



Universidad
Zaragoza

Trabajo Fin de Grado

**DISEÑO Y FABRICACIÓN DE UN CABEZAL DE PULIDO
EN MANO DE ROBOT**

**DESIGN AND FABRICATION OF A ROBOT HAND
POLISHING HEAD**

Autor/es

Carlos Fraile Buetas

Director/es

Juan José Aguilar Martín

Titulación del autor

Grado en Ingeniería de Tecnologías Industriales

Escuela de Ingeniería y Arquitectura/ Universidad de Zaragoza

2023/2024

Resumen

El desarrollo de este trabajo de fin de grado "DISEÑO Y FABRICACIÓN DE UN CABEZAL DE PULIDO EN MANO DE ROBOT" se enmarca en el Área de Ingeniería de los Procesos de Fabricación de la Escuela de Ingeniería y Arquitectura de la Universidad de Zaragoza.

El proyecto se centra en la tarea de diseñar y fabricar un prototipo de cabezal de pulido utilizando técnicas de prototipado rápido. Inicialmente, se materializa un prototipo acorde a las necesidades del proyecto mediante el empleo del software Solid Edge 2023. Posteriormente, este diseño se lleva a la realidad a través de la fabricación en impresión 3D, utilizando el software Cura UltiMaker.

Una vez que los componentes han sido producidos, se procede al ensamblaje, donde se realiza una evaluación detallada del comportamiento futuro del sistema que será integrado en un robot industrial.

En la fase final, se realizará un diseño específico para la fabricación de componentes metálicos, buscando asegurar la durabilidad y robustez necesarias para aplicaciones industriales.

Abstract

The development of this final degree project, "DESIGN AND FABRICATION OF A ROBOT HAND POLISHING HEAD" falls within the manufacturing process Engineering Area of the Engineering and Architecture School of the Zaragoza University.

The project focuses on the task of designing and manufacturing a polishing head prototype using fast prototyping techniques. Initially, a prototype is materialized according to the project's needs using Solid Edge 2023 software. Afterwards, this design is brought to life through 3D printing, using Cura UltiMaker software.

Once the components have been produced, assembly takes place, where a detailed assessment of the future behavior of the system, which will be integrated into an industrial robot, is conducted.

In the final phase, a specific design for the manufacture of metal components will be developed, aiming to ensure the durability and robustness required for industrial applications.

Índice de contenidos

1	INTRODUCCION	1
1.1	Objetivo	1
1.2	Motivación	1
1.3	Metodología	1
2	ESTADO DEL ARTE.....	2
2.1	Proceso de pulido automático de superficies	3
2.2	Tecnologías más avanzadas	4
	AOV-10 de ATI	4
	CraftMate	4
	ACF-K de Ferrobotics	4
3	ANTECEDENTES	5
4	DISEÑO DE COMPONENTES PROTOTIPO INICIAL	6
4.1	Motor	6
4.2	Sistema flexible	7
4.3	Mecanismo de desplazamiento	11
4.4	Guía	12
4.5	Muelles-amortiguadores.....	12
4.6	Sistema giratorio	13
4.7	Carcasa	14
5	PROTOTIPO INICIAL	15
6	FABRICACION.....	15
7	DISEÑO DE PROTOTIPO FINAL CON MOTOR INTEGRADO	16
8	DISEÑO DE COMPONENTES Y MATERIALES FINALES.....	24
9	CONCLUSIONES	26
10	LINEAS FUTURAS	28
11	REFERENCIAS.....	29

Índice de tablas

Tabla 1 Comparación entre pulidoras rotativas y orbitales.....	3
Tabla 2 Tamaño de grano según tipo de aplicación	3
Tabla 3 Calculo giro ante un par en x	10
Tabla 4 Calculo giro ante un par en y	11
Tabla 5 Calculo altura precarga muelle	21
Tabla 6 Desglose de componentes	25
Tabla 7 Tornillería empleada modelo final	26
Tabla 8 Comparación del prototipo anterior y prototipo nuevo	27

Índice de figuras

Figura 1 Partes que componen una pulidora manual	2
Figura 2 AOV-10 de ATI	4
Figura 3 Selección área de defecto con Software CraftMate	4
Figura 4 Active Contact Flange Kit.....	5
Figura 5 Prototipo anterior.....	5
Figura 6 Motor neumático.....	7
Figura 7 Sistema giro primera solución	8
Figura 8 Sistema giro segunda solución	8
Figura 9 Sistema flexible.....	9
Figura 10 Tensiones máximas ante un par en x.....	10
Figura 11 Nodos utilizados calculo giro en x	10
Figura 12 Tensiones máximas ante un par en y.....	11
Figura 13 Nodos utilizados calculo giro en y	11
Figura 14 Mecanismo de desplazamiento superior	12
Figura 15 Mecanismo de desplazamiento inferior.....	12
Figura 16 Guía	12
Figura 17 Muelle-Amortiguador.....	13
Figura 18 Sistema giratorio.....	13
Figura 19 Carcasa superior	14
Figura 20 Carcasa inferior.....	14
Figura 21 Prototipo inicial	15
Figura 22 Impresión sistema flexible con Prusa i3	16
Figura 23 Soporte muelles.....	16
Figura 24 Agujero carcasa tomas neumáticas.....	17
Figura 25 Agujero para introducir llave en el montaje del eje	17
Figura 26 Eje motor	18
Figura 27 Diagrama muelle precargado y en carga	18
Figura 28 Calculadora de muelles de "MuelleStock"	20
Figura 29 Dimensiones de muelles necesarios "MuelleStock"	20
Figura 30 Curva del muelle y rango funcionamiento del muelle en el cabezal	21
Figura 31 Tensiones máximas ante un par en el eje Z de 2,29 N.m	23
Figura 32 Prototipo final con motor integrado	23
Figura 33 Fuelle	24
Figura 34 Diseño final.....	25
Figura 35 Desplazamiento del prototipo anterior frente al del prototipo final	27
Figura 36 Conexión del sensor GP2Y0A51SK0F.....	28
Figura 37 Ubicación de los sensores	29

1 INTRODUCCION

El presente trabajo de fin de grado se enfoca en el diseño y fabricación de un cabezal de pulido para la corrección de defectos en superficies pintadas. Para ello, se diseñan y adquieren sus distintos componentes de acuerdo con los requisitos esenciales que debe cumplir el cabezal, estos requisitos son suministrados por el tutor del trabajo.

Inicialmente, se realiza un prototipo inicial con un motor fabricado en impresión en 3D muy parecido a este en dimensiones, dado que en la documentación del proveedor no se proporcionan todas las dimensiones. Conforme se va avanzando el proyecto y se recibe el motor, se fabrica el prototipo final haciendo las modificaciones que son necesarias y se prueba. Finalmente se realiza este diseño final con los materiales y componentes finales.

Se trata de realizar el pulido de superficies pintadas acoplándose en un robot, por lo que este cabezal tiene que ser flexible para amortiguar los posibles errores de posicionamiento del robot. Además, ha de poderse precargar hasta un valor determinado con la ayuda de un grupo muelle amortiguado, permitiendo su desplazamiento vertical.

En el trabajo se abordan dificultades como su diseño de acuerdo con las restricciones de movimientos y giros, elección componentes, mejoras de modelos anteriores, cálculos de giros, tensiones, fuerzas y momentos.

1.1 Objetivo

El principal objetivo del trabajo es diseñar y fabricar un cabezal de pulido a partir de unas necesidades, cuya aplicación será la corrección de defectos en superficies pintadas.

1.2 Motivación

La motivación para realizar el presente trabajo es la oportunidad de poder materializar una idea, con la fabricación de un prototipo que pueda aplicarse en el mundo real. Adicionalmente, el desarrollo de habilidades técnicas con el aprendizaje de software de diseño en 3D, como Solid Edge, altamente solicitado en el mundo laboral, sumado al aprendizaje en impresión en 3D, posibilitando un prototipado rápido que facilita la creación de nuevos diseños, mejora los ya existentes y contribuye a la innovación en distintos campos.

1.3 Metodología

La metodología empleada para el presente proyecto consta de las siguientes partes:

- Análisis de la necesidad y estudio de modelos anteriores.
- Elección y adquisición de componentes.
- Diseño de otros componentes con Solid Edge [1].
- Impresión en 3D con Cura UltiMaker [2].
- Montaje de los componentes del prototipo inicial.

- Acoplo de motor y cambios correspondientes.
- Montaje del prototipo final con el motor integrado.
- Diseño de los componentes y materiales finales.

2 ESTADO DEL ARTE

Actualmente, en el ámbito de la fabricación de piezas, el desafío se encuentra en incrementar la producción, elevar la calidad y reducir los costes. Es por ello, por lo que se busca la mejora de los procesos productivos con su automatización, mejorando así la eficiencia.

Históricamente, el pulido de superficies pintadas se realizaba de forma manual, debido a la falta de tecnología automatizada. Con el avance de la tecnología, la disminución de costos y la necesidad de eficiencia en la producción, la automatización del pulido se ha vuelto predominante en la actualidad, ofreciendo estos beneficios.

El pulido de piezas pintadas es una etapa crítica para garantizar la calidad estética y funcionalidad de los productos acabados, en que la incorporación de un brazo robótico en el sistema de pulido introduce un elemento de precisión esencial para el pulido de piezas pintadas. La capacidad de ajuste del brazo robótico a las geometrías específicas de las piezas, combinada con la capacidad de aplicar niveles controlados de presión, dará lugar a una mayor calidad y reducción de errores. El diseño y la implementación efectiva de estos sistemas requieren una cuidadosa consideración de factores.

Analizando en el mercado los tipos de pulidoras manuales, estos se dividen principalmente en dos categorías: rotativas y de orbital [3]. Estos conceptos están principalmente relacionados con el movimiento de la borla alrededor del motor. En el caso de una pulidora rotativa, el rotor y la borla giran de manera sincronizada en una única dirección, sin presentar vibraciones, oscilaciones ni órbitas. Por otro lado, en una pulidora orbital, el rotor y la borla se desplazan en ejes distintos, generando así vibraciones, oscilaciones o movimientos orbitales en la borla.



Figura 1 Partes que componen una pulidora manual

La siguiente tabla muestra una comparativa entre ambas:

	Diferencias	Tipos	Ejemplo	Patrón de movimiento
Rotativa	<ul style="list-style-type: none"> •Rotor y borla giran juntos en una dirección •Rotación unidireccional, circular y con el eje en el centro del rotor 	Rotativa	 DEWALT DWP849X	
Orbital	<ul style="list-style-type: none"> •Rotor y borla se mueven en ejes diferentes. •Movimiento orbital, vibratorio u oscilante. 	Orbital fija	 Black & Decker Orbital	
		Orbital aleatoria de doble acción	 Griot's Garage GG6	
		Rotación forzada de doble acción	 Flex 3401	

Tabla 1 Comparación entre pulidoras rotativas y orbitales

2.1 Proceso de pulido automático de superficies

El proceso de pulido automatizado de superficies implica el uso de un robot equipado con un cabezal. Es fundamental controlar con el robot los parámetros de presión, velocidad y tamaño de grano.

Según el acabado final que se desee, el **tamaño de grano** en el pulido va desde P1000 hasta P5000 [4], normativa ISO- 6344-3 [5]. Este sistema, asigna un número para indicar el tamaño de las partículas abrasivas, cuanto mayor sea el número, más finas son las partículas.

Si la pintura está en relativamente buenas condiciones y tiene mínimas imperfecciones, se puede comenzar con papel de lija de grano más fino. Sin embargo, si la pintura está muy dañada, descolorida o tiene rayones profundos, se tiene que comenzar con un grano más grueso.

El tamaño de grano recomendado según el tipo de aplicación es el siguiente [4]:

Tipo de operación	Tipo de grano	Tamaño de grano
Correcciones de pintura	grueso	P1000 - P1500
Corte o refinamiento medio	medio	P2000 - P3000
Acabado fino	fino	P4000 - P5000.
Ultrafino	micrograno	superior a P5000

Tabla 2 Tamaño de grano según tipo de aplicación

Una **presión** o **velocidad** inadecuada puede causar una sobrecarga del motor, un desgaste prematuro de los componentes internos de la pulidora, un aumento en la temperatura de la pieza, así como también de la almohadilla de pulido, dañando tanto la herramienta como la pieza y desgastando rápidamente las almohadillas de pulido.

También, puede dejar marcas en la superficie. Esta velocidad óptima del cabezal de pulido está directamente vinculada al tamaño del grano, y depende del disco de pulido que se utilice

2.2 Tecnologías más avanzadas

Las tecnologías más recientes y avanzadas que se han identificado son:

AOV-10 de ATI, [6] es uno de los modelos más modernos, permite un cambio de discos de pulido automáticamente, pudiendo reemplazar discos ya gastados o cambiar a discos de tamaño de grano más pequeño para ir afinando cada vez más el acabado superficial. Esto permite reducir los requisitos de tiempo y mano de obra en el cambio de medios.



Figura 2 AOV-10 de ATI

CraftMate, [7] es una plataforma que utiliza tecnología de visión 3D para automatizar los procesos de acabado de superficies. Con solo presionar un botón, se puede escanear y construir un modelo 3D exacto de una superficie lista para ser procesada, permitiendo modificar los distintos parámetros.

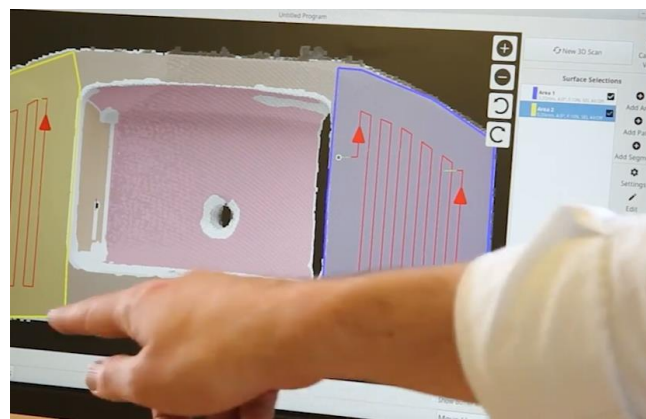


Figura 3 Selección área de defecto con Software CraftMate

ACF-K de Ferrobotics (Active Contact Flange Kit), [8] permite una fuerza constante, incluso con orientaciones cambiantes, mediante un actuador mecatrónico y sensores. Además, es modular y flexible, por lo tanto permite un cambio de herramienta más rápido.



Figura 4 Active Contact Flange Kit

3 ANTECEDENTES

Para el desarrollo del prototipo, se realizó en primer lugar un análisis detenido del modelo de cabezal preexistente, viendo su funcionamiento y las áreas de mejora.

El prototipo de cabezal anterior constaba de un motor neumático que hacía girar el disco de pulido. Como se necesitaba una presión determinada para el pulido, este motor se desplazaba verticalmente en el eje Z, ejerciendo la presión con unos muelles. Estos muelles, en reposo, permanecían precargados sobre el sistema de reposo. En funcionamiento, se cargaban hasta un valor determinado. Además, constaba de un sistema flexible para amortiguar los posibles errores de posicionamiento del robot en la parte superior, que permitía el giro en el eje X e Y del conjunto formado por el motor, el eje y el disco. Todo ello, iría ensamblado en el interior de sus dos carcasas.

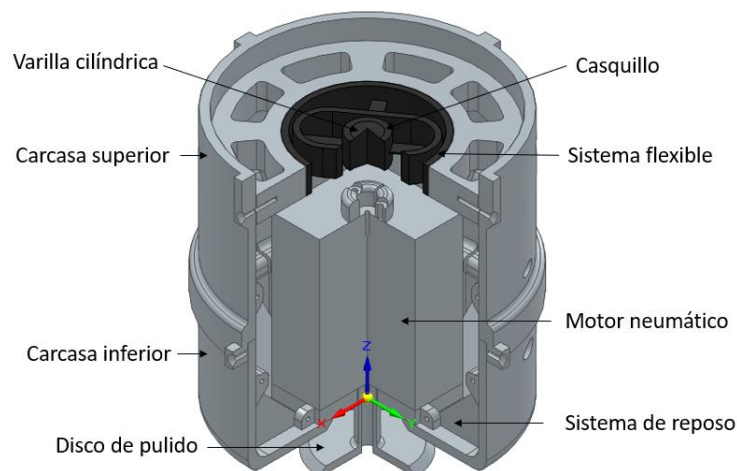


Figura 5 Prototipo anterior

Analizando la **problemática** del modelo anterior, se encontró que:

- El sistema flexible se encontraba muy alto, dando lugar a que cuando se produce el contacto con un desalineamiento entre el disco y la pieza a pulir, al girar el conjunto sobre el sistema flexible, este tuviera mucho desplazamiento en el plano XY, y por tanto, una menor precisión del robot, al estar el disco más descentrado.

Se decide que una posible mejora es poner el sistema de giro en la parte inferior, reduciendo así este desplazamiento.

- Los muelles, tenían dificultades a la hora de realizar ciertos movimientos, por lo que se opta por darle un grado de libertad extra, que permita girar la parte superior del muelle unida a la carcasa. Para ello, unido al muelle se diseña una pieza que se coloca en una ranura habilitada en la unión entre las carcasas.
- Para hacer más suave y controlada la compresión y expansión, se decide sustituir estos muelles por un grupo muelle amortiguador.
- El casquillo permitía el desplazamiento en el eje Z de la varilla por el interior de él. Este casquillo no contrarrestaba el par reacción que el motor ejercía sobre la varilla, permitiendo su giro en el eje Z.
- En el pulido, el polvo procedente de la pintura se desprendía y podía dañar los rodamientos del motor, por lo que se necesita un sistema que lo proteja. Como solución, se incorpora un fuelle flexible que reduzca la cantidad de polvo a la entrada.
- El tamaño del cabezal era demasiado grande y limitaba a la hora de realizar ciertos movimientos. Se busca una reducción de tamaño en el diseño.

Finalmente, con estas ideas en mente se procede al diseño de este.

4 DISEÑO DE COMPONENTES PROTOTIPO INICIAL

4.1 Motor

Para comenzar el diseño, lo primero era encontrar un motor neumático cuya presión de trabajo pudiera ser suministrada por los conductos de aire comprimido de la sala de procesos del Torres Quevedo. Como se quiere poner el sistema flexible en la parte inferior, su eje tiene que poderse cambiar por otro más largo. Además, la estructura del motor debe tener agujeros para poder acoplar los componentes. Adicionalmente, si la parte inferior del disco es de velcro, se facilita el intercambio del papel de pulido de forma sencilla y rápida según el acabado que se desee.

Se decide optar por el siguiente motor [9]

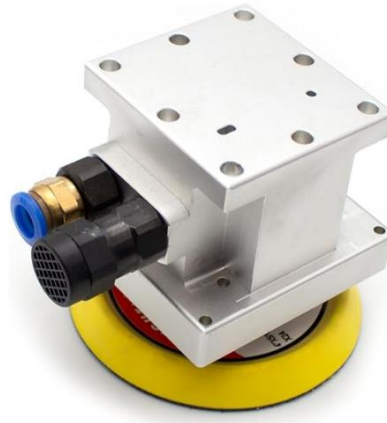


Figura 6 Motor neumático

Especificaciones:

Consumo de aire: 350 l/min

Potencia: 240W

Velocidad: 12000 rpm

Presión de trabajo: 6 Kg/cm²

Peso: 1100 g

Una vez con el motor, se procede a diseñar los demás componentes.

4.2 Sistema flexible

El siguiente componente que se diseña es el **sistema flexible**.

Las especificaciones que debe cumplir son:

- Girar en su eje X e Y en 5,7º, es decir, 0,1 radianes ante la aplicación de un momento de 0.1 N·m en esas direcciones.
- No debe permitir el movimiento traslacional en la dirección del eje X e Y.
- Debe permitir al eje que conecte el cabezal de pulido desplazarse libremente en dirección Z.
- Los prototipos se fabricarán en PLA y el modelo definitivo en aluminio 7075.
- Debe ser de un tamaño reducido para poder ser implementado sin problemas en el cabezal de pulido.

Al cambiar este lugar donde se ubica respecto al modelo anterior, se realiza un diseño nuevo. Inicialmente, como primera solución, se plantea poner en la parte inferior el mismo sistema flexible que en el modelo anterior, unido a un casquillo por cuyo interior desliza el eje del motor. Con ello se consigue bajar el sistema flexible. El problema era que si se acopla directamente el casquillo al eje del motor girando en la parte inferior a tantas revoluciones y estando sometido a cargas, se desgasta y calienta en exceso, pudiendo fallar.

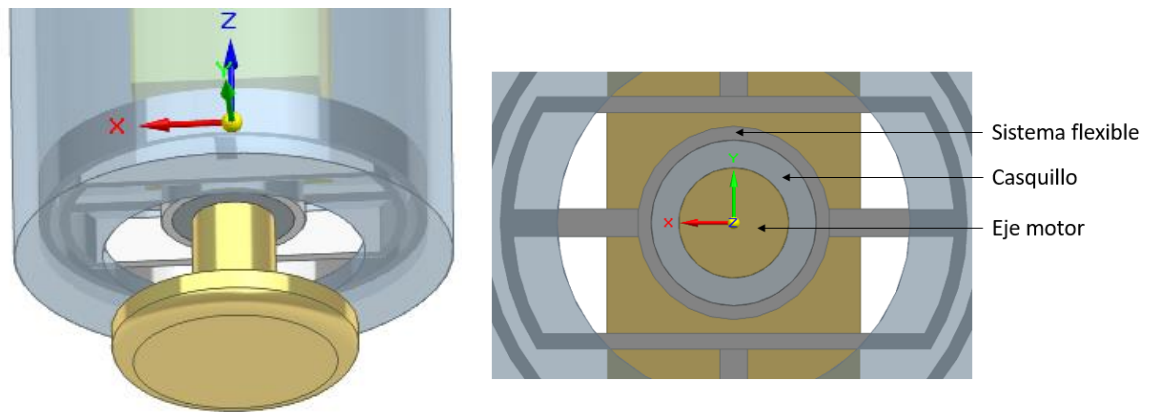


Figura 7 Sistema giro primera solución

Se encuentra una segunda solución que permite tener el sistema flexible en la parte inferior y no estar sujeto al eje mediante el casquillo. Esta solución es poner un mecanismo de desplazamiento solidario al motor que permite el desplazamiento en el eje Z, pero dejando hueco de 1 mm respecto al eje para que al girar el eje no roce.

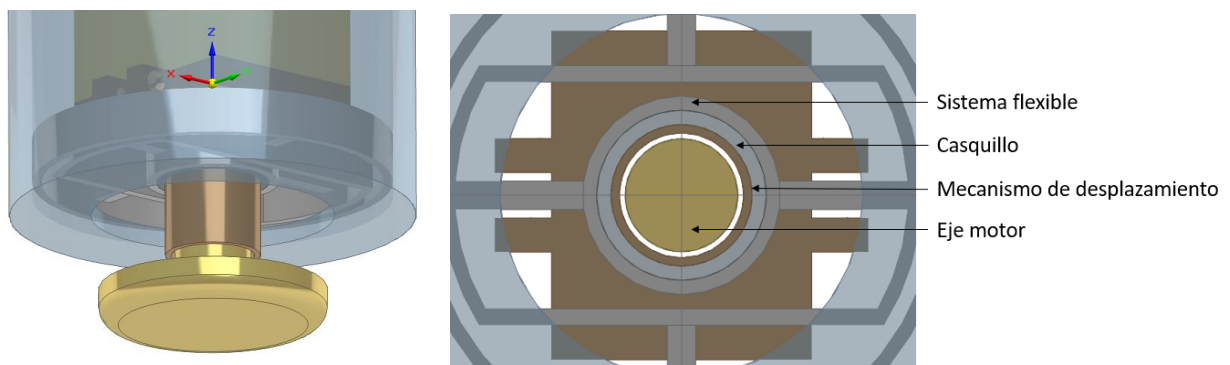


Figura 8 Sistema giro segunda solución

El problema que tiene esta solución es que el par reacción que se produce por el contacto del disco y la pieza a pulir no se contrarresta, permitiendo el giro del sistema de desplazamiento y el motor en el eje Z.

Como solución final, se opta por incorporar guías en lugar del casquillo. Estas, impiden el giro en las tres direcciones y permiten el desplazamiento únicamente en el eje Z.

Una vez con la idea de cómo debe ser este sistema flexible, se procede a diseñarlo en Solid Edge. El sistema flexible consta de un anillo circular exterior, un anillo interior que alberga las guías y un anillo intermedio, unidos con 4 láminas en direcciones determinadas que permiten el giro. Estos dos últimos anillos tienen el giro permitido en los ejes X e Y. La cuestión, en este diseño, ha sido la colocación de las láminas y como ha de ser su geometría. Otros valores, como la altura de la pieza, el diámetro del anillo interior, el espesor de las paredes o la separación entre los anillos, son prefijados.

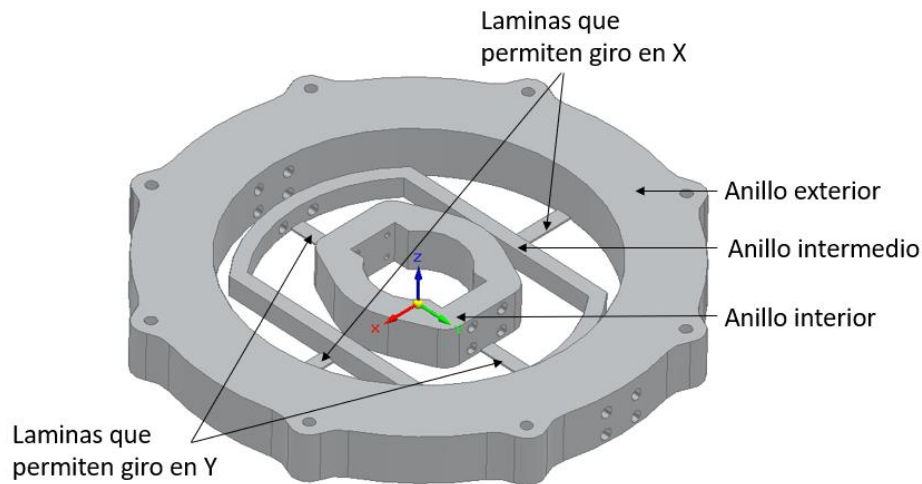


Figura 9 Sistema flexible

Inicialmente se diseña el sistema flexible en el interior de la carcasa, como en el modelo anterior. Más adelante se decide que para facilitar el montaje, así como para optimizar el espacio disponible, el sistema flexible no esté dentro de la carcasa y pase a formar parte de ella. Para que el giro se realice a una altura aún más baja, las láminas se sitúan en la cara inferior. Sumado a esto, se realizan agujeros en la cara exterior para poder introducir el destornillador y facilitar el montaje de la guía.

Para las simulaciones se utiliza como material **PLA** con las siguientes características:

- Módulo elástico 2770 MPa
- Coeficiente de Poisson 0,3
- Limite elástico 60 MPa

Se realiza un tipo de estudio elástico lineal, con un tipo de malla tetraédrica de 2 mm. Se restringe la cara externa para impedir los desplazamientos en todas las direcciones y se aplican los distintos pares mencionados anteriormente en su cara superior central. Las tensiones que se den en la pieza ante la aplicación del par deben entrar dentro del rango admisible con un coeficiente de seguridad de $\frac{1}{3}$ del límite elástico del material.

Para la **orientación** de las láminas se busca que al aplicar las distintas cargas el sistema flexible se desplace lo menor posible en el eje X y en el eje Y. Además, que las tensiones máximas que se den sean las menores posibles. Para ello, se realizan distintas simulaciones (Anexo V) y se determina que la disposición óptima es con las láminas en posición horizontal.

Para el **dimensionamiento de las láminas**, la primera de las dimensiones que se ha determinado ha sido la longitud, para así fijar este parámetro ya que afecta en las dimensiones globales del sistema flexible y determina el diámetro del anillo exterior. Tras ello, se han variado las dimensiones de la sección, iterando con distintos valores hasta encontrar la combinación de dimensiones en las cuatro laminas que cumplan el giro permitido, sin exceder el coeficiente de seguridad admitido. Sus dimensiones obtenidas son en las láminas interiores, 21 mm x 12,3 mm x 1,26 mm y en las láminas

exteriores: 22,5 mm x 11,1 mm x 1,37 mm.

Para calcular el giro se necesita crear dos conos en las partes superior e inferior. Para ver el desplazamiento que sufren los nodos de los extremos se realizan cálculos siguiéndose la metodología descrita en el (Anexo VI).

A continuación, se observa el resultado de la simulación de Solid Edge y una tabla de resultados donde se muestran los giros que da la simulación en los ejes X e Y, así como la tensión máxima alcanzada.

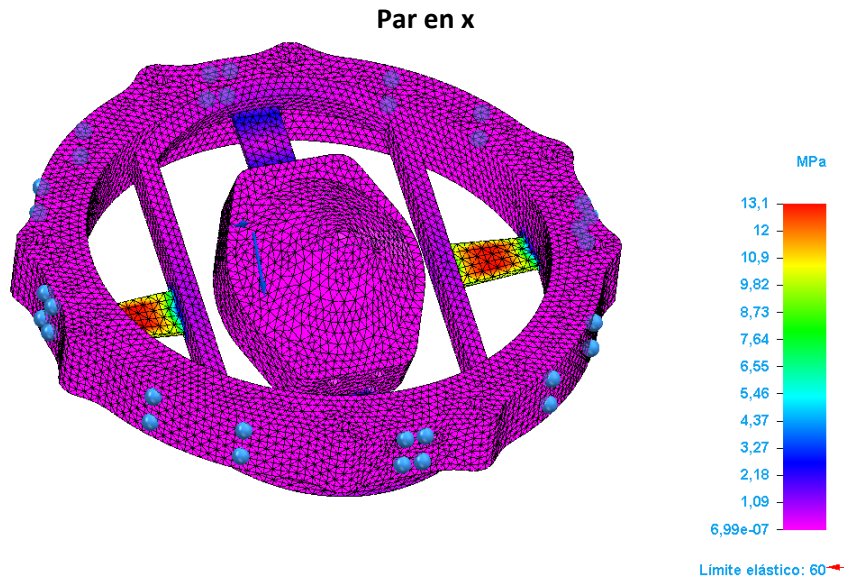


Figura 10 Tensiones máximas ante un par en x

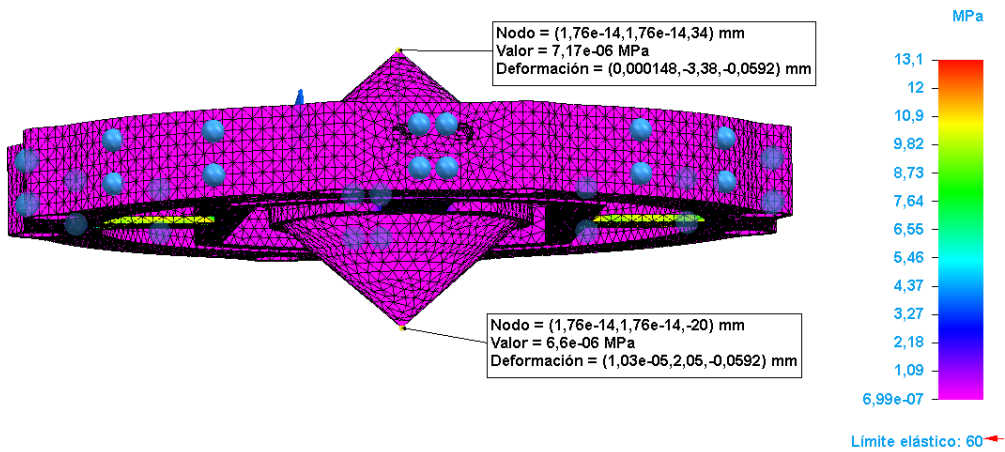


Figura 11 Nodos utilizados calculo giro en x

Giro en x

X(mm)	Y(mm)	Z(mm)	DX(mm)	DY(mm)	DZ(mm)
1,76E-14	1,76E-14	34	1,48E-04	-3,38	-0,0592
1,76E-14	1,76E-14	-20	1,03E-05	2,05	-0,0592

RADIANES	GRADOS
0,10	5,74

Tabla 3 Calculo giro ante un par en x

Par en y

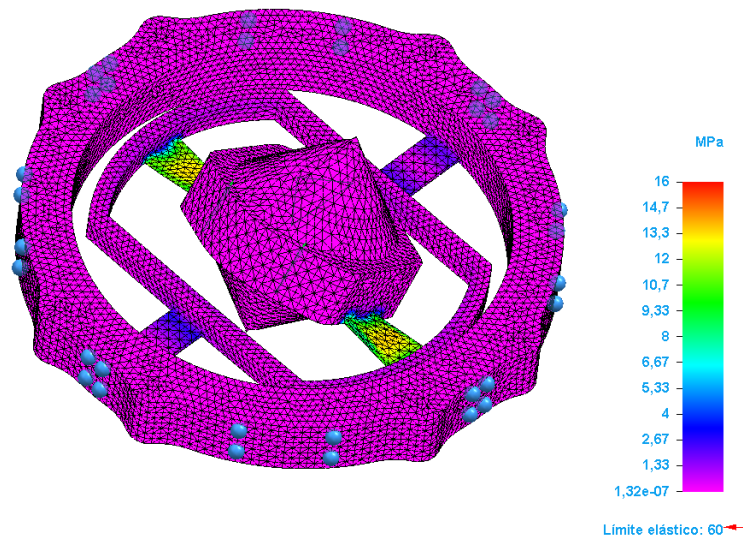


Figura 12 Tensiones máximas ante un par en y

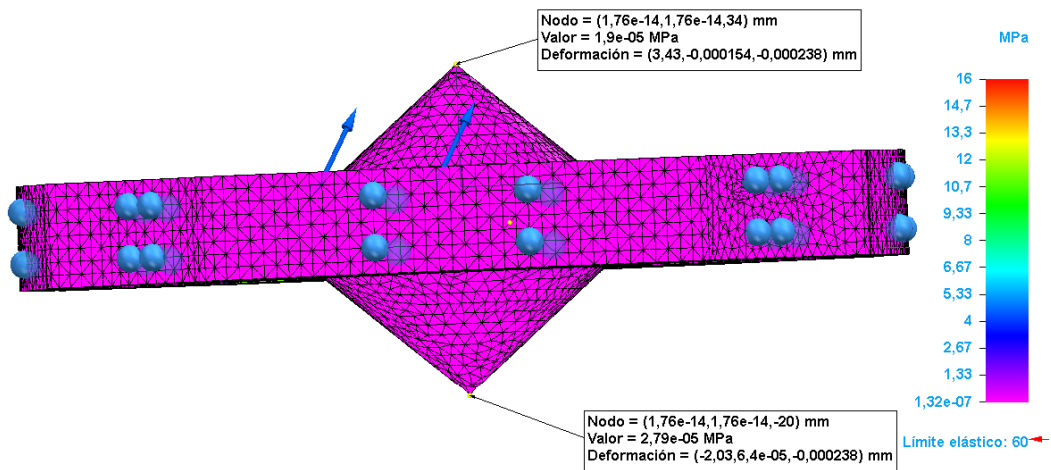


Figura 13 Nodos utilizados calculo giro en y

Giro en y

X(mm)	Y(mm)	Z(mm)	DX(mm)	DY(mm)	DZ(mm)
1,76E-14	1,76E-14	34	3,43	-0,00015	-0,00024
1,76E-14	1,76E-14	-20	-2,03	6,40E-05	-0,00024

RADIANES	GRADOS
0,10	5,77

Tabla 4 Calculo giro ante un par en y

4.3 Mecanismo de desplazamiento

El **mecanismo de desplazamiento** se atornilla al motor, desplazándose en conjunto con él en el eje Z. Sobre él, se atornillarán los muelles-amortiguadores. Para facilitar la impresión y el montaje, se decide fabricarlo en dos partes.

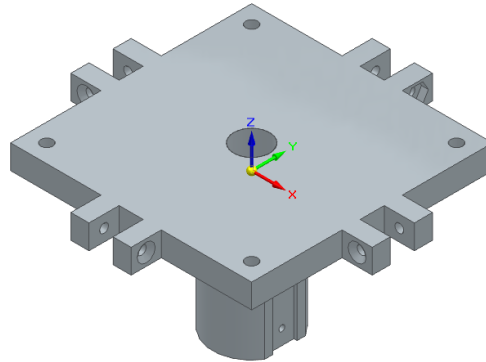


Figura 14 Mecanismo de desplazamiento superior

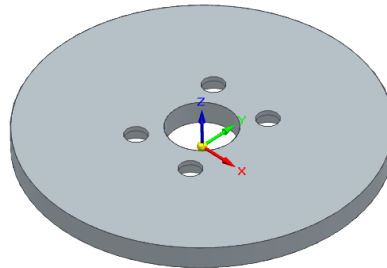


Figura 15 Mecanismo de desplazamiento inferior

4.4 Guía

La guía está compuesta de dos partes: una guía fija que es atornillada al mecanismo de desplazamiento superior y el carro móvil que se desplaza en el eje Z sobre ella y es atornillado al sistema flexible. Se opta por la guía MGN 7H [10] con sus dimensiones (Anexo I).

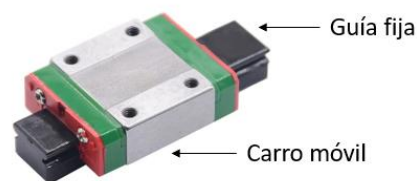


Figura 16 Guía

4.5 Muelles-amortiguadores

El siguiente componente son los **muelles-amortiguadores** para permitir la vuelta a la posición inicial del conjunto. En este sistema se colocan cuatro en total.

Las especificaciones que se deben cumplir son:

- La pulidora debe tener un rango de movimiento entre 0 y 20 milímetros en dirección vertical.

- La fuerza total que tendrán que soportar oscilará entre 10 y 60 Newtons, en precarga y cargados, correspondiente al rango de movimiento establecido. Es decir, cada muelle soportará 2.5N en reposo y 15N cuando se someta a una compresión de 20 mm.
- La colocación del muelle se realizará con cierta inclinación respecto del eje de la pulidora.

Para el prototipo inicial, se aprovechan los grupos muelle-amortiguador que hay en la sala de procesos; para el prototipo final, se mantendrán los amortiguadores y los muelles se cambiarán para cumplir las especificaciones anteriores.

Este grupo muelle-amortiguador, está formado por dos muelles en serie separados por un casquillo de 3 mm. Tienen una longitud de 110 mm entre ejes y un recorrido que, dada la inclinación de colocación, permite que la pulidora se desplace 20 mm verticalmente. En el interior se encuentra el amortiguador.

Mediante la rosca superior, se permite ajustar la altura inicial de los muelles modificando su precarga.

El grupo muelle-amortiguador que se utilizó fue el siguiente [11]



Figura 17 Muelle-Amortiguador

4.6 Sistema giratorio

El muelle-amortiguador va unido en su parte superior a la carcasa a través de una **pieza giratoria** que le da un grado de libertad extra más. Esta pieza giratoria quedará sujeta entre las dos carcasas quedando impedido su desplazamiento y pudiendo girar sobre su eje.

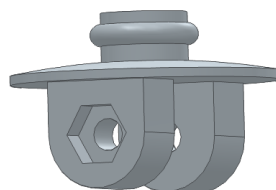


Figura 18 Sistema giratorio

4.7 Carcasa

Finalmente, sabiendo todos los componentes que va a tener el sistema de pulido, se hace un diseño de la carcasa. La altura de ella viene determinada por la altura necesaria en los muelles. Además, se deja un hueco en el centro para facilitar el montaje. Los soportes de los tornillos se diseñan buscando optimizar el espacio disponible.

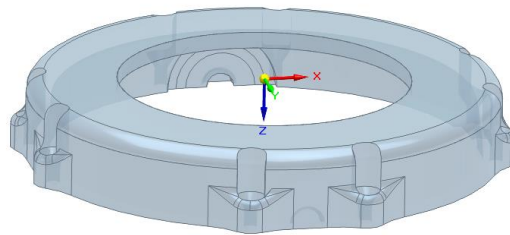


Figura 19 Carcasa superior

Dentro de la carcasa inferior se encuentra el sistema de reposo que permite mantener la precarga de los muelles. Además, se diseña con una cierta inclinación para corregir posibles descentramientos en la bajada. También se deja cierta holgura en el alojamiento del sistema de giro, ya que, en el modelo anterior, se vio que el sistema de giro giraba con dificultad.

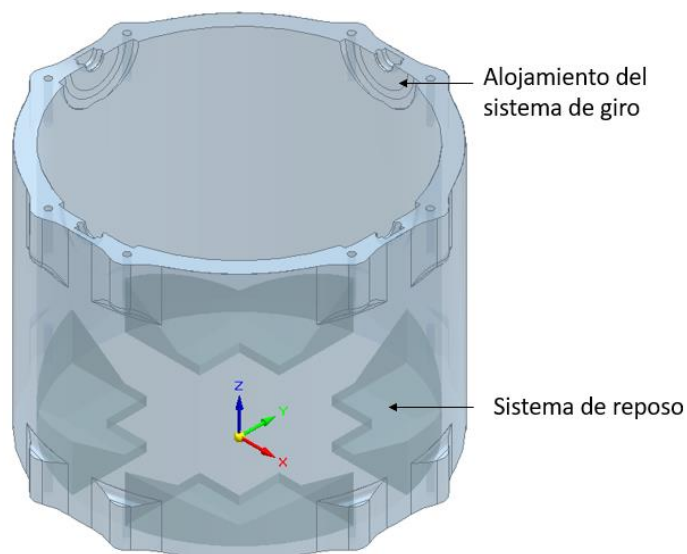


Figura 20 Carcasa inferior

Una vez fabricadas todas las piezas, se procede al montaje (Anexo II) con los distintos tornillos (Anexo IV), comprobándose que el mecanismo funciona correctamente, permitiendo el desplazamiento vertical del conjunto y su giro.

5 PROTOTIPO INICIAL

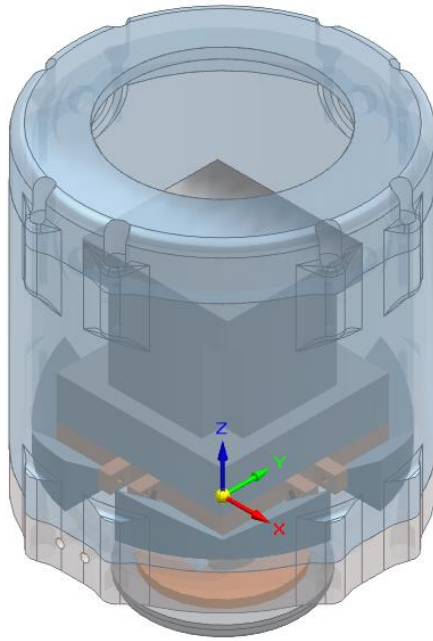


Figura 21 Prototipo inicial

6 FABRICACION

Las piezas se fabrican en la sala de procesos del edificio Torres Quevedo con las impresoras Anet ET5 y Prusa i3. Los parámetros utilizados en la impresión son:

- Temperatura de impresión: 200 °C
- Velocidad de impresión: 50 mm/s
- Densidad de relleno: 50%
- Patrón de relleno: Cubico
- Patrón inicial: Lineal
- Altura capa: 0,2 mm
- Espesor de pared: 0,8 mm

Para el sistema flexible, ha sido necesario ajustar los parametros (Anexo VII).

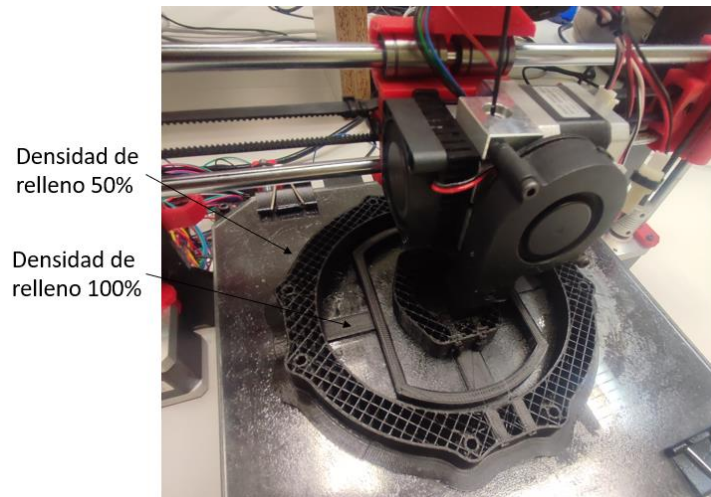


Figura 22 Impresión sistema flexible con Prusa i3

Se activa la función "generate support" para crear las estructuras temporales que sostienen las áreas sobresalientes o voladizas que no tienen una base sólida y que, de lo contrario, colapsarían durante el proceso de impresión.

7 DISEÑO DE PROTOTIPO FINAL CON MOTOR INTEGRADO

Al integrar el **motor**, se necesita realizar las siguientes modificaciones:

- La toma de alimentación interfiere con los muelles. Para solucionar el problema, se cambia la ubicación de los muelles creándoles cuatro soportes en las esquinas. Por necesidad de espacio, se aumenta también el diámetro de la carcasa y del sistema flexible. Por cuestiones de diseño y para que encajen correctamente, se necesita realizar dos soportes distintos, denominados soportes N y soportes S (Anexo IX). También, se les hace un redondeo en la parte superior para evitar el rozamiento con el grupo muelle-amortiguador.

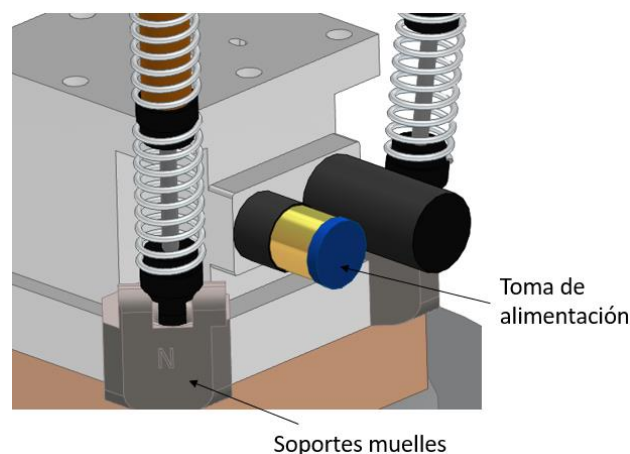


Figura 23 Soporte muelles

- Se crea un hueco cuadrado de sección 70 mm x 70 mm en la carcasa superior, para permitir la salida de las tomas, permitiendo el desplazamiento vertical y el giro con holgura suficiente para prevenir interferencias.

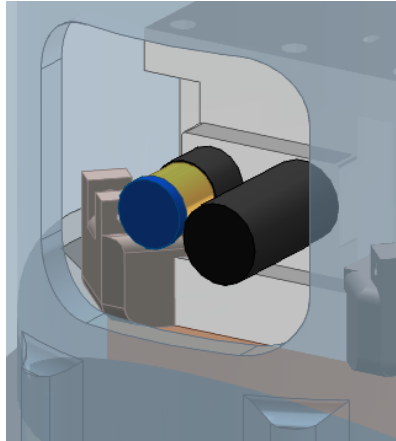


Figura 24 Agujero carcasa tomas neumáticas

- Se le realiza una sección de 50 mm x 5 mm en el mecanismo de desplazamiento superior para poder introducir la llave inglesa que trae el motor. Esta llave sujeta el mecanismo del motor para que, al roscar el eje sobre él, este mecanismo no gire.



Figura 25 Agujero para introducir llave en el montaje del eje

- Se observa que el eje del motor es excéntrico y experimenta un desplazamiento de 5 mm en el plano XY, por lo que se tiene que rediseñar el mecanismo de desplazamiento superior aumentando su diámetro interno hasta los $\varnothing 22$ mm y por consiguiente el sistema flexible.
- La parte inferior del motor sobresale, por lo que se aumenta la altura del mecanismo de desplazamiento superior realizándole un vaciado interno de 64 mm x 64 mm de sección $\varnothing 13$ mm de profundidad.

También se realizan otras modificaciones:

- Se alarga el **eje del motor** a 83 mm, haciéndole un roscado en la parte superior e inferior de rosca 5/16" con un paso de 24 hilos por pulgada. El sentido del roscado será horario para que no se desenrosque al girar el motor.



Figura 26 Eje motor

- Hasta ahora, se habían empleado para el prototipo inicial los muelles que venían con el grupo muelle-amortiguador. Para el prototipo final, se calcula cuáles deben de ser los **nuevos muelles**. Conocidas las premisas impuestas, se obtiene entonces la constante del muelle como el cociente entre el alargamiento que va a experimentar y el rango de fuerzas que lo va a provocar.

Para calcular la altura que debe tener la carcasa debido a los muelles en precarga, se parte de un valor de $D=85$ mm entre ejes de los amortiguadores cargado del todo y $E=13,9$ mm entre ejes de los amortiguadores en horizontal. Con ello, se calcula la altura F a la que quedará en carga.

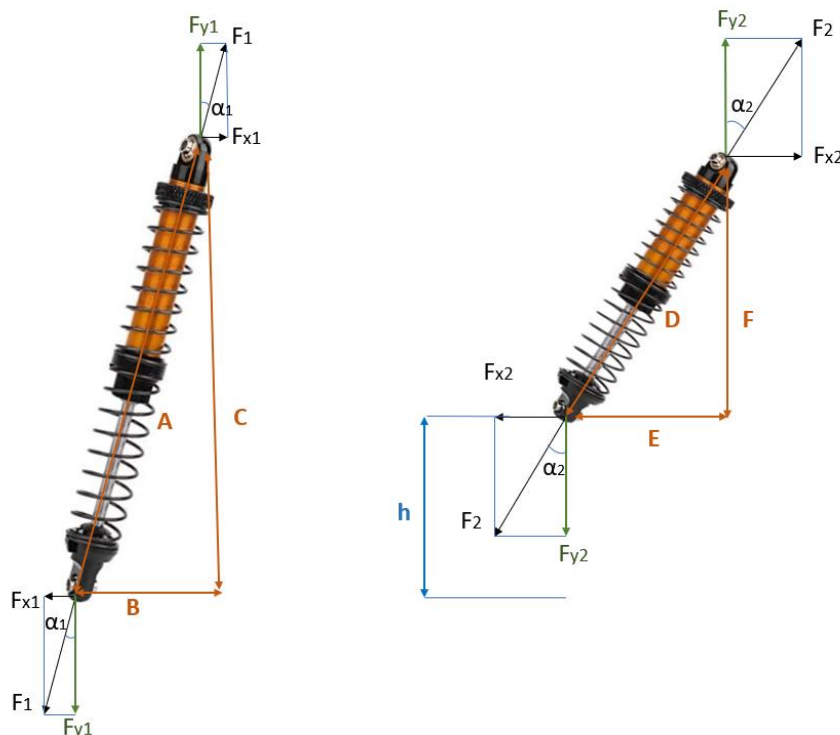


Figura 27 Diagrama muelle precargado y en carga

$$F^2 + 13,9^2 = 85^2$$

$$F = 83,85$$

Puesto que la distancia entre ejes de los amortiguadores, de 13,9 mm en horizontal se mantiene constante en ambos casos, ($B=E$); la distancia en vertical C será la del

sistema en carga F sumado al desplazamiento permitido $h=20$ mm.

$$C = 83,85\text{mm} + 20\text{mm}$$

$$C = 103,85\text{mm}$$

Se calcula la distancia que se tiene que dejar entre ejes con el sistema en precarga, así como la altura de la carcasa.

También los ángulos $\alpha_1 = 7,62^\circ$ y $\alpha_2 = 9,27^\circ$

$$103,85 = A \cdot \cos(7,62^\circ)$$

$$A = 104,776\text{mm}$$

La constante K del muelle se obtiene de acuerdo con la ley de Hooke. Sabiendo que cada muelle está sometido a $F_{Y1} = 2,5N$ en precarga, $F_{Y2} = 15N$ en carga y el valor de los ángulos calculados anteriormente, se descomponen las fuerzas y se calcula la constante elástica experimental que deberá tener el muelle a comprar.

$$F_1 \cdot \cos(7,62^\circ) = 2,5N$$

$$F_1 = 2,52N$$

$$F_2 \cdot \cos(9,27^\circ) = 15N$$

$$F_2 = 15,2N$$

$$\Delta F = K \cdot \Delta X$$

$$F_2 - F_1 = K \cdot (A - D)$$

$$15,2N - 2,52N = K \cdot (104,776 \cdot 10^{-3}\text{m} - 85 \cdot 10^{-3}\text{m})$$

Lo que da como resultado un muelle con una constante

$$K = 607 \text{ N/m}$$

Puesto que cada grupo muelle-amortiguador está formado por dos muelles en serie separados por un casquillo de 3 mm, que se supone despreciable frente a la longitud de los muelles, se calcula cual tiene que ser la constante K de cada muelle

$$\frac{1}{Kt} = \frac{1}{K_1} + \frac{1}{K_2}$$

Teniendo en cuenta que al ser iguales, $K_1 = K_2$

$$K_1 = K_2 = 1214 \text{ N/m}$$

Ya con la constante obtenida, se buscó en la página web de la comercializadora "MuelleStock" [12] las dimensiones que debía de tener cada uno de los muelles.

Se realiza un cambio de unidades.

$$K_1 = K_2 = 0,1214 \text{ daN/mm}$$

y se va iterando hasta encontrar un muelle que se aproxime ese valor.

Se busca un muelle de diámetro interno 13,6 mm y 40 mm de longitud, como el muelle anterior, pero con distinto valor de diámetro de espira. Se va modificando el diámetro de la espira hasta encontrar un valor que se aproxime a ese valor de K, siendo ese diámetro de espira de 1,28 mm.

Como resultado se obtiene un muelle de 40 mm de altura que se puede comprimir hasta un máximo de 11,83 mm.

Figura 28 Calculadora de muelles de "MuelleStock"

Posteriormente, se busca en el catálogo cuales son los muelles que más se aproximan a los necesarios. En un futuro serán los que corresponda comprar.

[Ver especificaciones técnicas >](#)

[+ aumenta Espiras](#)

Muelles similares Standard en Stock

¿No está tu muelle? [Calcula el precio de fabricarlo, aquí](#)

Cuerda Plano: ALAMBRE DE ACERO EN 10270-1 SH-PH (DIN 17223/B4-C)
 Acero Inoxidable: ALAMBRE DE ACERO EN 10270-3 *1.4310*NS (INOX-AISI 302)

15% 25% 35% Max.

A + Cantidad, - Precio

Diám. Ext.	Hilo	Largo	Diám. Int.	Espiras útiles	Paso	k (DaN/mm)	Carga	Largo	Carga	Largo	Carga	Largo	Carga	Largo	Material	Código del prod.	Ver Plano	Cantidad	Precio Ud / Precio Total	Plazo
16.00	1.20	40	13.60	5.50	7.27	0.1163	0.700	34.00	1.16	30.00	1.63	26.00	3.68	8.40	inox	203986	Q	1	10.05 € 10.05 €	i +
16.00	1.40	40	13.20	5.50	7.27	0.2244	1.350	34.00	2.24	30.00	3.14	26.00	6.78	9.80	inox	204016	Q	1	10.05 € 10.05 €	i +
15.00	1.20	40	12.60	5.50	7.27	0.1435	0.860	34.00	1.44	30.00	2.01	26.00	4.53	8.40	inox	203712	Q	1	10.05 € 10.05 €	i +
16.00	1.50	40	13.00	5.00	8.00	0.3321	1.990	34.00	3.32	30.00	4.65	26.00	10.05	9.75	inox	204046	Q	1	10.05 € 10.05 €	i +

Figura 29 Dimensiones de muelles necesarios "MuelleStock"

Para saber la altura a la que se tienen que precargar estos muelles, se parte de los resultados de "Muellestock" obtenidos anteriormente y se obtiene la curva de funcionamiento de un muelle con su ecuación característica.

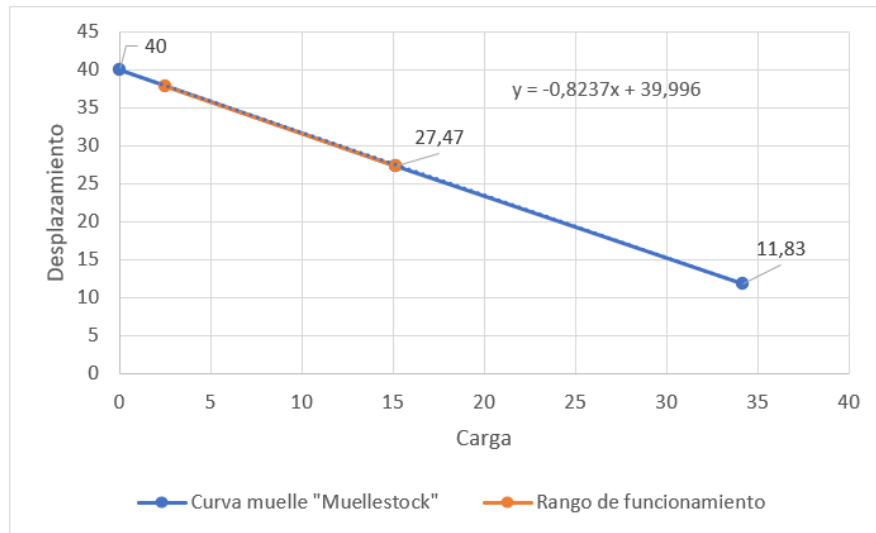


Figura 30 Curva del muelle y rango funcionamiento del muelle en el cabezal

Con esta ecuación se obtiene, para una precarga de 2,52N, la altura a la que se tiene que precargar los muelles, obteniendo una altura de 37,9 mm para cada muelle. También el rango de funcionamiento de cada muelle en el cabezal.

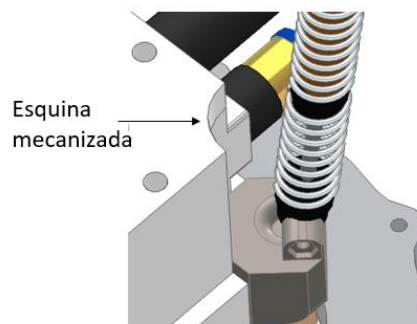
Carga [daN]	Carga [N]	Desplazamiento [mm]
0	0	40
1,52	15,2	27,47
3,42	34,2	11,83

Carga [N]	Desplazamiento [mm]
2,52	37,9
15,2	27,5

	1 muelle	2 muelles
Altura muelle precarga [mm]	37,9	75,84
Altura muelle carga[mm]	27,5	54,95

Tabla 5 Calculo altura precarga muelle

- Al girar, las **esquinas superiores** del motor interfieren con el muelle, por lo que será necesario mecanizarlas con una fresa de $\varnothing 29$ mm para optimizar el diseño.



- Probando el prototipo final, se ha visto que, a partir de las estimaciones iniciales, el **sistema flexible gira más de lo esperado**, por lo que se decide hacer el sistema flexible más rígido. Debido a ello se plantean dos nuevos escenarios:

- Giro permitido de 1º en su eje X e Y.
- Giro permitido de 0,5º en su eje X e Y.

Se vuelven a ajustar las láminas para cada uno de estos escenarios, hasta lograr el giro deseado. Finalmente, se necesitará realizar ensayos en un trabajo futuro para valorar cuál de los dos es el más adecuado.

Para el escenario más desfavorable, se calcula cual es el par reacción del motor en función de la velocidad angular y si el sistema flexible lo soportará. Siendo este el que permite un giro de 1º en su eje X e Y. Para ello se comprueba en primer lugar cual es el par reacción trabajando en condiciones nominales, conociendo la potencia de trabajo y su velocidad angular proporcionadas por el fabricante.

$$\text{Haciendo cambio de unidades } 12000 \text{ rpm} \cdot \frac{2\pi}{60} = 1256,63 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$$

$$P = M \cdot \omega$$

$$240\text{W} = M \cdot 1256,63 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$$

$$M = 0,19 \text{ N} \cdot \text{m}$$

En el contacto del disco con la pieza, este par va aumentando conforme se aumenta la presión ejercida por el disco sobre la pieza hasta llegar a estos 0,19 *N. m*. Si se sigue aumentando esta presión, sigue aumentando el par y se sale de las condiciones nominales, comenzando a disminuir su velocidad angular.

Se comprueba para este nuevo sistema flexible, hasta que valor de velocidad angular se puede reducir al aplicar presión en el pulido sin que el material plastifique con un coeficiente de seguridad de $\frac{1}{3}$. Se obtiene que esto ocurre para un par reacción de 2,29 *N. m*, que se da cuando la velocidad angular cae hasta las 1000 rpm (Anexo XV).

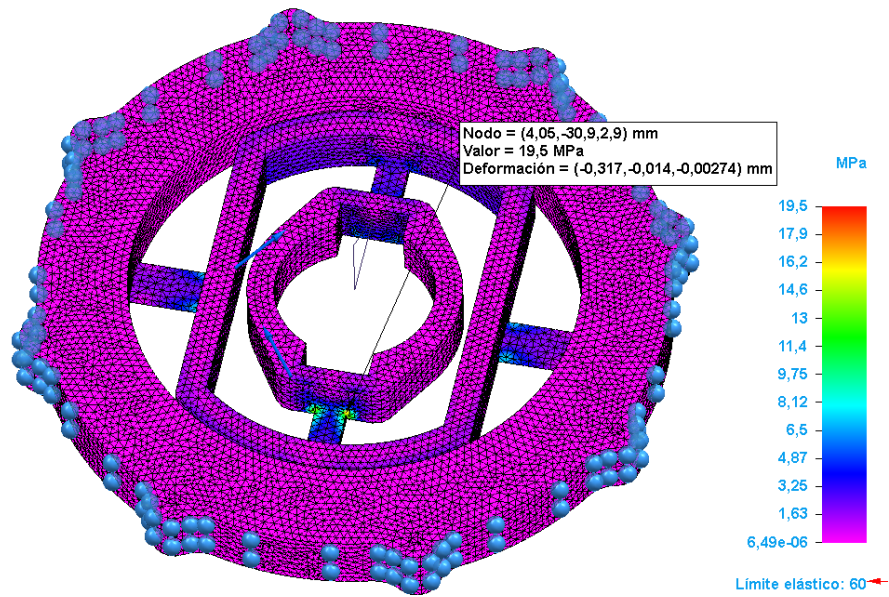


Figura 31 Tensiones máximas ante un par en el eje Z de 2,29 N.m

Como se observa en la simulación, las láminas no plastifican, encontrándose su tensión máxima en la unión con el anillo interior.

Finalmente, con estas modificaciones, se procede a montar el prototipo final con el motor integrado (Anexo III) y con los distintos tornillos que se disponen (Anexo IV).

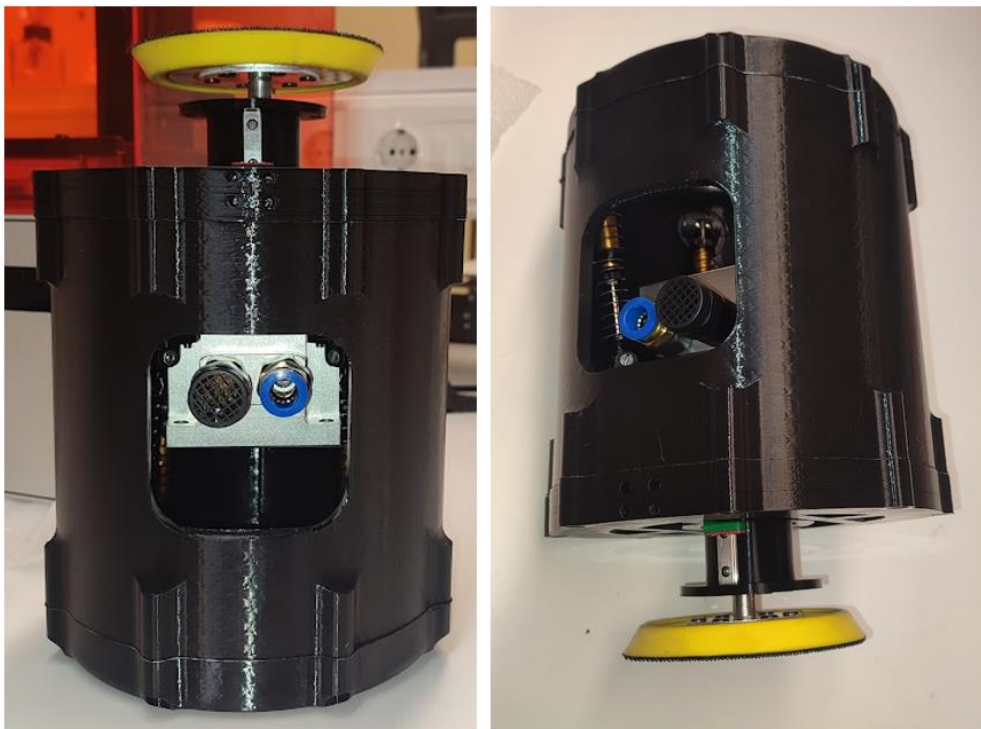


Figura 32 Prototipo final con motor integrado

8 DISEÑO DE COMPONENTES Y MATERIALES FINALES

El **mecanismo de desplazamiento superior** se fabricará en dos partes para facilitar el mecanizado.

El **Sistema flexible** se fabricará con Aluminio 7075.

- Densidad 2795,000 kg/m³
- Módulo de elasticidad 71705,473 MPa
- Coeficiente de Poisson 0,330
- Límite elástico 503,317 MPa

Se vuelve a ajustar este nuevo material para cumplir las especificaciones anteriores de los dos escenarios mencionados anteriormente (Anexo XI).

El **fuelle** se fabricará en TPU por ser flexible. Se hace de 1 mm de espesor, con un diseño corrugado para facilitar su plegado al comprimirse.

- Densidad 1050 kg/m³
- Módulo de elasticidad 2000 MPa
- Coeficiente de Poisson 0,4

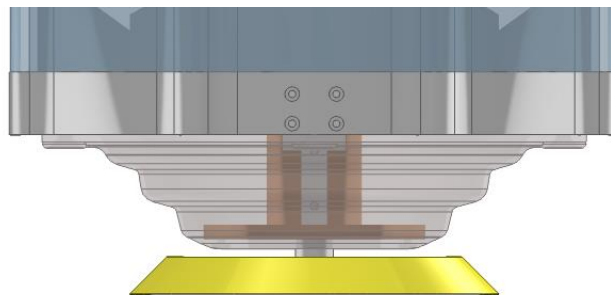


Figura 33 Fuelle

Finalmente se montan todos estos componentes (Anexo VIII)

adecuado para cada tipo de unión. Posteriormente se utiliza la biblioteca de materiales 3Dfindit [14] para descargar los tornillos normalizados proporcionados por los fabricantes. Los que no aparecían en el catálogo, se han buscado en la biblioteca. En los casos en los que la rosca se atornillaba en un material metálico no ha sido necesaria una tuerca; Mientras que en los casos en los que se atornillaba en uno de plástico, sí, exceptuando las carcasas. En las uniones entre dos piezas, se ha diseñado el diámetro del agujero del primer componente de un tamaño mayor al diámetro exterior del tornillo. Se ha hecho así para facilitar el montaje, quedando la unión atornillada únicamente en el segundo componente.

Unión	Tipo de tornillo	Métrica	Paso	Tuerca	Cantidad
Soporte muelles-Motor	DIN-912	M4x15	0,7	DIN-985	4
Soporte muelles-Motor-Sistema de desplazamiento superior	DIN-912	M4x35	0,7	-	4
Mecanismo desplazamiento superior-Mecanismo desplazamiento intermedio	DIN-912	M4x15	0,7	-	4
Soporte muelles -Grupo muelle amortiguador	DIN 963	M3x25	0,5	DIN-985	4
Grupo muelle amortiguador-Sistema giro	DIN 963	M3x20	0,5	DIN-985	4
Mecanismo desplazamiento superior-Guia	DIN-912	M2x8	0,4	-	6
Sistema flexible-Carcasa inferior	DIN 7982	M3,9X25	1,3	-	8
Sistema flexible-Guia	GB/T 65	M2x6	0,4	-	8
Mecanismo desplazamiento intermedio-Mecanismo de desplazamiento inferior	DIN 7991	M4x10	0,7	-	4
fuelle-mecanismo de desplazamiento inferior	GB/T 67	M2x4	0,4	-	4
Carcasa superior - Carcasa inferior	DIN 7982	M3,9X25	1,3	-	8
Sistema flexible-Fuelle	GB/T 67	M2x4	0,4	-	4

Tabla 7 Tornillería empleada modelo final

9 CONCLUSIONES

Resumiendo, se ha llevado a cabo la mejora de un cabezal de pulido con su diseño y fabricación, a raíz de la evolución y perfeccionamiento de diversos modelos a lo largo del proceso (Anexo XIV). Se han conseguido unos resultados favorables, tanto en el diseño geométrico como en el dimensional, obteniendo un cabezal cuyos movimientos son suaves y sin holguras que permite tanto girar como desplazarse aplicando una fuerza de acuerdo con las especificaciones dadas.

La descripción detallada de su funcionamiento se encuentra detallada en el (Anexo X).

Al situar el Sistema flexible en la parte inferior se reduce el desplazamiento en horizontal pasando de ser "A" a ser "B".

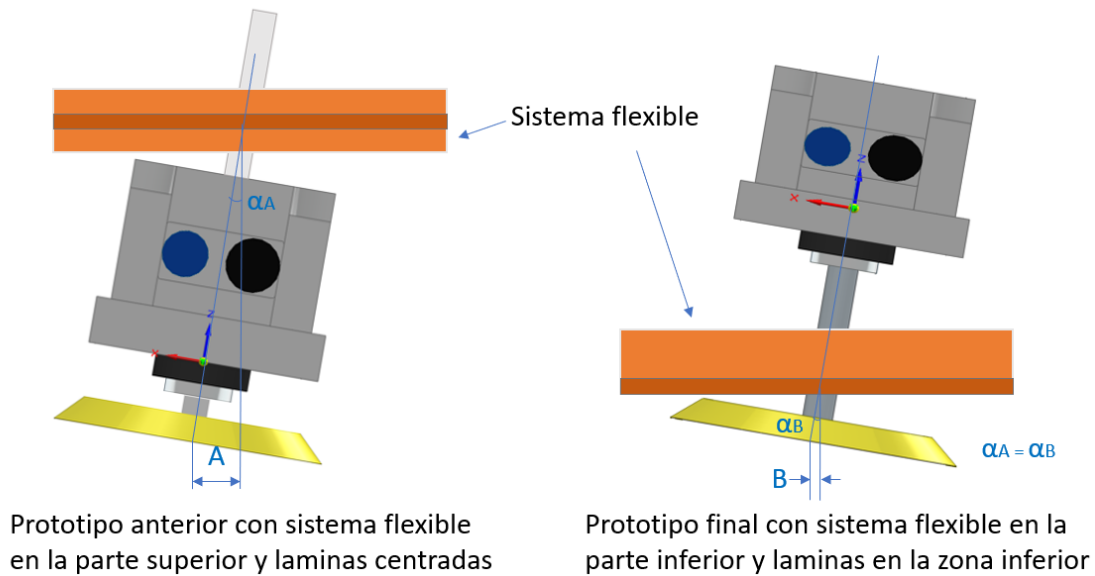


Figura 35 Desplazamiento del prototipo anterior frente al del prototipo final

A modo de resumen, se presenta la siguiente tabla comparativa del modelo anterior y el modelo realizado.



	 <p>Prototipo anterior</p>	 <p>Prototipo nuevo</p>
Ventajas	<ul style="list-style-type: none"> •Eje del motor más corto, se puede utilizar el que viene con el motor •Montaje más sencillo tanto de la carcasa superior como del sistema flexible 	<ul style="list-style-type: none"> •Prototipo mas avanzado, probado en el motor final •Sistema flexible en la parte inferior que permite un menor desplazamiento al girar en el los ejes X e Y •Guías absorben el par reacción eje Z •Carcasa permite la salida de las tomas •Reducción de la anchura de la carcasa (Anexo XII) •Grupo muelle-amortiguador controla la expansión en la bajada •Sistema de giro incorpora un grado de libertad extra •Fuelle evita entrada de polvo en los rodamientos •Propuesta de ubicación de equipos de medición •Agujero del eje excéntrico •Permite sobresalir la parte inferior del motor •Permite montar eje sin tener que desmontar todo el mecanismo
Desventajas	<ul style="list-style-type: none"> •Prototipo simple, no probado con el motor •Sistema flexible en la parte superior da lugar a un mayor desplazamiento al girar en el los ejes X e Y •Casquillo no absorbe par reacción eje Z •Carcasa no permite la salida de las tomas •Muelle no controla la expansión en la bajada •Agujero del eje no excéntrico •Parte inferior del motor no permite sobresalir 	<ul style="list-style-type: none"> •Eje del motor más largo, da lugar a mayores esfuerzos y se necesita fabricar uno mas largo •Se requiere la participación de dos personas para llevar a cabo el montaje del sistema de giro en la carcasa superior •Montaje de guías en el sistema flexible mas laborioso, se corre peligro de que la guía fija se desprenda del carro móvil, perdiendo los rodamientos internos de la guía.

Tabla 8 Comparación del prototipo anterior y prototipo nuevo

10 LINEAS FUTURAS

En este punto, el proyecto se encuentra con el prototipo diseñado y fabricado en PLA, con los distintos componentes que lo forman instalados en él y con el cabezal final metálico diseñado. La elección de estos materiales asegurará una vida útil más larga de los componentes.

Como trabajo futuro se propone lo siguiente:

- Fabricar el cabezal metálico con sus materiales finales utilizando para ello el programa en CNC a través de la herramienta gratuita de FAGOR CNC [15].
- Sustituir los muelles actuales por los calculados anteriormente.
- Reducir altura de carcasa buscando reducir tanto la longitud del grupo muelle amortiguador como situarlos en una posición más baja.
- Acoplar el cabezal al brazo robótico y conectar al sistema neumático.
- Buscar un disco que ya incorpore el elemento prolongador, para que el acoplamiento sea más rígido.
- Realizar ensayos, comprobando fuerzas, momentos, giros y desplazamientos con instrumentación.

Como instrumentación propuesta para una posible mejora, se plantea la implementación de tres sensores, con los que se obtendrán resultados de desplazamientos y giros.

Se propone el sensor de infrarrojos GP2Y0A51SK0F que permite una medición en un rango entre 20-150 mm, teniendo el emisor y receptor juntos.

Se propone conectar este sensor a la placa de Arduino y programarse posteriormente el código. Utilizando para ello los siguientes componentes.

- Sensor GP2Y0A02YK0F de dimensiones 27 x 13,2 x 14,2 mm [16]
- Pantalla LCD 16 x 2 con módulo i2C [17]
- Tarjeta WeMos D1 para Arduino [18]
- Cableado

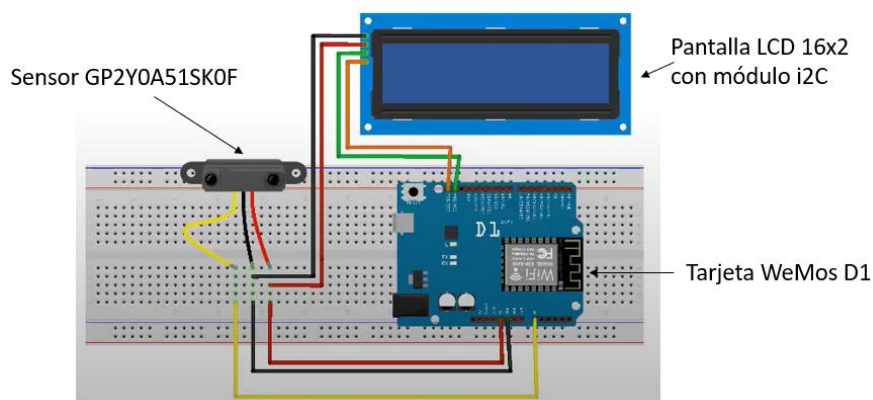


Figura 36 Conexión del sensor GP2Y0A51SK0F

Se propone montar los tres sensores iguales en la parte superior del motor para medir desplazamiento en Z y los giros en los ejes X e Y. Para medir los giros, se crea una lámina de 40 mm x 40 mm para que la medición se realice sobre una superficie plana, esta superficie plana estará unida a la carcasa inferior.

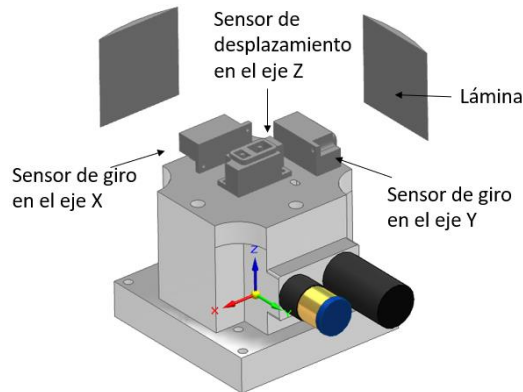


Figura 37 Ubicación de los sensores

Mediante estos procedimientos, el objetivo es mejorar progresivamente el prototipo, ajustándolo de la manera precisa, hasta que adquiera la precisión requerida para llevar a cabo su funcionamiento.

11 REFERENCIAS

1. Solid Edge 2023 Disponible en: <https://resources.sw.siemens.com/es-ES/download-solid-edge-student-edition> (accedido 14 enero 2024).
2. UltiMaker Cura - UltiMaker Disponible en: <https://ultimaker.com/software/ultimaker-cura/> (accedido 14 enero 2024).
3. Guía definitiva de los tipos de pulidoras Disponible en: <https://www.comoautodetallar.com/post/guia-definitiva-de-los-tipos-de-pulidoras> (accedido 15 enero 2024).
4. What sandpaper grit to use for polishing car paint? Disponible en: <https://fastplus.eu/blogs/sanding-polishing/what-sandpaper-grit-to-use-for-polishing-car-paint> (accedido 14 enero 2024).
5. ISO- 6344-3. Coated abrasives — Determination and designation of grain size distribution — Part 3: Microgrit sizes P240 to P5000. **2021**. Disponible en: <https://cdn.standards.iteh.ai/samples/78219/fb2339f24eaf4dfe9ae08419bcb5d3d5/ISO-6344-3-2021.pdf> (accedido 14 enero 2024).
6. Automatic media c hanger for ATI's AOV-10 Solutions Disponible en: <https://www.atia.com/products/deburr/AutomaticMediaChangingSolutions.aspx> (accedido 14 enero 2024).

7. Nordbo robotics CraftMate platform for vision-based surface processing • Nordbo Robotics Disponible en: <https://www.nordbo-robotics.com/craftmate-platform> (accedido 14 enero 2024).
8. Acf-k Ferrobotics ACF-K ACTIVE CONTACT FLANGE KIT. Disponible en: <https://www.ferrobotics.com/app/uploads/2020/12/2020-ACF-K-Datasheet-EN-web.pdf> (accedido 14 enero 2024).
9. Máquina de pulido para brazo de robot automático Disponible en: https://www.amazon.es/gp/product/B0CC233WXM/ref=pe_4097591_850293331_em_1p_0_lm (accedido 14 enero 2024).
10. Guía MGN 7H Disponible en: https://es.aliexpress.com/item/1000007480470.html?spm=a2g0o.order_list.order_list_main.4.5b02194d207NrD&gatewayAdapt=glo2esp (accedido 14 enero 2024).
11. Grupo muelle-amortiguador Disponible en: https://www.amazon.es/VGEBY-Amortiguador-amortiguadores-suspensión-vehículos/dp/B08H1WK11G/ref=sr_1_51_sspa?__mk_es_ES=ÅMÅŽÕÑ&crd=26G70F7Y4H1TL&keywords=amortiguador%2Bcoche%2Brc&qid=1686211280&s=toys&sprefix=amortiguador%2Bcoche%2Brc%2Ctoys%2C121&sr=1-51-spons&sp_csd=d2lkZ2V0TmFtZT1zcF9hdGZfbmV4dA&smid=A1LG5FMET2LG2G&th=1 (accedido 14 enero 2024).
12. Calculo de Muelles Compresión Disponible en: <https://muellestock.com/es/producto/search?tipo=Compresión> (accedido 14 enero 2024).
13. 10ª EDICIÓN CATÁLOGO TORNILLERÍA. Disponible en: <https://www.cofan.es/catalogos/catalogo-tornilleria.pdf> (accedido 14 enero 2024).
14. Biblioteca CAD 3D y catálogos de fabricantes - 3Dfindit Disponible en: <https://www.3dfindit.com/es/cad-bim-library/manufacturer> (accedido 17 enero 2024).
15. Fagor Automation CNC simulator Disponible en: <https://www.fagorautomation.com/en/the-new-version-of-the-free-cnc-simulator-is-now-available/> (accedido 14 enero 2024).
16. Sensor GP2Y0A02YK0F Disponible en: https://es.aliexpress.com/item/1005003623290806.html?spm=a2g0o.productlist.main.93.596d7c56qsnamK&algo_pvid=57bf2fe5-89d2-4457-ab76-b91c9c200857&algo_exp_id=57bf2fe5-89d2-4457-ab76-b91c9c200857-46&pdp_npi=4%40dis%21EUR%214.17%214.17%21%21%214.50%21%21%40211b613117036663982134556e03fb%2112000026542226995%21sea%21ES%213382598715%21&curPageLogUid=INivMyY2hDIQ (accedido 14 enero 2024).
17. Pantalla LCD 16x2 con módulo i2C Disponible en: <https://tienda.bricogeek.com/pantallas-lcd/1827-pantalla-lcd-16x2-con->

modulo-
i2c.html?gad_source=1&gclid=Cj0KCQiAkeSsBhDUARIsAK3tiedcQtpXZmvtrsbREv
b5e5m0zV26En74thUwjnZUtytrBqHBc_T5BUsaAjNxEALw_wcB (accedido 14
enero 2024).

18. Tarjeta WeMos D1 Disponible en:
https://es.aliexpress.com/item/1005005107018745.html?src=google&src=google&albch=shopping&acnt=439-079-4345&slnk=&plac=&mtctp=&albbt=Google_7_shopping&albagn=888888&isSmbAutoCall=false&needSmbHouyi=false&albcp=18928172568&albag=&trgt=&crea=es1005005107018745&netw=x&device=c&albpq=&albpd=es1005005107018745&gad_source=1&gclid=CjwKCAiAqY6tBhAtEiwAHeRopaGwb5A31tCbmk8Qs2k0O_oVMRWloezyvhXcJ9q7B0JHiNxr4iBbLRoC2qIQAvD_BwE&gclsrc=aw.ds&aff_cid=c0ba9e1af20e40f5a5468496dfd1135d-1705243120891-03366-UneMJZVf&aff_fsk=UneMJZVf&aff_platform=aaf&sk=UneMJZVf&aff_trace_key=c0ba9e1af20e40f5a5468496dfd1135d-1705243120891-03366-UneMJZVf&terminal_id=1842cffd34eb4f6b8d25e2b3cf64c5fb&afSmartRedirect=y (accedido 14 enero 2024).