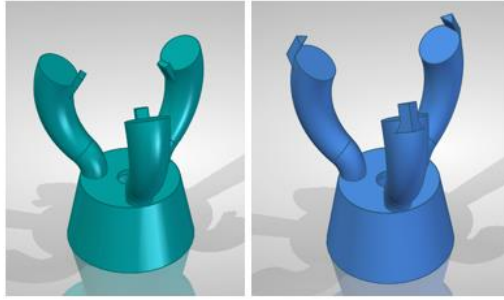


Ilustración 54. Opciones de desviador interior y exterior para favorecer el giro

Por último se imprimieron los mejores desarrollos en la impresora 3D Objet, para obtener un modelo más fino de los mismos, con el resultado que se puede ver en las imágenes siguientes:



Ilustración 55. Mejores tridentes impresos en Objet 3D

6. CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

En este punto el proyecto se encuentra con un diseño completamente realizado, en el que se han contemplado todos los criterios principales. Se tiene un peso total de estructura de aproximadamente un 1.80kg. Como resumen general de las conclusiones que se obtienen de este proyecto es que el número ideal de tramos que se deben colocar es de 4 siendo la longitud de las barras de 400 mm y el tramo útil de 300 mm consiguiendo sin desplazamiento de 900 mm punto. Se han desarrollado todas las uniones necesarias para que el sistema sea consistente, y solo faltaría en incluir los tapones y sujeciones estándar a los tubos capilares para evitar que se salgan de su posición.

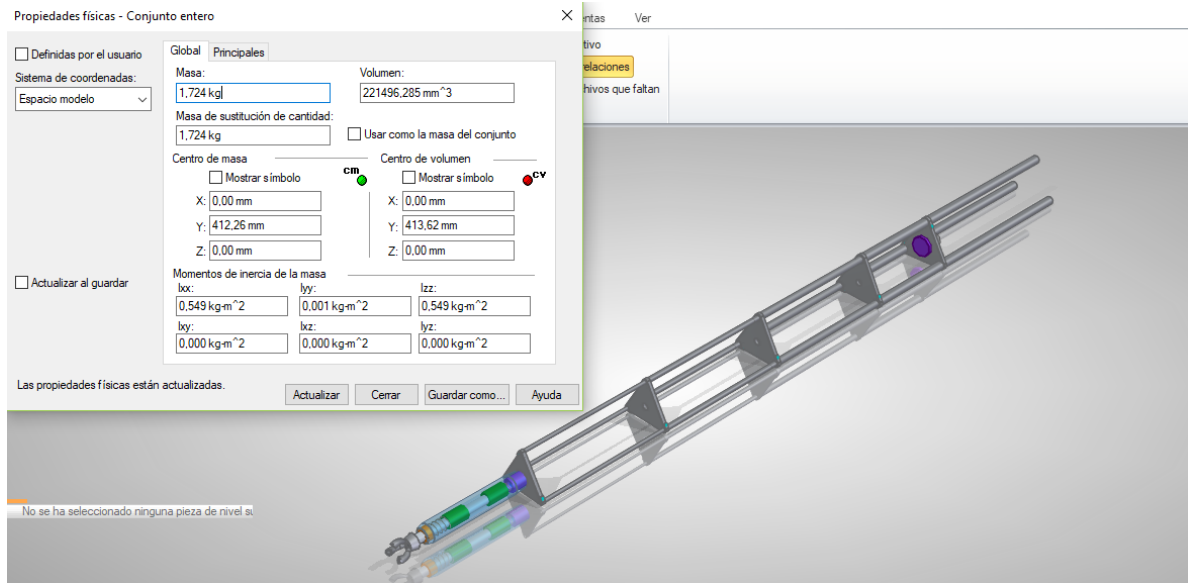


Ilustración 56. Peso estimado estructura en material acero

Se ha definido el tridente óptimo que es aquel que cumple las características y tamaño reducido que se puede incluir e interactuar con el resto de tridentes y que además su deformación es de las mínimas que se han conseguido con los diseños planteados

Se han comenzado a comprar algunos de los componentes que son necesarios standard para nuestra estructura, cómo pueden ser los muelles, los rodamientos, los tubos capilares y también se dispone de la nueva bola de 2 pulgadas que va a permitir que la inclusión de tres tridentes sea más fácil que con el sistema de pulgada y media.



Ilustración 57. Tubos capilares

Como trabajo futuro, el desarrollo el prototipo completo a partir de los elementos que se han descrito pudiendo así validar los que son funcionales y cumplen todos las características de diseño, así como modificar y optimizar todos aquellos elementos que estén sujetos a una mejora. Queda pendiente de mecanizar los tubos ya que actualmente no se dispone de un escariador para poder realizarlo en el taller.

Una vez se disponga del láser habría que comprobar el funcionamiento de la conicidad de los tapones que se han planteado así como del alineamiento que se sigue entre el láser una vez colocado y el reflector que se estará situada dentro del tridente.

También cuando toda la estructura se encuentre completamente montada ahora comprobar realmente cuánto afecta el posicionamiento del láser en este punto es decir, se tendrá que añadir algún tipo de contrapeso para que el sistema le sea más fácil el movimiento.

Con todos estos pasos, se busca el ir perfeccionando y afinando el prototipo hasta que posea la exactitud necesaria para realizar las mediciones y calibraciones de máquina con el sistema.

Referencias

- [1] «Etalon,» [En línea]. Available: <https://www.etalon-ag.com/en/products/lasertracer-mt/>.
- [2] A. T. Gonzalez Bueno, «Diseño y desarrollo de un brazo telescópico para verificación volumetrica de maquina herramienta,» Unizar, Zaragoza, 2016.
- [3] «SEMAVE,» [En línea]. Available: <https://mantenimiento-y-reparacion-de-maquinas-herramienta-semave.com/verificacion-y-ajuste/>.
- [4] M. M. A. P. R.Ramesh, «‘Error compensation in machine tools Part I: geometric, cutting-force induced and fixture- dependent errors’.,» *Machine Tools & Manufacture* 4, pp. 1235-1256, 2000.
- [5] M. M. A. P. R.Ramesh, «‘Error compensation in machine tools Part II: thermal errors’,» *Machine Tools & Manufacture* 40, 2000.
- [6] M. E. A. S. N.A.Barakat, «‘Kinematic and geometric error compensation of a coordinate measuring machine’,» *Machine Tool Manufacture International Journal of Machine Tools and Manufacture* 40., pp. 833-850, 2000.
- [7] T. W. K. S. H. C. Jenq shyong Chen, «‘Geometric error calibration of multi-axis machines using an auto-alignment laser interferometer’,» *Precision Engineering* 23, pp. 243-252, 1999.
- [8] D. J. S. J. A. S.Aguado, «‘Identification strategy of error parameter in volumetric error compensation of machine tool based on laser tracker measurements’,» *International Journal of Machine tool & Manufacture*, vol. 53, pp. 160-169, 2011.
- [9] W. H. H. A. W. R. F. H.Schwenke, «‘Geometric error measurement and compensation of machines-An update’,» *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, pp. 660-675, 2008.
- [10] J. S. M. D. S. C. J. A. M. S. Aguado Jiménez, «Verificación volumétrica: verificación de máquina-herramienta de grandes dimensiones,» *UNIZAR*, 2012.
- [11] «Renishaw,» [En línea]. Available: <https://resources.renishaw.com/en/details/data-sheet-rld10-0-degree-detector-head--93260>.
- [12] «SIOS Meßtechnik GmbH,» [En línea]. Available: www.SIOS.de.
- [13] «Newport,» [En línea]. Available: <https://www.newport.com/p/BGR-6.35>.
- [14] S. Group, «RS,» [En línea]. Available: <https://docs-emea.rs-online.com/webdocs/13f0/0900766b813f039f.pdf>.
- [15] «Muelles Diaz,» [En línea]. Available: <http://www.muellesdiaz.com/>.