

Trabajo Fin de Grado

Selección, diseño e integración de componentes para la medición en proceso de la posición y orientación del efector final de un robot colaborativo.

Selection, design and integration of components for in-process measurement of the position and orientation of the end-effector of a collaborative robot.

Autor

Pablo Alamañac Hernandez

Directores

Francisco Javier Brosed Dueso

Juan José Aguilar Martín

Grado en Ingeniería Mecánica

Escuela de Ingeniería y Arquitectura 2024

Selección, diseño e integración de componentes para la medición en proceso de la posición y orientación del efector final de un robot colaborativo.

Resumen:

El desarrollo de este Trabajo Final de Grado consiste en el análisis y diseño de un utillaje sobre un robot colaborativo para la verificación de diseños industriales mediante un sistema de medición.

Los problemas abordados son la comparativa de robots colaborativos, para la posterior selección del que más se adecue a los requisitos del problema, la elección de las herramientas que se van a utilizar en la operación de mecanizado, el diseño del utillaje del cabezal y el estudio del posicionamiento del robot.

Para el desarrollo de la comparativa de los robots colaborativos se obtuvo la información de los catálogos de las propias empresas. Para el diseño del utillaje que se encarga de la unión entre el brazo del robot y el cabezal, encargado de mecanizar la pieza, se hará uso del programa Solid Edge, donde se analizarán los resultados tanto de las tensiones generadas por las cargas externas como las deformaciones producidas. Y para el correcto posicionamiento del sistema de medición, teniendo en cuenta los componentes que completan el sistema, se utilizará el software Matlab.

ÍNDICE

1. Introducción	5
2. Materiales y equipos.....	7
2.1 Bancada, Soporte antivibratorio y Mesa de trabajo.....	7
2.5 Utillaje esferas inferiores.....	10
2.2 Sistema de medición.....	12
2.2.1 Brazo telescópico y tridente.....	12
3. Análisis y selección de componentes.	15
3.1 Selección del robot colaborativo.	15
3.2 Tabla comparativa de diferentes cobots.	17
3.3 Análisis del proceso de mecanizado.	20
3.3.1 Broca	20
3.4 Cabezal.	21
4. Diseño y desarrollo de los utillajes.....	24
4.1 Utillaje de unión bancada-robot.....	24
4.2 Utillaje de unión cabezal-mano robot.	26
4.3 Utillaje de unión cabezal-sistema de medición.	29
4.3.1 Apoyo superior	32
4.3.2 Apoyo inferior	33
4.3.3 Esfera de medición.....	35
4.3.4 Cilindro unión esfera-apoyo	35
4.3.5 Casquillo esfera	36
4.3.6, 4.3.7 y 4.3.8 Cabezal, brazo robot y utillaje de unión cabezal-mano robot	36
4.3.9 Esfera apoyo.....	36
4.3.10 Cilindro apoyo	37
4.3.11 Placa unión apoyo	38
4.4 Análisis comparativo de rigidez y peso para la selección del diseño final.	38
4.4.1 Análisis por elementos finitos.....	39
4.4.2 Evolución del diseño y análisis de los resultados	42
4.5 Cambio en el utillaje de unión cabezal-sistema de medición.	46
4.5.1 Evolución del diseño y análisis de los resultados utillaje rotado	47
4.5.2 Estudio de la incorporación de tirantes.....	51
4.5.3 Análisis de cargas horizontales en el diseño seleccionado	57



5. Estudio de la seguridad	59
5.1 Identificación de la actividad y su entorno	60
5.2 Análisis de riesgos	61
5.3 Implementación de medidas de seguridad	63
6. Análisis del volumen de trabajo	66
6.1 Datos principales	66
6.2 Variables de salida	69
7. Conclusiones	73
Bibliografía	75
Anexos	77

1. Introducción

En el Departamento de Ingeniería de Diseño y Fabricación de la Universidad de Zaragoza se está desarrollando una célula de mecanizado. Esta célula busca integrar un robot de mecanizado que, junto con un sistema de medición por coordenadas, permita determinar de forma continua la posición y orientación del efector final durante el proceso. Además, el sistema facilitará la realización de una verificación volumétrica del robot, garantizando un control preciso y eficiente de su rendimiento.

La verificación se realiza con el propósito de mejorar la precisión, minimizando el error entre los puntos teóricos y los reales capturados por el sistema de medida. El equipo de medición que se va a utilizar está basado en el uso de interferometría láser. Siendo el objetivo, poder relacionar la posición del efector final del robot en el momento del mecanizado con la posición de los elementos punteados en la pieza de trabajo.

El enfoque principal de este trabajo es el diseño de los utillajes necesarios para integrar el sistema de medición y el robot colaborativo en una célula de mecanizado. Partiendo de los componentes disponibles, se busca desarrollar utillajes que garanticen una rigidez, ligeros y fáciles de montar, utilizando herramientas como el análisis por elementos finitos para garantizar su eficiencia y funcionalidad.

Para el desarrollo de estos utillajes es fundamental considerar las características de los componentes que ya han sido diseñados o seleccionados en trabajos previos y que nos delimitarán aspectos del diseño.

Las necesidades generadas para este diseño, serán el análisis y la selección de un robot colaborativo y de los elementos del mecanizado.

Además, se tendrá en cuenta que, en este trabajo, el sistema de medición, para poder obtener la posición y la orientación del efector final, serán necesarios 6 brazos y 3 esferas que tendrán que colocarse en el utillaje entre un radio de 250 mm y 300 mm, para evitar colisiones.

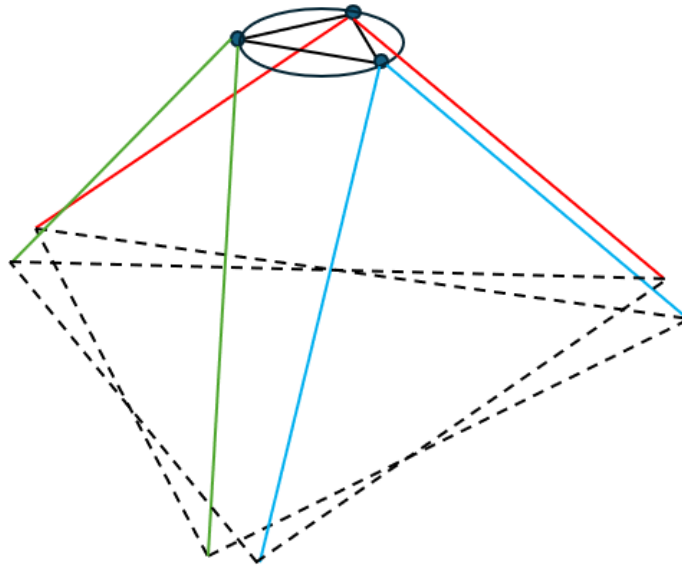


Figura 1. Croquis de las esferas que conforman los triángulos.

Por lo tanto, los objetivos del presente trabajo son:

- Selección del robot colaborativo que más se adecue.
- Selección de las herramientas del proceso de mecanizado: cabezal y broca.
- Diseño del utillaje al que se amarrará el robot seleccionado.
- Diseño del utillaje para integrar el cabezal de mecanizado y las 3 esferas del sistema de medición.
- Estudio de la seguridad.
- Análisis del volumen de trabajo

El desarrollo del proyecto se lleva a cabo siguiendo un enfoque estructurado. Primero, se definirán los objetivos y requisitos del sistema, seleccionando el robot colaborativo adecuado. A continuación, se diseñarán los utillajes necesarios para integrar los componentes en la célula robotizada, considerando aspectos de modularidad, precisión y facilidad de instalación. Paralelamente, se realizará un análisis de riesgos para identificar y mitigar posibles peligros, seleccionando componentes de seguridad adecuados. Por último, se realizará un análisis de la

distribución y volumen de trabajo del sistema de medición, realizando simulaciones en el programa Matlab.

2. Materiales y equipos

En este apartado se describirán los elementos y equipos que deben considerarse para el diseño de los nuevos utillajes, así como su integración en el sistema. Estos componentes se incluyen tanto por formar parte de la zona de trabajo como por haber sido seleccionados o diseñados en trabajos previos. La finalidad es garantizar que todos los elementos necesarios se contemplen de manera coherente, facilitando la integración y el correcto funcionamiento del conjunto.

2.1 Bancada, Soporte antivibratorio y Mesa de trabajo.

La bancada se trata de una estructura de acero, diseñada y construida por la universidad (figura 2), con dimensiones generales de 4000x800x157 mm. Su propósito principal es alojar el robot de mecanizado junto con los utillajes requeridos durante el proceso. Su peso es de 382 kg.

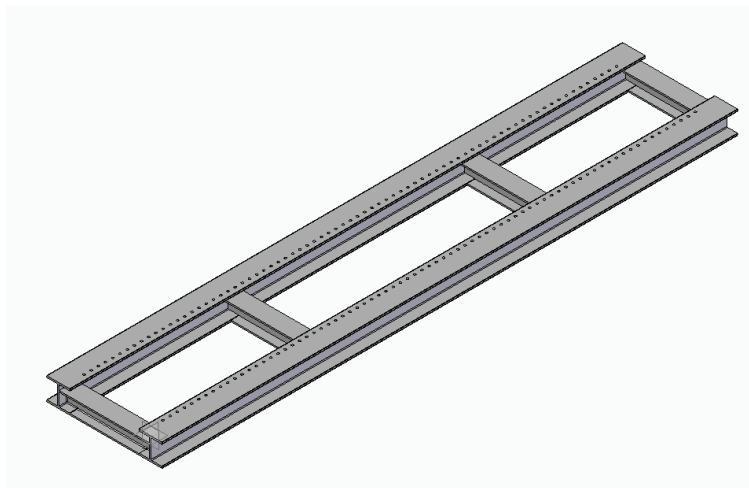


Figura 2. Diseño de la bancada. Vista en el programa Solid Edge.

Dicha bancada se encuentra colocada sobre 4 soportes antivibratorios, posicionados en los extremos. Han sido proporcionados por la comercial Egaña [1]. Y son los encargados de soportar todo el peso y proporcionar estabilidad a la célula.

De manera individual resisten valores entre 250-500 kg, por lo que el conjunto no puede superar los 2000 kg.



Figura 3. Soporte antivibratorio Egaña.

Para la mesa de trabajo, donde se va a colocar la pieza máster a la que se va a realizar el mecanizado, se va a proceder a fusionar dos diseños propuestos en los trabajos previos. [2,3]

Se va a utilizar una placa de 500,3 x 590 x 50 mm. Su peso aproximado es de 110 kg.

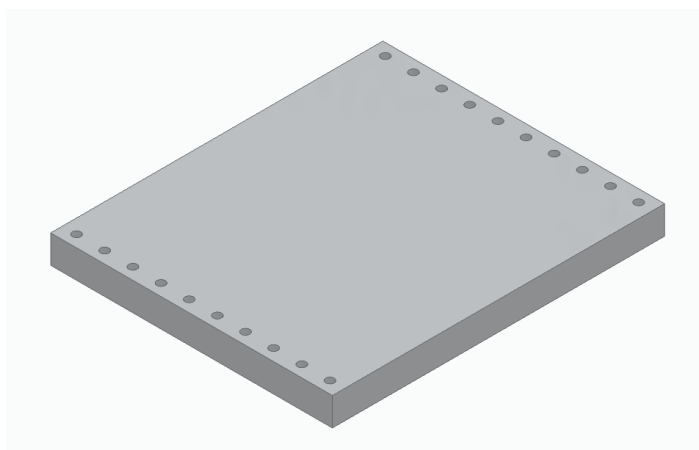


Figura 4. Geometría mesa de trabajo.

El sistema de registro y amarre se consigue con un apoyo cinemático, su funcionamiento consiste en realizar el apoyo del rodillo situado en la placa

intermedia, sobre las dos esferas colocadas en la mesa de trabajo. Mediante estos 3 apoyos y el amarre del tornillo Allen a la pieza, garantizamos el registro de la pieza sobre la mesa.

Se van a colocar 5 ubicaciones donde se podrá colocar el bloque a mecanizar en la mesa de trabajo. Esto es interesante para poder tener una mayor cantidad de bloques para conseguir un mayor número de comparaciones. Esta mesa de trabajo la podremos trasladar a una máquina de medición por coordenadas para poder obtener las coordenadas de los apoyos cinemáticos y trasladar las medidas al sistema del robot.

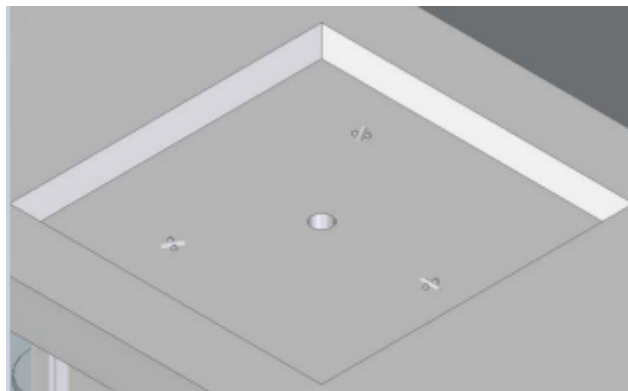


Figura 5. Sistema de registro y amarre de la placa intermedia a la mesa de trabajo.

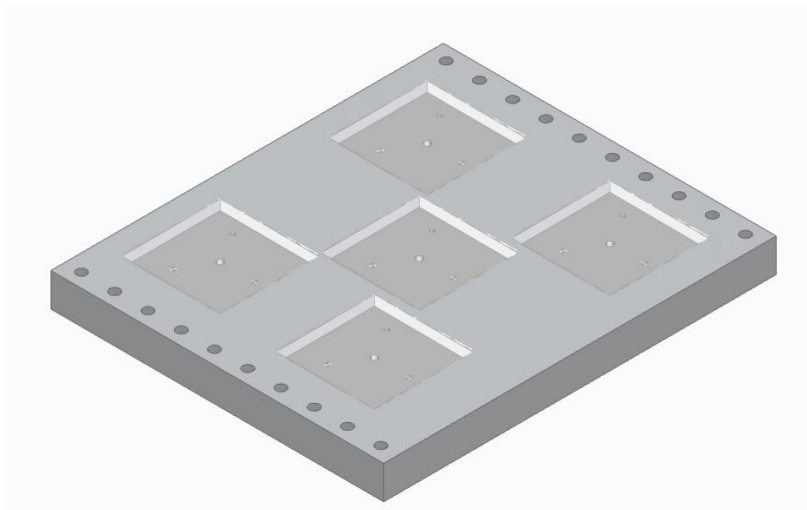


Figura 6. Integrar sistema de registro en la mesa de trabajo.

La placa intermedia es el utillaje que permite acoplar la pieza de trabajo a la mesa, garantizando el registro.

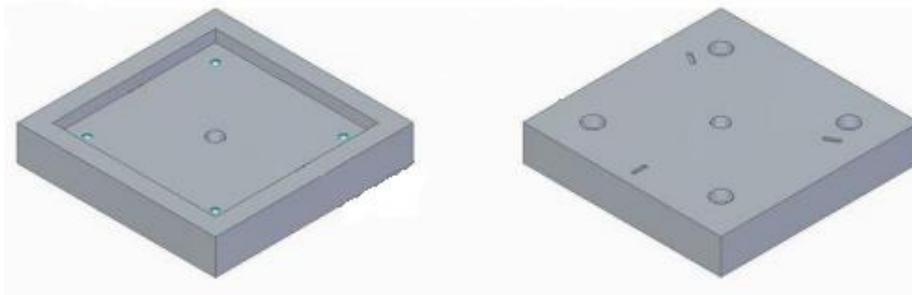


Figura 7. Placa intermedia. Cara superior e inferior.

El diseño presenta las siguientes características: un vaciado rectangular para posicionar la pieza de trabajo, un orificio de 6,6 mm de diámetro a través del cual pasa el tornillo que fija la pieza a la mesa de trabajo, cuatro orificios con vaciado para alojar tornillos Allen M4 que aseguran la fijación de la pieza a la placa y un rebaje diseñado para ubicar los rodillos que conforman el sistema de registro.

La pieza de trabajo, a la que se van a realizar los punteados, será una pieza con base cuadrada, fabricada en aluminio. En su cara inferior, la pieza cuenta con varias características que permiten su acople y funcionalidad: cuatro orificios roscados M4 que la unen con la placa intermedia y un orificio roscado M6 que facilita su acople con la mesa de trabajo. Su peso es de 0,93 kg.

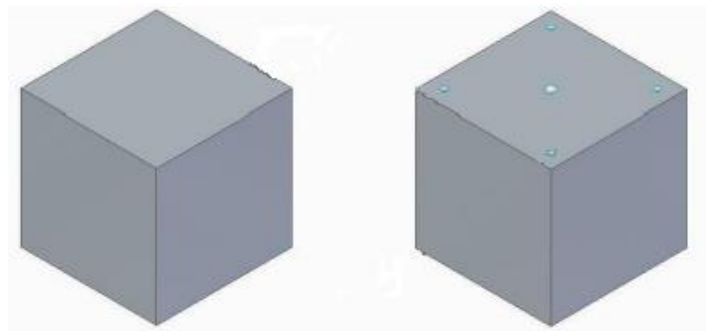


Figura 8. Pieza de trabajo. Cara superior e inferior.

2.5 Utilaje esferas inferiores.

Para este utillaje también se utilizará el diseñado en trabajos previos [2,4]. Se necesitan fijar a la bancada las 6 esferas que forman los 2 triángulos equiláteros en la base, por lo que se usa el diseño en el que la esfera, a través de un imán, se

mantiene en el utillaje y es capaz de girar por tres contactos puntuales en 3 esferas pequeñas.

Se tendrá en cuenta más adelante que el centro de la esfera se encuentra a 30 mm de la base.



Figura 9. Utillaje esferas inferiores.

Las esferas laterales se colocaran sobre el centro de la viga de la bancada. El utillaje que se diseñó, es un bloque de aluminio con 2 agujeros roscados para el amarre del utillaje de las esferas inferiores y 2 agujeros pasantes para el amarre de este a la bancada. Su peso es de 4,75 kg.

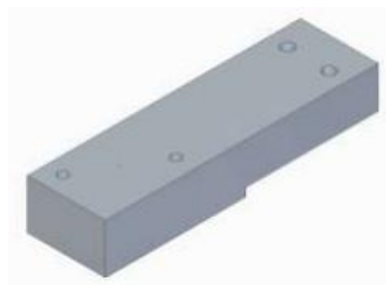


Figura 10. Utillaje lateral esferas inferiores.

Para las esferas centrales, que se encontraran en voladizo entre las vigas de la bancada, se utilizará un utillaje en forma de T amarrado en sus extremos.



Figura 11. Utillaje central esferas inferiores.

2.2 Sistema de medición.

La finalidad del sistema de medición es conocer la posición (XYZ) y orientación (ABC) del efector final en todo momento. Para ello, en este trabajo se van a utilizar 6 brazos telescópicos y 3 esferas siguiendo la siguiente disposición:

Dos triángulos equiláteros en la base, cuyos vértices son las esferas donde se apoyan los extremos de cada brazo. Y un triángulo, también equilátero, en la zona superior, cuya ubicación nos referiremos como plataforma, inverso a los otros dos, formado cada vértice por las esferas que deben alcanzar los tridentes y tendrán que ir integradas en el utillaje. Como se ve en la siguiente figura, a cada esfera del triángulo superior contactarán 2 brazos.

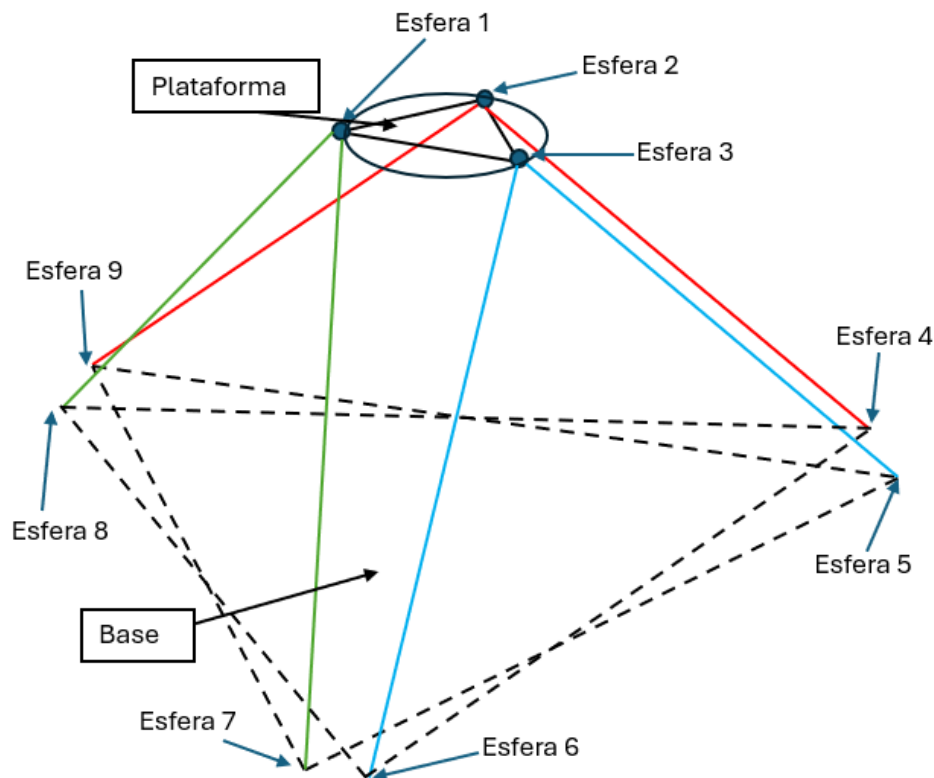


Figura 12. Diseño de la bancada. Vista en el programa Solid Edge.

2.2.1 Brazo telescópico y tridente.

El brazo que se va a utilizar [5] consta en un extremo de una esfera, la cual le permite registrarse y girar con respecto a un punto de la bancada mediante un apoyo cinemático. Y en el otro, un acoplamiento cinemático multipunto,

denominado tridente [6], formado por tres dedos que generan un contacto con la esfera del triángulo superior.

Este se encarga de proporcionar el desplazamiento relativo entre la esfera unida a la mano del robot y la esfera fijada en la bancada.

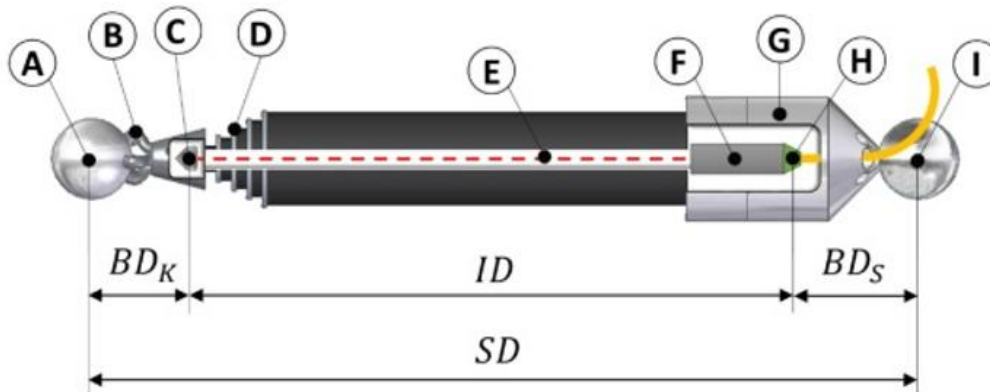


Figura 13. Esquema brazo telescópico.

Elemento	Descripción
A	Esfera fijada a la Máquina-Herramienta (Robot)
B	Tridente, acoplamiento cinemático
C	Retro reflector de esquina
D	Sistema telescópico, formado por 5 cilindros de fibra de carbono
F	Cabeza del sensor
G	Soporte de cabeza de sensor
H	Fibra óptica
I	Esfera montada en el sistema
SD	Distancia entre centros de las esferas
ID	Distancia del rayo láser
BD*	Distancia entre el retroreflector y la esfera fijada al robot
BD**	Distancia entre la fibra óptica y la esfera del sistema

Tabla 1. Descripción de los elementos.

Sobre el sistema debemos tener en cuenta para el desarrollo del trabajo que el peso de cada brazo es de 1 kg y que se distribuye 0,3 kg en las esferas donde se une el tridente y 0,7 kg en las esferas donde se apoya. Esta repartición de pesos es fundamental para el posterior análisis por elementos finitos.

También será necesario considerar las longitudes máxima y mínima de los brazos, así como el ángulo mínimo de cada uno, ya que estos parámetros serán fundamentales para evaluar, mediante simulación, la viabilidad del proceso en etapas posteriores. Los valores correspondientes son: una longitud máxima de 1000 mm, una longitud mínima de 420 mm y un ángulo mínimo de 30° [4].

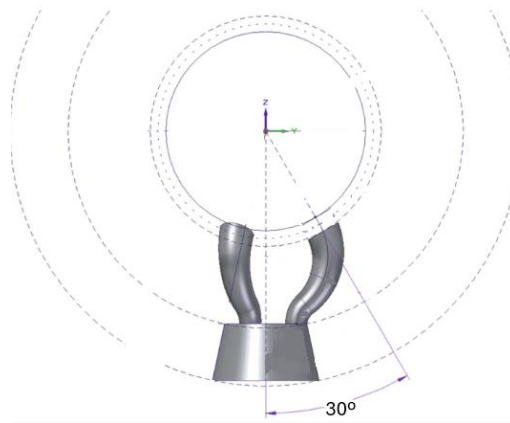


Figura 14. Ángulo mínimo del tridente.

Queda claro que, a partir de los elementos presentados hasta este punto, será necesario seleccionar y diseñar aquellos componentes específicos requeridos para cumplir con los objetivos propuestos en el presente trabajo.

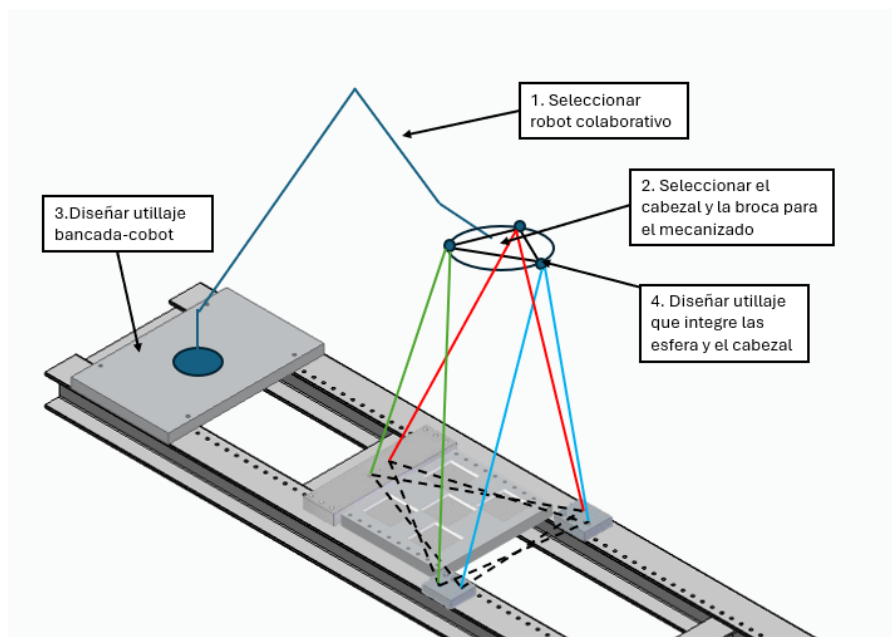


Figura 15. Célula de mecanizado.

3. Análisis y selección de componentes.

Los objetivos que se persiguen en el trabajo son medir las coordenadas XYZ y la orientación ABC del efector final de manera continuada a la vez que se realiza el proceso de mecanizado ligero, que en este caso serán varios punteados diferentes sobre las piezas master. Y comprobar la calidad de estos punteados, trasladando las piezas master a una máquina de medición por coordenadas (MMC) con la que obtendremos la posición teórica de los distintos mecanizados y podremos comprobar con su posición durante el proceso para obtener el error.

Para alcanzar los objetivos, se requiere un análisis de las características del proceso de mecanizado y una selección de los elementos y herramientas que lo llevarán a cabo.

3.1 Selección del robot colaborativo.

Dado que el objetivo principal no se centra en la realización de una tarea productiva, se realizará un análisis de las características técnicas y operativas necesarias para el desempeño de las funciones planteadas. La posibilidad de implementar un robot colaborativo surge como una alternativa interesante, considerando sus ventajas en términos de seguridad, flexibilidad y adecuación a entornos donde no se requieren altas prestaciones en cuanto a fuerza o rapidez.

Aunque los robots colaborativos se destacan por su diseño seguro y su capacidad para operar junto a los humanos, en este caso particular, la actividad que se llevará a cabo no puede considerarse colaborativa, ya que la tarea consiste en realizar un proceso de mecanizado.

A continuación, se presenta una tabla comparativa que incluye diferentes modelos de robots colaborativos de las diversas marcas disponibles en el mercado. Se evalúan sus características técnicas más relevantes para la actividad de verificación volumétrica que se pretende llevar a cabo. Se han considerado aspectos clave como la capacidad de carga, el rango de alcance, la precisión, la repetibilidad y las dimensiones del robot, ya que estas propiedades son determinantes para garantizar un desempeño adecuado en esta tarea específica.

La selección de estos parámetros responde a los requisitos del proceso. Este análisis permite identificar el modelo más adecuado para cumplir con los objetivos planteados.

Los parámetros deseados para el robot colaborativo incluyen una carga útil superior a 15 kg aproximadamente, lo cual es fundamental para soportar el utillaje que integrará las esferas del sistema de medición, el cabezal y la herramienta necesaria para realizar el mecanizado. Además, se busca un alcance superior a 1000 mm, permitiendo aprovechar al máximo el volumen de trabajo ofrecido por los brazos del sistema de medida.

Otros factores como la repetibilidad, el peso total del robot y su superficie ocupada también serán considerados. Estos se evaluarán en comparación con las opciones disponibles, seleccionando el modelo que mejor se ajuste a los requisitos específicos del proyecto y ofrezca un equilibrio óptimo.

3.2 Tabla comparativa de diferentes cobots.

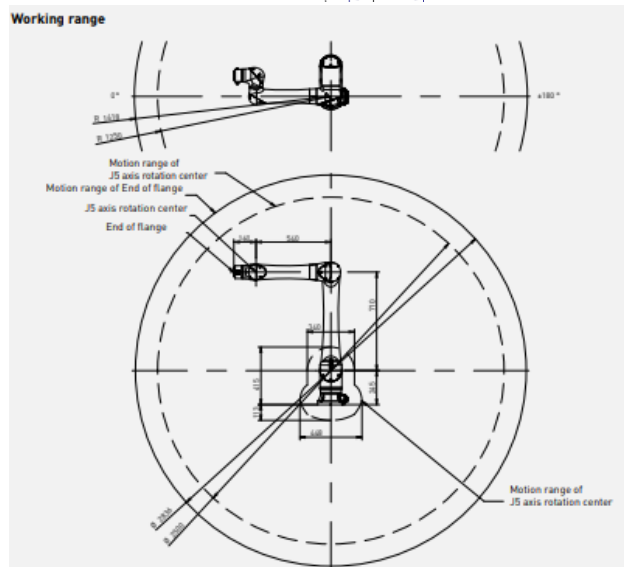
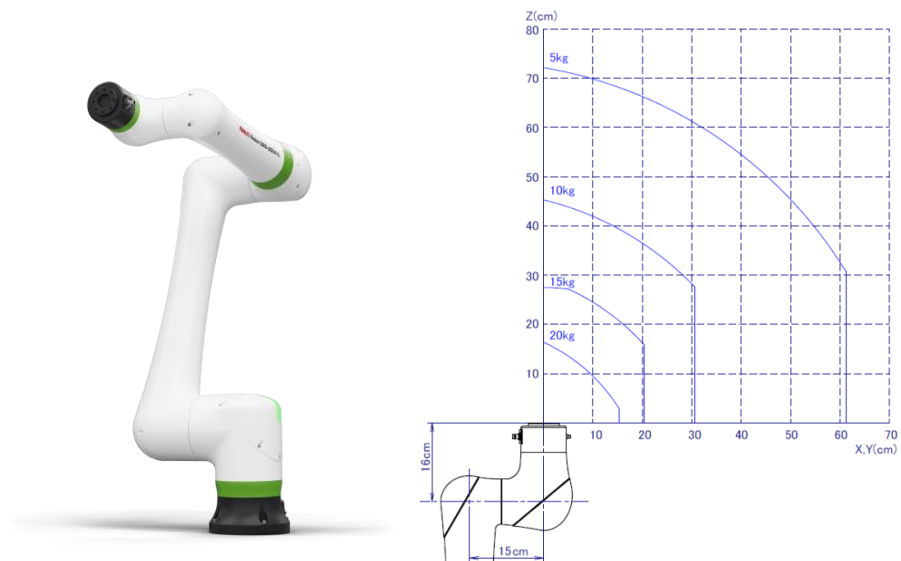
	MODELO	MARCA	CARGA ÚTIL(KG)	MAX. ALCANCE(mm)	REPETIBILIDAD(+/-mm)	PESO (Kg)	SUPERFICIE COLOCACION	ALIMENTACIÓN TRIFASICA/ALTERNA	Nº EJES
1	LBR iiwa 7 R800	KUKA	7	800	0,1	24	Ø 190 mm	CA 110 V-230 V	7
2	LBR iiwa 14 R820	KUKA	14	820	0,15	30	Ø 190 mm	CA 110 V-230 V	7
6	UR5e	UNIVERSAL ROBOTS	5	850	0,03	18,4	17436,62463	100-240 VAC 7-440 Hz	6
7	UR10e	UNIVERSAL ROBOTS	12,5	1300	0,05	33,5	28352,8737	100-240 VAC 7-440 Hz	6
8	UR20	UNIVERSAL ROBOTS	20	1750	0,05	64	1217386,788	100-240 VAC 7-440 Hz	6
9	UR16	UNIVERSAL ROBOTS	16	900	0,05	33,1	28352,8737	100-240 VAC 7-440 Hz	6
10	GoFa 10	ABB	10	1520 muñeca /1620 brida	0,02	51	200mm x 200mm	24V/2A	6
11	GoFa 12	ABB	12	1270 muñeca /1370 brida	0,02	48	200mm x 200mm	24V/2A	6
12	M1013	DOOSAN ROBOTICS	10	1300	0,05	34	150 x 150 mm	DC 24 V / Máx. 3 A	6
13	M1509	DOOSAN ROBOTICS	15	900	0.03	33	150 x 150 mm	DC 24 V / Máx. 3 A	6
14	CRX-10iA	FANUC	10	1249	0,04	40	28352,8737	1 phase 200-240 V 50/60 Hz	6
15	CRX-15iA	FANUC	15	1441	0,02	255	346 x 346	3 phase 380-575 V 50/60 Hz	6
16	CRX-20iA/L	FANUC	20	1418	0.04	41	Ø 190	1 phase 200-230 V 50/60 Hz	6
17	HC10DTP	YASKAWA	10	1379	0,05	48	231.2 x 231.2	200-230 VAC 50/60 Hz	6
18	HC20SDTP	YASKAWA	20	1412	0,05	97	280 X 280	200-230 VAC 50/60 Hz	6
19	TM14	OMRON	14	1100	0.1	32	Ø 203	110-240 VAC 50/60 HZ	6
20	TM16	OMRON	16	900	0.1	32	Ø 203	110-240 VAC 50/60 HZ	6
21	CR16	DOBOT	16	1000	0.03	40	28652,1104	48V DC	6
22	JAKA Zu 18	JAKA	18	1073	0.03	35	27759,11269	100-240VAC, 50-60Hz	6
23	E15	HAN's	15	1300	0.05	60		200-240V AC 50-60Hz	6

Tabla 2. Comparativa de las características de los robots colaborativos

En la Tabla 2, donde se comparan 23 modelos de robots colaborativos de diferentes marcas, detallando aspectos técnicos clave para su evaluación. Cada fila representa un modelo, mientras que las columnas incluyen: **MODELO**, que identifica el nombre específico del robot; **MARCA**, que indica el fabricante; **CARGA ÚTIL (KG)**, que muestra la capacidad máxima de carga que puede manipular; **MAX. ALCANCE (mm)**, que señala la distancia máxima que alcanza el brazo del robot; y **REPETIBILIDAD (\pm mm)**, que refleja la precisión en la repetición de movimientos. Además, se incluye el **PESO (KG)**, relevante para la instalación, y la **SUPERFICIE DE COLOCACIÓN**, que describe el área que ocupa el robot, clave para el montaje. También se especifica la **ALIMENTACIÓN TRIFÁSICA/ALTERNA**, indicando el tipo de energía eléctrica requerida, y el **nº DE EJES**, que define los grados de libertad o movimientos posibles. Esta tabla permite comparar los robots según sus capacidades, características y compatibilidad con distintos entornos y aplicaciones.

Basándonos en la tabla comparativa de modelos de robots colaborativos, se ha seleccionado el modelo **CRX-20iA/L de FANUC** como el más adecuado para la tarea de verificación volumétrica. Este cobot cumple con todos los requisitos establecidos: ofrece una capacidad de carga útil suficiente para soportar el utillaje necesario, incluyendo el cabezal y las esferas del sistema de medición. Además, cuenta con un alcance superior a los 1000 mm, lo que permite aprovechar al máximo el volumen operativo del sistema de medición.

El CRX-20iA/L también destaca por su excelente repetibilidad, asegurando mediciones consistentes y precisas, lo que es esencial en una aplicación donde la precisión es clave. Por último, su diseño compacto y peso reducido facilitan su integración en el espacio disponible de la bancada, sin necesidad de realizar adaptaciones significativas en la infraestructura. Estas características hacen de este modelo la elección óptima para llevar a cabo la actividad planteada.



Robot	CRX-20iA/L
Robot footprint [mm]	190
Mounting position Floor	•
Mounting position Upside down	•
Mounting position Angle	•
Controller	R-30iB Plus
Mini Plus	•
Dimensions [mm]	410 x 277 x 370
Tablet TP	•
Electrical connections	
Voltage 50/60Hz 3phase [V]	-
Voltage 50/60Hz 1phase [V]	200-230
Average power consumption [kW]	0.4
Integrated services	
Integrated signals on upper arm In/Out	2/2 *3
Integrated air supply	-
Environment	
Acoustic noise level [dB]	<70
Ambient temperature [° C]	0-45
Ambient humidity [%]	≤ 75 *4
Ambient humidity - Short term [%RH]	≤ 95 *5
Vibration acceleration [m/s ²]	≤ 4.9 [0.5G]
Protection	
Body standard/optional	IP67
Wrist & J3 arm standard/optional	IP67
Cleanroom class [ISO Class 3]	o *6
Food grade / mechanical options	
Food grade grease	o *7
White epoxy paint	o

Figura 16. Robot colaborativo CRX-20iA/L de FANUC. Tablas y gráficas de sus características [6,9]

3.3 Análisis del proceso de mecanizado.

El proceso de medición de los taladrados realizados en las piezas master se lleva a cabo utilizando una MMC equipada con un palpador que incluye una esfera de 4 mm de diámetro. En primer lugar, el palpador de la MMC se posiciona para palpar un punto por autocentrado en el cono punteado generado durante el proceso de taladrado. Una vez alineado, el cabezal de la MMC desciende de manera controlada hasta que la esfera del palpador queda alojada en el interior del cono. En este punto, la esfera establece contacto tangente con las paredes del cono fabricado, y el sistema de la MMC registra las coordenadas XYZ del centro de la esfera, determinando así la posición precisa del taladrado respecto al sistema de referencia. Este procedimiento asegura una medición exacta y uniforme de las posiciones de los taladrados, permitiendo un análisis detallado de los errores y la calidad del proceso de mecanizado.

3.3.1 Broca

Para realizar la operación de mecanizado, se ha seleccionado una broca cuyo diseño geométrico permita cumplir con los requisitos de la tarea. En particular, el punteado generado debe dejar un cono invertido que permita el contacto adecuado de la esfera de 4 mm de diámetro perteneciente al palpador con el fin de obtener las coordenadas espaciales precisas de la operación.

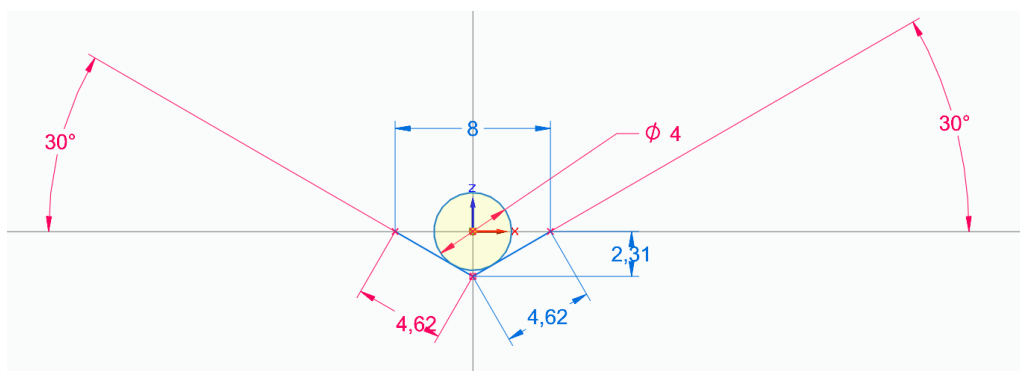
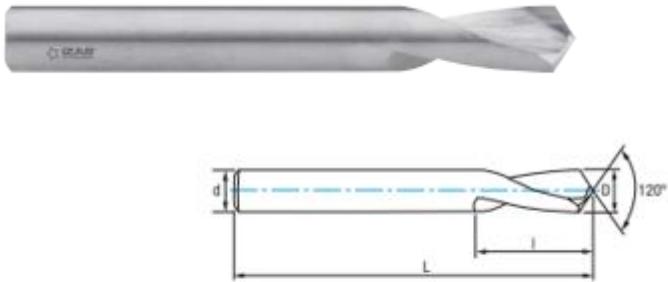


Figura 17. Boceto para calcular el diámetro de la broca a seleccionar.

Para garantizar que la esfera haga contacto con dos puntos dentro del cono, se han realizado cálculos geométricos que determinan los valores necesarios que debe alcanzar el punteado. Esto asegura que la esfera esté correctamente

posicionada para medir con precisión. Además, se ha establecido que el ángulo en el vértice del cono resultante será de 120°, lo que implica que la broca seleccionada debe tener el mismo ángulo en su punta para generar la forma deseada.

Como se observa en el boceto, para garantizar que el cono generado por el punteado cumpla con los requisitos geométricos establecidos, se requiere una broca con un diámetro superior a 8 mm. Por ello, se ha seleccionado una broca para centrar de diámetro 10 de metal duro fabricada por Izartools [7], adecuada para mecanizar aluminio.



Material		Vc (m/min)	Avances f/rev. (mm/rev) - Feed - Pas				
Grupo	Sub.		MD/HM/Carb.	Ø 2	Ø 3	Ø 6	Ø 10
P	P.1	60-75	0,070	0,090	0,150	0,200	0,250
	P.2	40-55	0,070	0,090	0,150	0,200	0,250
	P.3	25-30	0,060	0,080	0,140	0,170	0,200
	P.5	20-30	0,060	0,080	0,140	0,200	0,220
M		20-30	0,060	0,080	0,140	0,200	0,220
K	K.1	45-50	0,100	0,120	0,170	0,220	0,250
	K.2	45-50	0,100	0,120	0,170	0,220	0,250
S		20-30	0,050	0,060	0,080	0,120	0,150
N	N.1	55-60	0,100	0,120	0,150	0,220	0,250
	N.2	55-60	0,100	0,120	0,150	0,220	0,250
	N.3	100-110	0,120	0,140	0,160	0,220	0,250
	N.4	100-110	0,120	0,140	0,160	0,220	0,250
	N.5	70-90	0,120	0,140	0,160	0,220	0,250
	N.6	150-200	0,150	0,160	0,220	0,280	0,300

Aluminio

$$r.p.m. = \frac{Vc \times 1.000}{\pi \times \phi}$$

$$Vf (mm/min.) = r.p.m. \times f$$

Figura 18. Imagen de la broca y tabla de parámetros de mecanizado.[7]

3.3.2 Cabezal.

Para proceder a la selección del cabezal de mecanizado o electrohusillo adecuado para la operación de punteado, se ha realizado un cálculo detallado de

la potencia requerida durante el mecanizado. Este cálculo se basa en los parámetros de corte definidos previamente en la tabla de la figura 18, que incluyen factores como la velocidad de corte, el avance por revolución, la profundidad de corte y las características del material a mecanizar, en este caso aluminio.

La potencia necesaria para el mecanizado se obtiene aplicando las fórmulas estándar que relacionan estos parámetros con las propiedades del material y la herramienta seleccionada. Con estos valores, se puede determinar qué cabezal o electrohusillo es capaz de proporcionar la potencia suficiente para garantizar un proceso estable y eficiente, evitando problemas como sobrecargas o pérdidas de precisión durante el mecanizado. Nos interesa que la potencia requerida por el proceso no sea superior al 50% de la potencia máxima que puede ejercer el electrohusillo.

Dc	8,00	mm
n	2188,38	rpm
pi	3,14	
Vc	55,00	m/min
fn	0,22	mm/rev
Vf	481,44	mm/min
Q	24,20	cm ³ /min
Pc	0,28	KW
Kc	700,00 (350-700)	N/mm ²
Mc	0,00123	Nm
Fc	0,01	N

Tabla 3. Cálculo detallado de los parámetros de mecanizado y fórmulas utilizadas.

$$Q = \frac{D_c \times f_n \times v_c}{4}$$

$$P_c = \frac{f_n \times v_c \times D_c \times k_c}{240 \times 10^3}$$

$$M_c = \frac{P_c \times 30 \times 10^3}{\pi \times n}$$

Tras evaluar las opciones disponibles y teniendo en cuenta los cálculos realizados sobre la potencia requerida para el mecanizado, se ha seleccionado el motor husillo de VEVOR de 2,2 kW de potencia [8]. Se escoge en su versión cuadrada, ya que se considera que esta forma será la más favorable para el posterior diseño del utillaje a la mano del robot.

Este modelo cumple con todos los requerimientos establecidos para el proceso de punteado:



Figura 19. Imagen del cabezal de mecanizado VEVOR de 2,2kW,

sitio web: vevor.es

En primer lugar, su potencia de 2,2 kW garantiza un rendimiento suficiente para realizar el mecanizado de aluminio con los parámetros de corte definidos, sin comprometer la estabilidad ni la precisión durante la operación. Además, el husillo proporciona un momento de corte adecuado para las exigencias del proceso, asegurando un mecanizado eficiente y sin esfuerzos excesivos.

Otras de las características importantes que este modelo cumple son su compatibilidad con pinzas portabrocas del tipo ER20, lo que permite sujetar con firmeza la broca seleccionada, tener un peso adecuado para que la carga útil del robot colaborativo no se vea superada y una conexión monofásica que es la más adecuada para este caso.

4. Diseño y desarrollo de los utillajes

El diseño y desarrollo de los utillajes es clave para integrar los componentes en la célula de mecanizado, asegurando su estabilidad, funcionalidad y precisión. Esta etapa incluye la creación de elementos para acoplar el robot a la bancada, fijar el electrohusillo y el sistema de medición, y soportar las operaciones en la mesa de trabajo. Se realizarán análisis estructurales y verificaciones dimensionales para optimizar su rendimiento y garantizar un montaje eficiente en el sistema.

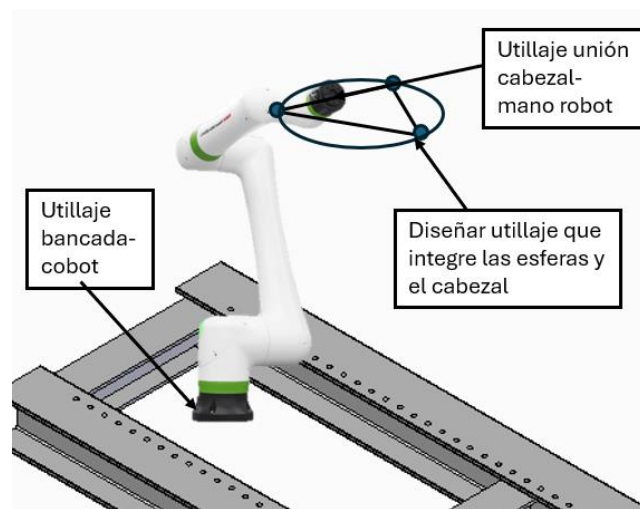


Figura 20. Esquema de los utillajes necesarios.

Durante este proceso de diseño, se realizarán análisis mediante elementos finitos y verificaciones dimensionales para optimizar las geometrías de los utillajes, mejorando su funcionalidad y facilitando su uso en la preparación del equipo y en las operaciones de cambio.

4.1 Utillaje de unión bancada-robot.

El utillaje que conecta la bancada con el robot es el encargado de fijar la base del robot a la bancada. Su diseño prioriza la estabilidad y la resistencia, dado que debe soportar de forma segura todo el peso del robot.

Para este diseño, se debe tener en cuenta las restricciones de amarre del robot, que consiste en 4 agujeros en la base del robot.

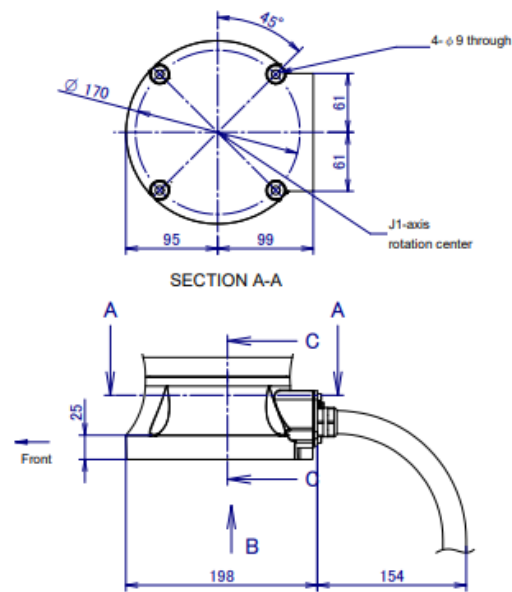


Figura 21. Dimensions of the robot base CRX-20iA/L back side connector.

Descripción de la pieza:

La pieza se trata de una plancha de acero de dimensiones 800x500x50 mm con 4 agujeros pasantes de $\varnothing 15$ mm en las esquinas, coincidentes con los de la bancada para amarrar la plancha a esta, y 4 agujeros pasantes de $\varnothing 9$ mm donde se sujetará el robot a la plancha.

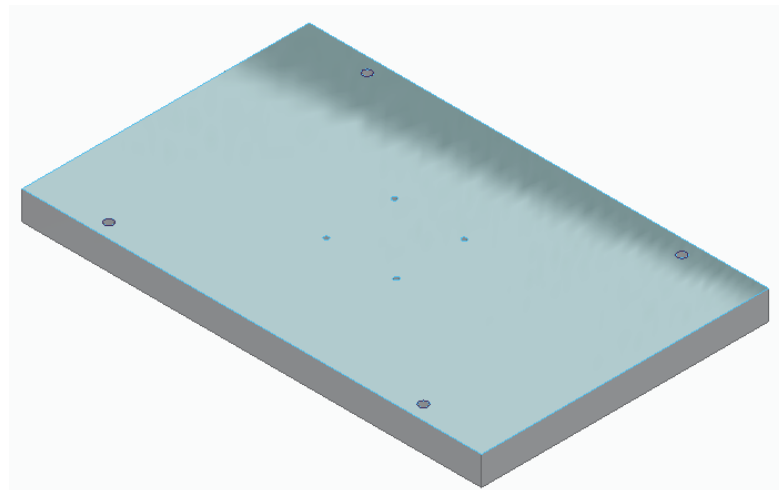


Figura 22. Utillaje de unión bancada-robot.

Estudio de elementos finitos:

Para garantizar el correcto funcionamiento del utillaje, se realizó un análisis de elementos finitos en el utillaje simulando las condiciones de operación. Se aplicó una fuerza vertical de 2136,618 N, correspondiente al peso total del robot, los elementos acoplados y su peso propio. En lo referente al momento generado, se considera el causado por la carga útil máxima del robot cuando su brazo está completamente extendido a una longitud de 1418 mm, lo que se traduce en un momento de 278211,6 Nmm. Además, se establecieron restricciones fijas en los cuatro agujeros de \varnothing 15 mm de la placa para simular su fijación. Los resultados del análisis en las zonas críticas mostraron un desplazamiento máximo de 0,00189 mm y una tensión máxima (Von Mises) de 2,66 MPa.

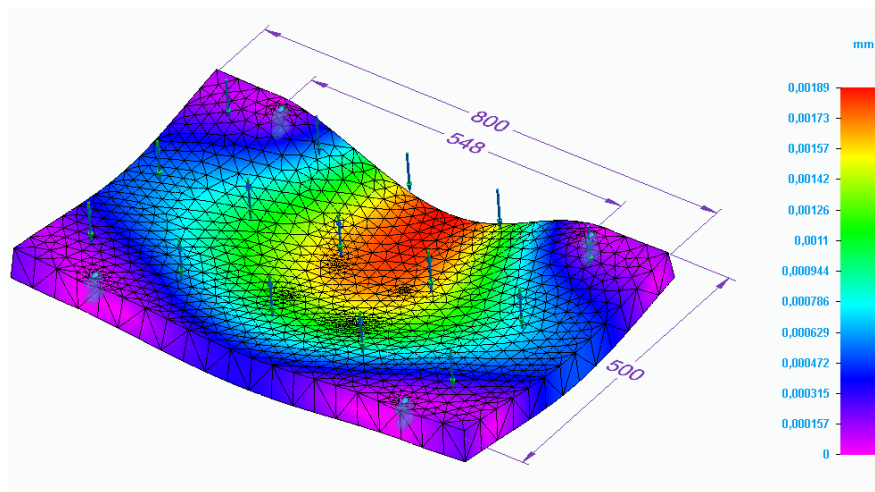


Figura 23. Distribución de los desplazamientos en el utillaje de unión bancada-robot.

4.2 Utillaje de unión cabezal-mano robot.

Este utillaje es el encargado de conectar el electrohusillo con la mano del robot, hay que conseguir implementar los dos tipos de uniones en una misma brida. El plano de la mano del robot la encontramos en el manual de Fanuc del CRX-20iA/L y el plano del cabezal por parte del fabricante.

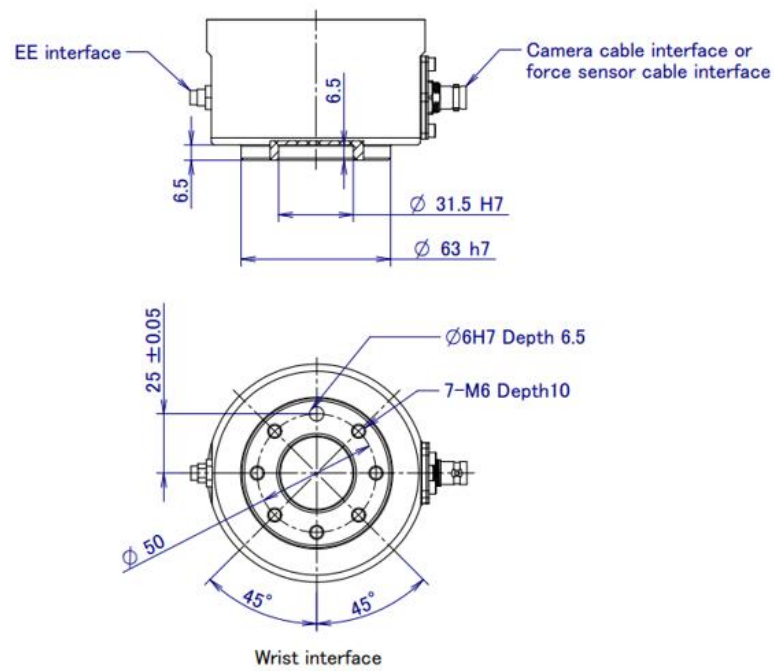


Figura 24. End effector interface CRX-20iA/L.

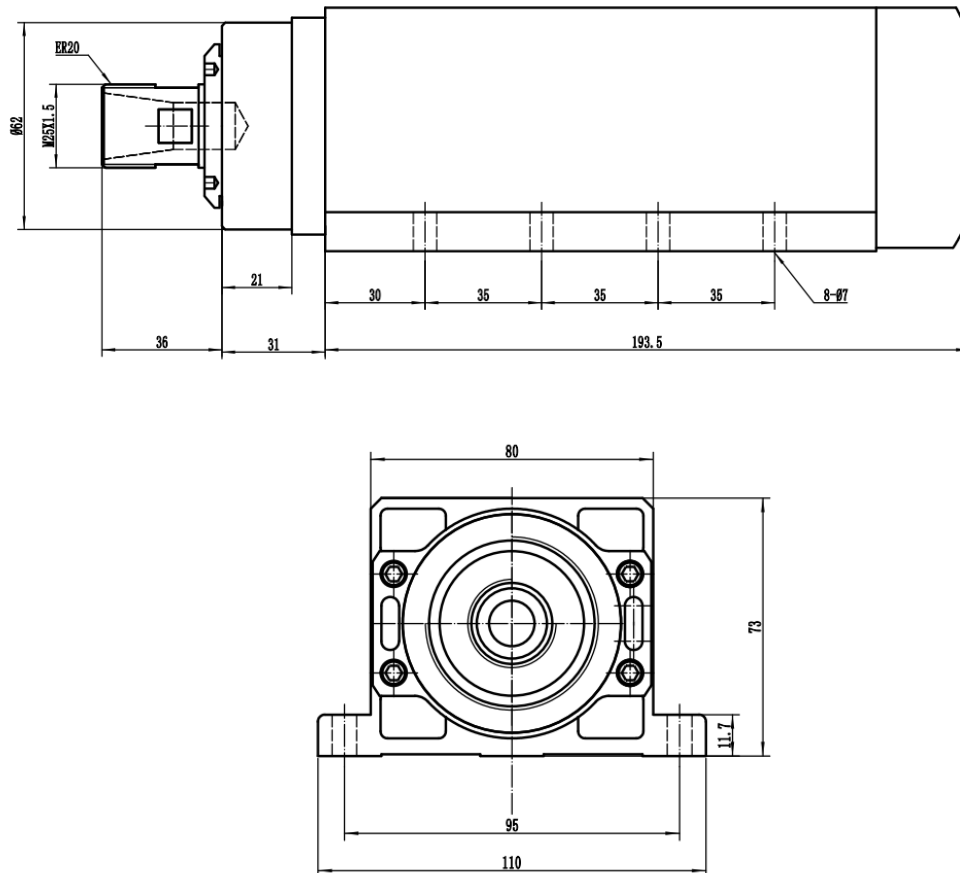


Figura 25. Croquis cabezal VEVOR 2,2kW .

Descripción de la pieza:

La pieza consiste en una placa fabricada en aluminio de dimensiones 115x150x25 mm; la descripción de las operaciones que se realizan en la pieza se va a dividir por caras de manera que se puedan comprender fácilmente:

En la cara anterior se encuentran las siguientes operaciones: 8 agujeros pasantes de diámetro 8 mm, 4 a cada lado de la placa, coincidiendo así con los de la estructura del cabezal, para así proceder a su amarre, y 7 agujeros siguiendo un patrón circular, con un vaciado para alojar la cabeza del tornillo de M6, mediante los cuales realizamos la unión con la mano del robot.

En la cara posterior, todas las operaciones van dedicadas al registro de la posición de la pieza con la mano del robot; estas son: un vaciado de diámetro 63 mm con 6,5 mm de profundidad para encajar la mano del robot, produciéndose así el registro de la posición y limitando el desplazamiento en dirección radial de la pieza. Para limitar el giro, se deja un saliente en el vaciado, actuando como un bulón de registro con forma cilíndrica de 6 mm de diámetro y 6 mm de profundidad que encajara en el único agujero no roscado de la mano del robot, como podemos ver en el plano de la figura 13.

En las caras laterales, de manera simétrica, se encuentra 1 agujero roscado por cara de M5 que servirá como sistema de amarre de unos tirantes que se comentarán más adelante.

Por último, en la cara inferior, dos agujeros roscados de M7 que se utilizarán para sujetar el apoyo inferior del siguiente utillaje, que se describirá a continuación.

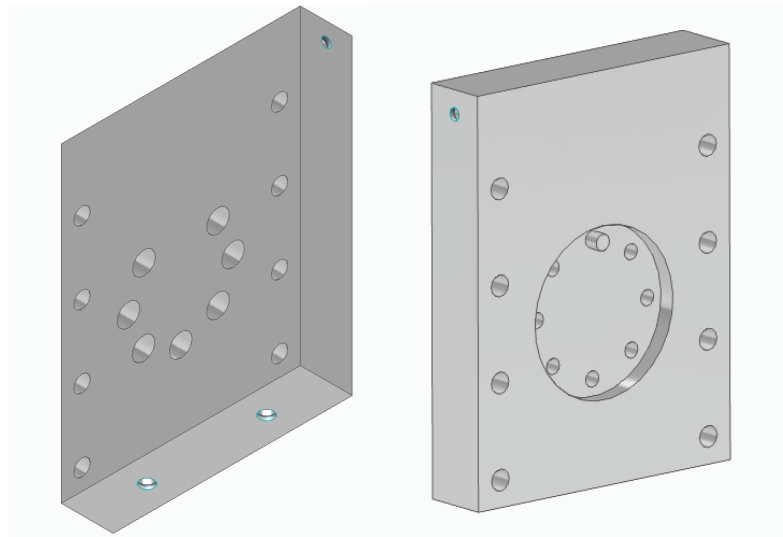


Figura 26. Utillaje de unión cabezal-mano robot.

Estudio de elementos finitos:

En esta pieza no es necesario realizar el estudio por elementos finitos, ya que va integrada en el siguiente utillaje, donde sí que se procederá al análisis de manera conjunta de los dos utillajes.

4.3 Utillaje de unión cabezal-sistema de medición.

En este apartado se presentará el diseño y desarrollo del utillaje encargado de unir el sistema de fijación anterior con las esferas de medición, donde harán contacto los tridentes del sistema de medición. Este utillaje debe cumplir con varios objetivos clave: garantizar robustez, rigidez y ligereza, además de permitir la integración precisa de las esferas de medición.

Las esferas estarán dispuestas de manera que formen un triángulo equilátero y se ubiquen en un radio de entre 284 mm, con el centro en la broca del cabezal. Asimismo, otro objetivo fundamental es que las esferas puedan ser retiradas y reinstaladas sin comprometer la repetibilidad en su posicionamiento. Para lograrlo, se contempla el uso de apoyos cinemáticos, aprovechando su capacidad para mantener una posición exacta incluso después de múltiples montajes y desmontajes.

Los apoyos cinemáticos son sistemas diseñados para garantizar la repetibilidad y precisión en el posicionamiento de elementos mediante un contacto controlado entre superficies específicas. Su principio de funcionamiento se basa en limitar los grados de libertad de una pieza mediante puntos de contacto bien definidos, evitando interferencias y distribuyendo de manera óptima las fuerzas aplicadas.

En el caso de este utillaje, el apoyo cinemático en cada esquina del triángulo se implementará mediante una configuración de contacto entre una esfera y dos cilindros. La esfera, fijada al componente móvil (apoyo que portará las esferas de medición), encajará perfectamente en los dos cilindros dispuestos sobre el soporte del utillaje. Este diseño crea un sistema de apoyo estable que elimina cualquier posibilidad de movimiento indeseado, asegurando que las esferas puedan ser desmontadas y reinstaladas sin perder precisión en su posición original.

Este enfoque no solo garantiza la repetibilidad del sistema, sino que también facilita el montaje y desmontaje de las esferas con un ajuste rápido y sin necesidad de recalibraciones frecuentes, optimizando tanto el tiempo como la precisión en las operaciones de medición.

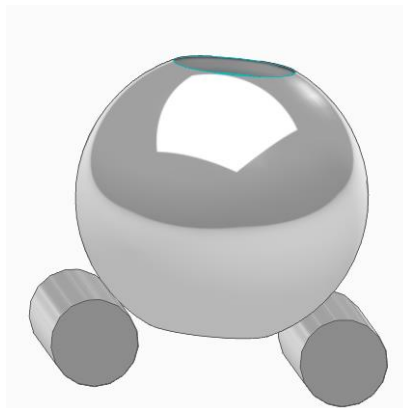


Figura 27. Disposición del apoyo cinemático o kinematic coupling en inglés.

Descripción del utillaje:

El primer diseño del utillaje, desde donde se realizarán los cambios en la geometría para aproximarnos a los objetivos propuestos, es un ensamblaje de un total de 9 piezas, por lo que se va a describir realizando un despiece, nombrando y

analizando en detalle las dimensiones, características y funcionamiento de cada una y cómo afectan al global.

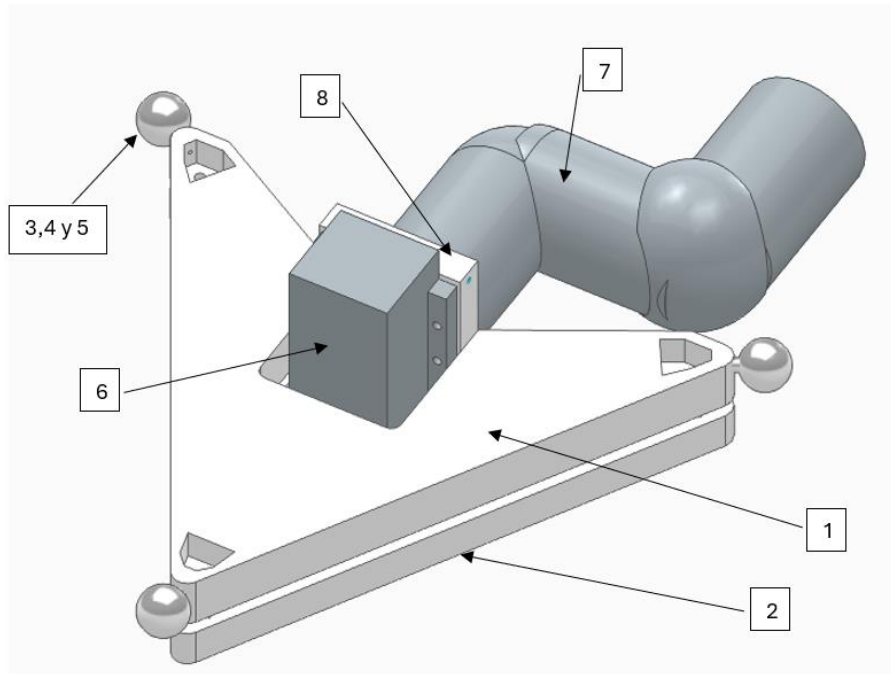


Figura 28. Primer diseño del utillaje.

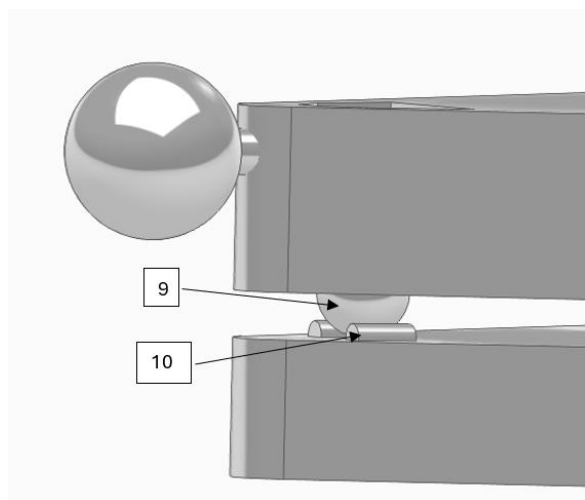


Figura 29. Detalle del primer diseño del utillaje.

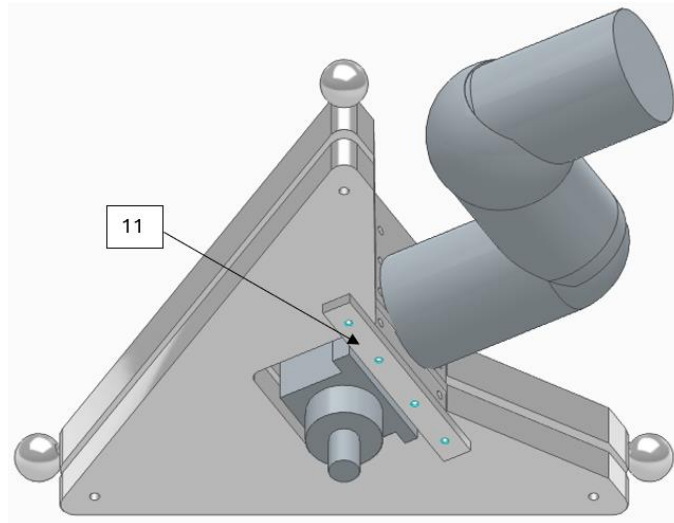


Figura 30. Vista inferior del primer diseño del utillaje.

Listado de las piezas:

1. Apoyo superior
2. Apoyo inferior
3. Esfera de medición
4. Cilindro unión esfera-apoyo
5. Casquillo esfera
6. Cabezal o electrohusillo
7. Brazo robot
8. Utillaje de unión cabezal-mano robot
9. Esfera del apoyo
10. Cilindro apoyo
11. Placa unión apoyo

4.3.1 Apoyo superior

Esta pieza es la parte superior del apoyo cinemático, es la pieza móvil que se va a retirar y recolocar cuando se necesite. Las esferas de medición irán amarradas a esta pieza.

Descripción de la pieza:

Placa de aluminio de forma triangular de espesor 40 mm con chaflanes en su cara posterior para evitar las colisiones con el brazo del robot, además de un vaciado en su centro en forma rectangular para que el cabezal pueda atravesar el apoyo.

En las esquinas se ubican unas cajas para poder atornillar tanto la pieza que unirá la esfera de medición a esta parte superior del apoyo como la esfera que forma parte del propio apoyo cinemático que hace contacto con los dos cilindros. Para ello, en la cara inferior se realiza un vaciado en forma de media esfera donde estas irán pegadas para que, una vez fuera esta parte superior, cuando se quiera retirar, estas no se suelten.

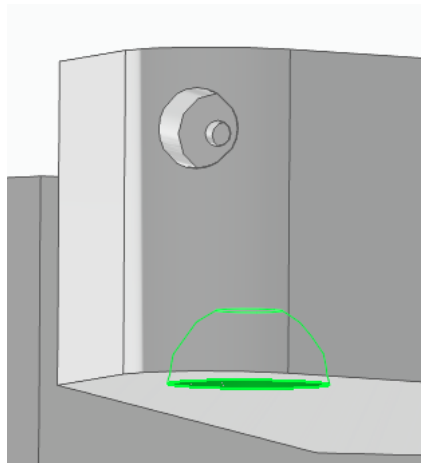


Figura 31. Detalle de las operaciones en las esquinas.

4.3.2 Apoyo inferior

La siguiente pieza del apoyo cinemático es su parte inferior. Se trata de una placa de aluminio con la misma forma que el apoyo superior, con sus mismos chaflanes para evitar las colisiones y el vaciado en el centro para que el cabezal pueda colocarse.

En su cara superior se pueden observar dos operaciones en cada esquina del triángulo, un agujero pasante que servirá para generar el apriete de la esfera, una vez que se apoye en los pares de cilindros, que irá roscada como veremos más adelante, y dos vaciados donde se alojarán los cilindros tumbados para contactar

con la esfera. La separación entre estos es crucial, ya que tiene que permitir que la varilla que irá roscada a la esfera atraviese el apoyo inferior sin que colisione, pero no puede superar una distancia que provoque que la esfera no haga contacto con los dos cilindros, lo que provocaría que no se generase el apoyo cinemático.

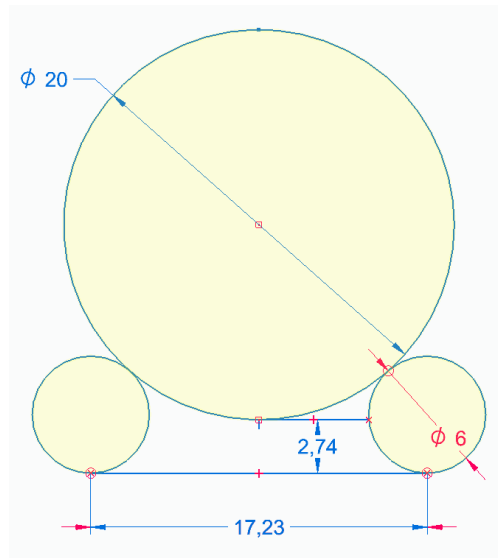


Figura 32. Boceto de ubicación de los cilindros del apoyo.

Por último, en la cara inferior se realizan dos agujeros roscados para unir la placa de unión apoyo de (pieza nº 11) a este apoyo inferior, consiguiendo así unir el apoyo cinemático con el utillaje de unión cabezal-mano robot.

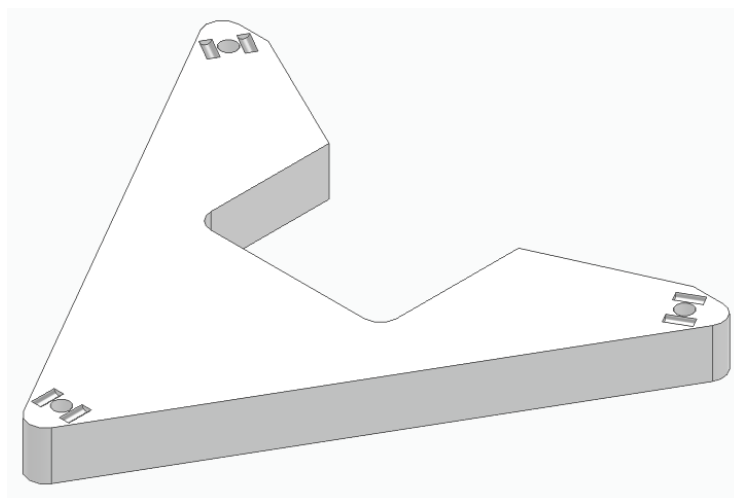


Figura 33. Apoyo inferior.

4.3.3 Esfera de medición

La esfera de medición de acero que tiene 1 ½ pulgadas o 38 mm de diámetro y a la que está pensado que hagan contacto dos tridentes por esfera, es un elemento comercial [13], al que para generar un buen apriete que aporte rigidez, se le realiza por electroerosión un agujero de diámetro 10 mm y de 25 mm de profundidad donde se alojará un casquillo roscado en el interior.

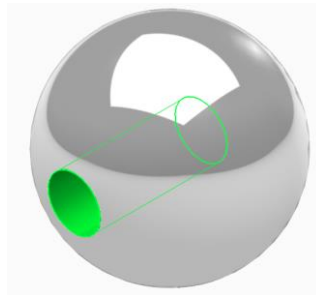


Figura 34. Esfera de medición.[13]

4.3.4 Cilindro unión esfera-apoyo

La función de esta pieza es lograr la unión entre la parte superior del apoyo y la esfera de medición; para ello se diseña un cilindro que se alojará en los agujeros que se han comentado anteriormente de las esquinas del apoyo superior. Una vez ubicados, se apretarán al apoyo mediante un tornillo de M4, que se introducirá por la cajera de este. Par lograr el apriete con la esfera se realiza un rebaje en el diámetro y un roscado para poder roscar el casquillo que se encuentra en el interior de la esfera.

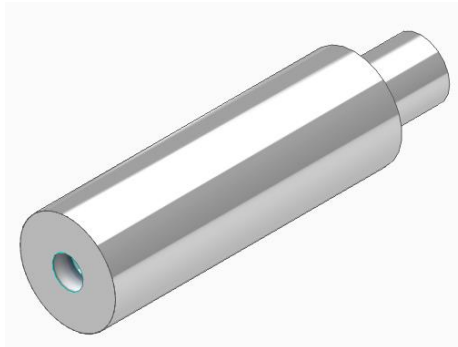


Figura 35. Cilindro unión esfera apoyo.

4.3.5 Casquillo esfera

Para terminar, el sistema con el que se van a sujetar las esferas de medición al apoyo, se diseña un casquillo de latón de diámetro exterior 10 mm que irá introducido en la esfera por apriete y el agujero interior irá roscado con M6, para que se pueda roscar al cilindro unión esfera-apoyo.

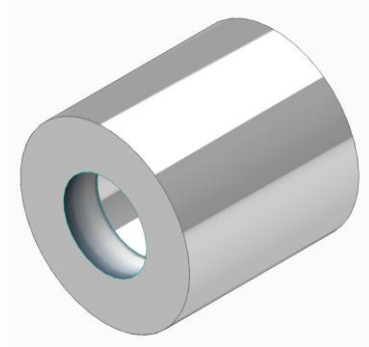


Figura 36. Casquillo esfera.

4.3.6, 4.3.7 y 4.3.8 Cabezal, brazo robot y utillaje de unión cabezal-mano robot

En este apartado se van a comentar las piezas señaladas con brevedad, ya que ya están explicadas en apartados anteriores; esto se hace para ubicar todos los elementos que aparecen en la figura 16 y seguir un orden. El cabezal que se va a utilizar es el VEVOR 2,2kW en su versión cuadrada, que ya se ha comentado en el apartado 3.4. Se realiza un diseño a través de Solid Edge, siguiendo sus dimensiones del plano para facilitar su integración y diseño del propio utillaje. Con el brazo robot ocurre lo mismo. Lo que se aprecia en la figura 16 solo es una aproximación según las dimensiones del manual para hacerse a la idea y para comprobar que el utillaje que se está desarrollando no colisionará. Por último, se señala el utillaje de unión cabezal-mano robot para no generar dudas, pero esta pieza ya se ha explicado en el apartado 4.2.

4.3.9 Esfera apoyo

La esfera del apoyo es un componente esencial en el diseño del sistema cinemático utilizado para asegurar la repetibilidad y precisión en la posición de las esferas de medición. Este elemento también es comercial[14], una esfera de acero

para rodamiento de diámetro 20 mm y actúa como punto de contacto clave en el sistema de apoyo.

Su función principal es interactuar con los dos cilindros dispuestos en la base del utillaje, formando un apoyo cinemático que limita los grados de libertad en cada esquina del triángulo equilátero. Gracias a esta configuración, se logra un posicionamiento estable y repetible, incluso después de múltiples desmontajes y montajes. La esfera se encuentra roscada con un agujero de M8 para poder así pasar una varilla roscada por su interior y generar el apriete entre el apoyo superior e inferior.

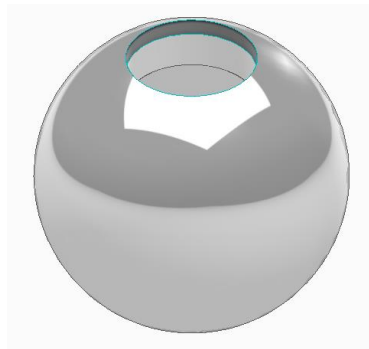


Figura 37. Esfera del apoyo.[14]

4.3.10 Cilindro apoyo

El cilindro de apoyo, elemento comercial [15], de acero, es esencial en el sistema cinemático para posicionar con precisión las esferas de medición. Con un diámetro de 6 mm y una longitud de 14 mm, está diseñado para garantizar un contacto óptimo con la esfera de 20 mm de diámetro. Su función principal es formar, junto con la esfera, un sistema que limite los grados de libertad en cada esquina del triángulo del utillaje, asegurando estabilidad y repetibilidad.

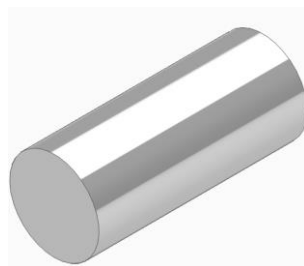


Figura 38. Cilindro esfera.[15]

4.3.11 Placa unión apoyo

La placa de unión de apoyo conecta el sistema de apoyo inferior con el utillaje que une el cabezal y la mano del robot. Fabricada en aluminio, esta placa combina ligereza y resistencia, contribuyendo a la estabilidad del conjunto sin añadir un peso excesivo.

Sus dimensiones son 195 x 25 x 10 mm y cuenta con cuatro agujeros de 8 mm de diámetro.

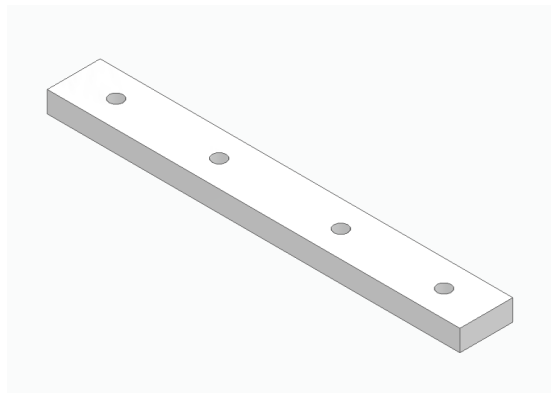


Figura 39. Casquillo esfera.

4.4 Análisis comparativo de rigidez y peso para la selección del diseño final.

En este apartado se busca identificar el diseño más eficaz para cumplir con los objetivos planteados; para ello nos apoyaremos en un análisis detallado de la relación entre peso y rigidez de los diferentes diseños y modificaciones del utillaje. La rigidez es un factor crítico, ya que afecta directamente a los desplazamientos que puedan experimentar las esferas de medición durante su uso, y estos deben ser minimizados para garantizar la precisión en las mediciones volumétricas.

Al mismo tiempo, se considera fundamental mantener un peso reducido en el conjunto, ya que un peso excesivo podría comprometer la manejabilidad del sistema y aumentar las cargas sobre el robot colaborativo, afectando su rendimiento. A través de este análisis, se pretende alcanzar un equilibrio entre rigidez y ligereza, logrando un diseño óptimo que cumpla con los requerimientos funcionales sin sacrificar la facilidad de uso y montaje.

Este enfoque permitirá evaluar diferentes configuraciones y realizar las modificaciones necesarias para encontrar la mejor solución que combine precisión, estabilidad y eficiencia en el desempeño del utillaje dentro de la célula de mecanizado.

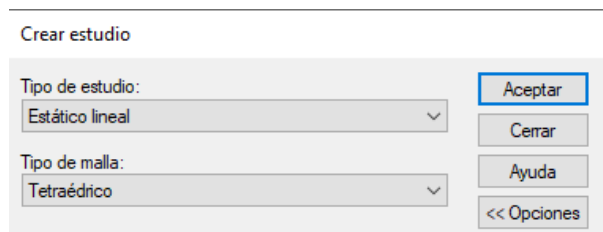
Es fundamental comprender la estructura del procedimiento que se seguirá para alcanzar el diseño final del utillaje. Este procedimiento se basa en el análisis por elementos finitos utilizando el software Solid Edge, a través del cual se evaluarán las tensiones y los desplazamientos que experimenta el utillaje bajo las condiciones de carga establecidas.

Dado que las cargas aplicadas al utillaje permanecen constantes en todos los diseños evaluados, es posible comparar de manera efectiva los resultados obtenidos. Esto nos permitirá determinar si las modificaciones realizadas acercan el diseño a los objetivos establecidos, como minimizar los desplazamientos y mantener la rigidez, o si, por el contrario, lo alejan de estos requerimientos. Este enfoque asegura que cada iteración sea guiada por un análisis técnico, facilitando la optimización del diseño.

4.4.1 Análisis por elementos finitos

En este apartado se describe el análisis por elementos finitos de un caso, el resto se seguirá el mismo procedimiento.

En primer lugar, el tipo de estudio, en este caso, es un análisis estructural estático.



Crear estudio

Tipo de estudio:
Estático lineal

Tipo de malla:
Tetraédrico

Aceptar
Cerrar
Ayuda
<< Opciones

Figura 40. Selección del tipo de estudio.

Se seleccionan todos los elementos ya comentados en el apartado 4.3, menos el cabezal y la mano del robot que, como hemos indicado anteriormente, solo se diseñan para ayudar a la integración y al diseño del utillaje.

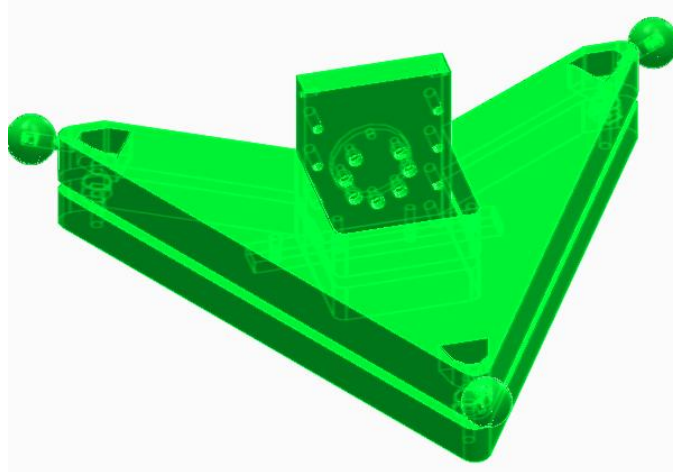


Figura 41. Selección de toda la geometría.

Se definirán las cargas externas como fuerzas. En todos los estudios las fuerzas serán las mismas: las generadas por el peso de los tridentes en contacto con las esferas de medición. Cada tridente genera una carga de $1/3$ de kilo en la esfera. Como en cada esfera habrá dos tridentes que harán contacto, la carga final será de $2/3$ de kilo en cada una de las esferas. Al ser una carga referida al peso, esta llevará una dirección y sentido negativo en el eje Z.

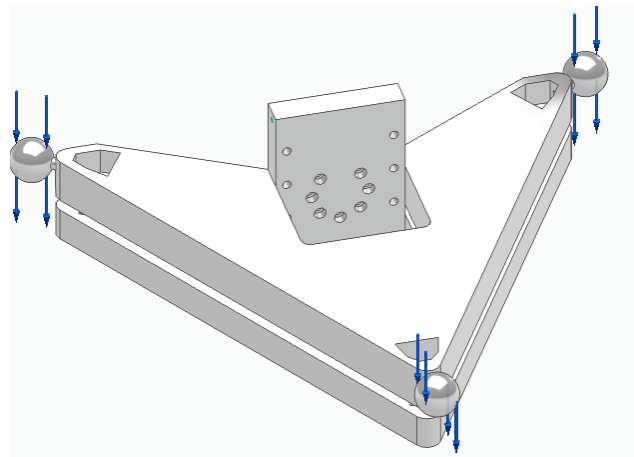


Figura 42. Aplicación de las cargas estructurales.

Las restricciones o puntos fijos del estudio tampoco sufrirán ninguna modificación entre los diferentes diseños, por lo que en todos se han colocado puntos fijos en los 7 tornillos que amarran la pieza de unión entre el cabezal y la mano del robot a esta última. Y a los 4 tornillos que sujetan la placa de unión del apoyo a la parte inferior de este.

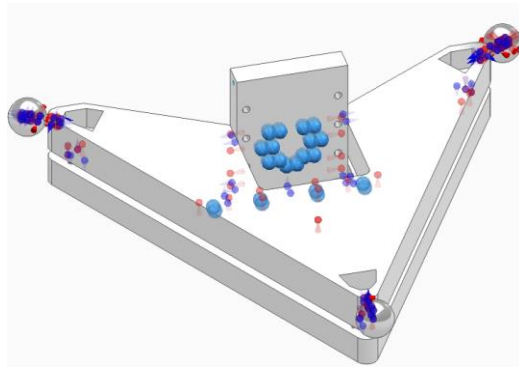


Figura 43. Restricciones y conectores.

Con el modelo y las condiciones configuradas, se genera una malla de elementos finitos para discretizar la geometría. Este paso permitió dividir el modelo en pequeños elementos interconectados, facilitando la resolución de las ecuaciones de equilibrio estructural.

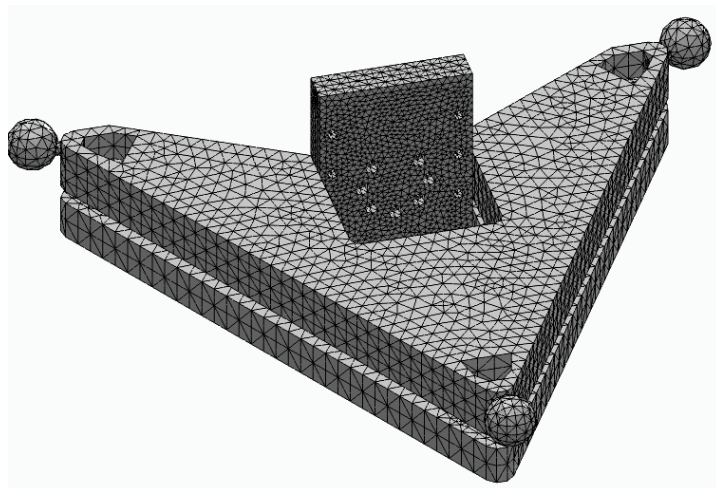


Figura 44. Mallado.

Los resultados obtenidos incluyeron mapas de tensiones (como las tensiones de Von Mises) y desplazamientos, los cuales fueron visualizados en forma de distribuciones de color sobre la geometría, centrándonos en el punto de interés, que es el centro de cada una de las tres esferas.

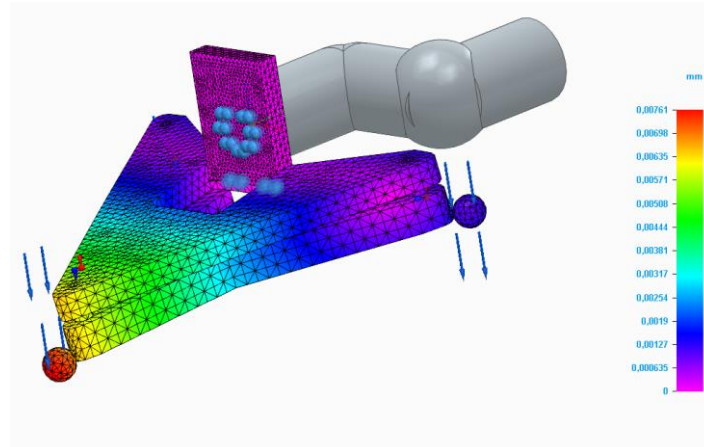


Figura 45. Deformada y resultados de los desplazamientos según tabla de colores.

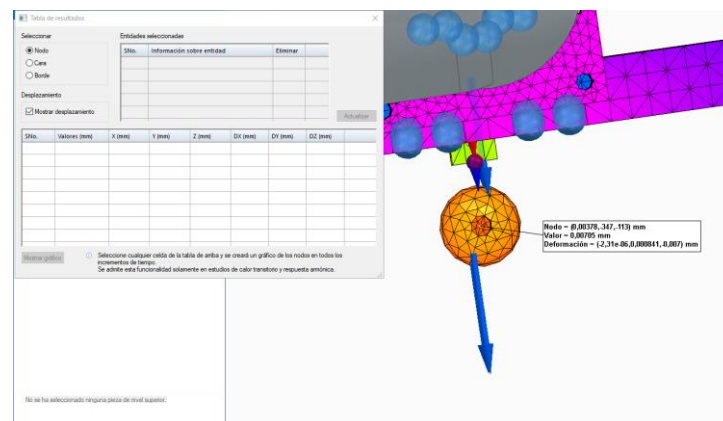


Figura 46. Ubicación del nodo donde se miden los desplazamientos (centro esfera).

4.4.2 Evolución del diseño y análisis de los resultados

En este apartado, se presentan cinco diseños distintos del utillaje, enfocados específicamente en la modificación de los elementos del apoyo. Cada diseño incorpora diferentes configuraciones para comprobar cómo afectan a la rigidez y al peso.

Más adelante se comentan los cambios en detalle de cada uno y qué se espera conseguir.

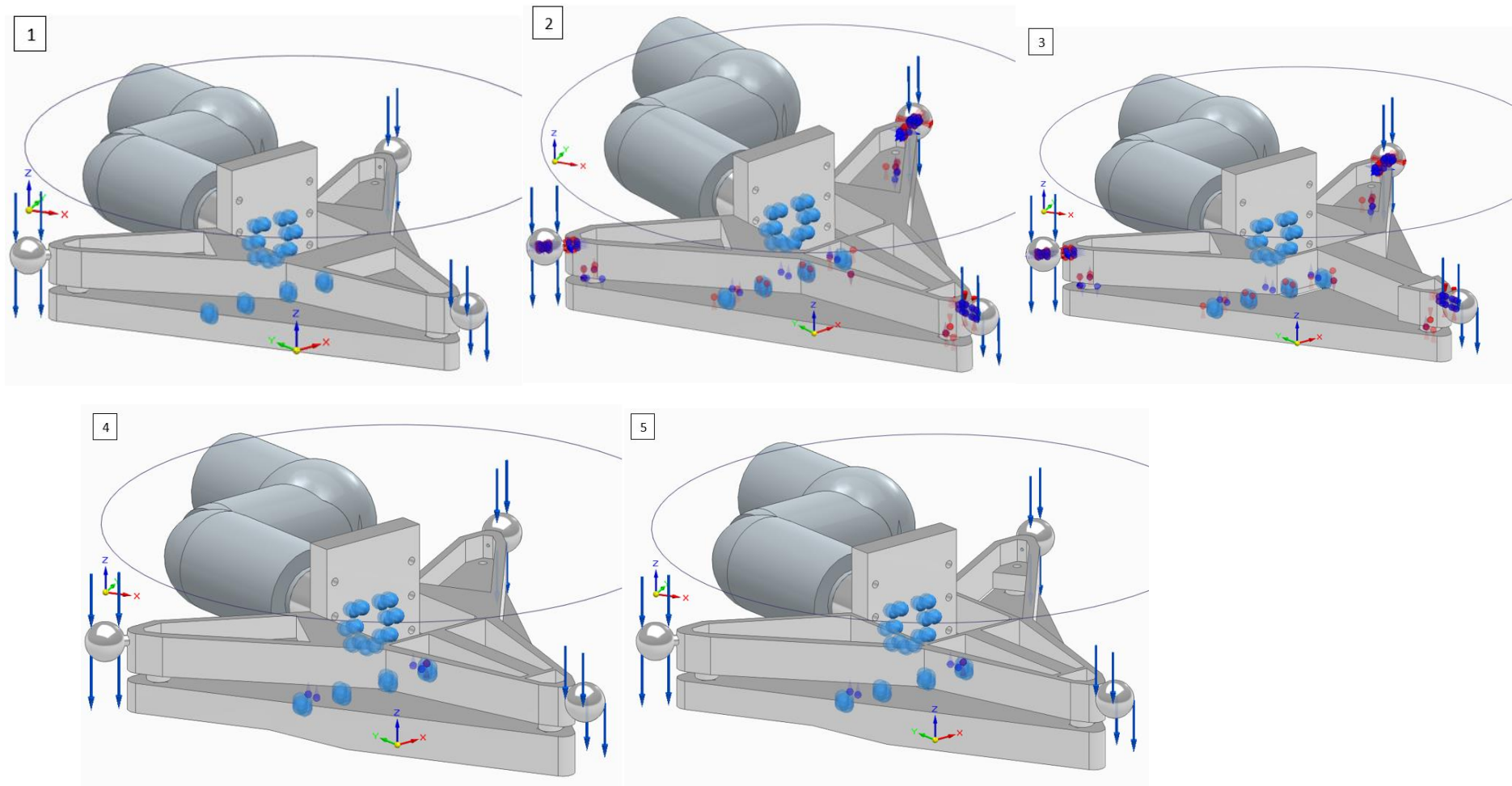


Figura 47. Conjunto de diseños diferentes del utillaje.

Modificaciones en el diseño:

Diseño 1:

- Modificación realizada: Respecto al diseño inicial se han realizado chaflanes en los laterales del triangulo y se han aumentado la dimensión de las cajas con el objetivo de aligerar el apoyo superior.
- Resultado esperado: Aligerar el peso total del utillaje, en concreto la parte móvil que es lo que nos interesa. Al aligerar puede que se pierda rigidez.

Diseño 2:

- Modificación realizada: Modificamos la cajera frontal, aumentando su área, pero dejando un nervio central.
- Resultado esperado: Un ligero aumento del peso del utillaje, pero se espera ganar rigidez en la esfera frontal, que es la que se observa que tiene un desplazamiento mayor.

Diseño 3:

- Modificación realizada: Eliminar las paredes laterales de la cajera frontal y ensanchar el nervio.
- Resultado esperado: Aligerar el utillaje y ganar rigidez tras aumentar la anchura del nervio.

Diseño 4:

- Modificación realizada: Volviendo al diseño 2 del apoyo superior, en este se modifica el apoyo inferior, modificando el espesor. Se quiere ver como afecta un aumento en el espesor en la zona que está sufriendo más desplazamientos.
- Resultado esperado: Aumentar la rigidez a costa de aumentar el peso global del utillaje.

Diseño 5:

- Modificación realizada: Manteniendo el cambio del espesor en el apoyo inferior, se realiza un vaciado completo de las cajas laterales, dejando la zona necesaria donde se aloja la esfera del apoyo.
- Resultado esperado: Disminuir el peso del utillaje sin variar la rigidez en la zona critica.

Resultados de los cambios:

			Peso Suma (kg)	kg/ μ m	μ m/kg
1	peso apoyo sup (kg)	3,829		6,74	0,15
	peso apoyo inf (kg)	5,273			
	desplazamiento max (mm)	0,00135	9,102		
2	peso apoyo sup (kg)	3,325		6,37	0,16
	peso apoyo inf (kg)	5,273			
	desplazamiento max (mm)	0,00135	8,598		
3	peso apoyo sup (kg)	3,298		5,19	0,19
	peso apoyo inf (kg)	5,273			
	desplazamiento max (mm)	0,00165	8,571		
4	peso apoyo sup (kg)	3,325		7,60	0,13
	peso apoyo inf (kg)	6,105			
	desplazamiento max (mm)	0,00124	9,43		
5	peso apoyo sup (kg)	2,014		6,29	0,16
	peso apoyo inf (kg)	6,105			
	desplazamiento max (mm)	0,00129	8,119		

Tabla 4. Resultados del estudio peso-rigidez.

La tabla muestra el comportamiento estructural de las cinco configuraciones diferentes, evaluando parámetros como el peso en los apoyos superior e inferior, el desplazamiento máximo y las relaciones peso/desplazamiento (kg/ μ m y μ m/kg). Los valores obtenidos destacan diferencias significativas en las cargas aplicadas y en los desplazamientos resultantes.

Distribución del peso: El peso en los apoyos superior e inferior varía ligeramente entre los diseños, siendo el diseño 5 el que tiene la menor carga en el apoyo superior (2,014 kg), mientras que el diseño 4 presenta la mayor carga en el apoyo inferior (6,105 kg).

Desplazamiento máximo: El desplazamiento máximo oscila entre 0,00124 mm (diseño 4) y 0,00165 mm (diseño 3). El diseño 4, a pesar de tener un mayor peso

total, presenta el menor desplazamiento máximo, sugiriendo una mayor rigidez estructural.

Relaciones peso-desplazamiento: Este calor indica lo bien aprovechada que esta la masa, el diseño 4 muestra la relación más eficiente en $\text{kg}/\mu\text{m}$ (7,60). Por el contrario, el diseño 3 tiene la relación menos favorable (5,19 $\text{kg}/\mu\text{m}$), lo que refleja una mayor deformación relativa bajo carga. En términos de micrómetros/kg, los diseños 1 y 4 presentan los valores más bajos (0,15 y 0,13 respectivamente), lo que reafirma su buen desempeño. Para la selección del diseño final buscamos desplazamientos bajos con un peso razonable para poder manipular el utillaje.

Diseño más eficiente: El diseño 4 destaca como el más eficiente en términos de peso soportado por desplazamiento (7,60 $\text{kg}/\mu\text{m}$) y presenta el menor desplazamiento máximo (0,00124 mm), lo que lo hace ideal para aplicaciones donde se priorice la rigidez estructural. Comentar también que el diseño 5 ofrece un equilibrio aceptable entre la distribución del peso y el desplazamiento.

4.5 Cambio en el utillaje de unión cabezal-sistema de medición.

Se ha llevado a cabo un cambio en el diseño del utillaje de unión entre el cabezal y el sistema de medición, considerando la posibilidad de rotar el utillaje. En esta nueva configuración, el apoyo superior, que originalmente servía para acoplar las esferas de medición, pasa a ocupar la posición inferior, manteniendo las esferas, mientras que el apoyo inferior se sitúa ahora en la parte superior.

Esta modificación surge como una estrategia para mitigar posibles colisiones entre los tridentes de medición y el apoyo inferior original al momento de entrar en contacto con las esferas de medición.

Además, este cambio permite implementar una mejora adicional: la posibilidad de incorporar tirantes estructurales en la nueva disposición del utillaje. Estos tirantes contribuirán a aumentar significativamente la rigidez del sistema, lo que resulta fundamental para minimizar deformaciones y garantizar la estabilidad durante las mediciones.

A pesar de este cambio en la configuración del utillaje, el procedimiento de análisis estructural se mantendrá sin modificaciones. Se llevará a cabo nuevamente un estudio detallado de peso-rigidez para evaluar las distintas alternativas de diseño que puedan surgir en esta nueva configuración. El objetivo sigue siendo identificar el diseño óptimo que logre el mejor equilibrio entre rigidez, peso y operatividad. Con esta metodología consistente, se garantizará que los nuevos diseños se sometan a los mismos estándares de evaluación, permitiendo una comparación directa con las configuraciones anteriores.

4.5.1 Evolución del diseño y análisis de los resultados utillaje rotado

Se va proceder a repetir el estudio anterior con el utillaje rotado. En este caso se dividirá en: modificaciones en el apoyo con las esferas (inferior), modificaciones en el apoyo sin esferas (superior) y tirantes.

PREELIMINARRES			
	CASO 1		
	PESO A. SUPERIOR	5,352	
	PESO A. INFERIOR	5,28	
	PESO SUMA	10,632	
	DEFORMACION	0,007	
	RELACIONES	PESO/DEFORMACION	1,52
		DEFORMACION/PESO	0,66

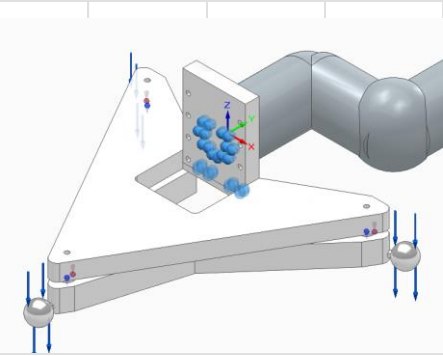


Tabla 5. Resultados del estudio peso-rigidez del diseño rotado

Caso 1: caso sobre el que se van a realizar los cambios, punto de partida.

- Modificación realizada: Respecto al diseño inicial se han rotado los apoyos en el eje Y, por lo que ahora las esferas se encuentran en el apoyo inferior
- Resultado esperado: Aumento de las deformaciones en las esferas.

MODIFICACIONES EN EL APOYO CON LAS ESFERAS (INFERIOR)		
CASO 2		
PESO A. SUPERIOR	5,352	
PESO A. INFERIOR	2,116	
PESO SUMA	7,468	
DEFORMACION	0,00709	
RELACIONES	PESO/DEFORMACION	1,05
	DEFORMACION/PESO	0,95
CASO 3		
PESO A. SUPERIOR	5,352	
PESO A. INFERIOR	1,677	
PESO SUMA	7,029	
DEFORMACION	0,00709	
RELACIONES	PESO/DEFORMACION	0,99
	DEFORMACION/PESO	1,01
CASO 4		
PESO A. SUPERIOR	5,352	
PESO A. INFERIOR	1,65	
PESO SUMA	7,002	
DEFORMACION	0,00776	
RELACIONES	PESO/DEFORMACION	0,90
	DEFORMACION/PESO	1,11

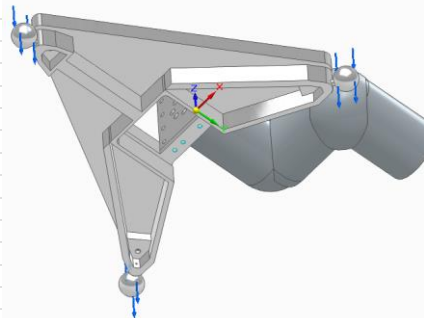
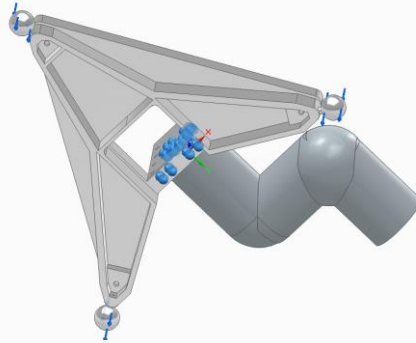
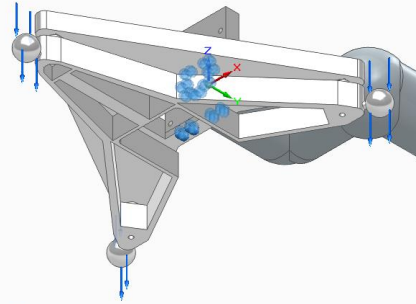


Tabla 6. Resultados del estudio peso-rigidez del diseño rotado, donde solo se realizan cambios en el apoyo inferior.

Modificaciones en el diseño del apoyo inferior:

Caso 2:

- Modificación realizada: Se generan cajeras, con un vaciado completo en las laterales y en la frontal se deja material en forma de nervio.
- Resultado esperado: Aligero peso del apoyo inferior, que es ahora el móvil sin esperar cambios en la rigidez.

Caso 3:

- Modificación realizada: Eliminar el nervio de la cajera frontal dejando en las tres la zona de material necesaria donde se alojara la esfera.
- Resultado esperado: Aligero el utilaje, pero se espera perder rigidez.

Caso 4:

- Modificación realizada: Dejar solo el nervio en la cajera frontal eliminando sus paredes.
- Resultado esperado: Peso aproximado al caso anterior pero con esta estructura se espera ganar rigidez.

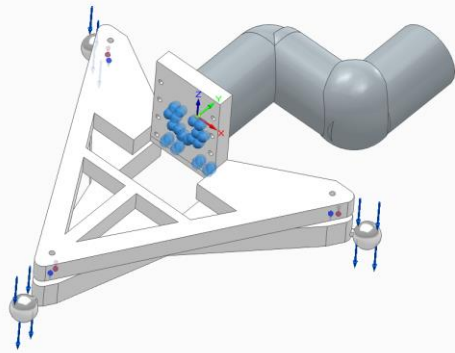
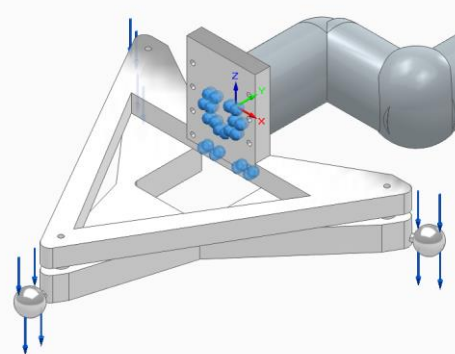
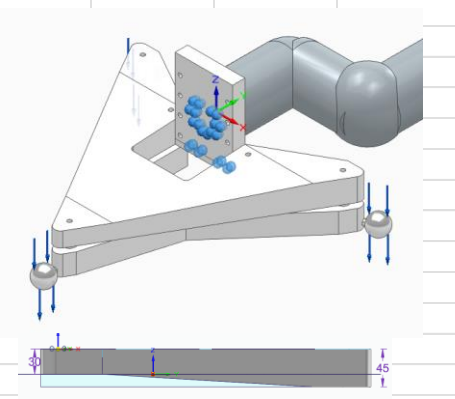
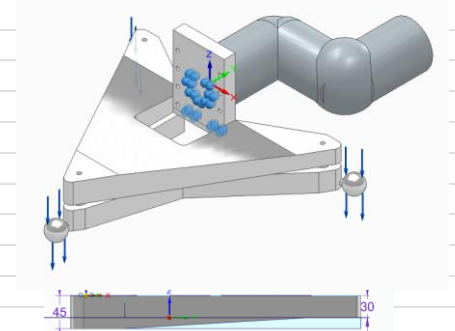
MODIFICACIONES EN EL APOYO SIN ESFERAS (SUPERIOR)		
CASO 5		
PESO A. SUPERIOR		4,098
PESO A. INFERIOR		5,28
PESO SUMA		9,378
DEFORMACION		0,0121
RELACIONES	PESO/DEFORMACION	0,78
	DEFORMACION/PESO	1,29
		
CASO 6		
PESO A. SUPERIOR		3,178
PESO A. INFERIOR		5,28
PESO SUMA		8,458
DEFORMACION		0,0133
RELACIONES	PESO/DEFORMACION	0,64
	DEFORMACION/PESO	1,57
		
ANALISIS CHAFLAN		
CASO 7		
PESO A. SUPERIOR		6,972
PESO A. INFERIOR		5,28
PESO SUMA		12,252
DEFORMACION		0,0111
RELACIONES	PESO/DEFORMACION	1,10
	DEFORMACION/PESO	0,91
		
CASO 8		
PESO A. SUPERIOR		6,375
PESO A. INFERIOR		5,28
PESO SUMA		11,655
DEFORMACION		0,00687
RELACIONES	PESO/DEFORMACION	1,70
	DEFORMACION/PESO	0,59
		

Tabla 7. Resultados del estudio peso-rigidez del diseño rotado, donde solo se realizan cambios en el apoyo superior.

Modificaciones en el diseño del apoyo superior:

Caso 5:

- Modificación realizada: Vaciados en el centro del triángulos dejando una estructura unida por nervios.
- Resultado esperado: Aligerar el peso del apoyo, puede que se pierda rigidez.

Caso 6:

- Modificación realizada: Se eliminan los nervios y se deja un vaciado mayor en el centro del triángulo.
- Resultado esperado: Disminuir peso del apoyo, pero se espera perder rigidez.

Caso 7:

- Modificación realizada: Volviendo al diseño sin vaciados se quiere observar como cambian los resultados al aumentar el espesor en las zonas laterales.
- Resultado esperado: Aumentar rigidez, pero aumentado el peso.

Caso 8:

- Modificación realizada: Mismo fundamento que en el caso 7 pero se aumenta el espesor de la zona frontal.
- Resultado esperado: Aumentar la rigidez a costa de aumentar el peso del apoyo.

4.5.2 Estudio de la incorporación de tirantes

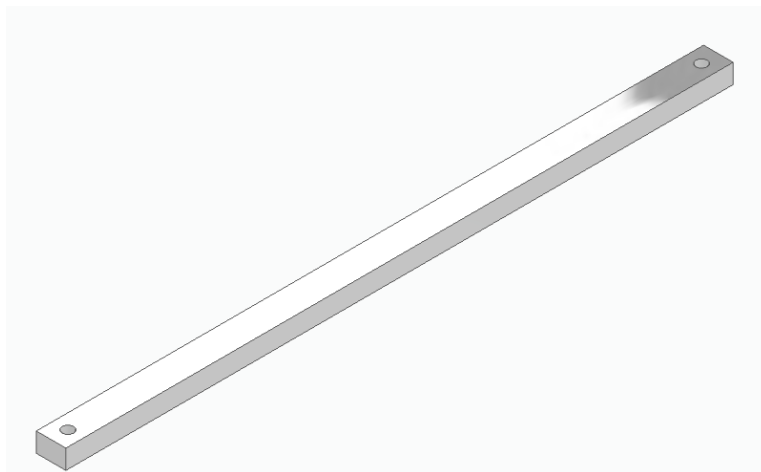


Figura 48. Tirante.

En este apartado se describe el tirante, un componente destinado a proporcionar rigidez estructural al sistema. Está fabricado en aluminio, y cuenta con unas dimensiones de 346 mm de largo, 15,33 mm de ancho y 10 mm de espesor.

El diseño incluye dos agujeros de 6 mm de diámetro situados en sus extremos, permitiendo su fijación al utillaje mediante 2 tornillos de M6.

En las secciones siguientes se analizarán en detalle su integración en el sistema.

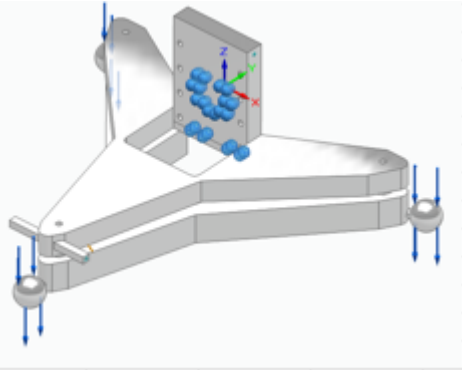
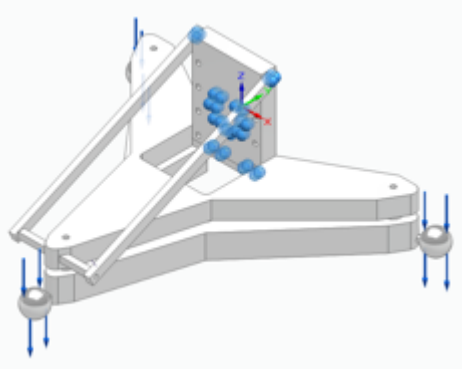
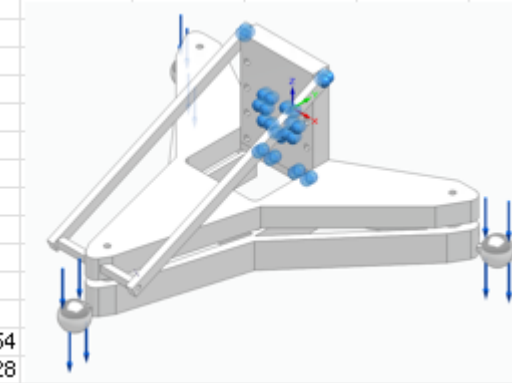
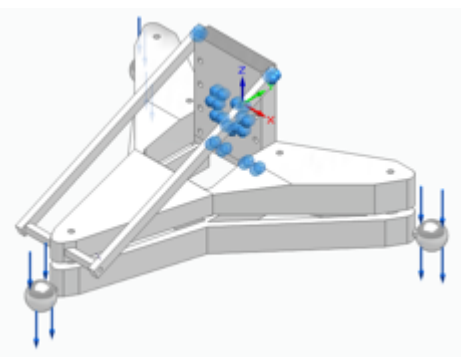
SIN TIRANTES			
CASO 9			
PESO A. SUPERIOR	3,828		
PESO A. INFERIOR	5,28		
PESO SUMA	9,108		
DEFORMACION	0,0113		
RELACIONES	PESO/DEFORMACION	0,81	
	DEFORMACION/PESO	1,24	
TIRANTES			
CASO 10			
TIRANTES	0,142		
PESO A. SUPERIOR	3,828		
PESO A. INFERIOR	5,28		
PESO SUMA	9,392		
DEFORMACION	0,00131		
RELACIONES	PESO/DEFORMACION	7,17	
	DEFORMACION/PESO	0,14	
PRUEBAS CON TIRANTES			
CASO 11			
TIRANTES	0,142		
PESO A. SUPERIOR	3,828		
PESO A. INFERIOR	1,866		
PESO SUMA	5,978		
DEFORMACION	0,00169		
RELACIONES	PESO/DEFORMACION	3,54	
	DEFORMACION/PESO	0,28	
CASO 12			
TIRANTES	0,142		
PESO A. SUPERIOR	4,93		
PESO A. INFERIOR	1,866		
PESO SUMA	7,08		
DEFORMACION	0,00149		
RELACIONES	PESO/DEFORMACION	4,75	
	DEFORMACION/PESO	0,21	

Tabla 8. Resultados del estudio peso-rigidez del diseño rotado, donde solo se incorporan los tirantes al utillaje.

Modificaciones en el diseño donde se incorporan los tirantes en el apoyo que tiene las esferas:

Caso 9:

- Modificación realizada: Con el objetivo de poder integrar tirantes en el utillaje se cambia el diseño, donde la zona de los apoyo frontal se necesita estrechar para que puedan colocarse los tirantes, se dejarán dos salientes a los lados con un agujero roscado de M6 donde se amarran los tirantes.
- Resultado esperado: Aligerar el peso total del utillaje.

Caso 10:

- Modificación realizada: Colocamos los tirantes
- Resultado esperado: Un aumento considerable en la rigidez del utillaje.

Caso 11:

- Modificación realizada: Colocar el diseño del apoyo interior que mejor resultados ha obtenido.
- Resultado esperado: Aligerar el utillaje.

Caso 12:

- Modificación realizada: El diseño del apoyo superior será el que tiene un aumento de espesor en las zonas laterales, ya que con los tirantes las esferas que se deforman mas son las de los lados.
- Resultado esperado: Aumentar la rigidez a costa de aumentar el peso.

Evaluación de los resultados:

Distribución del peso: En los diferentes casos analizados, los pesos totales varían dependiendo de los elementos estructurales utilizados (tirantes, chaflanes, etc.):

- **Pesos mayores:**

Casos como el Caso 1 (10,632 kg) y el Caso 7 (12,252 kg) presentan una mayor suma de pesos debido a una estructura más robusta, con distribuciones equilibradas entre los apoyos superior e inferior. Esto puede traducirse en mayor rigidez, pero también en mayor penalización de peso.

- **Pesos reducidos:**

Diseños como el Caso 3 (7,029 kg), el Caso 11 (5,978 kg, con tirantes) y el Caso 12 (7,080 kg, con tirantes) optimizan el peso total, enfocándose en elementos de refuerzo para compensar la rigidez estructural sin depender de una masa elevada.

Desplazamiento máximo: El desplazamiento máximo o deformación estructural es un indicador clave de la rigidez de la estructura. Valores menores de deformación se asocian con una mayor rigidez:

- **Deformaciones mínimas:**

Caso 10 (0,00131 mm) y Caso 12 (0,00149 mm): Estos diseños, que incluyen tirantes, destacan por sus valores mínimos de deformación, gracias al refuerzo adicional que incrementa significativamente la rigidez.

- **Deformaciones intermedias:**

Diseños como el Caso 1 (0,007 mm) y el Caso 8 (0,00687 mm, con chaflán) logran un equilibrio entre peso y rigidez, presentando desplazamientos aceptables con una distribución de masa razonable.

- **Deformaciones máximas:**

Caso 6 (0,0133 mm) y Caso 9 (0,0113 mm, sin tirantes): Estos casos tienen deformaciones más elevadas, evidenciando un comportamiento estructural

menos eficiente, especialmente cuando no se emplean refuerzos adecuados.

Relaciones peso-desplazamiento: Las relaciones peso/deformación y deformación/peso permiten evaluar la eficiencia estructural de cada diseño:

- **Peso/Deformación:** Diseños con mayor relación peso/deformación ofrecen una estructura más rígida por unidad de peso. Por ejemplo:
Caso 10: Relación peso/deformación de 7,17, el valor más alto, lo que lo convierte en el diseño más eficiente.
Caso 8: Relación peso/deformación de 1,70, también destaca, aunque con un peso mayor.
- **Deformación/Peso:** Valores más bajos de esta relación son deseables, ya que indican una menor deformación por unidad de peso.
Caso 10: Relación deformación/peso de 0,14, confirmando su rigidez sobresaliente.
Caso 12: Relación deformación/peso de 0,21, también destaca como un diseño eficiente.

Diseño más eficiente: Tras analizar la distribución del peso, el desplazamiento máximo y las relaciones peso-deformación, se concluye que el es el diseño más eficiente es con tirantes ya que los diseños mas eficientes son el Caso 10 y el Caso 12. El primero es el diseño con más rigidez del análisis, pero evaluando la actividad que se va desempeñar y observando que aunque el Caso 12 es menos rígido consigue un valor de deformación en igual al del Caso 10, con una reducción considerable en el peso total del utillaje y en concreto en el apoyo móvil o inferior que debido al cambio del diseño ahora se montará desde abajo, lo que resulta un montaje mas aparatoso respecto a la idea principal, por ello mismo buscaremos el peso mas reducido en esta parte del apoyo. Por lo tanto, el diseño final será el **Caso 12**.

Caso	Peso A. Superior	Peso A. Inferior	Peso Suma	Deformación	Peso/Deformación	Deformación /Peso
Caso 1	5,352	5,28	10,632	0,007	1,52	0,66
Caso 2	5,352	2,116	7,468	0,00709	1,05	0,95
Caso 3	5,352	1,677	7,029	0,00709	0,99	1,01
Caso 4	5,352	1,65	7,002	0,00776	0,9	1,11
Caso 5	4,098	5,28	9,378	0,0121	0,78	1,29
Caso 6	3,178	5,28	8,458	0,0133	0,64	1,57
Caso 7	6,972	5,28	12,252	0,0111	1,1	0,91
Caso 8	6,375	5,28	11,655	0,00687	1,7	0,59
Caso 9	3,828	5,28	9,108	0,0113	0,81	1,24
Caso 10	3,828	5,28	9,392	0,00131	7,17	0,14
Caso 11	3,828	1,866	5,978	0,00169	3,54	0,28
Caso 12	4,93	1,866	7,08	0,00149	4,75	0,21

Tabla 9. Resultados del estudio peso-rigidez.

El estudio concluye que el diseño que cumple de manera mas optima con los requerimientos de peso y rigidez es el caso 12. Su peso total es de 8,414 kg.

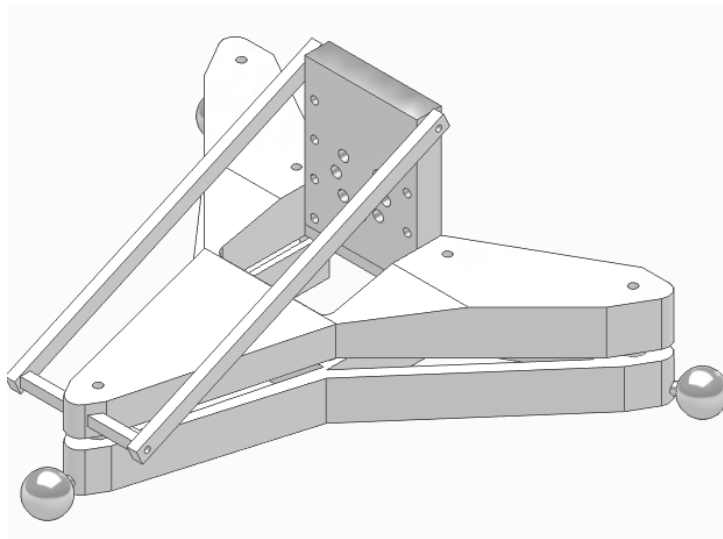


Figura 49. Diseño caso 12.

4.5.3 Análisis de cargas horizontales en el diseño seleccionado

En esta sección se aborda el análisis del comportamiento del diseño seleccionado cuando es sometido a cargas horizontales. Este tipo de evaluación es crucial para complementar el estudio inicial de rigidez vertical y garantizar que el utillaje pueda resistir adecuadamente fuerzas laterales sin comprometer su funcionalidad, estabilidad ni precisión.

Las cargas horizontales representan un factor crítico en escenarios donde las fuerzas externas, como vibraciones, impactos laterales, o el propio movimiento del sistema, puedan generar esfuerzos adicionales en el utillaje.

Por ello, este análisis busca identificar cómo dichas cargas afectan la distribución de los desplazamientos laterales y la posible aparición de puntos críticos que puedan comprometer la integridad estructural. Los valores de las cargas no cambian en este caso, seguirán siendo de 2/3 de kilo debido al peso de los dos tridentes o lo que es lo mismo 6,54 N. Nos centraremos en los casos críticos.

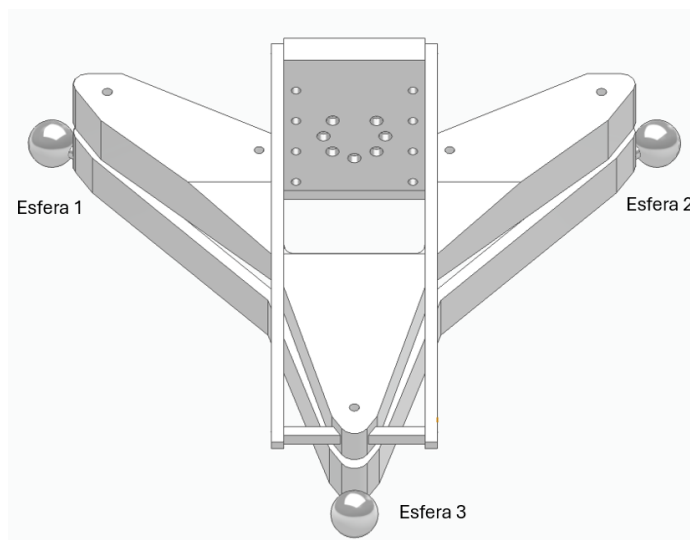


Figura 50. Diseño final, con tirantes

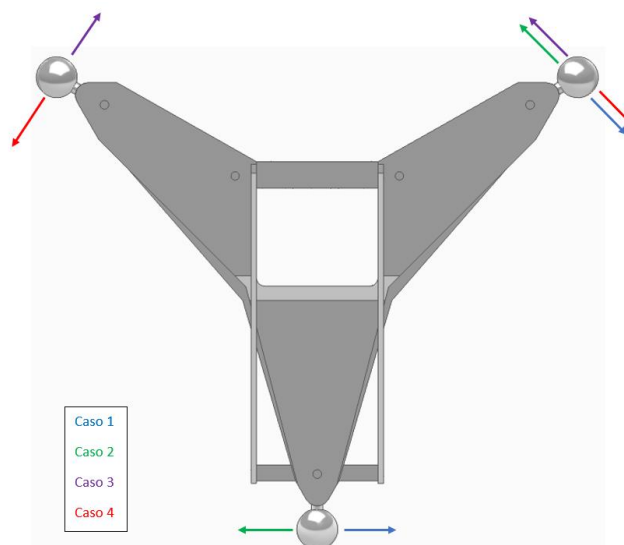


Figura 51. Esquema de las direcciones de las fuerzas en cada caso de estudio.

El análisis por elementos finitos se realiza de la misma forma comentada en el apartado 4.4.1, la única diferencia es el sentido de las fuerzas. El punto donde vamos a medir los desplazamientos también seguirá siendo el centro de la esfera.

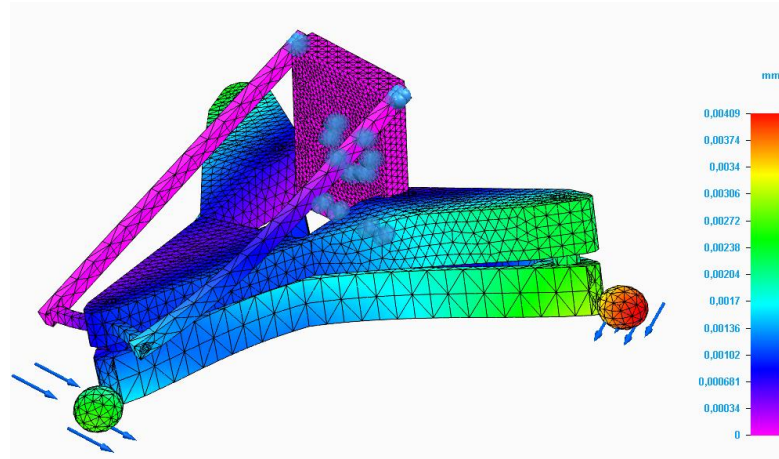
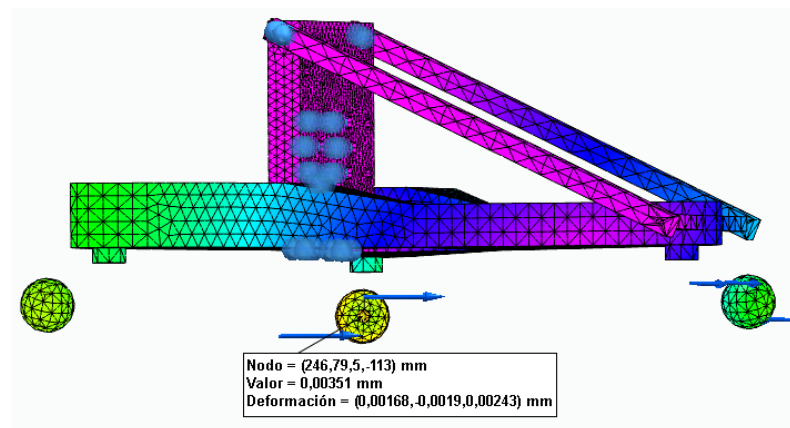


Figura 52. Deformada y resultados de los desplazamientos según tabla de colores.



SNo.	Valores (mm)	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)	DX (mm)	DY (mm)	DZ (mm)
1	0,00351	246	79,5	-113	0,00168	-0,0019	0,00243

Figura 53. Ubicación del nodo donde se miden los desplazamientos (centro esfera).

	Esfera mas solicitada	Desplazamiento XYZ (mm)
CASO 1	Esfera 2	0,00351
CASO 2	Esfera 2	0,00351
CASO 3	Esfera 2 y Esfera 3	0,00168
CASO 4	Esfera 2 y Esfera 3	0,00168

Tabla 10. Resultados de los diferentes casos de estudio.

5. Estudio de la seguridad

Utilizar robots colaborativos en procesos de mecanizado representa una solución tecnológica avanzada, sin embargo, la interacción directa entre el robot y el operador introduce riesgos potenciales que deben ser identificados, evaluados y controlados para garantizar un entorno de trabajo seguro.

En este apartado, se describe el procedimiento para realizar un análisis de los riesgos asociados a la actividad que se llevará a cabo junto al robot colaborativo, teniendo en cuenta las particularidades del proceso de mecanizado. Este análisis considera factores clave como las características del robot, el entorno de trabajo, las herramientas empleadas y las posibles interacciones operario-máquina.

El objetivo principal es desarrollar un plan de seguridad que permita prevenir accidentes, minimizar riesgos y cumplir con las normativas aplicables, asegurando así un equilibrio óptimo entre la seguridad y el desempeño del sistema automatizado.

5.1 Identificación de la actividad y su entorno.

Para comenzar a realizar el estudio de la seguridad, previamente tiene que diferenciar el tipo de actividad que se puede dar, en este caso, diferenciaremos entre el tipo de actividad con presencia de la broca y sin ella, ya que supone un cambio drástico en el riesgo. Cuando se esté ejecutando el mecanizado, se supondrá como caso más desfavorable, donde la seguridad que se tomará será máxima, sin embargo, cuando la broca se encuentre fuera del portabrocas, se considerará un ambiente más seguro al eliminar el peligro de la herramienta de corte, por lo que la seguridad que se tomará será diferente.

También es necesario definir el entorno de trabajo, lo diferenciaremos en 3 espacios. El primero es el espacio de operación, donde ocurren la mayoría de los movimientos, en este caso la operación de mecanizado. El segundo es el espacio restringido, delimitado por el máximo rango de trabajo, aquí será el máximo alcance que tenga el brazo del robot. También se encontrarán en este espacio los equipos límite de seguridad. Y por el último, el tercer espacio, el espacio resguardado,

donde no tendrá que haber ningún riesgo generado por la actividad que se va a desempeñar.

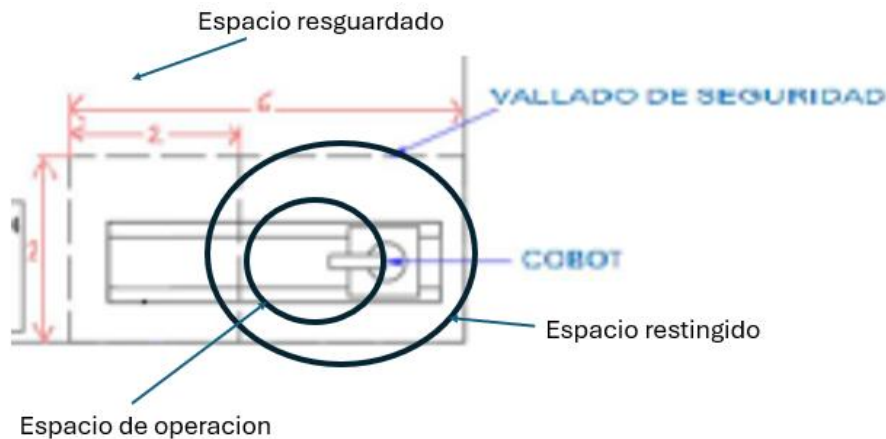


Figura 54. Espacio del entorno de trabajo.

Además, es necesario aplicar las normas UNE-ISO 10218-2:2011 [11], que trata los peligros derivados del diseño e integración de los sistemas robóticos. Proporciona directrices relacionadas con la seguridad del personal y la integración del robot. Y la norma ISO/TS 15066:2016 [12], que es una especificación técnica que complementa la ISO 10218 y establece directrices para la seguridad en robots colaborativos. Esta norma es especialmente relevante en entornos donde humanos y cobots trabajan en estrecha proximidad.

5.2 Análisis de riesgos

En este apartado se tratará de evaluar los posibles riesgos que se puedan producir, de su probabilidad de que llegasen a ocurrir y de su severidad, es decir, la gravedad de sus consecuencias. Para ellos se usará matriz de riesgos para clasificar los peligros.

- Peligros que se dan por la broca
■ Peligros que se pueden dar en cualquier caso

Peligro Identificado	Descripción	Probabilidad (P)	Gravedad (G)	Nivel de Riesgo (R = P × G)	Acción Correctiva / Medida de Mitigación
Riesgo de colisión entre hombre – máquina	Posible contacto accidental entre el operador y el brazo del cobot durante el proceso de verificación.	3 (Media)	4 (Grave)	12	Implementar sensores de proximidad y zonas de seguridad programadas.
Riesgo de proyección de piezas o material	Proyección de material sobrante o la pieza durante el mecanizado o verificación.	2 (Baja)	5 (Crítica)	10	Uso de barreras de seguridad físicas y pantallas protectoras.
Riesgo de atrapamiento	Posibilidad de que el operador quede atrapado entre el cobot y otros elementos del entorno.	2 (Baja)	4 (Grave)	8	Evitar espacios confinados y limitar movimientos del cobot.
Riesgo por herramientas en movimiento	Contacto accidental con herramientas en rotación durante el proceso de mecanizado.	3 (Media)	5 (Crítica)	15	Detener herramientas automáticamente cuando no están en uso
Riesgo eléctrico	Descargas eléctricas por contacto con el cobot o equipos auxiliares mal aislados.	1 (Muy baja)	4 (Grave)	4	Inspección periódica de conexiones y aislamiento.
Error humano	Errores en la programación o uso del cobot debido a cansancio o falta de atención del operador.	3 (Media)	3 (Moderada)	9	Pausas regulares durante la actividad.
Riesgo de ruido	Exposición a niveles de ruido elevados generados durante el mecanizado o movimiento del cobot.	2 (Baja)	3 (Moderada)	6	Proporcionar protección auditiva y reducir ruido en el entorno mediante paneles absorbentes.
Riesgo de fallo del sistema del cobot	Mal funcionamiento del cobot que cause movimientos inesperados o pérdida de control.	2 (Baja)	5 (Crítica)	10	Mantenimiento preventivo y pruebas regulares del sistema.

Tabla 11. Matriz de riesgos.

5.3 Implementación de medidas de seguridad

A continuación, se detalla un listado de las medidas de seguridad implementadas para la actividad del mecanizado con el cobot:

1. Zonas de seguridad programadas:

Configuración del software para limitar los movimientos del cobot en áreas designadas como de alto riesgo. Usando la delimitación de las zonas que se ha comentado previamente en el apartado 5.1.

2. Vallado y enclavamiento de seguridad:

El vallado de seguridad se trata de una malla reforzada de aluminio que recorre parte del perímetro de la celda.

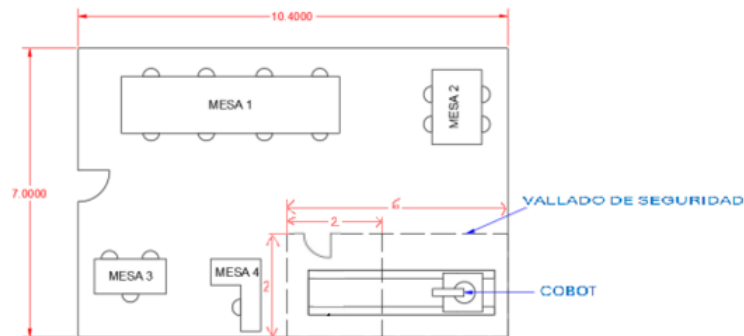


Figura 55. Ubicación del vallado en la sala.

En la puerta de acceso se implementará un interruptor de seguridad con enclavamiento electromagnético, Gkey del fabricante ABB [10], cuya función es la parada de los equipos que conforman la célula cuando esta se abra sin previa autorización.

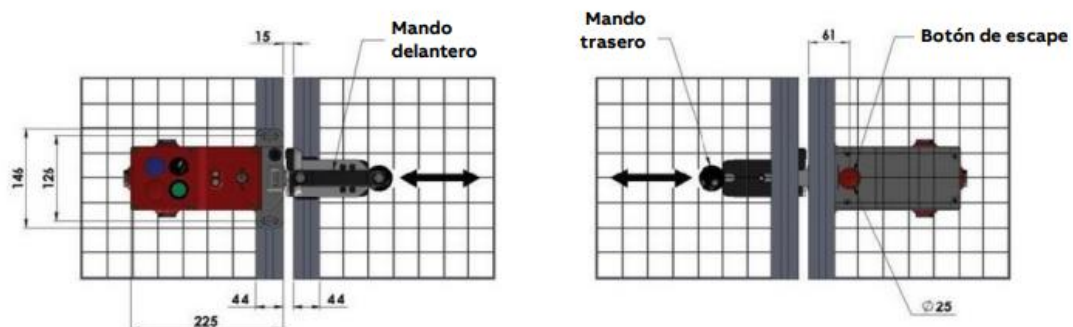


Figura 56. Sistema del enclavamiento.

3. EPI (Equipo de Protección Individual):

Este equipo será necesario cuando la actividad no sea colaborativa, es decir, se esté produciendo el mecanizado, en ese caso será obligatorio el uso de gafas, guantes y protectores auditivos.

4. Sistema de detención de emergencia:

Mecanismos que detienen el funcionamiento de herramientas activas si no están en uso o si detectan una anomalía. Botones accesibles que permiten detener inmediatamente el cobot en caso de peligro inminente.

Se colocará uno en el exterior y otro en el interior de manera accesible.



Figura 57. Botón de emergencia FANUC XA1E-BV

5. Mantenimiento preventivo del cobot:

Revisión regular del sistema para garantizar un funcionamiento óptimo y evitar fallos inesperados.

6. Señalización LED:

Esta señalización se tendrá en cuenta en la actividad no colaborativa, cuando se esté produciendo el mecanizado.

Incorporación de sistemas visuales mediante luces LED para alertar al personal sobre el estado del robot:

Rojo: Indica una anomalía detectada (ej., proximidad, colisión).

Amarillo: Indica una zona restringida o actividad moderada.

Verde: Indica un estado seguro o inactivo del cobot.



Figura 58. Baliza de señalización LED PATLITE LR4-302PJNW-RYG.

Por último, será muy favorable en el ámbito de la seguridad que se realice una mejora continua, esto se podrá conseguir si se supervisa la operación de manera continua para detectar nuevos riesgos o mejorar la seguridad existente.

6. Análisis del volumen de trabajo

En este apartado se va a simular el proceso de medición. A partir del software de Matlab, se modelan los elementos que componen la célula de mecanizado, para poder realizar un análisis matemático que nos permita, al simular, poder comprobar los 6 brazos del sistema de medición.

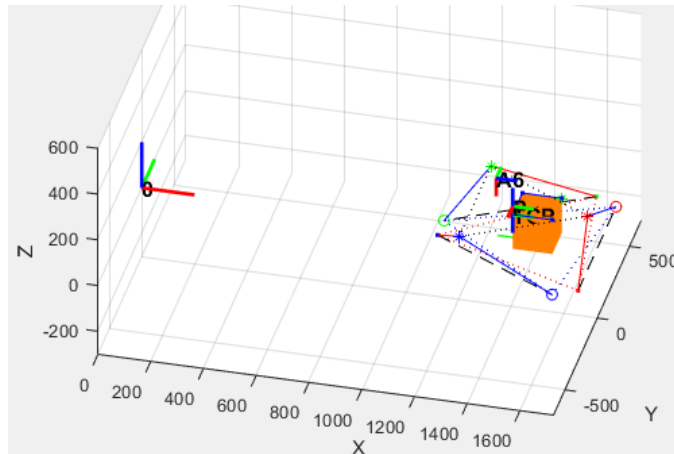


Figura 59. Esquema de la simulación de Matlab.

El objetivo es encontrar cuál es la distribución óptima de los elementos y qué volumen tendrá que tener la pieza de trabajo a la que se le harán los taladrados.

Las características que debe de cumplir el proceso y son en las que nos fijaremos para dar por válida o no la distribución de los elementos que componen la célula.

- No debe haber colisiones entre los elementos.
- Extensión máxima de los brazos: 1000mm.
- Extensión mínima de los brazos: 420mm.
- Ángulo mínimo formado en los brazos con la esfera: 30°

6.1 Datos principales

Para llevar a cabo la simulación a través de Matlab, se requiere rellenar una serie de datos.

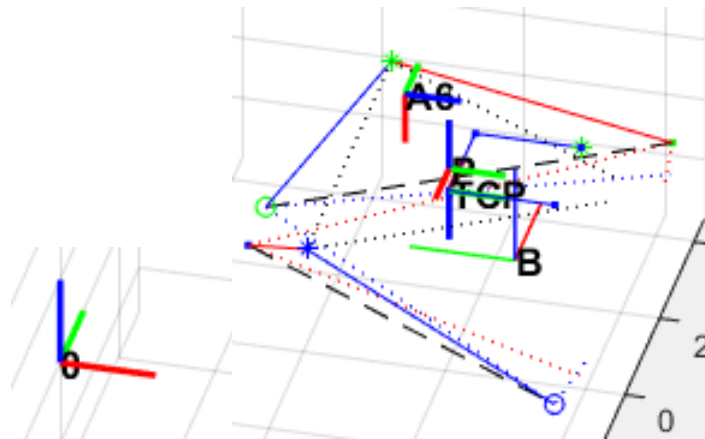


Figura 60. Orígenes del sistema

Antes de continuar con el programa, identificaremos los orígenes que se aprecian en la figura, también se puede apreciar el cambio de orientación de algunos de ellos.

Comentar que en los sistemas de coordenadas se usa el mismo criterio, el color rojo es la X, el verde la Y y el azul la Z.

El 0 es para la base del robot y se encuentra en la posición $(0,0,0)$, es decir en el origen del sistema.

El A6 indica la posición del centro de la mano del robot, respecto a este sistema colocaremos el P y TCP. Como podemos observar, se encuentra girado en Y respecto a la base del robot.

TCP es la punta de la broca y P, de plataforma, el baricentro del plano que forman las esferas de medición. Estos se posicionan mediante el decalaje que tienen respecto a A6.

B, es el baricentro de triángulos donde se encuentran las esferas inferiores.

- **Dimensiones de la base y la plataforma**

Según los diseños de los utillajes de la mesa de trabajo y de las esferas inferiores, para la base y el utillaje que integra las esferas de medición, para la plataforma, se obtienen los siguientes datos:

Radio de la base = 369,5 mm

Radio de la plataforma = 284 mm

Distancia entre las esferas 1-6 en el triángulo inferior, $L_{61} = 100$ mm

- **Posicionamiento de la base**

Se introducen las coordenadas (posición y orientación), respecto al robot, a las que situaremos la base, que es el baricentro de los triángulos equiláteros que forman las esferas inferiores.

$dx_{R_B} = 1500$ mm, $dy_{R_B} = 0$ y $dz_{R_B} = 0$ mm

Orientación de los triángulos inferiores $A_{R_B} = 90^\circ$

- **Posicionamiento de la plataforma (P) y TCP respecto de la brida (A6)**

Para este caso se debe tener en cuenta la geometría del utillaje que integra las esferas de medición, del cabezal y la broca.

Siendo A6 el centro de la mano del robot, TCP la punta de la broca y P el baricentro del plano que forman las esferas de medición.

$dx_{A6_TCP} = 149,5$ mm, $dy_{A6_TCP} = 0$ y $dz_{A6_TCP} = 61,5$ mm.

$dx_{A6_P} = 112,98$ mm, $dy_{A6_P} = 0$ mm y $dz_{A6_P} = 61,5$ mm.

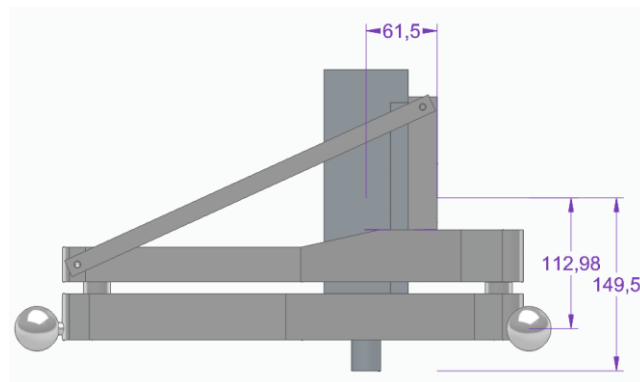


Figura 61. Decalaje de TCP y P.

- **Posibles ubicaciones de los bloques**

Observando la geometría de la placa que forma la mesa de trabajo (figura 4) y que nuestra intención es colocar 5 apoyos en forma de X para colocar 5 posibles bloques en forma de cubo (figura 6), se reparte la superficie de manera

que el mayor área que pueden ocupar dichos cubos en la mesa será de 150 x 150 mm cada uno. Esto delimita ya la geometría del bloque que introducimos en la simulación. También podemos obtener las coordenadas donde colocaremos cada uno de los bloques.

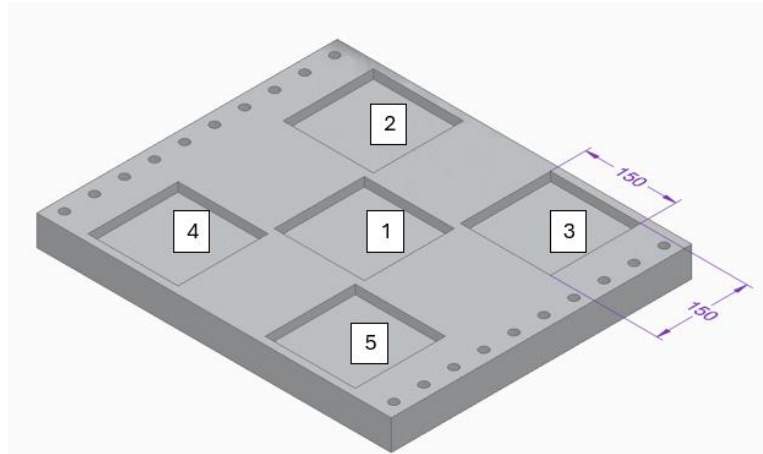


Figura 62. Mesa de trabajo con 5 vaciados para colocar los bloques.

Para poder llevar a cabo todos los casos, se ha tenido que colocar la pieza en 5 sitios, por lo que resulta en 5 códigos diferentes.

```
% -Posición de la pieza (P_box, pos del vértice superior, máximas XYZ)
P_box=[dx_R_B+X_box/2 Y_box/2 Z_box]; 1

%P_box=[1337.42+X_box/2 147.5+Y_box/2 Z_box]; %Superior izq 2
%P_box=[1662.58+X_box/2 147.5+Y_box/2 Z_box]; %Superior dcha 3
%P_box=[1337.42+X_box/2 -147.5+Y_box/2 Z_box]; %Inferior izq 4
%P_box=[1662.58+X_box/2 -147.5+Y_box/2 Z_box]; %Inferior izq 5
```

Figura 63. Posición de los 5 bloques para colocar los bloques.

6.2 Variables de salida

Para interpretar los resultados de la simulaciones utilizamos dos herramientas:

-Tabla de resultados

Esta tabla muestra las características de cada simulación y muestra los datos que debe de cumplir el proceso para considerarse apto.

L máxima HPTI [mm]
Extensión máxima HPTI's [mm]
Extensión mínima HPTI's [mm]
L mínima HPTI [mm]
Ángulo entre tridentes
Ángulo mínimo tridentes
Colisión

Tabla 12. Resultados de la simulación a través de Matlab.

Nos centraremos en los resultados que aparecen en las casillas sombreadas en la Tabla 12, donde aparecerán en cada simulación los valores de extensión máxima y mínima de los 6 brazos que se van a utilizar. El rango de estos valores que ya ha sido comentado en el trabajo tendrá que estar entre [420 mm – 1000 mm], ya que es el rango de valores que se considera óptimo para el trabajo del brazo del sistema de medición. Además, aparece el ángulo mínimo que se produce en la simulación, este no debe de ser inferior a 30°. Por último, la casilla de colisión, donde aparecerá un 0 si no se ha producido colisión y un 1 si sí que se ha producido.

-Matriz de colisiones

La otra herramienta es la matriz de colisiones, en la que muestra en las columnas cada uno de los 6 brazos usados en el proceso y en las filas los 4 puntos en los que se realiza el mecanizado en la simulación, estos se realizan en los vértices superiores del bloque a analizar.

Como vemos, donde aparece un 0 no hay colisión y si es un 1 sí que la habrá

		Brazos					
		1	2	3	4	5	6
Puntos de chequeo	1	0	0	0	0	0	1
	2	0	0	0	0	0	1
	3	0	0	1	0	0	0
	4	0	0	1	0	0	0

Tabla 13. Matriz de colisiones.

Como observamos, la tabla indica que en el primer punto de chequeo colisiona el brazo 6.

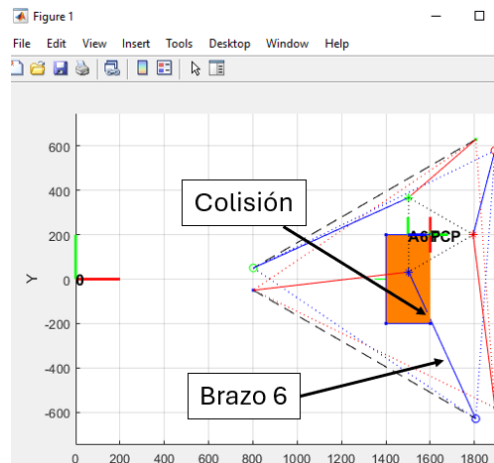


Figura 64. Ejemplo de colisión

6.2 Resultados de la simulación

Como ya hemos comentado en el apartado 6.1, los bloques tendrán un área de 150 x 150 mm, entonces lo que se busca obtener con la simulación es qué valores de Z son los que resultan en un proceso apto para las 5 posiciones diferentes.

Las únicas diferencias en el proceso de simulación entre los diferentes casos son la ubicación de la pieza de trabajo. El resto de parámetros introducidos y el procedimiento a seguir serán los mismos.

El planteamiento, después de introducir los parámetros característicos del propio sistema, será ubicar la pieza en su posición y, a partir de ahí, variar el valor de Z del bloque a simular hasta conseguir los valores Z_{min} y Z_{max} . Y obtener así el intervalo donde el sistema no dará problemas.

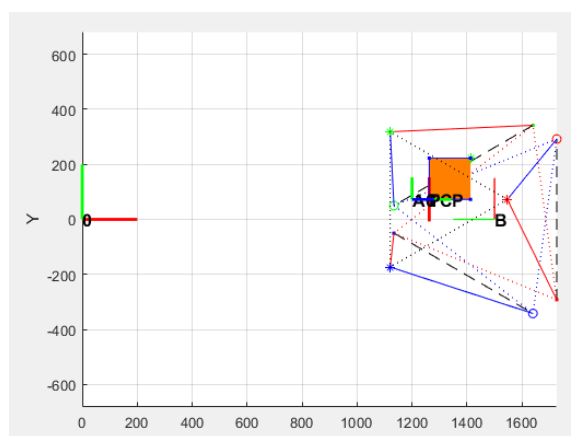


Figura 65. Bloque ubicado en la posición 2.

Para una altura del bloque de $Z = 390$ mm, se consigue la Z_{\min} , es decir, para un Z menor a ese valor, uno o más brazos no se extenderían por debajo de los 420 mm.

Results1	Results2
RB; %[mm] % R Base fija; Coordenadas en SRB	369,5
RP; %[mm] % R PLATAFORMA MÓVIL; Coordenadas en SRP	284
L_61; %[mm] Utilizado para el caso B6: distancia entre la base 6 y la 1	100
POSE de la BASE desde SR Robot [mm]	1500 0 0 90 0 0
POSE XYZABC del TCP desde SR A6 [mm]	149.5 0 62.57 90 0 90
POSE XYZABC de la Plataforma P desde SR A6 [mm]	112.98 0 62.57 -90 0 90
Dimensión X de la pieza [mm]	150
Dimensión Y de la pieza [mm]	150
Dimensión Z de la pieza [mm]	400
POSE XYZABC de la pieza [mm]	1412.42 222.5 400
Separación del plano inferior de mecanizado [mm]	100
RADIO máximo HPTI (colisiones) [mm]	22
Error en IK [mm]	-180,0000009
Contador repeticiones ik	1
L máxima HPTI [mm]	1000
Extensión máxima HPTI's [mm]	749,5064683
Extensión mínima HPTI's [mm]	437,5342509
L mínima HPTI [mm]	420
Ángulo entre tridentes	51,08268602
Ángulo mínimo tridentes	30
Colisión	0

Tabla 14. Resultados del caso 2, Z_{\min} .

Para una altura del bloque de $Z = 750$ mm, se consigue la Z_{\max} , es decir, para un Z superior a ese valor, uno o más brazos se extenderían por encima de los 1000 mm.

Results1	Results2
RB; %[mm] % R Base fija; Coordenadas en SRB	369,5
RP; %[mm] % R PLATAFORMA MÓVIL; Coordenadas en SRP	284
L_61; %[mm] Utilizado para el caso B6: distancia entre la base 6 y la 1	100
POSE de la BASE desde SR Robot [mm]	1500 0 0 90 0 0
POSE XYZABC del TCP desde SR A6 [mm]	149.5 0 62.57 90 0 90
POSE XYZABC de la Plataforma P desde SR A6 [mm]	112.98 0 62.57 -90 0 90
Dimensión X de la pieza [mm]	150
Dimensión Y de la pieza [mm]	150
Dimensión Z de la pieza [mm]	750
POSE XYZABC de la pieza [mm]	1412.42 222.5 750
Separación del plano inferior de mecanizado [mm]	187,5
RADIO máximo HPTI (colisiones) [mm]	22
Error en IK [mm]	1,60412E-06
Contador repeticiones ik	4
L máxima HPTI [mm]	1000
Extensión máxima HPTI's [mm]	994,8989763
Extensión mínima HPTI's [mm]	787,083367
L mínima HPTI [mm]	420
Ángulo entre tridentes	35,93068518
Ángulo mínimo tridentes	30
Colisión	0

Tabla 15. Resultados del caso 2, Z_{\max} .

Los resultados obtenidos de aplicar el procedimiento, variando el valor Z del bloque de manera iterativa, nos permiten obtener dichos intervalos de trabajo para cada una de las 5 posiciones.

Caso	Zmin (mm)	Zmax (mm)
Caso 1	340	870
Caso 2	385	750
Caso 3	385	750
Caso 4	385	750
Caso 5	385	750

Tabla 16. Intervalos de la Z para los distintos bloques.

7. Conclusiones

El presente trabajo se ha centrado en el diseño de los utillajes necesarios y en la integración de los componentes para llevar a cabo la medición de la posición XYZ y orientación ABC del efector final de un robot colaborativo durante un proceso de mecanizado ligero. Este objetivo general ha necesitado de un enfoque combinado de aspectos de selección tecnológica, diseño mecánico y análisis de seguridad.

Tras un análisis detallado de las especificaciones y los requisitos del proceso, se seleccionó un robot colaborativo que cumpliera con los criterios de precisión y la capacidad de carga. También se han seleccionado las herramientas más adecuadas para realizar el proceso de mecanizado.

La parte troncal del trabajo ha sido el desarrollo de soluciones específicas para posicionar y fijar los distintos componentes del sistema, como ha sido un sistema de fijación para el robot colaborativo que garantiza estabilidad durante el mecanizado. Soportes y elementos de sujeción para los dispositivos de medición, diseñados para facilitar su instalación y mantenimiento. Y el utillaje encargado de integrar, registrar y amarrar la mano del robot, el cabezal y las esferas de medición.

Además, se han identificado los posibles riesgos para la seguridad asociados a la actividad mediante una matriz de riesgos detallada. Sobre esta base, se seleccionaron los componentes de seguridad necesarios, diferenciando entre la actividad colaborativa y la no colaborativa (mecanizado).

El estudio de la distribución de los elementos en la célula de trabajo y el volumen de trabajo del sistema de medición a través de Matlab nos ha permitido comprobar si se puede realizar el proceso sin colisiones y manteniéndonos en el intervalo óptimo de trabajo de los brazos de medición. Además de comprobar cuáles son los volúmenes mínimos y máximos de las piezas master en las distintas ubicaciones en la mesa de trabajo.

Con este trabajo se ha podido contribuir al departamento de fabricación de la Universidad de Zaragoza al desarrollo de la célula colaborativa, abordando desafíos como el diseño modular, la integración de sistemas de medición diseñados en trabajos previos y la seguridad en el mecanizado ligero. Los diseños propuestos son versátiles, escalables y cumplen con los requisitos técnicos del proceso, estableciendo una base sólida para su implementación práctica.

Las posibilidades de continuación del trabajo pueden ser la construcción y prueba de un prototipo físico que permitirá ajustar posibles discrepancias entre la simulación y la realidad. A continuación, en la optimización de los diseños, se podrían explorar materiales alternativos o modificaciones geométricas que reduzcan el peso de los utillajes sin comprometer su rigidez.

Este proyecto ha sido una experiencia enriquecedora, permitiéndome aprender y aplicar conocimientos sobre el campo de los robots colaborativos, el diseño e integración y el análisis del volumen de trabajo. Aunque se presentaron algunos desafíos, como la comprensión de los trabajos previos y sus objetivos, se lograron los objetivos planteados.

Bibliografía

- [1] Egaña. (2010). Catalogo-soportes-antivibratorios-serie alta. 2022, de Egaña.
Sitio web: www.eganasl.com
- [2] Adrián Pacho Olmo. Dpto de Ingeniería Diseño y Fabricación. Universidad de Zaragoza (2023). *Diseño y desarrollo de utillajes para la medición en proceso de la posición y orientación del cabezal de un robot de mecanizado.*
- [3] Borja León León. Dpto de Ingeniería Diseño y Fabricación. Universidad de Zaragoza (2023). *Diseño de célula robotizada de mecanizado para su verificación volumétrica mediante tres brazos telescópicos.*
- [4] Raquel Acero, Juan José Aguilar, Francisco Javier Brosted, Jorge Santolaria, Sergio Aguado & Marcos Pueo. Dpto de Ingeniería Diseño y Fabricación. Universidad de Zaragoza (2021). *Design of a Multi-Point Kinematic Coupling for a High Precision Telescopic Simultaneous Measurement System.* Sitio web: www.mdpi.com
- [5] J. José Aguilar, Raquel Acero, Francisco Javier Brosted, Jorge Santolaria, departamento de Ingeniería Diseño y Fabricación. Universidad de Zaragoza, España. (2020). *Development of a High Precision Telescopic Instrument Based on Simultaneous Laser Multilateration for Machine Tool Volumetric Verification.* . . Sitio web: www.mdpi.com
- [6] Fanuc, catálogo de robots colaborativos. Sitio web: <https://crx.fanuc.eu>
- [7] Izar, catálogo industrial-taladrado-brocas centrar. Sitio web: <https://www.izartool.com>
- [8] Vevor, mecanizado-accesorios-motor de husillo. Sitio web: <https://www.vevor.es>
- [9] FANUC Robot CRX series operators manual. Facilitado por el fabricante.
- [10] ABB, Cerradura de seguridad GKey, manual del producto. Sitio web: <https://new.abb.com>

[11] UNE - ISO 10218-1:2012. [une.org](http://www.une.org). [En línea] Sitio web: <https://www.une.org>

[12] ISO/TS 15066:2016. [une.org](http://www.une.org). [En línea] Sitio web: <https://www.une.org>

[13] eCalidad, catálogo de esferas de acero para rodamientos. Sitio web:
<https://ecalidad.es>

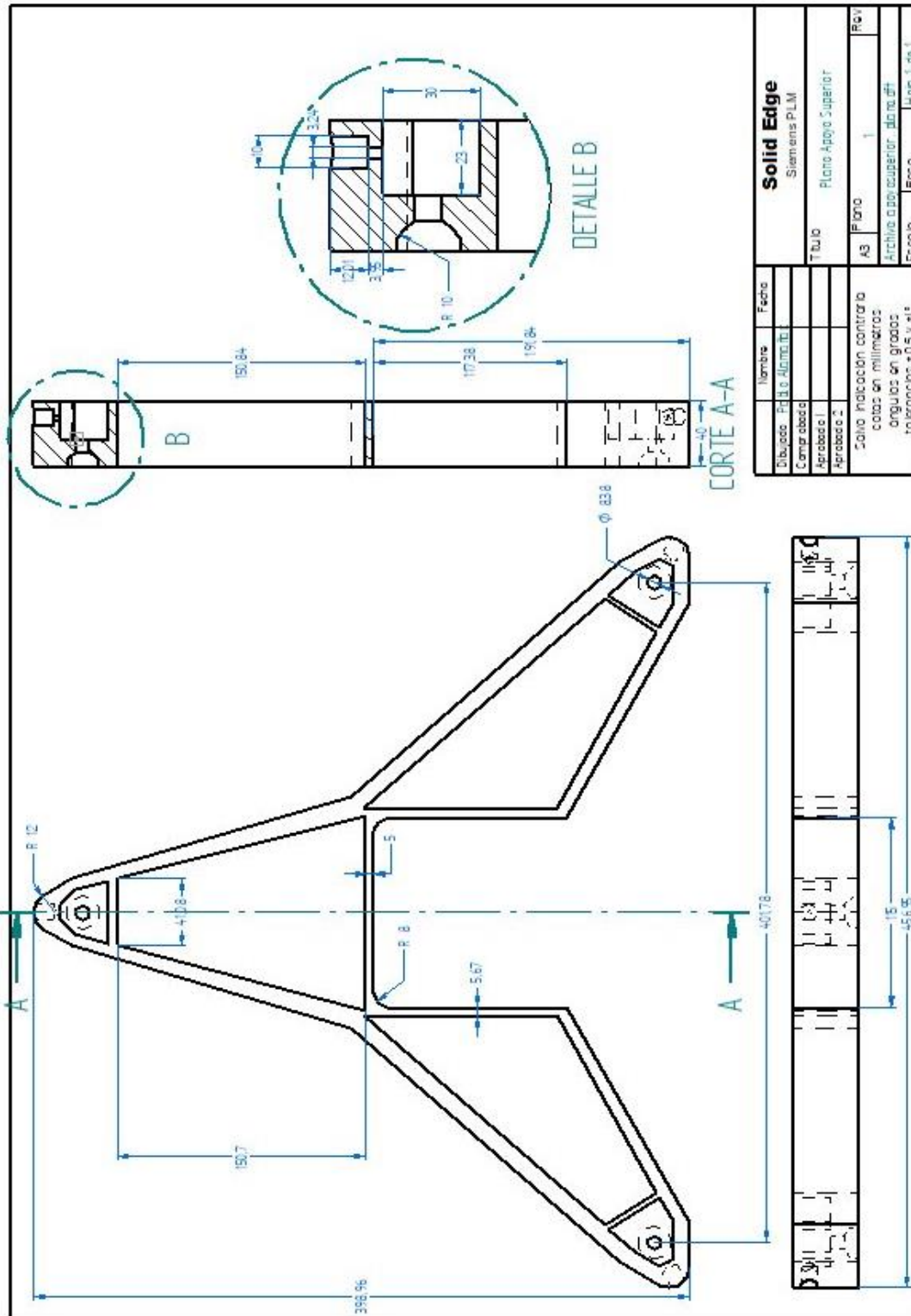
[14] Superimanes, catálogo de esferas de acero para rodamientos. Sitio web:
<https://www.superimanes.com>

[15] Leroy Merlin, catálogo perfiles de acero. Sitio web: <https://www.leroymerlin.es>

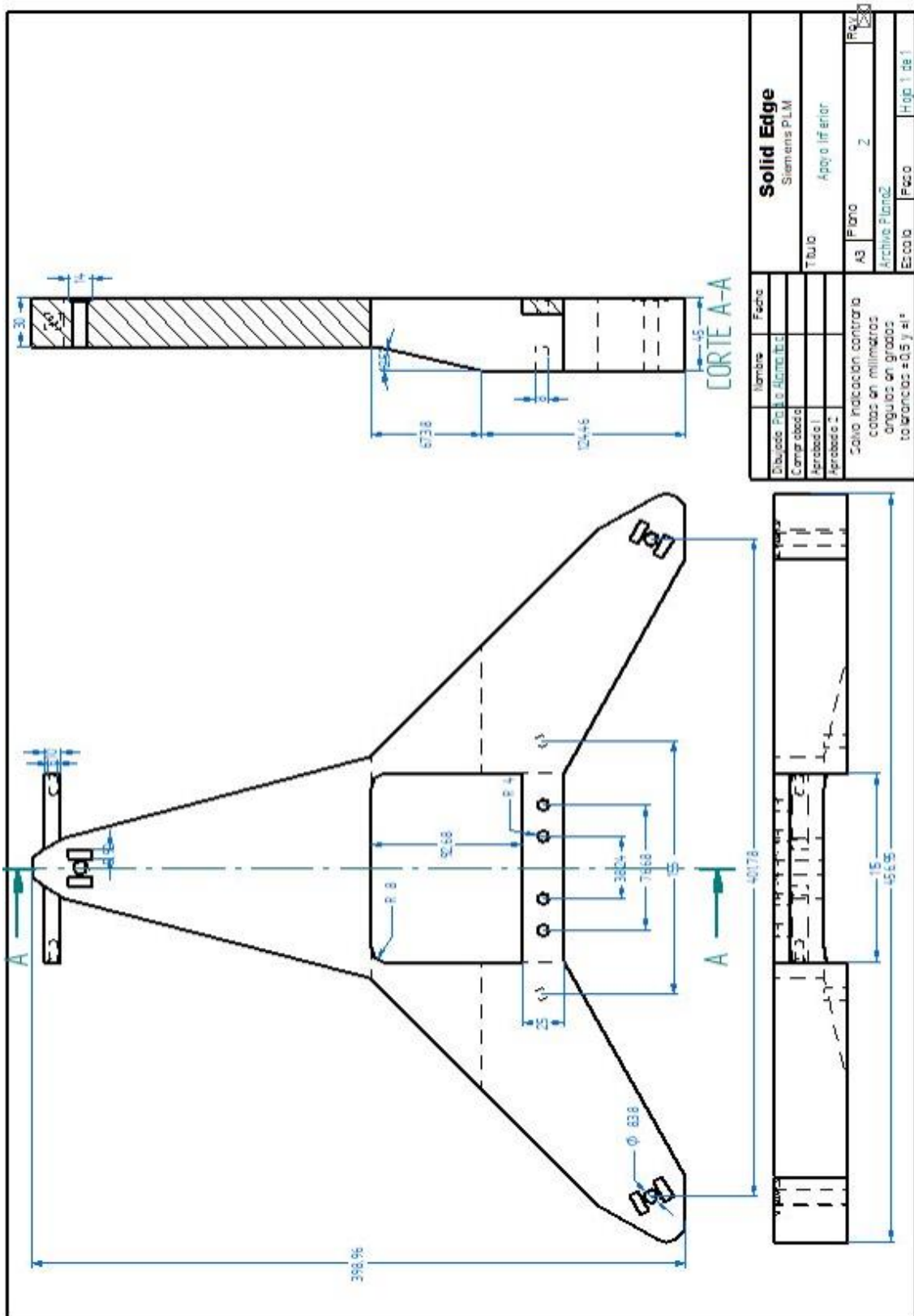
Anexos

A.1 Planos de las piezas del utillaje final.

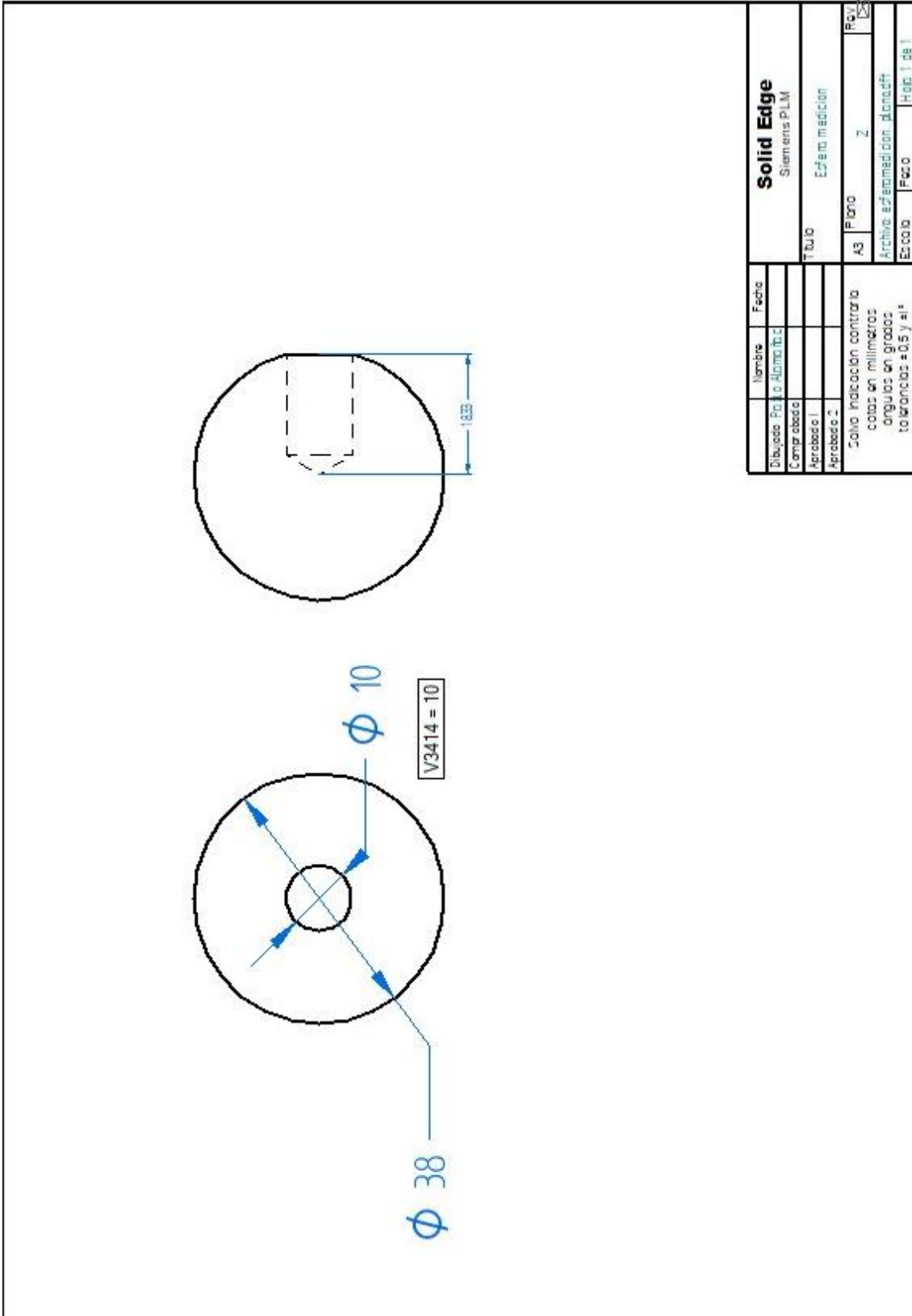
A.1.1 Apoyo superior



A.1.2 Apoyo inferior



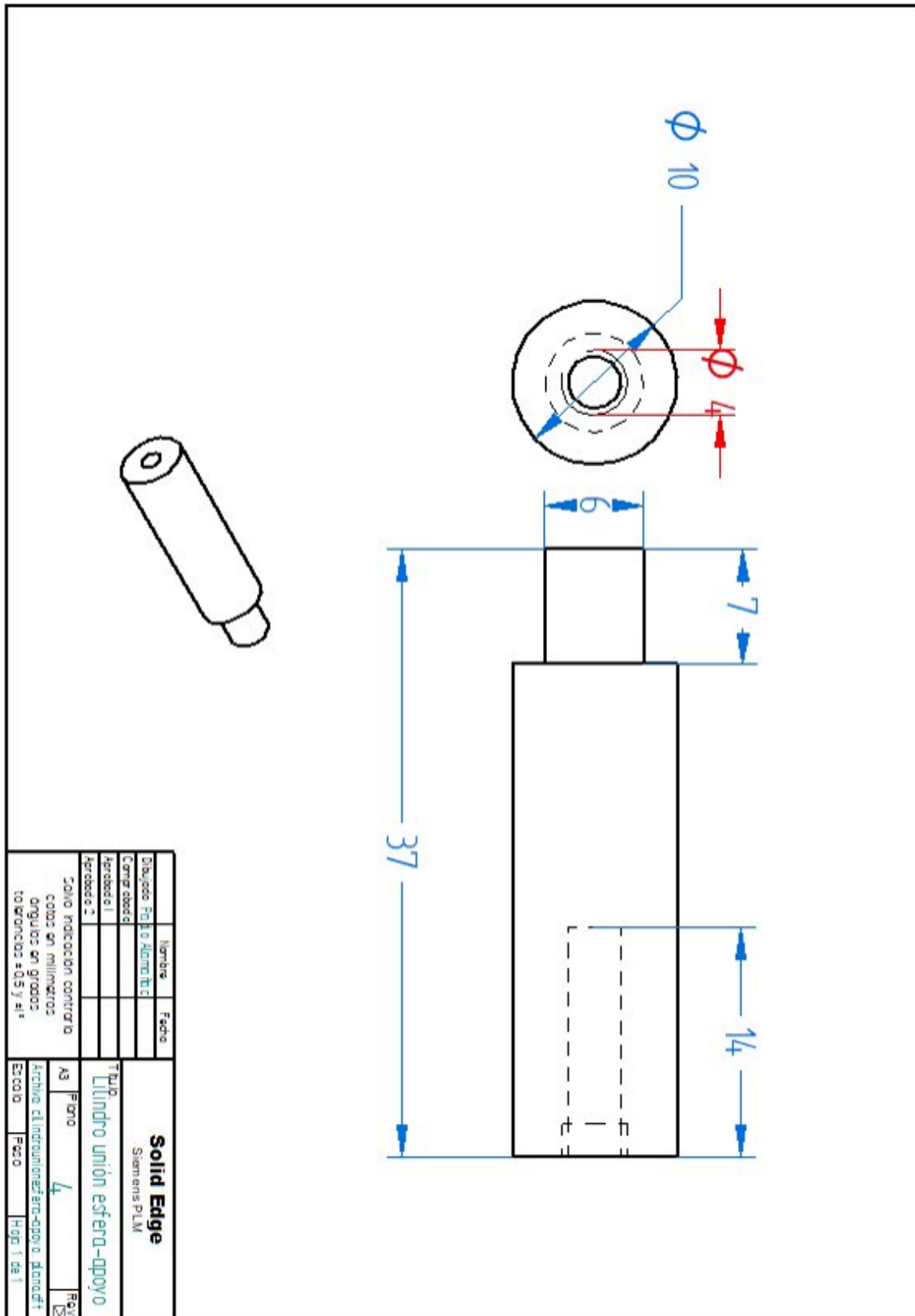
A.1.3 Esfera medición



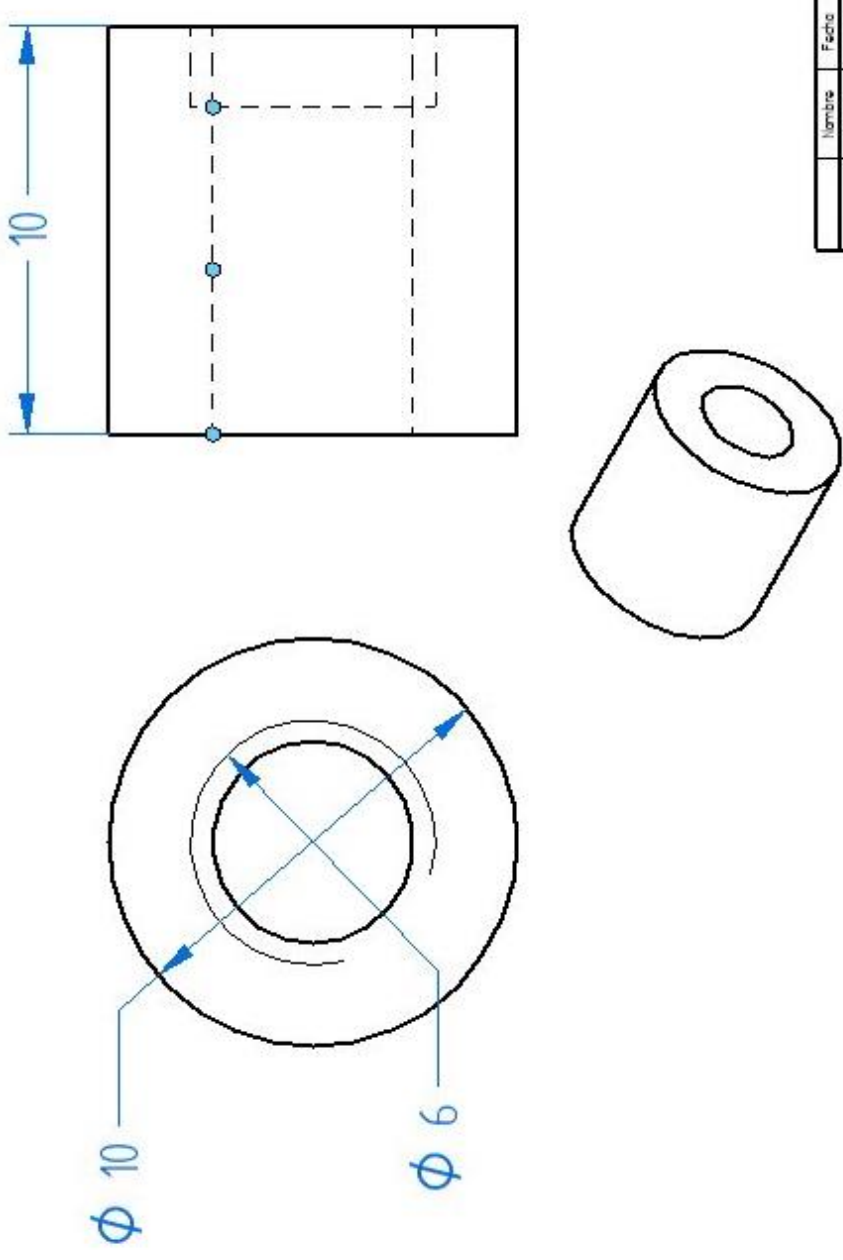
Nombre		Fecha
Dibujado Por	Alumna	
Comprobado		
Aprobado 1		
Aprobado 2		
Solo indicación contraria		
cotas en milímetros		
ángulos en grados		
tolerancias ± 0.5 y ± 1°		
Escuela		Foco
Archivo esfera medición: plan04.dwg		Hoja 1 de 1
Solid Edge		
Siemens PLM		
Título		Esfera medición
Plano		2
Rev		1



A.1.4 Cilindro unión esfera-apoyo

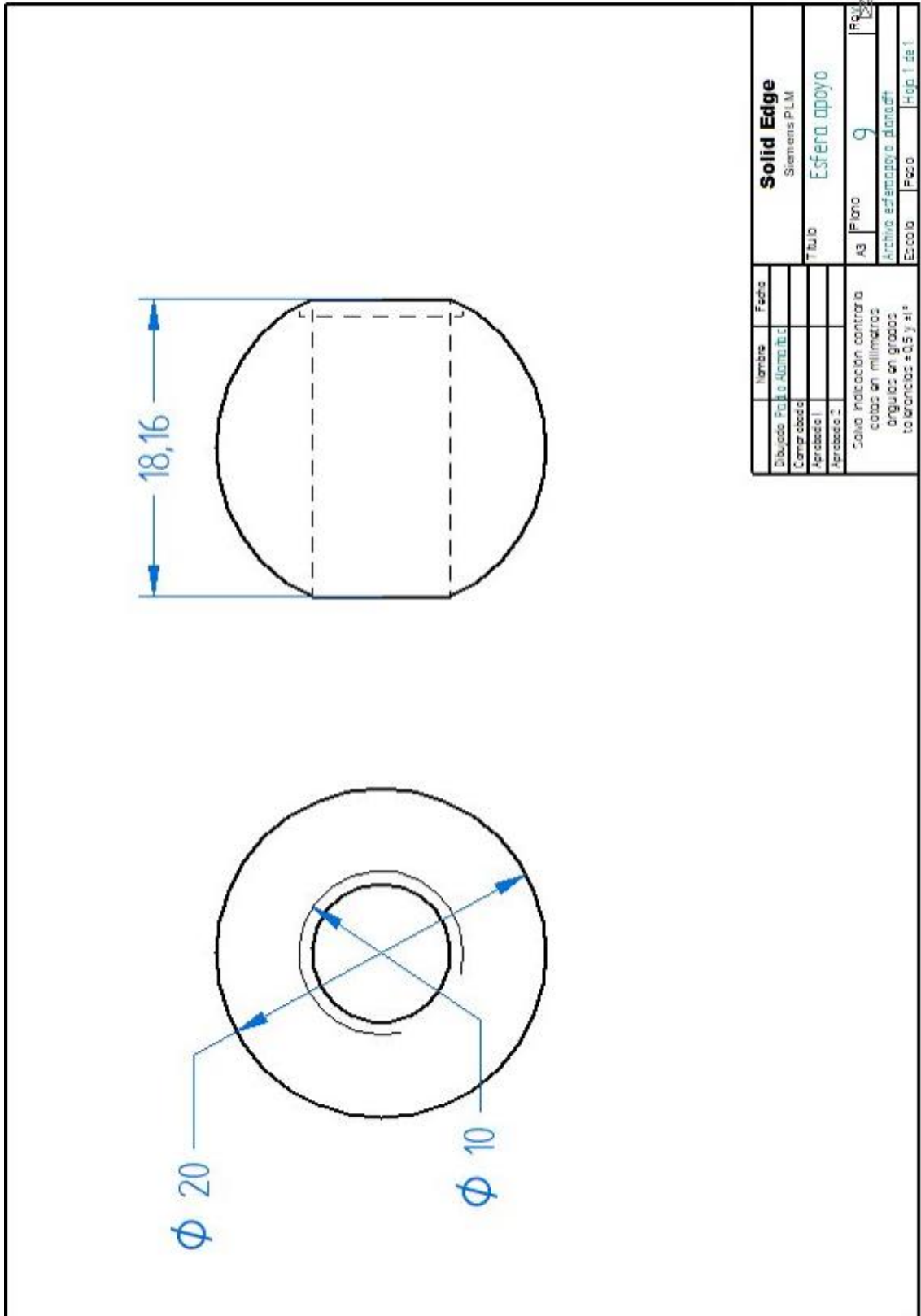


A.1.5 Casquillo esfera



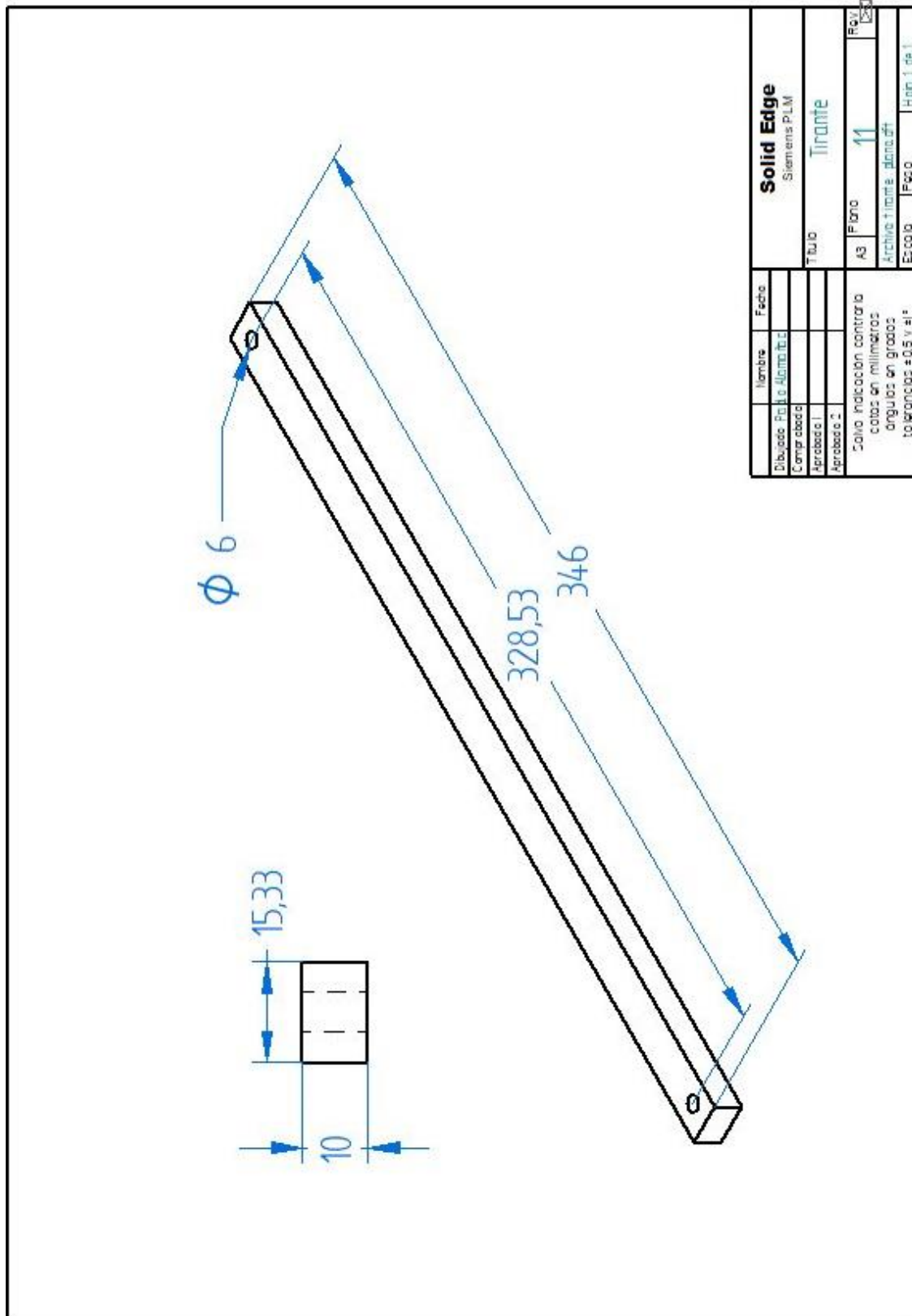
Nombre		Fecha
Dibujado Por	Alumno	
Comprobado		
Aprobado 1		
Aprobado 2		
Solid Edge Siemens PLM		
Título Casquillo esfera		
A3	Folios	5
Archivo: casquillo esfera_plano.dwg		
Escala	Fecha	Folio 1 de 1
Nota: Solo indicación contraria cotas en milímetros ángulos en grados tolerancias = 0.5 y ±1		

A.1.9 Esfera apoyo

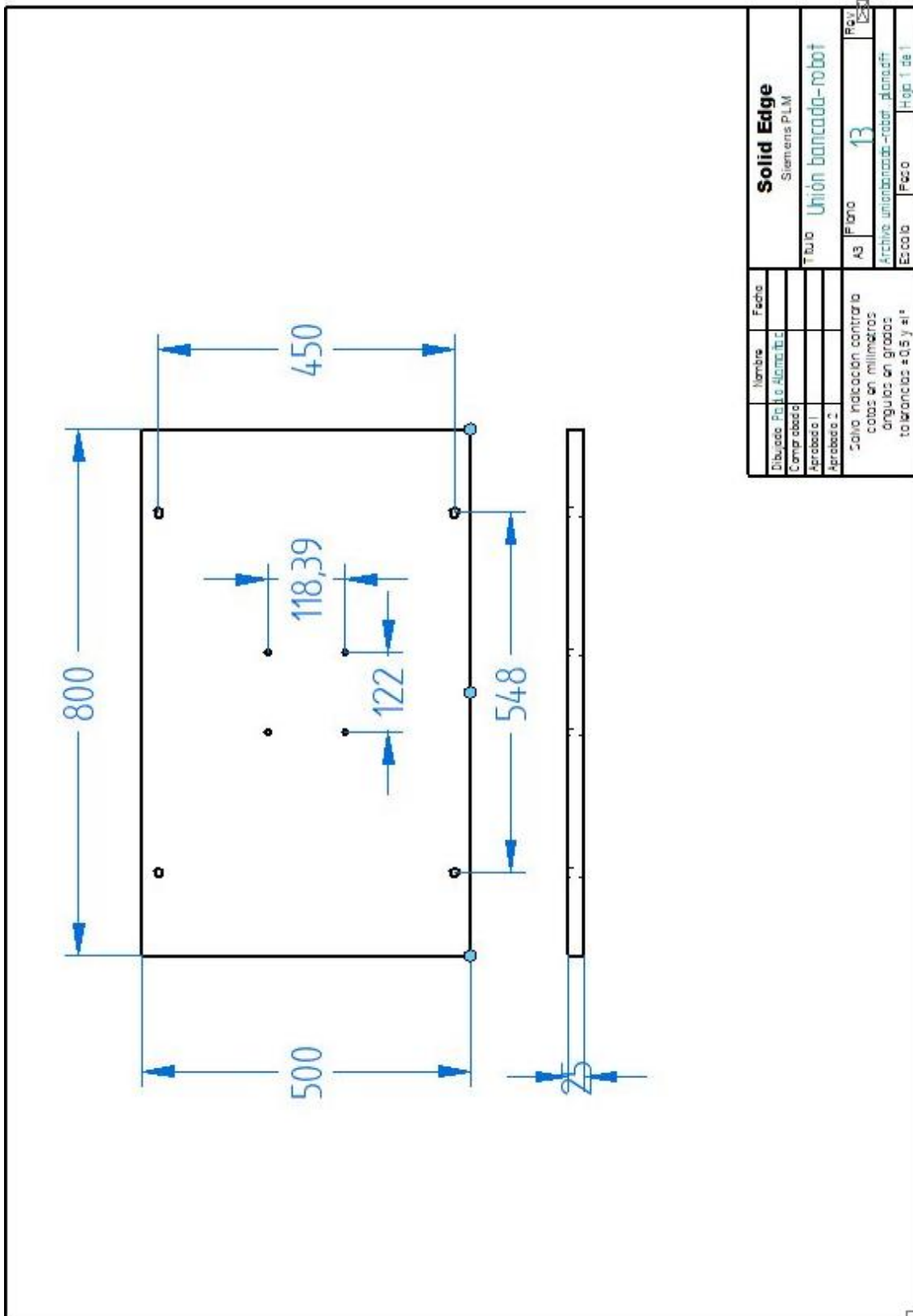




A.1.12 Tirante

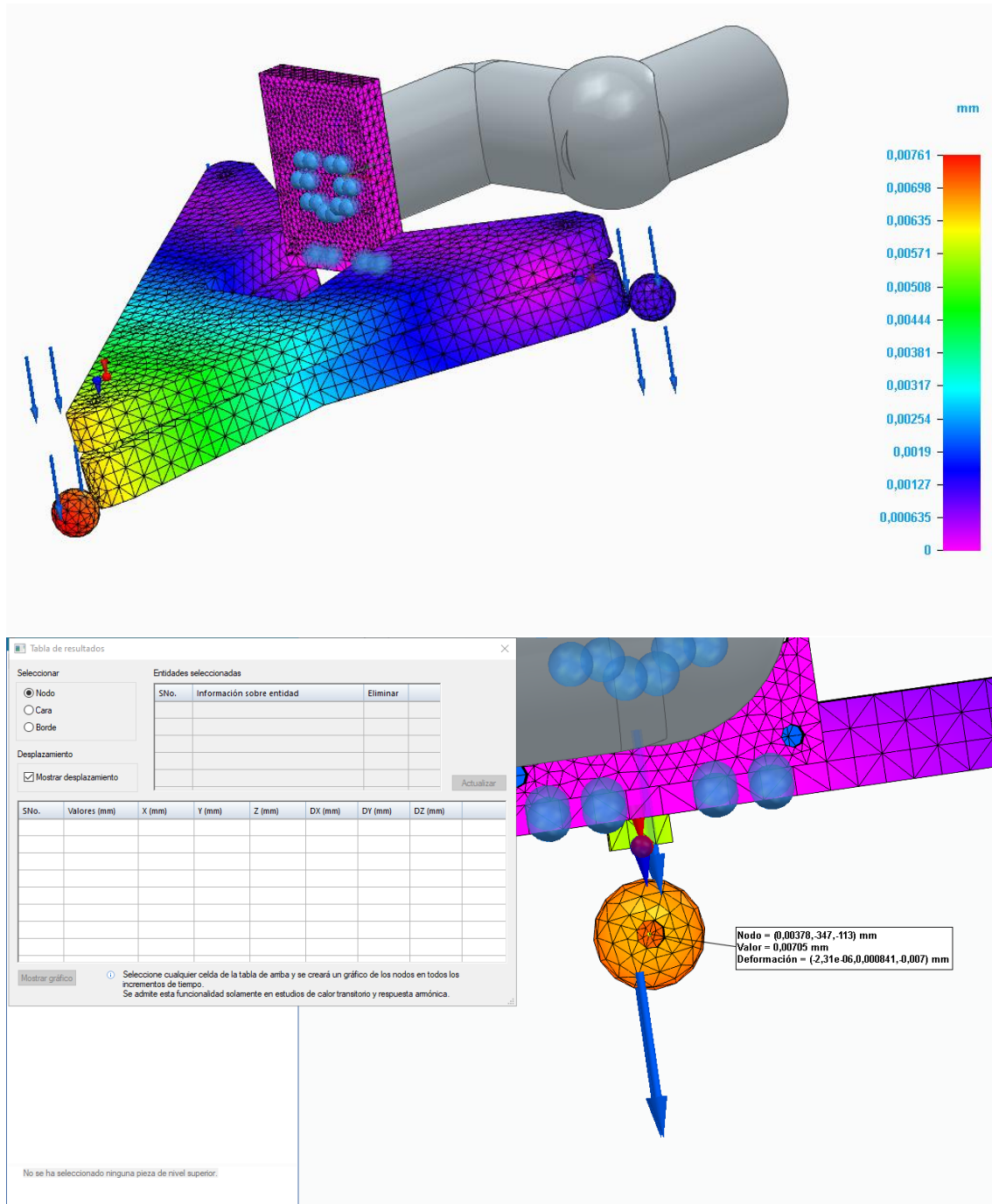


A.1.13 Utillaje unión bancada-robot



A.2 Análisis por elementos finitos distribución de los desplazamientos.

A.2.1 Caso1



A.2.2 Caso2

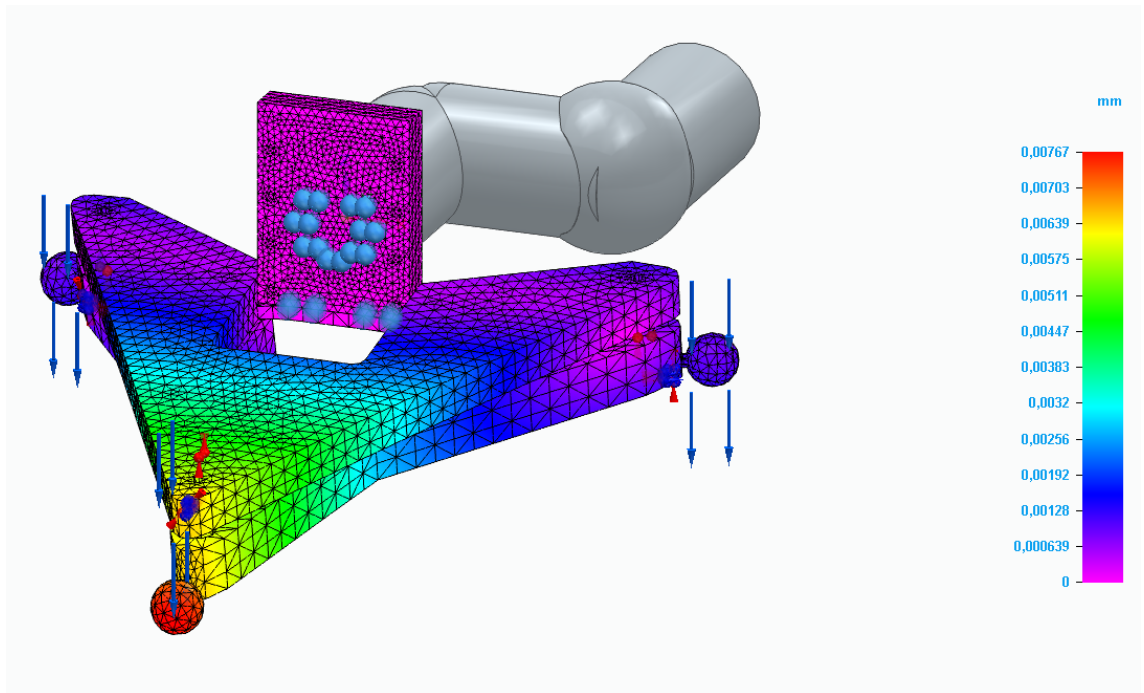


Tabla de resultados

Seleccionar

Nodo
 Cara
 Borde

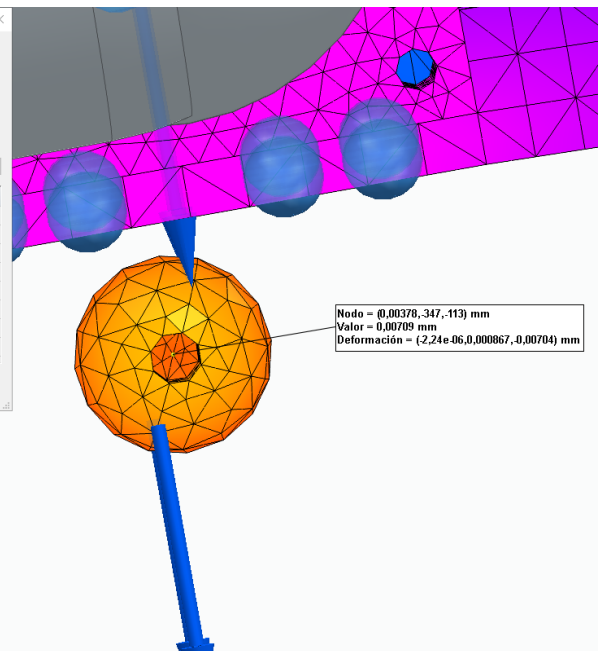
Desplazamiento

Mostrar desplazamiento

SNº.	Valores (mm)	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)	DX (mm)	DY (mm)	DZ (mm)
1	0,00709	0,00378	-347	-113	-2,24e-06	0,000867	-0,00704

Mostrar gráfico

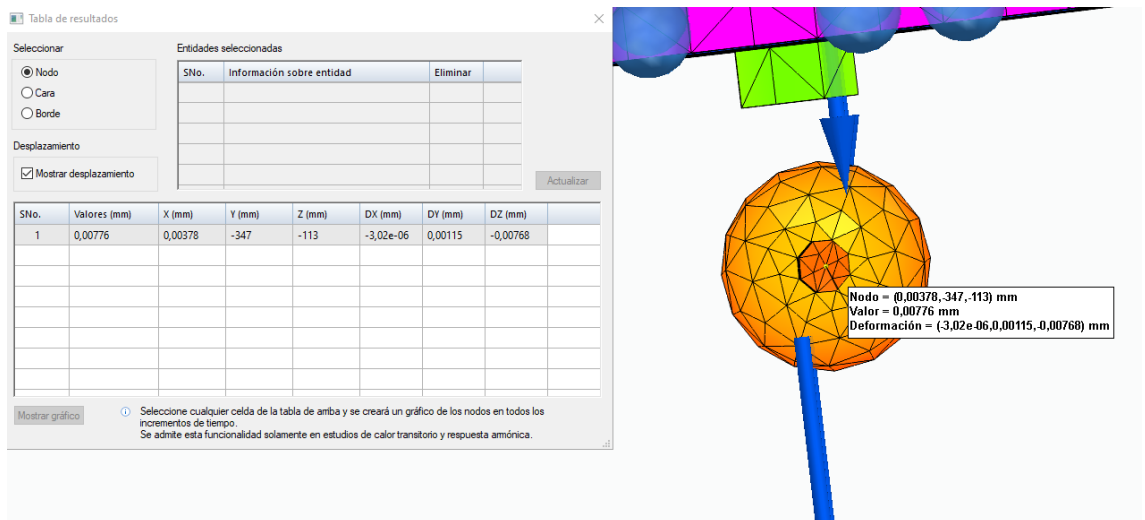
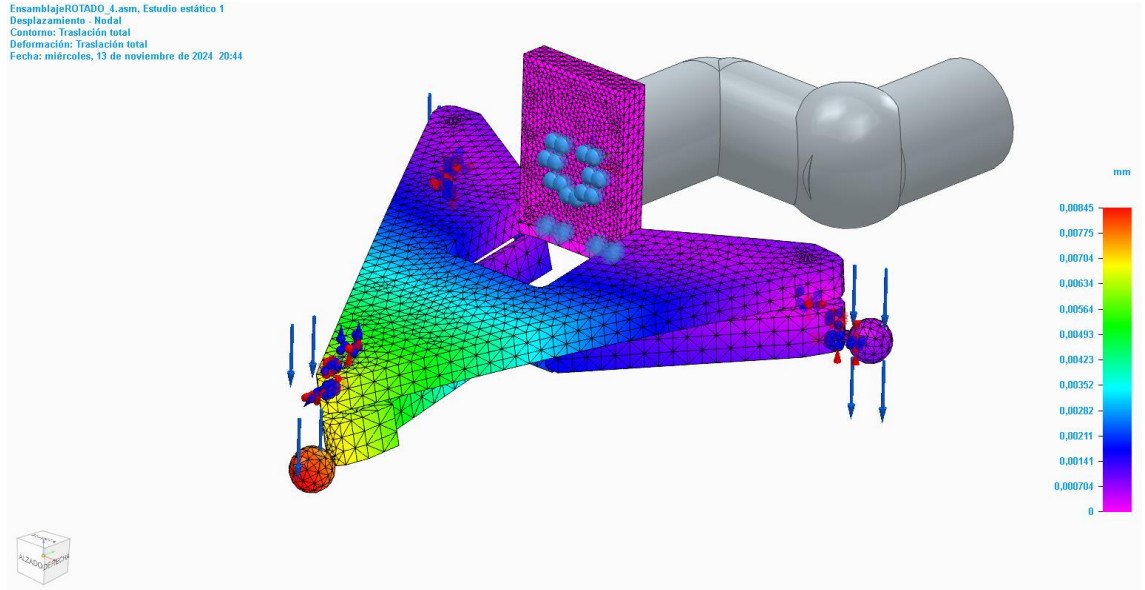
Seleccione cualquier celda de la tabla de arriba y se creará un gráfico de los nodos en todos los incrementos de tiempo.
Se admite esta funcionalidad solamente en estudios de calor transitorio y respuesta armónica.



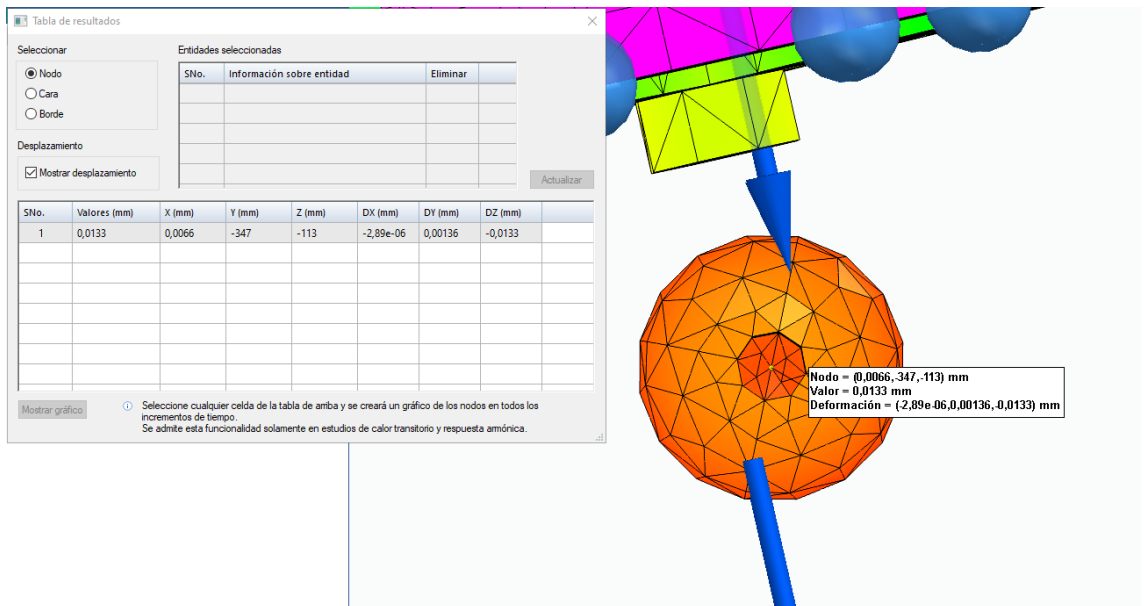
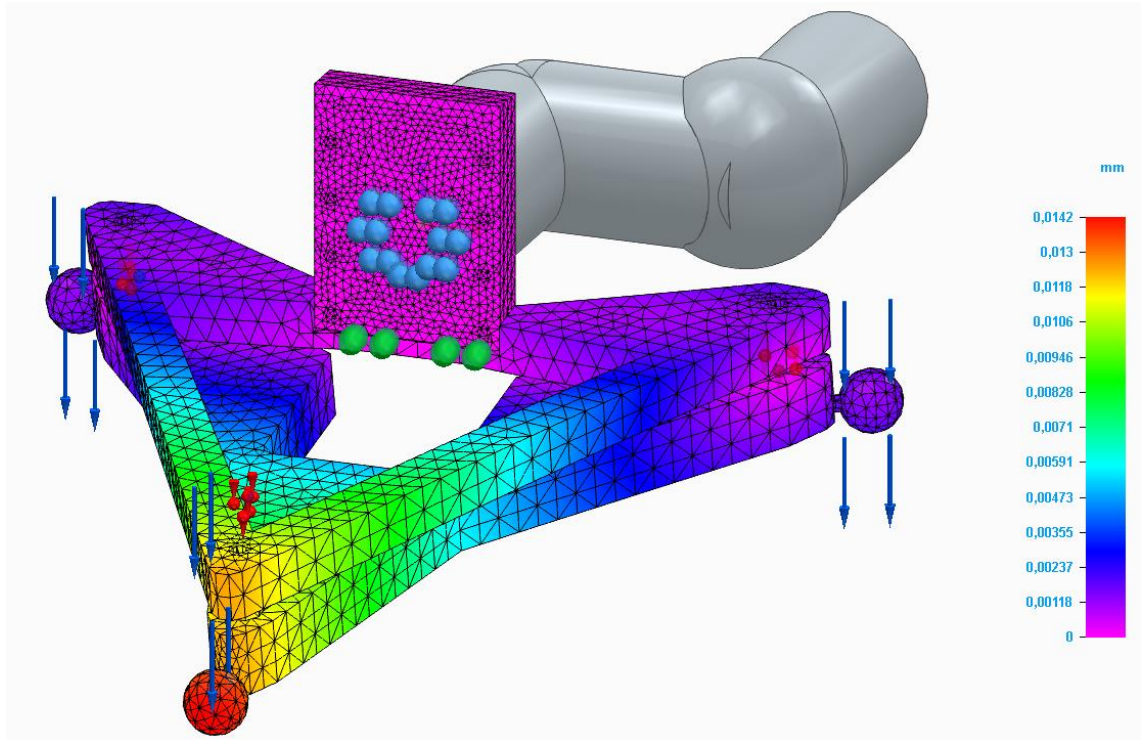
No se ha seleccionado ninguna pieza de nivel superior.

A.2.1 Caso4

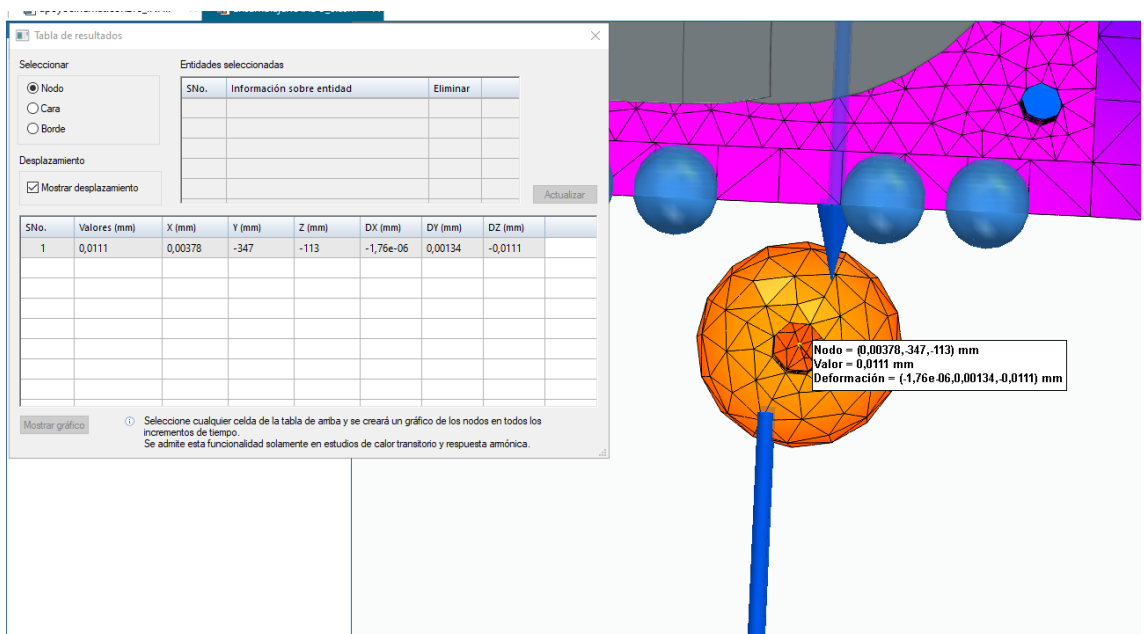
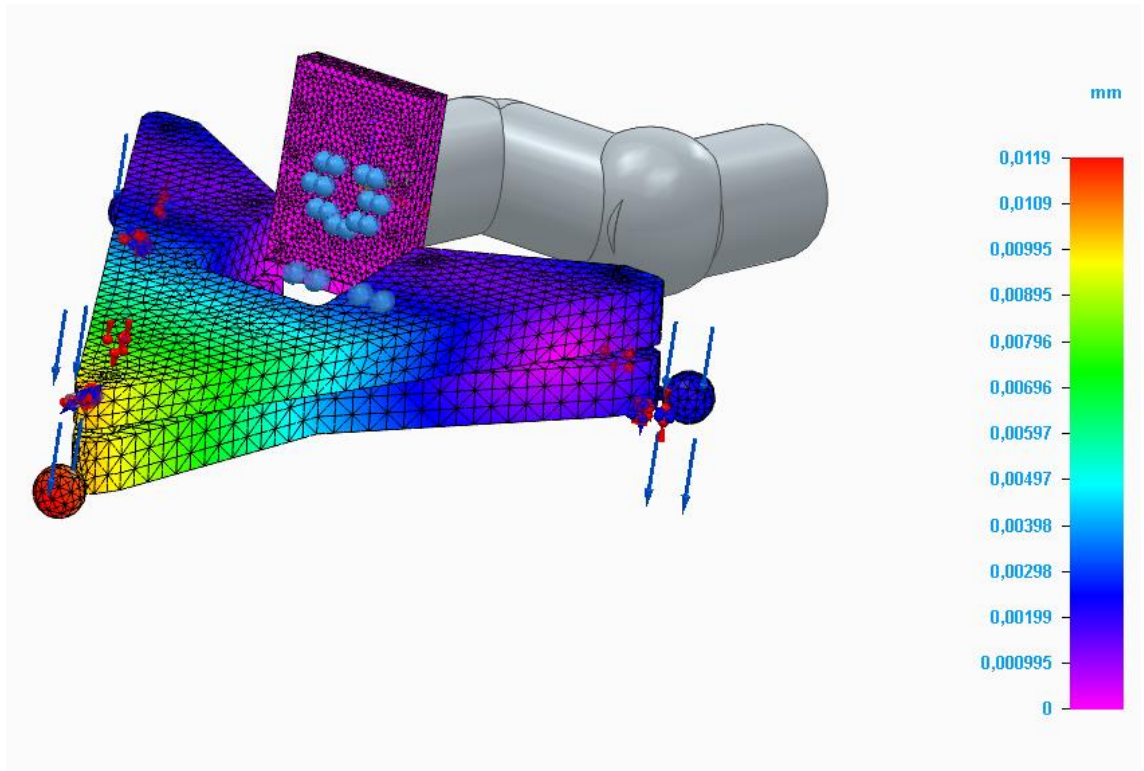
Ensamblaje ROTADO_4_asm, Estudio estático 1
 Desplazamiento - Nodal
 Contorno: Traslación total
 Deformación: Traslación total
 Fecha: miércoles, 13 de noviembre de 2024 20:44



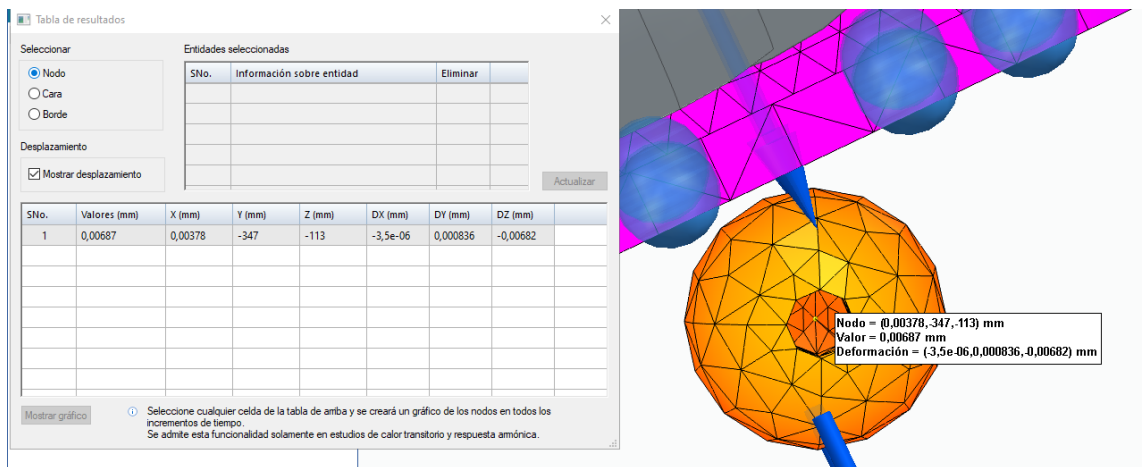
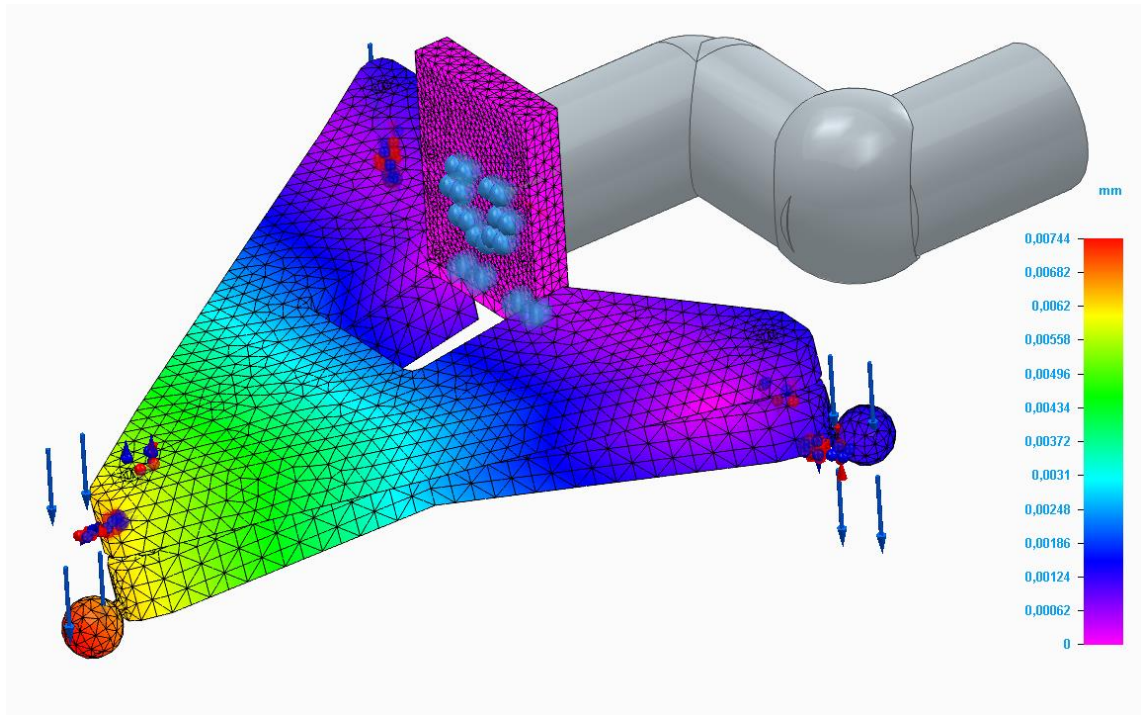
A.2.1 Caso6



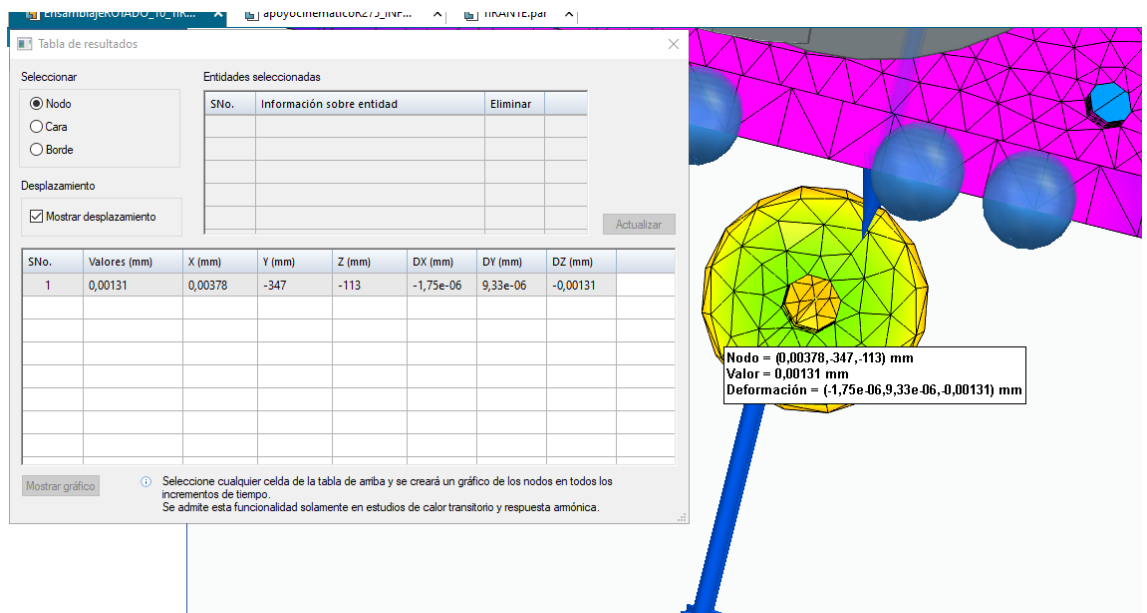
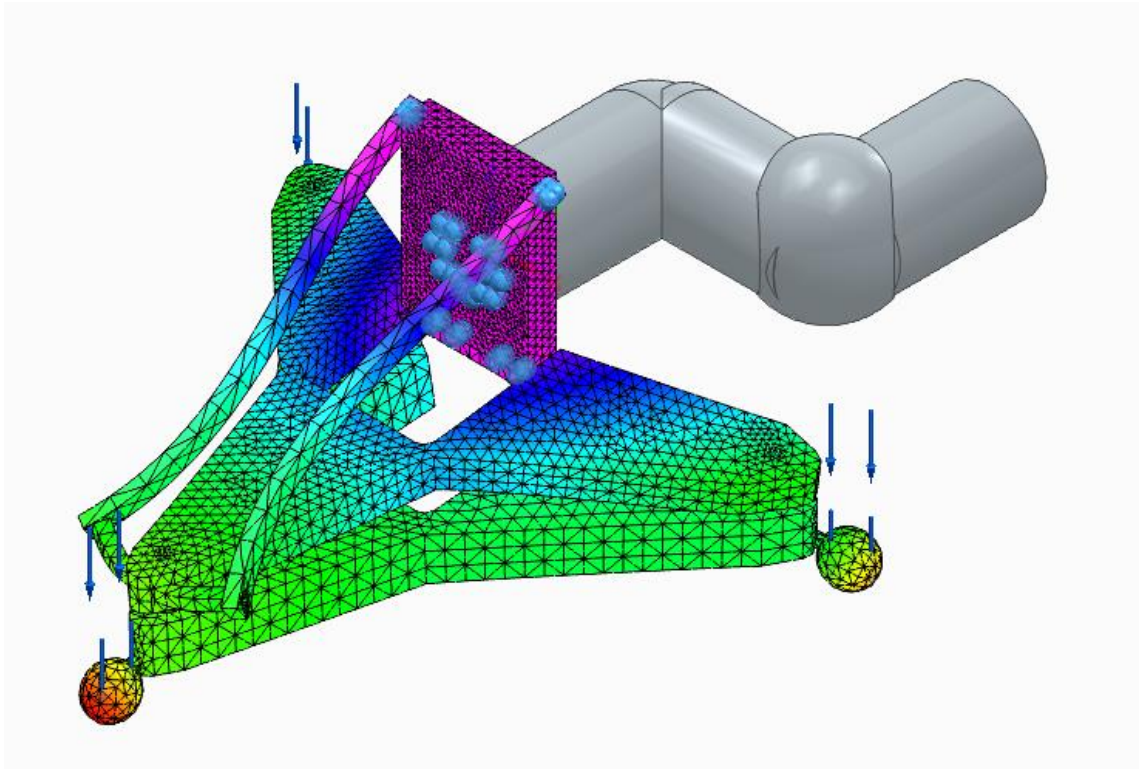
A.2.1 Caso7



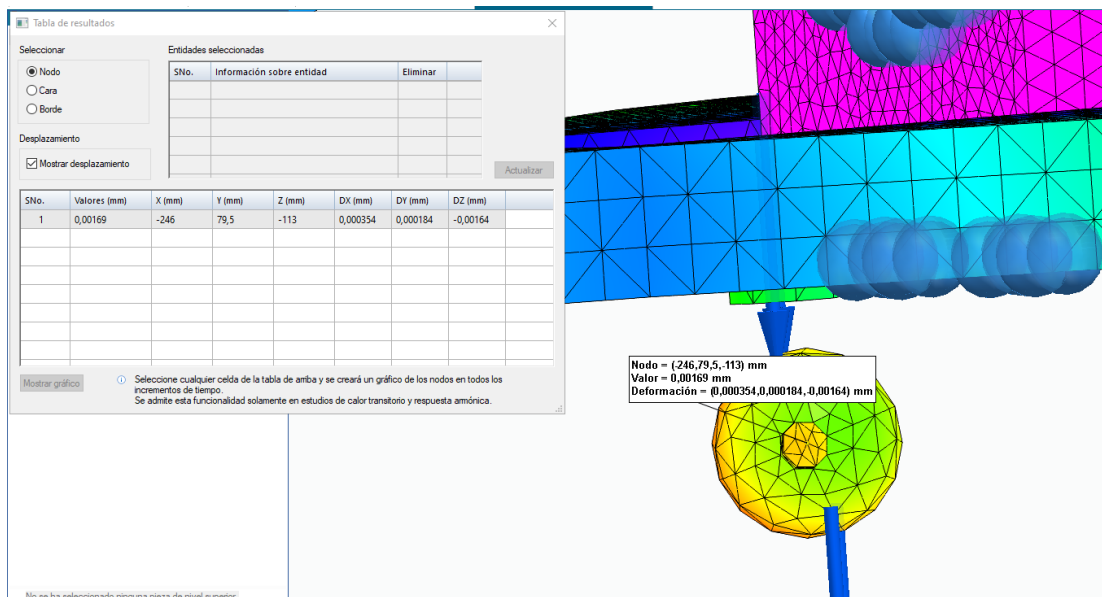
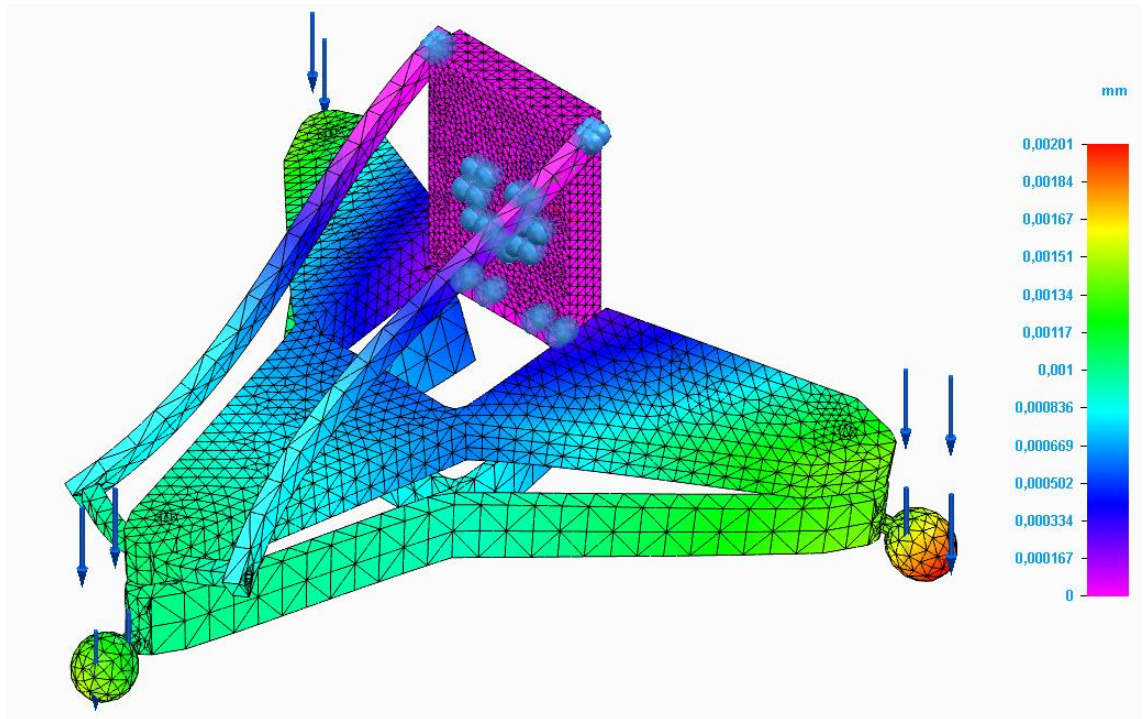
A.2.1 Caso8



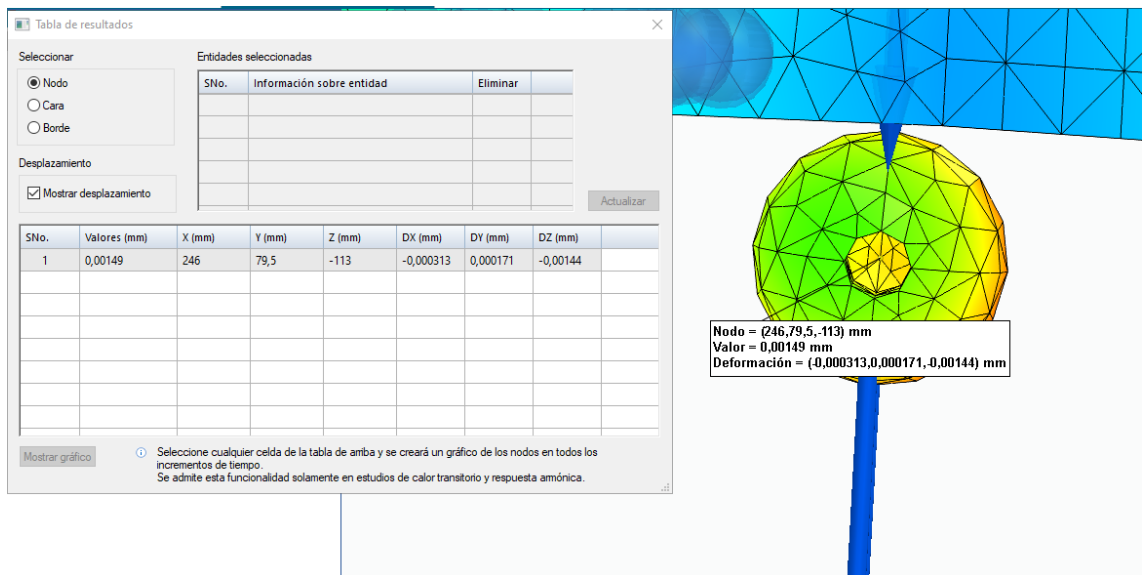
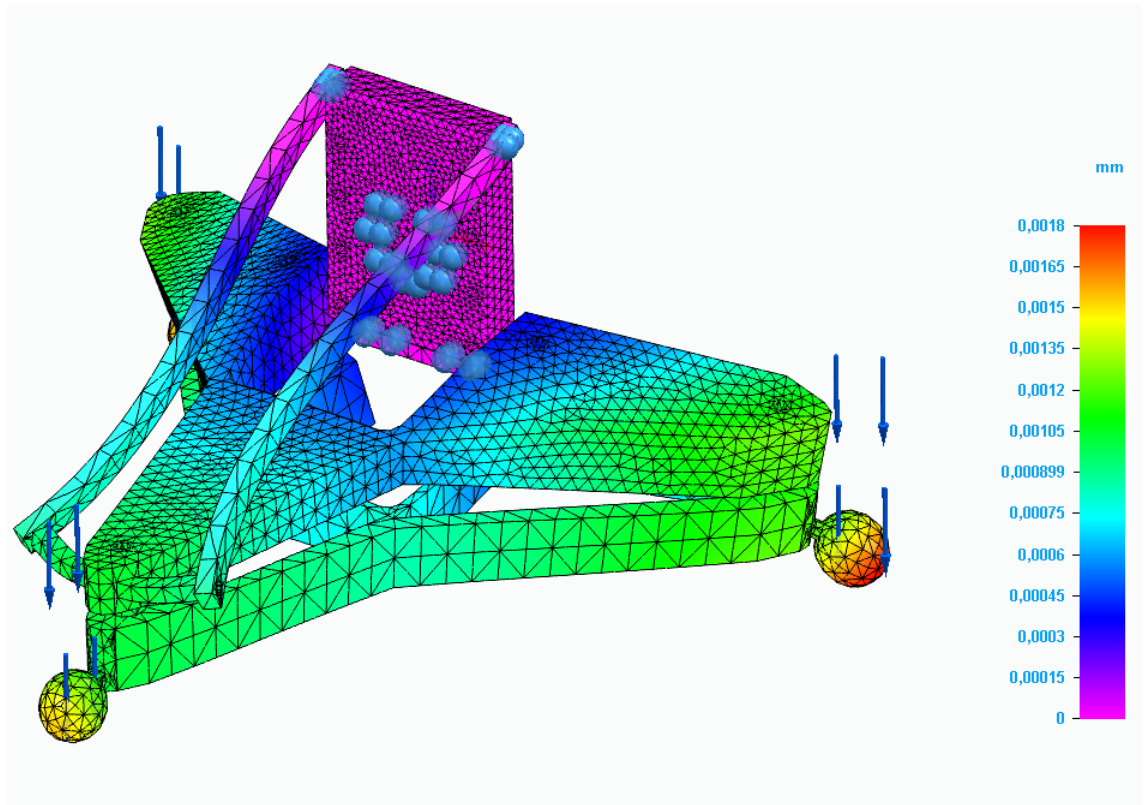
A.2.1 Caso10



A.2.1 Caso11



A.2.1 Caso12



A.3 Simulaciones para obtener las dimensiones del bloque a mecanizar

A.3.1 Estudio 1

Results1	Results2
RB; %[mm] % R Base fija; Coordenadas en SRB	700
RP; %[mm] % R PLATAFORMA MÓVIL; Coordenadas en SRP	284
L_61; %[mm] Utilizado para el caso B6: distancia entre la base 6 y la 1	100
POSE de la BASE desde SR Robot [mm]	1500 0 0 90 0 0
POSE XYZABC del TCP desde SR A6 [mm]	149.5 0 62.57 90 0 90
POSE XYZABC de la Plataforma P desde SR A6 [mm]	112.98 0 62.57 -90 0 90
Dimensión X de la pieza [mm]	200
Dimensión Y de la pieza [mm]	400
Dimensión Z de la pieza [mm]	200
POSE XYZABC de la pieza [mm]	1600 200 200
Separación del plano inferior de mecanizado [mm]	50
RADIO máximo HPTI (colisiones) [mm]	22
Error en IK [mm]	2,83165E-06
Contador repeticiones ik	1
L máxima HPTI [mm]	1000
Extensión máxima HPTI's [mm]	840,9872522
Extensión mínima HPTI's [mm]	447,3937787
L mínima HPTI [mm]	420
Ángulo entre tridentes	109,7912812
Ángulo mínimo tridentes	30
Colisión	1

	1	2	3	4	5	6
1	0	0	0	0	1	1
2	0	0	0	0	0	1
3	0	0	1	0	0	0
4	0	0	1	1	0	0

A.3.2 Estudio 2

Results1	Results2
RB; %[mm] % R Base fija; Coordenadas en SRB	369,5
RP; %[mm] % R PLATAFORMA MÓVIL; Coordenadas en SRP	284
L_61; %[mm] Utilizado para el caso B6: distancia entre la base 6 y la 1	100
POSE de la BASE desde SR Robot [mm]	1500 0 0 90 0 0
POSE XYZABC del TCP desde SR A6 [mm]	149.5 0 62.57 90 0 90
POSE XYZABC de la Plataforma P desde SR A6 [mm]	112.98 0 62.57 -90 0 90
Dimensión X de la pieza [mm]	200
Dimensión Y de la pieza [mm]	400
Dimensión Z de la pieza [mm]	200
POSE XYZABC de la pieza [mm]	1600 200 200
Separación del plano inferior de mecanizado [mm]	50
RADIO máximo HPTI (colisiones) [mm]	22
Error en IK [mm]	2,83165E-06
Contador repeticiones ik	1
L máxima HPTI [mm]	1000
Extensión máxima HPTI's [mm]	568,2524909
Extensión mínima HPTI's [mm]	257,3114443
L mínima HPTI [mm]	420
Ángulo entre tridentes	76,95181386
Ángulo mínimo tridentes	30
Colisión	1

	1	2	3	4	5	6
1	0	0	0	0	1	1
2	0	0	0	0	0	1
3	0	0	1	0	0	0
4	0	0	1	1	0	0

A.3.3 Estudio 3

Results1	Results2
RB; %[mm] % R Base fija; Coordenadas en SRB	369,5
RP; %[mm] % R PLATAFORMA MÓVIL; Coordenadas en SRP	284
L_61; %[mm] Utilizado para el caso B6: distancia entre la base 6 y la 1	100
POSE de la BASE desde SR Robot [mm]	1500 0 0 90 0 0
POSE XYZABC del TCP desde SR A6 [mm]	149.5 0 62.57 90 0 90
POSE XYZABC de la Plataforma P desde SR A6 [mm]	112.98 0 62.57 -90 0 90
Dimensión X de la pieza [mm]	150
Dimensión Y de la pieza [mm]	150
Dimensión Z de la pieza [mm]	200
POSE XYZABC de la pieza [mm]	1575 75 200
Separación del plano inferior de mecanizado [mm]	50
RADIO máximo HPTI (colisiones) [mm]	22
Error en IK [mm]	1,9091E-06
Contador repeticiones ik	1
L máxima HPTI [mm]	1000
Extensión máxima HPTI's [mm]	467,7797886
Extensión mínima HPTI's [mm]	304,6344393
L mínima HPTI [mm]	420
Ángulo entre tridentes	91,01914001
Ángulo mínimo tridentes	30
Colisión	0

A.3.4 Estudio 4

Results1	Results2
RB; %[mm] % R Base fija; Coordenadas en SRB	369,5
RP; %[mm] % R PLATAFORMA MÓVIL; Coordenadas en SRP	284
L_61; %[mm] Utilizado para el caso B6: distancia entre la base 6 y la 1	100
POSE de la BASE desde SR Robot [mm]	1500 0 0 90 0 0
POSE XYZABC del TCP desde SR A6 [mm]	149.5 0 62.57 90 0 90
POSE XYZABC de la Plataforma P desde SR A6 [mm]	112.98 0 62.57 -90 0 90
Dimensión X de la pieza [mm]	150
Dimensión Y de la pieza [mm]	150
Dimensión Z de la pieza [mm]	340
POSE XYZABC de la pieza [mm]	1575 75 340
Separación del plano inferior de mecanizado [mm]	85
RADIO máximo HPTI (colisiones) [mm]	22
Error en IK [mm]	1,70755E-06
Contador repeticiones ik	1
L máxima HPTI [mm]	1000
Extensión máxima HPTI's [mm]	551,945236
Extensión mínima HPTI's [mm]	422,6437489
L mínima HPTI [mm]	420
Ángulo entre tridentes	70,87810869
Ángulo mínimo tridentes	30
Colisión	0

A.3.5 Estudio 5

Results1	Results2
RB; %[mm] % R Base fija; Coordenadas en SRB	369,5
RP; %[mm] % R PLATAFORMA MÓVIL; Coordenadas en SRP	284
L_61; %[mm] Utilizado para el caso B6: distancia entre la base 6 y la 1	100
POSE de la BASE desde SR Robot [mm]	1500 0 0 90 0 0
POSE XYZABC del TCP desde SR A6 [mm]	149.5 0 62.57 90 0 90
POSE XYZABC de la Plataforma P desde SR A6 [mm]	112.98 0 62.57 -90 0 90
Dimensión X de la pieza [mm]	150
Dimensión Y de la pieza [mm]	150
Dimensión Z de la pieza [mm]	400
POSE XYZABC de la pieza [mm]	1575 75 400
Separación del plano inferior de mecanizado [mm]	100
RADIO máximo HPTI (colisiones) [mm]	22
Error en IK [mm]	2,09131E-06
Contador repeticiones ik	1
L máxima HPTI [mm]	1000
Extensión máxima HPTI's [mm]	594,4963766
Extensión mínima HPTI's [mm]	476,8753834
L mínima HPTI [mm]	420
Ángulo entre tridentes	64,13978295
Ángulo mínimo tridentes	30
Colisión	0

A.3.6 Estudio 6

Results1	Results2
RB; %[mm] % R Base fija; Coordenadas en SRB	369,5
RP; %[mm] % R PLATAFORMA MÓVIL; Coordenadas en SRP	284
L_61; %[mm] Utilizado para el caso B6: distancia entre la base 6 y la 1	100
POSE de la BASE desde SR Robot [mm]	1500 0 0 90 0 0
POSE XYZABC del TCP desde SR A6 [mm]	149.5 0 62.57 90 0 90
POSE XYZABC de la Plataforma P desde SR A6 [mm]	112.98 0 62.57 -90 0 90
Dimensión X de la pieza [mm]	150
Dimensión Y de la pieza [mm]	150
Dimensión Z de la pieza [mm]	600
POSE XYZABC de la pieza [mm]	1575 75 600
Separación del plano inferior de mecanizado [mm]	150
RADIO máximo HPTI (colisiones) [mm]	22
Error en IK [mm]	9,74542E-07
Contador repeticiones ik	1
L máxima HPTI [mm]	1000
Extensión máxima HPTI's [mm]	753,6802579
Extensión mínima HPTI's [mm]	664,844444
L mínima HPTI [mm]	420
Ángulo entre tridentes	47,9063907
Ángulo mínimo tridentes	30
Colisión	0

A.3.7 Estudio 7

Results1	Results2
RB; %[mm] % R Base fija; Coordenadas en SRB	369,5
RP; %[mm] % R PLATAFORMA MÓVIL; Coordenadas en SRP	284
L_61; %[mm] Utilizado para el caso B6: distancia entre la base 6 y la 1	100
POSE de la BASE desde SR Robot [mm]	1500 0 0 90 0 0
POSE XYZABC del TCP desde SR A6 [mm]	149.5 0 62.57 90 0 90
POSE XYZABC de la Plataforma P desde SR A6 [mm]	112.98 0 62.57 -90 0 90
Dimensión X de la pieza [mm]	150
Dimensión Y de la pieza [mm]	150
Dimensión Z de la pieza [mm]	900
POSE XYZABC de la pieza [mm]	1575 75 900
Separación del plano inferior de mecanizado [mm]	225
RADIO máximo HPTI (colisiones) [mm]	22
Error en IK [mm]	1,20742E-06
Contador repeticiones ik	1
L máxima HPTI [mm]	1000
Extensión máxima HPTI's [mm]	1019,777393
Extensión mínima HPTI's [mm]	955,996932
L mínima HPTI [mm]	420
Ángulo entre tridentes	34,13343489
Ángulo mínimo tridentes	30
Colisión	0

A.3.8 Estudio 8

Results1	Results2
RB; %[mm] % R Base fija; Coordenadas en SRB	369,5
RP; %[mm] % R PLATAFORMA MÓVIL; Coordenadas en SRP	284
L_61; %[mm] Utilizado para el caso B6: distancia entre la base 6 y la 1	100
POSE de la BASE desde SR Robot [mm]	1500 0 0 90 0 0
POSE XYZABC del TCP desde SR A6 [mm]	149.5 0 62.57 90 0 90
POSE XYZABC de la Plataforma P desde SR A6 [mm]	112.98 0 62.57 -90 0 90
Dimensión X de la pieza [mm]	150
Dimensión Y de la pieza [mm]	150
Dimensión Z de la pieza [mm]	870
POSE XYZABC de la pieza [mm]	1575 75 870
Separación del plano inferior de mecanizado [mm]	217,5
RADIO máximo HPTI (colisiones) [mm]	22
Error en IK [mm]	-180,0000004
Contador repeticiones ik	1
L máxima HPTI [mm]	1000
Extensión máxima HPTI's [mm]	992,2977042
Extensión mínima HPTI's [mm]	926,6277212
L mínima HPTI [mm]	420
Ángulo entre tridentes	35,16123077
Ángulo mínimo tridentes	30
Colisión	0

A.3.9 Estudio 9

Results1	Results2
RB; %[mm] % R Base fija; Coordenadas en SRB	369,5
RP; %[mm] % R PLATAFORMA MÓVIL; Coordenadas en SRP	284
L_61; %[mm] Utilizado para el caso B6: distancia entre la base 6 y la 1	100
POSE de la BASE desde SR Robot [mm]	1500 0 0 90 0 0
POSE XYZABC del TCP desde SR A6 [mm]	149.5 0 62.57 90 0 90
POSE XYZABC de la Plataforma P desde SR A6 [mm]	112.98 0 62.57 -90 0 90
Dimensión X de la pieza [mm]	200
Dimensión Y de la pieza [mm]	200
Dimensión Z de la pieza [mm]	200
POSE XYZABC de la pieza [mm]	1600 100 200
Separación del plano inferior de mecanizado [mm]	50
RADIO máximo HPTI (colisiones) [mm]	22
Error en IK [mm]	2,56132E-06
Contador repeticiones ik	1
L máxima HPTI [mm]	1000
Extensión máxima HPTI's [mm]	498,5685149
Extensión mínima HPTI's [mm]	283,8124527
L mínima HPTI [mm]	420
Ángulo entre tridentes	86,88796092
Ángulo mínimo tridentes	30
Colisión	0

A.3.10 Estudio 10

Results1	Results2
RB; %[mm] % R Base fija; Coordenadas en SRB	369,5
RP; %[mm] % R PLATAFORMA MÓVIL; Coordenadas en SRP	284
L_61; %[mm] Utilizado para el caso B6: distancia entre la base 6 y la 1	100
POSE de la BASE desde SR Robot [mm]	1500 0 0 90 0 0
POSE XYZABC del TCP desde SR A6 [mm]	149.5 0 62.57 90 0 90
POSE XYZABC de la Plataforma P desde SR A6 [mm]	112.98 0 62.57 -90 0 90
Dimensión X de la pieza [mm]	300
Dimensión Y de la pieza [mm]	300
Dimensión Z de la pieza [mm]	300
POSE XYZABC de la pieza [mm]	1650 150 300
Separación del plano inferior de mecanizado [mm]	75
RADIO máximo HPTI (colisiones) [mm]	22
Error en IK [mm]	8,53774E-07
Contador repeticiones ik	1
L máxima HPTI [mm]	1000
Extensión máxima HPTI's [mm]	610,6388673
Extensión mínima HPTI's [mm]	347,632338
L mínima HPTI [mm]	420
Ángulo entre tridentes	67,94678912
Ángulo mínimo tridentes	30
Colisión	1

A.3.11 Estudio 11

Results1	Results2
RB; %[mm] % R Base fija; Coordenadas en SRB	369,5
RP; %[mm] % R PLATAFORMA MÓVIL; Coordenadas en SRP	284
L_61; %[mm] Utilizado para el caso B6: distancia entre la base 6 y la 1	100
POSE de la BASE desde SR Robot [mm]	1500 0 0 90 0 0
POSE XYZABC del TCP desde SR A6 [mm]	149.5 0 62.57 90 0 90
POSE XYZABC de la Plataforma P desde SR A6 [mm]	112.98 0 62.57 -90 0 90
Dimensión X de la pieza [mm]	200
Dimensión Y de la pieza [mm]	200
Dimensión Z de la pieza [mm]	300
POSE XYZABC de la pieza [mm]	1600 100 300
Separación del plano inferior de mecanizado [mm]	75
RADIO máximo HPTI (colisiones) [mm]	22
Error en IK [mm]	1,47878E-06
Contador repeticiones ik	1
L máxima HPTI [mm]	1000
Extensión máxima HPTI's [mm]	553,0592849
Extensión mínima HPTI's [mm]	371,2862814
L mínima HPTI [mm]	420
Ángulo entre tridentes	73,54759576
Ángulo mínimo tridentes	30
Colisión	0

A.3.12 Estudio 12

Results1	Results2
RB; %[mm] % R Base fija; Coordenadas en SRB	369,5
RP; %[mm] % R PLATAFORMA MÓVIL; Coordenadas en SRP	284
L_61; %[mm] Utilizado para el caso B6: distancia entre la base 6 y la 1	100
POSE de la BASE desde SR Robot [mm]	1500 0 0 90 0 0
POSE XYZABC del TCP desde SR A6 [mm]	149.5 0 62.57 90 0 90
POSE XYZABC de la Plataforma P desde SR A6 [mm]	112.98 0 62.57 -90 0 90
Dimensión X de la pieza [mm]	200
Dimensión Y de la pieza [mm]	200
Dimensión Z de la pieza [mm]	350
POSE XYZABC de la pieza [mm]	1600 100 350
Separación del plano inferior de mecanizado [mm]	87,5
RADIO máximo HPTI (colisiones) [mm]	22
Error en IK [mm]	1,47878E-06
Contador repeticiones ik	1
L máxima HPTI [mm]	1000
Extensión máxima HPTI's [mm]	584,8303726
Extensión mínima HPTI's [mm]	417,1396722
L mínima HPTI [mm]	420
Ángulo entre tridentes	67,78826636
Ángulo mínimo tridentes	30
Colisión	0

A.3.13 Estudio 13

Results1	Results2
RB; %[mm] % R Base fija; Coordenadas en SRB	369,5
RP; %[mm] % R PLATAFORMA MÓVIL; Coordenadas en SRP	284
L_61; %[mm] Utilizado para el caso B6: distancia entre la base 6 y la 1	100
POSE de la BASE desde SR Robot [mm]	1500 0 0 90 0 0
POSE XYZABC del TCP desde SR A6 [mm]	149.5 0 62.57 90 0 90
POSE XYZABC de la Plataforma P desde SR A6 [mm]	112.98 0 62.57 -90 0 90
Dimensión X de la pieza [mm]	250
Dimensión Y de la pieza [mm]	190
Dimensión Z de la pieza [mm]	350
POSE XYZABC de la pieza [mm]	1625 95 350
Separación del plano inferior de mecanizado [mm]	87,5
RADIO máximo HPTI (colisiones) [mm]	22
Error en IK [mm]	2,83165E-06
Contador repeticiones ik	1
L máxima HPTI [mm]	1000
Extensión máxima HPTI's [mm]	596,5920887
Extensión mínima HPTI's [mm]	411,5943785
L mínima HPTI [mm]	420
Ángulo entre tridentes	66,8880538
Ángulo mínimo tridentes	30
Colisión	0

A.3.14 Estudio 14

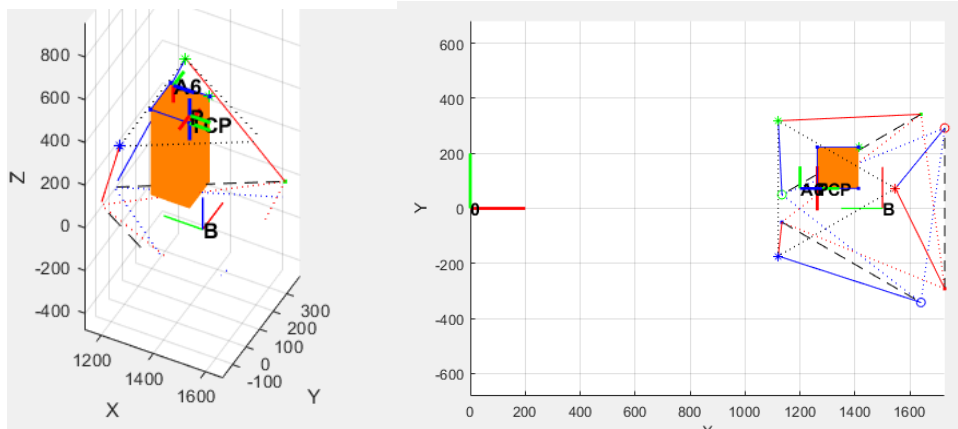
Results1	Results2
RB; %[mm] % R Base fija; Coordenadas en SRB	369,5
RP; %[mm] % R PLATAFORMA MÓVIL; Coordenadas en SRP	284
L_61; %[mm] Utilizado para el caso B6: distancia entre la base 6 y la 1	100
POSE de la BASE desde SR Robot [mm]	1500 0 0 90 0 0
POSE XYZABC del TCP desde SR A6 [mm]	149.5 0 62.57 90 0 90
POSE XYZABC de la Plataforma P desde SR A6 [mm]	112.98 0 62.57 -90 0 90
Dimensión X de la pieza [mm]	250
Dimensión Y de la pieza [mm]	190
Dimensión Z de la pieza [mm]	850
POSE XYZABC de la pieza [mm]	1625 95 850
Separación del plano inferior de mecanizado [mm]	212,5
RADIO máximo HPTI (colisiones) [mm]	22
Error en IK [mm]	1,45971E-07
Contador repeticiones ik	1
L máxima HPTI [mm]	1000
Extensión máxima HPTI's [mm]	996,2138936
Extensión mínima HPTI's [mm]	897,7360122
L mínima HPTI [mm]	420
Ángulo entre tridentes	35,42012476
Ángulo mínimo tridentes	30
Colisión	0

A.3.15 Estudio 15

Results1	Results2
RB; %[mm] % R Base fija; Coordenadas en SRB	369,5
RP; %[mm] % R PLATAFORMA MÓVIL; Coordenadas en SRP	284
L_61; %[mm] Utilizado para el caso B6: distancia entre la base 6 y la 1	100
POSE de la BASE desde SR Robot [mm]	1500 0 0 90 0 0
POSE XYZABC del TCP desde SR A6 [mm]	149.5 0 62.57 90 0 90
POSE XYZABC de la Plataforma P desde SR A6 [mm]	112.98 0 62.57 -90 0 90
Dimensión X de la pieza [mm]	250
Dimensión Y de la pieza [mm]	190
Dimensión Z de la pieza [mm]	370
POSE XYZABC de la pieza [mm]	1625 95 370
Separación del plano inferior de mecanizado [mm]	92,5
RADIO máximo HPTI (colisiones) [mm]	22
Error en IK [mm]	1,31003E-06
Contador repeticiones ik	1
L máxima HPTI [mm]	1000
Extensión máxima HPTI's [mm]	609,7400471
Extensión mínima HPTI's [mm]	430,430882
L mínima HPTI [mm]	420
Ángulo entre tridentes	64,82648888
Ángulo mínimo tridentes	30
Colisión	0

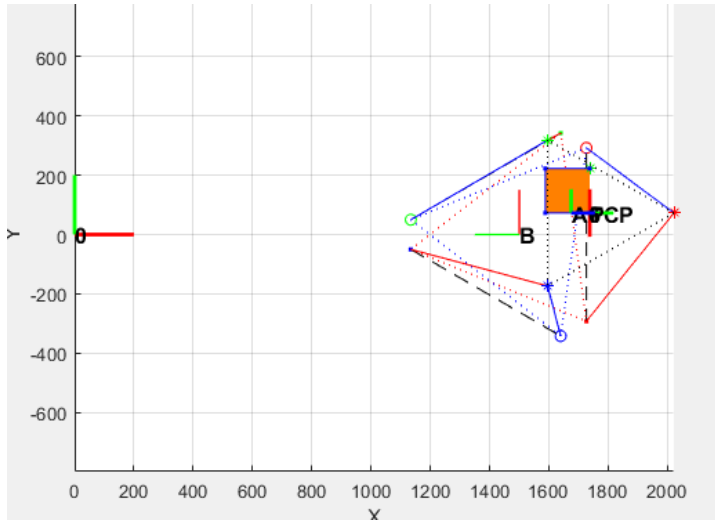
A.3.16 Casos para sacar las Z_min y Z-max en los casos no centrales

A.3.16.1 Caso 2



Results1	Results2
RB; %[mm] % R Base fija; Coordenadas en SRB	369,5
RP; %[mm] % R PLATAFORMA MÓVIL; Coordenadas en SRP	284
L_61; %[mm] Utilizado para el caso B6: distancia entre la base 6 y la 1	100
POSE de la BASE desde SR Robot [mm]	1500 0 0 90 0 0
POSE XYZABC del TCP desde SR A6 [mm]	149.5 0 62.57 90 0 90
POSE XYZABC de la Plataforma P desde SR A6 [mm]	112.98 0 62.57 -90 0 90
Dimensión X de la pieza [mm]	150
Dimensión Y de la pieza [mm]	150
Dimensión Z de la pieza [mm]	400
POSE XYZABC de la pieza [mm]	1412.42 222.5 400
Separación del plano inferior de mecanizado [mm]	100
RADIO máximo HPTI (colisiones) [mm]	22
Error en IK [mm]	-180,0000009
Contador repeticiones ik	1
L máxima HPTI [mm]	1000
Extensión máxima HPTI's [mm]	749,5064683
Extensión mínima HPTI's [mm]	437,5342509
L mínima HPTI [mm]	420
Ángulo entre tridentes	51,08268602
Ángulo mínimo tridentes	30
Colisión	0
Results1	Results2
RB; %[mm] % R Base fija; Coordenadas en SRB	369,5
RP; %[mm] % R PLATAFORMA MÓVIL; Coordenadas en SRP	284
L_61; %[mm] Utilizado para el caso B6: distancia entre la base 6 y la 1	100
POSE de la BASE desde SR Robot [mm]	1500 0 0 90 0 0
POSE XYZABC del TCP desde SR A6 [mm]	149.5 0 62.57 90 0 90
POSE XYZABC de la Plataforma P desde SR A6 [mm]	112.98 0 62.57 -90 0 90
Dimensión X de la pieza [mm]	150
Dimensión Y de la pieza [mm]	150
Dimensión Z de la pieza [mm]	750
POSE XYZABC de la pieza [mm]	1412.42 222.5 750
Separación del plano inferior de mecanizado [mm]	187,5
RADIO máximo HPTI (colisiones) [mm]	22
Error en IK [mm]	1,60412E-06
Contador repeticiones ik	4
L máxima HPTI [mm]	1000
Extensión máxima HPTI's [mm]	994,8989763
Extensión mínima HPTI's [mm]	787,083367
L mínima HPTI [mm]	420
Ángulo entre tridentes	35,93068518
Ángulo mínimo tridentes	30
Colisión	0

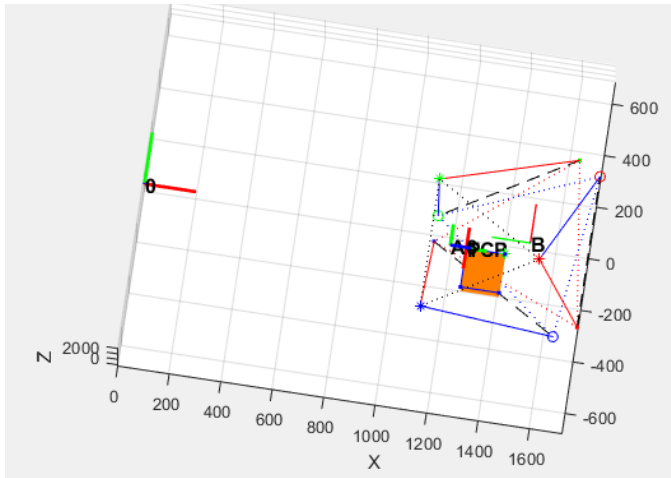
A.3.16.1 Caso 3



Results1	Results2
RB; %[mm] % R Base fija; Coordenadas en SRB	369,5
RP; %[mm] % R PLATAFORMA MÓVIL; Coordenadas en SRP	284
L_61; %[mm] Utilizado para el caso B6: distancia entre la base 6 y la 1	100
POSE de la BASE desde SR Robot [mm]	1500 0 0 90 0 0
POSE XYZABC del TCP desde SR A6 [mm]	149.5 0 62.57 90 0 90
POSE XYZABC de la Plataforma P desde SR A6 [mm]	112.98 0 62.57 -90 0 90
Dimensión X de la pieza [mm]	150
Dimensión Y de la pieza [mm]	150
Dimensión Z de la pieza [mm]	390
POSE XYZABC de la pieza [mm]	1737.58 222.5 390
Separación del plano inferior de mecanizado [mm]	97,5
RADIO máximo HPTI (colisiones) [mm]	22
Error en IK [mm]	3,04009E-06
Contador repeticiones ik	1
L máxima HPTI [mm]	1000
Extensión máxima HPTI's [mm]	755,0963271
Extensión mínima HPTI's [mm]	429,449999
L mínima HPTI [mm]	420
Ángulo entre tridentes	50,56507687
Ángulo mínimo tridentes	30
Colisión	0

Results1	Results2
RB; %[mm] % R Base fija; Coordenadas en SRB	369,5
RP; %[mm] % R PLATAFORMA MÓVIL; Coordenadas en SRP	284
L_61; %[mm] Utilizado para el caso B6: distancia entre la base 6 y la 1	100
POSE de la BASE desde SR Robot [mm]	1500 0 0 90 0 0
POSE XYZABC del TCP desde SR A6 [mm]	149.5 0 62.57 90 0 90
POSE XYZABC de la Plataforma P desde SR A6 [mm]	112.98 0 62.57 -90 0 90
Dimensión X de la pieza [mm]	150
Dimensión Y de la pieza [mm]	150
Dimensión Z de la pieza [mm]	750
POSE XYZABC de la pieza [mm]	1737.58 222.5 750
Separación del plano inferior de mecanizado [mm]	187,5
RADIO máximo HPTI (colisiones) [mm]	22
Error en IK [mm]	8,53774E-07
Contador repeticiones ik	1
L máxima HPTI [mm]	1000
Extensión máxima HPTI's [mm]	1003,426566
Extensión mínima HPTI's [mm]	788,1127441
L mínima HPTI [mm]	420
Ángulo entre tridentes	35,57914519
Ángulo mínimo tridentes	30
Colisión	0

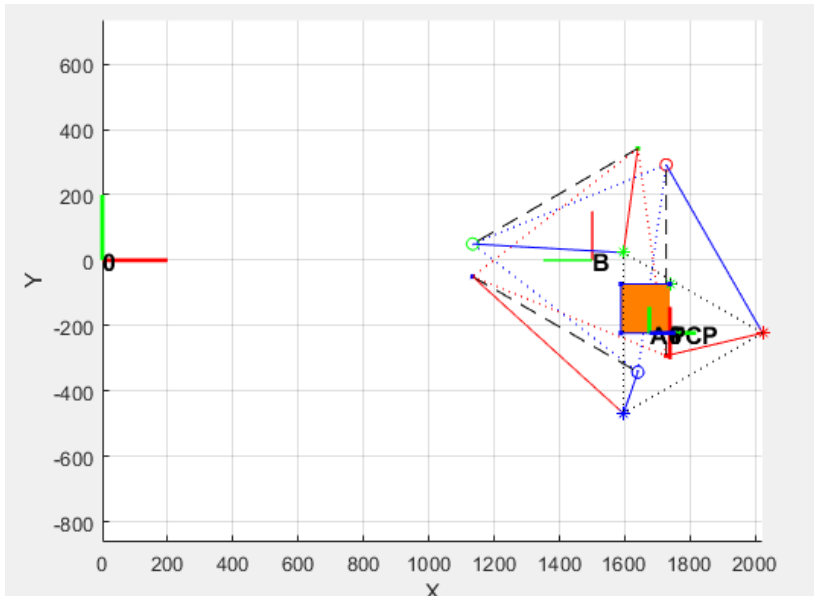
A.3.16.1 Caso 4



Results1	Results2
RB; %[mm] % R Base fija; Coordenadas en SRB	369,5
RP; %[mm] % R PLATAFORMA MÓVIL; Coordenadas en SRP	284
L_61; %[mm] Utilizado para el caso B6: distancia entre la base 6 y la 1	100
POSE de la BASE desde SR Robot [mm]	1500 0 0 90 0 0
POSE XYZABC del TCP desde SR A6 [mm]	149.5 0 62.57 90 0 90
POSE XYZABC de la Plataforma P desde SR A6 [mm]	112.98 0 62.57 -90 0 90
Dimensión X de la pieza [mm]	150
Dimensión Y de la pieza [mm]	150
Dimensión Z de la pieza [mm]	385
POSE XYZABC de la pieza [mm]	1412.42 -72.5 385
Separación del plano inferior de mecanizado [mm]	96,25
RADIO máximo HPTI (colisiones) [mm]	22
Error en IK [mm]	1,47878E-06
Contador repeticiones ik	2
L máxima HPTI [mm]	1000
Extensión máxima HPTI's [mm]	740,8706748
Extensión mínima HPTI's [mm]	422,5702513
L mínima HPTI [mm]	420
Ángulo entre tridentes	51,90882274
Ángulo mínimo tridentes	30
Colisión	0

Results1	Results2
RB; %[mm] % R Base fija; Coordenadas en SRB	369,5
RP; %[mm] % R PLATAFORMA MÓVIL; Coordenadas en SRP	284
L_61; %[mm] Utilizado para el caso B6: distancia entre la base 6 y la 1	100
POSE de la BASE desde SR Robot [mm]	1500 0 0 90 0 0
POSE XYZABC del TCP desde SR A6 [mm]	149.5 0 62.57 90 0 90
POSE XYZABC de la Plataforma P desde SR A6 [mm]	112.98 0 62.57 -90 0 90
Dimensión X de la pieza [mm]	150
Dimensión Y de la pieza [mm]	150
Dimensión Z de la pieza [mm]	750
POSE XYZABC de la pieza [mm]	1412.42 -72.5 750
Separación del plano inferior de mecanizado [mm]	187,5
RADIO máximo HPTI (colisiones) [mm]	22
Error en IK [mm]	8,53774E-07
Contador repeticiones ik	3
L máxima HPTI [mm]	1000
Extensión máxima HPTI's [mm]	994,8989691
Extensión mínima HPTI's [mm]	787,0833629
L mínima HPTI [mm]	420
Ángulo entre tridentes	35,93068549
Ángulo mínimo tridentes	30
Colisión	0

A.3.16.1 Caso 5



Results1	Results2
RB; %[mm] % R Base fija; Coordenadas en SRB	369,5
RP; %[mm] % R PLATAFORMA MÓVIL; Coordenadas en SRP	284
L_61; %[mm] Utilizado para el caso B6: distancia entre la base 6 y la 1	100
POSE de la BASE desde SR Robot [mm]	1500 0 0 90 0 0
POSE XYZABC del TCP desde SR A6 [mm]	149.5 0 62.57 90 0 90
POSE XYZABC de la Plataforma P desde SR A6 [mm]	112.98 0 62.57 -90 0 90
Dimensión X de la pieza [mm]	150
Dimensión Y de la pieza [mm]	150
Dimensión Z de la pieza [mm]	385
POSE XYZABC de la pieza [mm]	1737.58 -72.5 385
Separación del plano inferior de mecanizado [mm]	96,25
RADIO máximo HPTI (colisiones) [mm]	22
Error en IK [mm]	2,25887E-06
Contador repeticiones ik	1
L máxima HPTI [mm]	1000
Extensión máxima HPTI's [mm]	752,2833637
Extensión mínima HPTI's [mm]	424,4845111
L mínima HPTI [mm]	420
Ángulo entre tridentes	50,82391997
Ángulo mínimo tridentes	30
Colisión	0
Results1	Results2
RB; %[mm] % R Base fija; Coordenadas en SRB	369,5
RP; %[mm] % R PLATAFORMA MÓVIL; Coordenadas en SRP	284
L_61; %[mm] Utilizado para el caso B6: distancia entre la base 6 y la 1	100
POSE de la BASE desde SR Robot [mm]	1500 0 0 90 0 0
POSE XYZABC del TCP desde SR A6 [mm]	149.5 0 62.57 90 0 90
POSE XYZABC de la Plataforma P desde SR A6 [mm]	112.98 0 62.57 -90 0 90
Dimensión X de la pieza [mm]	150
Dimensión Y de la pieza [mm]	150
Dimensión Z de la pieza [mm]	750
POSE XYZABC de la pieza [mm]	1737.58 -72.5 750
Separación del plano inferior de mecanizado [mm]	187,5
RADIO máximo HPTI (colisiones) [mm]	22
Error en IK [mm]	8,53774E-07
Contador repeticiones ik	1
L máxima HPTI [mm]	1000
Extensión máxima HPTI's [mm]	1003,426562
Extensión mínima HPTI's [mm]	788,1127452
L mínima HPTI [mm]	420
Ángulo entre tridentes	35,57914533
Ángulo mínimo tridentes	30
Colisión	0