



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

CAMPUS D'ALCOI

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Escuela Politécnica Superior de Alcoy

Diseño, desarrollo e instrumentación de un tribómetro para
materiales poliméricos

Trabajo Fin de Grado

Grado en Ingeniería Mecánica

AUTOR/A: García Carrasco, Sergio

Tutor/a: Sánchez Caballero, Samuel

CURSO ACADÉMICO: 2021/2022

Resumen

El TFG tiene como objetivo el diseño y desarrollo de un tribómetro para materiales poliméricos capaz de llevar a cabo diferentes ensayos del tipo: pin-on-disk, ring-on-disk y block-on-disk, que incorpore un sistema de control de la fuerza normal ejercida. Además de controlar la fuerza normal y velocidad de giro, el tribómetro incorporará un sistema de instrumentación que registre dichos parámetros así como los derivados del ensayo tales como la fuerza de rozamiento en dos ejes y el coeficiente de fricción.

El alcance del TFG abarca tanto el diseño y cálculo de la estructura portante, la selección de los elementos motrices y de transmisión, el desarrollo de la electrónica de control e instrumentación, así como la programación en Arduino C++ del sistema de control e instrumentación del banco. Este proyecto se enmarca en el desarrollo de la beca del ministerio “*Proyecto 2021/22/00024 Instrumentación y desarrollo de equipos de ensayo*” cuyos objetivos y alcance han sido reconocidos previamente por el departamento, la universidad y el ministerio.

Con este TFG se trabajarán las siguientes competencias de la titulación:

- 03 (E) Conocimientos básicos sobre el uso y programación de los ordenadores, sistemas operativos, bases de datos y programas informáticos con aplicación en ingeniería.
- 42 (E) Conocimientos y capacidades para el cálculo, diseño y ensayo de máquinas.
- 47 (E) Conocimientos y capacidades para la aplicación de la ingeniería de materiales.
- 29 (E) Conocimientos básicos de los sistemas de producción y fabricación.
- 63 (E) Conocimiento en materias básicas y tecnológicas, que les capacite para el aprendizaje de nuevos métodos y teorías, y les dote de versatilidad para adaptarse a nuevas situaciones.

-
- 64 (G) Capacidad de resolver problemas con iniciativa, toma de decisiones, creatividad, razonamiento crítico y de comunicar y transmitir conocimientos, habilidades y destrezas en el campo de la Ingeniería Industrial.

Abstract

The objective of the undergraduate project is the design and development of a tribometer for polymeric materials capable of carrying out different tests such as pin-on-disk, ring-on-disk and block-on-disk, which incorporates a control system of the normal force exerted. In addition to controlling the normal force and rotational speed, the tribometer will incorporate an instrumentation system that records these parameters as well as those derived from the test, such as the friction force in two axes and the friction coefficient.

The scope of the TFG includes the design and calculation of the supporting structure, the selection of the driving and transmission elements, the development of the control and instrumentation electronics, as well as the programming in Arduino C++ of the control and instrumentation system of the bench. This project is part of the development of the ministry grant “*Proyecto 2021/22/00024 Instrumentación y desarrollo de equipos de ensayo*” whose objectives and scope have been previously recognized by the department, the university and the ministry.

With this TFG the following competences of the degree will be worked:

- 03 (E) Basic knowledge on the use and programming of computers, operating systems, databases and software, databases and computer programs with application in engineering.
- 42 (E) Knowledge and skills for the calculation, design and testing of machines.
- 47 (E) Knowledge and skills for the application of materials engineering.
- 29 (E) Basic knowledge of production and manufacturing systems.
- 63 (E) Knowledge in basic and technological subjects, which enables them to learning of new methods and theories, and to provide them with the versatility to adapt to new situations.

-
- 64 (G) Ability to solve problems with initiative, decision-making, creativity, critical reasoning, and to communicate and transmit knowledge, skills and abilities in the field of Industrial Engineering.

Antes de comenzar, me gustaría agradecer a todas aquellas personas que han contribuido a mi desarrollo, en especial a los profesores que intentan formar personas críticas, creativas y justas, como Finá en primaria o Raimon y Nati en secundaria, entre otros.

En el grado, tengo que destacar a Samuel, mi tutor, junto con el equipo del MechLab, por guiarme y despertar mi curiosidad, y a los muchos otros que nos han puesto las pilas.

A mis padres, por soportarme y educarme con tanta bondad, y a mi hermano, por ser un gran referente, ya que gracias a él me inicié en la programación, que es uno de los pilares de este trabajo.

También a todos los colegas de la promoción 2018-2022, por haber aportado tanto a lo largo de la carrera, y a todas aquellas personas que me han acompañado, en busca de concordia y diversión desinteresada.

Al MEFP, por haber incentivado este trabajo.

Y a tí, lector, pues eres la razón de ser de este trabajo.

Índice

Listado de Símbolos	13
Glosario	17
1 Introducción	19
1.1 Justificación académica del proyecto	21
1.2 Justificación técnica del proyecto	21
1.3 Objetivos del proyecto	21
2 Estudio de mercado	23
2.1 Estudio del estado del arte	25
2.2 Análisis de la competencia	26
2.2.1 Anton-Paar	27
2.2.2 Bruker	27
2.2.3 Nanovea	28
2.2.4 Resumen de características	28
2.3 Determinación del segmento de mercado	29
3 Requerimientos y especificaciones	31
3.1 Requisitos técnicos	33
3.2 Normativa aplicable	34
3.2.1 Elección de normativa	34
3.2.2 ASTM G99	35
4 Características básicas de la máquina	35
4.1 Descripción general de la máquina	37
4.2 Descripción de los subconjuntos de la máquina	38
4.2.1 Estructura	38

4.2.2	Plataforma de ensayo	39
4.2.2.1	Sistema de rotación del disco	40
4.2.2.2	Sistema de traslación de la plataforma	40
4.2.3	Puente	41
4.2.4	Sistema de control	42
4.3	Descripción del funcionamiento de la máquina	43
5	Cálculos justificativos	45
5.1	Selección de materiales para las escuadras	47
5.2	Simulación de la estructura del puente	49
5.3	Calibración del sensor de posición	56
5.4	Selección del muelle para la suspensión	59
5.5	Selección del servomotor	61
5.6	Comprobación del árbol	63
5.7	Cálculo del apriete árbol-disco	66
5.8	Descripción de los procesos de fabricación	69
5.8.1	Escuadras	69
5.8.2	Piezas metálicas	70
6	Presupuesto	75
6.1	Análisis de viabilidad	78
7	Código	79
7.1	Diagrama de flujo	81
7.2	Código	83
8	Planos	101
8.1	Índice de planos	101
Diagrama eléctrico	117
9	Pliego de condiciones	119
9.1	Normativa aplicada	121
9.2	Manual de montaje	121
9.3	Manual de utilización	125
9.4	Manual de mantenimiento	126
9.4.1	Árbol, rodamientos y transmisión	126
9.4.2	Electrónica	127
9.4.3	Motores	127

9.4.4 Estructura	127
10 Conclusiones	129
Bibliografía	132
Índice de figuras	135
Índice de tablas	137
Anejo 1: Informe de cálculo del árbol	139

Listado de Símbolos

d	Diámetro.
E	Módulo de elasticidad o de Young.
F	Fuerza.
G	Módulo de elasticidad transversal.
K	Constante de rigidez lineal.
ν	Coefficiente de Poisson.
ω	Velocidad de rotación.
P	Potencia.
p	Presión.
R	Coefficiente de determinación.
S_e	Límite de resistencia a la fatiga.
S_{uc}	Límite de resistencia a la rotura por compresión.
S_{ut}	Límite de resistencia a la rotura por tracción.
T	Par torsor.

Glosario

ASTM	American Society for Testing and Materials, Sociedad Americana para Pruebas y Materiales. , 34
know-how	Conjunto de conocimientos técnicos y administrativos que son imprescindibles para llevar a cabo un proceso comercial y que no están protegidos por una patente. , 29
PID	Controlador proporcional, integral y derivativo.

1

Introducción

Índice

1.1 Justificación académica del proyecto	21
1.2 Justificación técnica del proyecto	21
1.3 Objetivos del proyecto.....	21

1.1 Justificación académica del proyecto

El proyecto se origina a partir de la inquietud del alumno sobre la programación de microcontroladores, además de la necesidad de aplicar los conocimientos sobre diseño de máquinas adquiridos a lo largo del grado universitario, y la necesidad de superar los 12 créditos correspondientes al Trabajo Final de Grado para obtener el título de Graduado en Ingeniería Mecánica.

Esta inquietud, junto con la necesidad del departamento de ingeniería mecánica y de materiales de la escuela politécnica superior de Alcoy, lleva a una colaboración bajo una beca del Ministerio de Educación y Formación Profesional, dentro de cuyo margen se encuentra la realización de este proyecto.

1.2 Justificación técnica del proyecto

Las instalaciones de la Universidad no están dotadas con ningún tribómetro operativo, por lo que este proyecto cubre una necesidad imperante, especialmente en el DIMM, a la hora de realizar tareas de investigación o actividades docentes. El proyecto abre las puertas al personal de la Universidad a la caracterización tribológica de materiales poliméricos.

1.3 Objetivos del proyecto

El objetivo principal de este trabajo es el diseño y desarrollo de un tribómetro para materiales poliméricos capaz de llevar a cabo ensayos de diferente índole. El trabajo se enfocará en el ensayo pin-on-disk, dejando como líneas futuras de trabajo la ampliación de las capacidades del tribómetro para realizar ensayos ring-on-disk y block on disk.

El tribómetro constará de un sistema de control e instrumentación, de manera que se puedan realizar ensayos con una fuerza normal y velocidad de deslizamiento controladas, además de registrar en una tarjeta de memoria parámetros derivados del ensayo, como fuerza de rozamiento, coeficiente de fricción, número de ciclos, temperatura, etc de manera flexible.

El alcance del trabajo engloba los siguientes apartados:

- Diseño y cálculo de la estructura portante
- Selección de los elementos motrices y transmisión
- Desarrollo de la electrónica de control e instrumentación

- Programación en Arduino C++

2

Estudio de mercado

Índice

2.1 Estudio del estado del arte	25
2.2 Análisis de la competencia.	26
2.2.1 Anton-Paar	27
2.2.2 Bruker	27
2.2.3 Nanovea	28
2.2.4 Resumen de características	28
2.3 Determinación del segmento de mercado.	29

2.1 Estudio del estado del arte

La *tribología* es la ciencia que estudia el rozamiento, desgaste y lubricación entre superficies en contacto y en movimiento relativo. A pesar de haber sido una disciplina desarrollada desde la antigüedad, su origen formal se remonta al año 1964, en el que el gobierno de Reino Unido formó el conocido como 'Comité Jost', con el objetivo de estudiar el estado en el que se encontraba la investigación acerca de la lubricación, y establecer una serie de estándares.

En 1966, el Comité publicó un informe que destacaba, principalmente, el impacto económico del desgaste y las pérdidas por fricción en la economía de Reino Unido, con un valor en torno al 1,36 % del PIB. Esto llevó al gobierno de Reino Unido a la creación de una serie de centros de investigación tribológica, originándose así la tribología.

El objetivo de esta disciplina es, en esencia, optimizar el rozamiento en los elementos mecánicos, de manera que se minimizan el desgaste y las pérdidas por rozamiento.

Pese a ser una rama reciente de la ciencia, con poco más de 50 años de madurez, su gran relevancia en cuanto a costes, tanto energéticos como materiales y humanos, ha permitido un avance muy veloz que se mantiene incluso hoy en día; se estima que, con las nuevas metodologías emergentes, se puede lograr un nivel de ahorro similar al estimado en 1966; el 23% del consumo energético mundial tiene su origen en contactos tribológicos. [1]

La unidad fundamental de esta disciplina son los *sistemas tribológicos*, que son la definición exhaustiva de cualquier sistema en el cual existan elementos sujetos a deslizamiento, rodamiento o abrasión.

La máquina de ensayos fundamental para estudiar este campo es el tribómetro; un dispositivo que permite recoger una serie de parámetros referidos al par tribológico estudiado, como pueden ser velocidad de deslizamiento (en caso de rozamiento dinámico), fuerzas normal y de rozamiento, temperatura, permitiendo así la caracterización de estos.

En la actualidad, existen tres fabricantes de tribómetros *pin-on-disk* predominantes en el mercado:

- Anton-Paar
- Bruker
- Nanovea

Cabe destacar que la empresa Anton-Paar adquirió CSM, una empresa suiza de instrumentación, y ha reaprovechado muchos de los diseños de tribómetros que comercializaban.

2.2 Análisis de la competencia

Para establecer una referencia a la hora del fabricante más extendido en el mercado, se realiza una serie de búsquedas en la plataforma Scopus, una base de datos bibliográfica. De esta manera, se podrá cuantificar la prevalencia de cada uno de los fabricantes en el mundo académico.

Se puede observar que, pese a que Nanovea es el primer fabricante cuyos tribómetros se emplean para publicaciones académicas, es el menos mencionado en estas. Los totales de cada fabricante son los siguientes:

- Anton-Paar: 10 publicaciones
- Bruker: 16 publicaciones
- Nanovea: 6 publicaciones

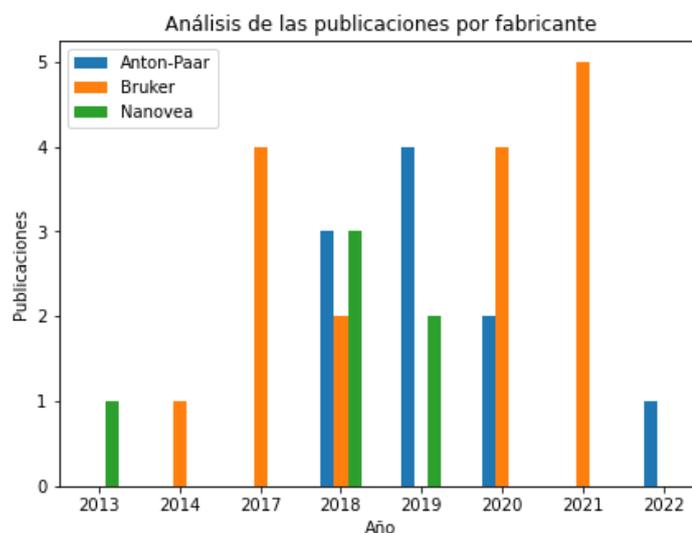


Figura 2.1: Resultados del análisis de la competencia en Scopus

Como se observa en la figura 2.1, Bruker es el fabricante de tribómetros más mencionado en las publicaciones académicas. A continuación se analizarán las prestaciones de cada uno de los tribómetros, para poder centrarse en un nicho de mercado hacia el cual orientar el tribómetro objeto de este trabajo.

2.2.1 Anton-Paar

La gama que ofrece Anton-Paar es la siguiente:

- *NTR*³: Este tribómetro está enfocado a contactos de muy baja carga y tamaño microscópico. Por tanto, su estudio se desestima para este trabajo.
- *TRB*: Este es el tribómetro Pin-on-Disk estándar de Anton-paar, por lo que será objeto del estudio de mercado. La carga se controla manualmente mediante pesas.
- *THT*: Esta gama es una versión adaptada para alta temperatura (hasta 1000°C del tribómetro mencionado anteriormente, por lo que no se tendrá en cuenta para evitar la redundancia.
- *MCT*: Este es el último modelo desarrollado por Anton-Paar, y está enfocado a ensayos tanto de fricción, como de desgaste y lubricación, con unos rangos de trabajo muy amplios (es apto para ensayos desde la biotribología, con cargas de contacto reducidas, hasta los materiales cerámicos). Es, en esencia, un reómetro modificado.



Figura 2.2: TRB de Anton-Paar



Figura 2.3: MCT de Anton-Paar

2.2.2 Bruker

El fabricante Bruker ofrece dos tribómetros: el UMT TriboLab y el TriboLab CMP. Este último está orientado a caracterizar procesos de pulido, por lo que no se tendrá en cuenta para el análisis.

El UMT TriboLab ofrece, además del control de los parámetros mecánicos, control de la humedad relativa y la temperatura. Se puede instalar una bomba para hacer circular lubricantes o refrigerantes en el par tribológico, y, a parte de ensayos rotativos, permite hacer ensayos lineales.



Figura 2.4: UMT TriboLab de Bruker

Este tribómetro es altamente versátil, además de contar con una gran variedad de módulos que permiten realizar ensayos de distintos tipos con gran facilidad; esta es, posiblemente, la clave de su extendido uso.

2.2.3 Nanovea

Este fabricante es el menos nombrado en publicaciones académicas, aunque está avalado por organizaciones de alto prestigio como la NASA. La información detallada de sus tribómetros está reservada a potenciales compradores, por lo que es imposible adjuntar datos cuantitativos en este trabajo. No obstante, se observan ciertas propiedades cualitativas, como un sistema de muelle neumático, con un gran volumen de aire, que permite mantener una fuerza normal constante sin importar la posible oscilación del disco.

2.2.4 Resumen de características

En la tabla 2.1 se recogen de forma resumida las características más importantes de cada uno de los tribómetros mencionados anteriormente, para tener una idea general de los requisitos de funcionamiento existentes en el mercado actual.

A parte de estos requisitos, también se ha observado una clara diferenciación entre dos estilos de tribómetro; el más clásico consta de un brazo en voladizo, sobre el que se colocan pesos o contrapesos, realizando un ajuste manual de la carga, radio, etc. No obstante, Bruker ofrece un modelo de tribómetro que consta de un sistema automatizado de aplicación de la carga y desplazamiento del disco, cosa que posiblemente lo haya hecho el más citado en artículos académicos.

		<i>TRB</i>	<i>MCT</i>	<i>UMT</i>
Fuerza normal	(<i>N</i>)	60	70	2000
Resolución	(<i>N</i>)	0,01	0,005	<i>Var.</i>
Fuerza de rozamiento	(<i>N</i>)	10/20	120	<i>Var.</i>
Resolución	(<i>N</i>)	$3 \cdot 10^{-5}$	—	<i>Var.</i>
Velocidad de giro	(<i>rpm</i>)	600/1500	3000	5000
Radio	(<i>mm</i>)	35	—	—
Par	(<i>Nm</i>)	0,45	0,3	5
Desplazamiento vertical	(<i>mm</i>)	—	—	150
Resolución	(μm)	—	—	0,5
Desplazamiento horizontal	(<i>mm</i>)	—	—	120
Resolución	(μm)	—	—	0,25
Control de temperatura		✓	✓	✓
Control de humedad rel.		✓	✓	✓

Tabla 2.1: Resumen de los tribómetros de la competencia

Anton-Paar ha desarrollado un tribómetro muy similar al UMT TriboLab de Bruker, por lo que se puede afirmar que en el mercado de los tribómetros existe una tendencia hacia la versatilidad y facilidad de uso. En este trabajo, por lo tanto, se buscará, además del cumplimiento de una serie de requisitos mecánicos de funcionamiento, un diseño versátil, adaptable y de funcionamiento intuitivo.

De hecho, el uso más extendido del UMT TriboLab podría deberse a que su capacidad de carga es mucho mayor, extendiendo su uso hasta más allá de los materiales poliméricos. No obstante, este trabajo se centra en el desarrollo de un tribómetro para materiales poliméricos, por lo que el MCT de Anton-Paar es una buena referencia de diseño.

2.3 Determinación del segmento de mercado

Debido al extenso *know-how* existente dentro de las empresas fabricantes de tribómetros, no es racional competir contra estas en cuanto a prestaciones o precisión, tratándose este proyecto de un trabajo final de grado. No obstante, al buscar un diseño versátil, se descarta la opción de tribómetro clásico, con sistema de pesas.

Por tanto, se buscará un diseño automatizado y versátil, cuyo valor añadido no sea la elevada precisión o grandes rangos de trabajo de los tribómetros existentes. El valor añadido residirá en una alta versatili-

dad manteniéndose dentro de los márgenes de trabajo de los materiales poliméricos, y, por tanto, manteniendo un *coste reducido*.

Este bajo coste permitirá enfocar el tribómetro al sector industrial, en el cual prima el equilibrio entre la inversión a realizar y las prestaciones. Además, se usa una gran proporción de componentes estandarizados de gran demanda, por lo que el mantenimiento es sencillo y barato, tanto en los subsistemas mecánicos como en los electrónicos.

Acotando aún más el segmento de mercado, el objetivo del trabajo estará dirigido a la industria de materiales poliméricos para piezas funcionales, en las cuales el desgaste sea un condicionante primario. Por ejemplo, se podrá enfocar a plantas de fabricación de elementos de transmisión poliméricos, como engranajes, para estudiar el impacto del uso de determinados lubricantes, o la aptitud al servicio de nuevos materiales. También podría responder a las necesidades de instituciones académicas, como universidades, en las cuales se investiguen los campos mencionados anteriormente.

3

Requerimientos y especificaciones

Índice

3.1 Requisitos técnicos	33
3.2 Normativa aplicable	34
3.2.1 Elección de normativa	34
3.2.2 ASTM G99	35

3.1 Requisitos técnicos

Los requisitos técnicos cualitativos que habrá de cumplir el tribómetro serán:

- *Facilidad de uso*, permitiendo realizar ensayos con tiempos de preparación reducidos.
- *Facilidad de mantenimiento*, mediante el empleo de elementos estandarizados de bajo precio y uso extendido.
- *Versatilidad* y adaptabilidad, permitiendo la adición de módulos que amplíen su funcionalidad.
- Un *bajo coste* que facilite su adquisición desde cualquier sector del mercado.

Por otra parte, como se comenta en el apartado anterior, el diseño a seguir tendrá un ajuste de radio y carga automático, mediante el uso de accionamientos electromecánicos y un sistema de control, minimizando la interacción manual con este.

En base a la tabla 2.1, se determinan los parámetros principales de funcionamiento para el tribómetro, que serán los siguientes:

<i>Parámetro</i>		<i>Valor</i>
Fuerza normal	(<i>N</i>)	100
Resolución	(<i>N</i>)	0,01
Fuerza de rozamiento	(<i>N</i>)	100
Resolución	(<i>N</i>)	0,01
Velocidad de giro	(<i>rpm</i>)	3000
Radio	(<i>mm</i>)	30
Par	(<i>Nm</i>)	0,5
Desplazamiento vertical	(<i>mm</i>)	50
Resolución	(μm)	0,025
Desplazamiento horizontal	(<i>mm</i>)	50
Resolución	(μm)	0,025
Control de temperatura		<i>No</i>
Control de humedad rel.		<i>No</i>

Tabla 3.1: Requisitos de funcionamiento del tribómetro

El sistema de control de temperatura y humedad no entra en el alcance de este trabajo. No obstante, el tribómetro se diseñará de manera que pueda aceptarlos en futuras ampliaciones.

3.2 Normativa aplicable

A pesar de ser una ciencia relativamente reciente, la tribología ha experimentado un crecimiento muy rápido, hasta el punto de que en el año 1997 ya existían 424 métodos estandarizados y publicados de caracterización del desgaste [2], siendo muchos de estos métodos específicos para campos muy especializados, desde muelas abrasivas, pasando por erosión, desgaste de arandelas, hasta suelos de madera de arce o pintura para coches.

El principal órgano contribuyente a la tribología ha sido la American Society for Testing and Materials, Sociedad Americana para Pruebas y Materiales (ASTM), cuyo comité G2 publicó un gran volumen de documentación en referencia al campo. También han habido aportaciones significativas desde las normas DIN, aunque no tanto como las anteriores.

3.2.1 Elección de normativa

Para empezar a concretar la normativa a aplicar, hay que definir la tipología de los ensayos a realizar. En grandes rasgos, existen ensayos dirigidos a la caracterización de los siguientes comportamientos:

- Desgaste por abrasión
- Erosión
- Desgaste por deslizamiento
- Corrosión

En el caso de este trabajo, el objetivo es poder realizar ensayos dirigidos a materiales poliméricos con sus posibles lubricantes, y caracterizar su comportamiento a desgaste por deslizamiento, no abrasión. En la base de datos [2] existen más de 100 normas referidas a este tipo de desgaste. No obstante, muchas son muy específicas para ciertos casos. A continuación se aportan algunos ejemplos.

La norma ASTM D2266 [3], en su primer apartado, indica lo siguiente: *'It is not intended to predict wear characteristics with metal combinations other than steel-on-steel or to evaluate the extreme pressure characteristics of the grease'*. Por tanto, se descarta directamente, puesto que no es apta para materiales poliméricos.

La norma ASTM D4172 [4], por ejemplo, sirve para caracterizar el comportamiento de lubricantes, siendo las probetas a emplear de un material preestablecido; el AISI E-52100. Por tanto, se descarta.

Normas como la ASTM G98 [5] sirven para caracterizar el comportamiento a gripaje de los materiales. Esta sí que se podría aplicar, aunque el objetivo principal del proyecto es la caracterización del deslizamiento, por lo que se deja a parte para futuras líneas de trabajo; como la tipología del ensayo es parecida a la que se elegirá para este trabajo, se podrá adaptar fácilmente en un futuro.

También se descartará la ASTM G83-96 [6], puesto que las probetas han de ser cilíndricas, con un diámetro de $12,7\text{mm}$ y una longitud que causarían una flexión excesiva en determinados polímeros. Además, la máquina a emplear presenta unas características específicas que la harían poco versátil.

Existen otras normas, como la ASTM D3233 [7], que son altamente específicas; esta, por ejemplo, tipifica las condiciones de ensayo para la máquina *Falex Pin and Vee Block Lubricant Test Machine*. La norma ASTM D3702 también emplea esta máquina. El desarrollo de una máquina para cumplir con estos ensayos, por tanto, es imposible.

Las normas que destacan como aplicables a este trabajo, sin embargo, son la ASTM G77 [8] y G99 [9], correspondientes a los ensayos block-on-disk y pin-on-disk, puesto que la topología de la máquina a emplear es muy similar, y se requerirían adaptaciones de bajo nivel para cambiar de un ensayo a otro, permitiendo así la caracterización de materiales de una manera más completa y versátil.

Para este trabajo, concretando aún más, se decide centrarse en el ensayo pin-on-disk. En cuanto a tribómetros pin-on-disk, las normas principales son la ASTM G99 y la DIN 50324, aunque esta última está enfocada a materiales cerámicos y metálicos, por lo que la principal norma a aplicar será la ASTM G99.

3.2.2 ASTM G99

La norma ASTM G99 '*Standard Test Method for Wear Testing with a Pin-on-Disk Apparatus*' recoge un procedimiento de laboratorio para determinar el desgaste no-abrasivo de un par tribológico en un tribómetro pin-on-disk.

En el documento se explica el funcionamiento del tribómetro pin-on-disk, que consta, en esencia, de un par tribológico formado por un disco y un elemento con punta esférica, colocado en dirección normal al disco y sobre el cual se aplica una fuerza. El dispositivo ha de ser capaz de generar una velocidad relativa entre el disco y el pin, mediante rotación de uno de los elementos (normalmente el disco).

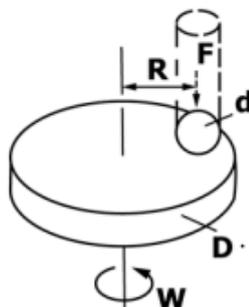


Figura 3.1: Diagrama explicativo del tribómetro según ASTM G99.

El disco suele tener un radio comprendido entre 30 y 100 *mm*, y un espesor de 2 a 10 *mm*. El pin suele tener una terminación esférica, con diámetro de 2 a 10 *mm*.

Los *parámetros del ensayo* serán los siguientes:

- *Carga*: El valor de la fuerza aplicada sobre el par tribológico en Newtons.
- *Velocidad*: La velocidad de deslizamiento existente entre los especímenes del par tribológico, indicada en metros por segundo.
- *Distancia*: Distancia recorrida del pin sobre el disco, en metros.
- *Temperatura*: La temperatura en grados centígrados medida sobre uno de los dos elementos, en un punto cercano al contacto.
- *Atmósfera*: La composición del ambiente que rodea al par tribológico. Típicamente, para materiales poliméricos, aire.

Esta norma, además, aporta una serie de parámetros de funcionamiento para poder realizar ensayos estandarizados (en la tabla 3.2), permitiendo el intercambio de datos entre laboratorios.

Fuerza normal (<i>N</i>)	10
Velocidad de deslizamiento (<i>m/s</i>)	0,1
Distancia (<i>m</i>)	1000
Diámetro del pin (<i>mm</i>)	10
Atmósfera	<i>aire</i>
Temperatura nominal ($^{\circ}C$)	23
Humedad relativa ($\%RH$)	12 – 78
Diámetro de pista (<i>mm</i>)	25 – 35

Tabla 3.2: Parámetros de ensayo estándar ASTM G99.

La norma también establece directivas acerca de las operaciones pertinentes al ensayo fuera del tribómetro, como son el pesaje de las muestras antes y después del ensayo, y la medición del volumen desgastado.

4

Características básicas de la máquina

Índice

4.1 Descripción general de la máquina	37
4.2 Descripción de los subconjuntos de la máquina	38
4.2.1 Estructura	38
4.2.2 Plataforma de ensayo	39
4.2.3 Puente	41
4.2.4 Sistema de control	42
4.3 Descripción del funcionamiento de la máquina	43

4.1 Descripción general de la máquina

El tribómetro pin-on-disk, como se ha introducido en los apartados previos, es una máquina capaz de simular un par tribológico formado por un disco rotativo sobre el cual se coloca un pin con punta esférica estacionario, aplicando sobre este una fuerza normal al disco.

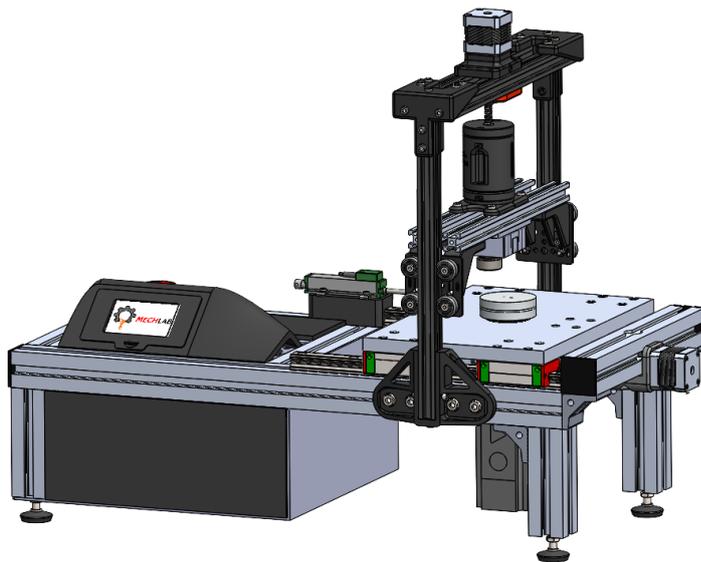


Figura 4.1: Vista general del tribómetro.

El dispositivo registra los parámetros del ensayo, que son las fuerzas normal y de rozamiento, velocidad, radio y temperatura. Además, consta de un sistema de control que posibilita el ajuste del radio en bucle cerrado, y el control de la fuerza normal en tiempo real. Todas estas funciones serán realizadas por una serie de subconjuntos en los que se divide el tribómetro, que son los siguientes:

- *Estructura*: La estructura es la base del tribómetro. Es un sistema rígido y resistente que sirve de soporte para el resto de elementos de este, que además consta de patas ajustables para ofrecer estabilidad.
- *Plataforma de ensayo*: Esta plataforma es el subconjunto principal del tribómetro. Está montada sobre guías lineales de manera que es posible desplazarla para ajustar el radio del ensayo. Este desplazamiento es causado por un husillo conectado a un motor, con un sensor de desplazamiento para lograr el control en bucle cerrado. Sobre esta va montado el *disco*, con el respectivo motor y rodamientos.

- *Puente*: El puente es un sistema portante montado sobre guías lineales, que servirá de montura para el sensor y el pin, además de contar con un sistema de suspensión que ayude a homogeneizar la fuerza en caso de oscilación en el disco.
- *Sistema de control*: El tribómetro, además de todos los subconjuntos mencionados anteriormente, constará de un sistema de control, formado principalmente por un microcontrolador, que coordinará todas las acciones de la máquina, como son la introducción de parámetros mediante una pantalla táctil, la adquisición de datos o el control del radio y la fuerza.

El conjunto, tiene unas dimensiones totales de $750 \times 365 \times 600 \text{ mm}$.

4.2 Descripción de los subconjuntos de la máquina

4.2.1 Estructura

La estructura está realizada en perfilera de aluminio de 40 mm . Esta opción es muy empleada en maquinaria hoy en día, puesto que presenta una serie de ventajas muy evidentes sobre el acero:

- *Bajo peso*, facilitando el montaje y transporte de la máquina.
- Buena *resistencia a la corrosión*, manteniendo un buen aspecto durante más tiempo sin necesidad de pintar.
- Mejor *rigidez específica* que el acero, permitiendo estructuras mucho más rígidas con pesos similares.
- *Facilidad de adaptación* y modularidad, ya que los perfiles se pueden cortar a la medida con herramientas de bajo coste, y se unen mediante escuadras atornilladas. Esto permite una baja inversión inicial respecto a, por ejemplo, realizar una bancada en fundición, por lo que es una opción idónea para tiradas de producción pequeñas.

A priori se plantea de manera que la estructura portante sirve a la vez para contener la electrónica (la figura 4.2(a)), no obstante, debido al alto volumen de componentes de control, y la modularidad requerida, se decide plantear una estructura más dispersa, en la que la electrónica tenga su propio contenedor separado con un gran volumen (la figura 4.2(b)).

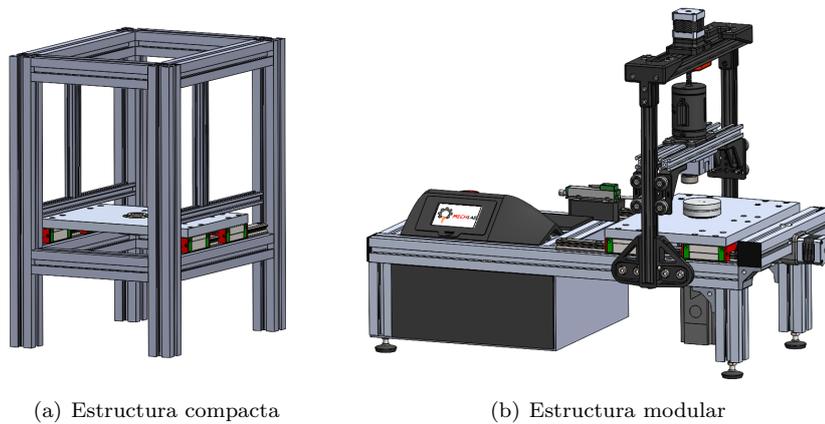


Figura 4.2: Alternativas matizadas para la estructura.

4.2.2 Plataforma de ensayo

En la plataforma de ensayo existen varios subsistemas. La plataforma con las guías lineales actúa como una base, tanto para el sistema de rotación del disco como para el sistema de traslación de esta.

La plataforma tiene un tamaño similar al de una hoja DIN A4. Aunque este tamaño puede parecer desproporcionado para el disco, que tan solo tiene 60 mm de diámetro, está pensado para permitir el montaje de elementos auxiliares, como un sistema de control de temperatura, una cámara o un perfilómetro. En sus extremos tiene montados mediante tornillos cuatro guías lineales HGH20, que permitirán el movimiento sobre dos raíles atornillados sobre las barras principales de la estructura.

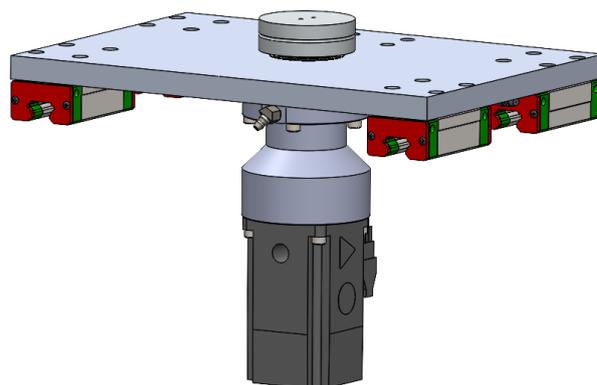


Figura 4.3: Plataforma de ensayo.

4.2.2.1 Sistema de rotación del disco

En el centro de la plataforma se encuentra el sistema de rotación del disco. Este disco está montado rígidamente, mediante un ajuste de apriete, sobre un árbol que atraviesa la plataforma mediante un agujero pasante. Sobre esta, se monta un par de rodamientos cónicos SKF 30204, que están encapsulados de manera que se pueden lubricar a través de un puerto de engrase.

Por debajo de los rodamientos se encuentra montada una torreta, cuya función principal es contener un acoplamiento elástico y soportar el servomotor que propulsará el disco. Además, consta de un retén radial DIN 3760 que impedirá el paso de la grasa de los rodamientos al exterior.

Una de las alternativas para la transmisión era el uso de una correa dentada para reducir la velocidad, puesto que en la mayoría de ensayos no se superan las $2000rpm$. No obstante, el servomotor tiene una capacidad de par sobrada para los ensayos (para detenerlo en transmisión directa, habría que someter al sensor a una sobrecarga), por lo que se decide trabajar en transmisión directa mediante un acoplamiento elástico; esta opción requiere un mantenimiento mucho menor, y permite velocidades más elevadas. Además, emite menos ruido y somete al servomotor a una menor carga mecánica, alargando su vida útil.

El servomotor es un BCH2 de Schneider Electric, controlado por un Lexium 28 de la misma marca. Este controlador recibirá una señal pulsada desde el microcontrolador, de manera que la velocidad se controlará con precisión.

4.2.2.2 Sistema de traslación de la plataforma

Para la traslación de la plataforma se emplea un sistema similar al existente en la mayoría de máquinas de fabricación aditiva FDM, que son un motor paso a paso unido elásticamente a un husillo. De hecho, los componentes empleados son idénticos a los de estas máquinas: un motor paso a paso Nema 17, y un husillo de 8 mm de paso con su correspondiente tuerca, unido al motor mediante un acoplamiento elástico enterizo realizado en aluminio, y sujetado al chasis mediante un cojinete *KFL08* para evitar la transmisión de esfuerzos axiales al motor (figura 4.4).

La holgura de esta tuerca puede parecer un problema respecto a una de bolas, como las que se emplean en fresadoras. No obstante, realizando mediciones sobre la máquina se aprecia una holgura inferior a $0,20\text{ mm}$,

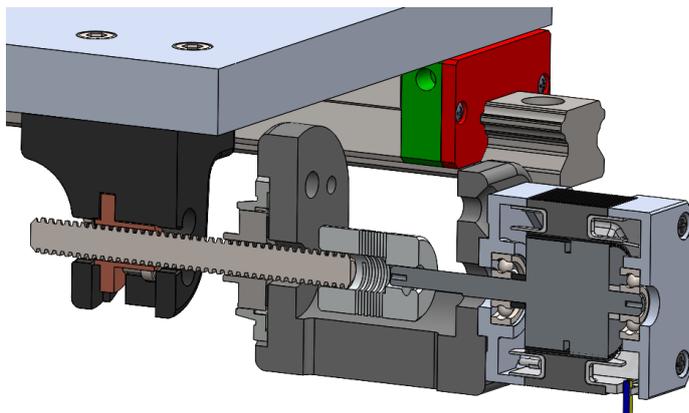


Figura 4.4: Vista seccionada del sistema de traslación.

que en un ensayo típico a 20 mm de radio supondría un error del 1 %, por lo que se acepta como un diseño válido, presentando una serie de ventajas, que son bajo coste, grandes cantidades de stock y facilidad de mantenimiento.

4.2.3 Puente

El puente es el subsistema encargado de ejercer la fuerza normal sobre el disco, a través del pin. Sus elementos principales son el pin, montado rígidamente sobre el sensor, los elementos estructurales, el sistema de suspensión y el servomotor.

Para ejercer la fuerza, el motor paso a paso mueve un husillo, que empuja una tuerca cuya rotación está impedida, de manera que esta actúa sobre el carro móvil del puente a través de un muelle. El sensor capta la fuerza normal, y el sistema de control es capaz de regular la fuerza ejercida en bucle cerrado.

El sistema de suspensión es empleado en gran variedad de tribómetros automatizados, puesto que aporta una mayor fiabilidad de los datos obtenidos, al ayudar a mantener la fuerza normal de manera homogénea, sin oscilaciones bruscas que podrían falsear los resultados [10].

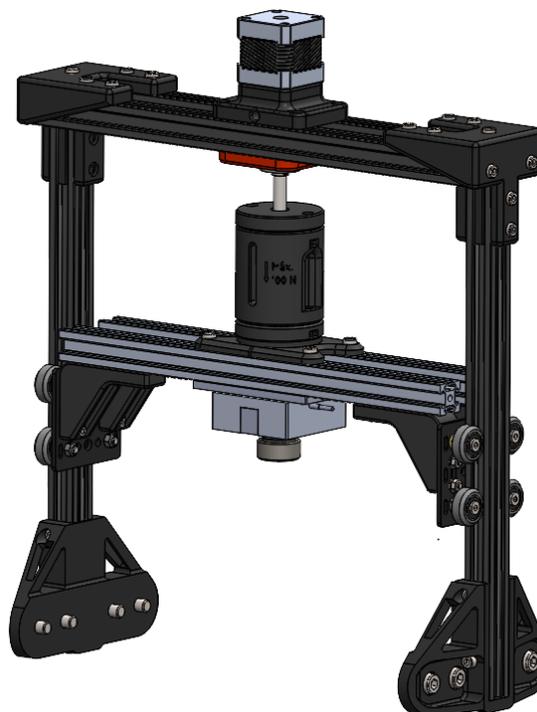


Figura 4.5: Vista general del puente.

4.2.4 Sistema de control

El elemento principal del sistema de control es un ESP32, un microcontrolador con un uso muy extendido entre la comunidad de Arduino. Se puede programar utilizando la misma sintaxis que en Arduino (aunque también existen implementaciones en C++ puro y MicroPython), y presenta un precio muy competitivo y unas prestaciones superiores, principalmente un procesador de dos núcleos, que permite realizar dos tareas independientes a mayor velocidad. Además, es capaz de generar señales pulsadas de hasta 40MHz, por lo que se puede controlar el movimiento de los motores paso a paso y del servomotor con una mayor resolución.

El ESP32 también está dotado de conectividad Wi-Fi y Bluetooth, aunque no se emplean debido a las dificultades a la hora de establecer una conexión con la red de la Universidad.

La interfaz principal con este sistema de control es una pantalla táctil Nextion, que consta de un procesador y memoria propios, lo que dota al tribómetro de aún más capacidad de procesamiento para futuras ampliaciones. Además, la interfaz humano-máquina se programa de manera intuitiva mediante un software específico a esta.

Los datos del ensayo se guardan en una tarjeta micro-SD, dentro de archivos de texto que contienen, antes que nada, una cabecera con los parámetros principales (velocidad, radio, fuerza normal, n° de ciclos), y seguido de esta, los valores instantáneos de las fuerzas, coeficiente de fricción, temperatura y tiempo en intervalos de 0,5 s. El formato de guardado es similar a un `.csv`, para poder ser tratado posteriormente en cualquier programa.

Para la lectura de los parámetros principales (fuerza, radio y par) se emplea un conversor análogo-digital (Analog Devices AD7606), que consta de 8 canales y es capaz de leer señales de $\pm 10 V$ a 200kHz. Esto permite obtener el valor de fuerza con una resolución de 0,003 N y el radio con una resolución de 3 μm . El lector de temperatura está conectado al mismo bus de comunicaciones SPI que el anterior, se trata de una placa MAX31855 diseñada por Adafruit, que realiza la compensación y conversión de forma autónoma para un termopar de tipo K, facilitando esta lectura.

El diagrama de flujo del código, así como el código desarrollado se encuentran en el apartado 7.

4.3 Descripción del funcionamiento de la máquina

El funcionamiento de la máquina se adecua totalmente la norma ASTM G99, con las adaptaciones pertinentes.

Para realizar un ensayo, los primeros pasos comienzan fuera del tribómetro. Antes que nada, se ha de limpiar tanto el pin como el disco empleando productos que no dejen ningún tipo de residuo, eliminando cualquier suciedad o partículas abrasivas que podrían introducir errores en el ensayo. En caso de haber algún elemento ferromagnético, será necesario desimantarlo.

Hecho esto, se secan las probetas en un horno para eliminar cualquier contenido de agua que puedan haber absorbido, especialmente si se trata de materiales porosos o polímeros higroscópicos. Acto seguido, se pesan en una báscula con una resolución de al menos 0,1 mg , y se miden las dimensiones con una resolución de al menos 2,5 μm .

Una vez realizados estos pasos, las probetas ya están listas. Se inserta el disco en su alojamiento de manera que queda fijado perpendicularmente al eje de rotación ($\pm 1^\circ$), y el pin de manera que queda perpendicular al disco ($\pm 1^\circ$).

La intervención manual con las probetas ya ha terminado; a partir de ahora, los ajustes se realizan a través de la interfaz humano-máquina del tribómetro. El primer paso es ajustar el radio. Hecho esto, el usuario introduce los ciclos objetivo, la carga y la velocidad de giro. El tribómetro ejerce la carga, y comienza a rotar el disco a la velocidad deseada. Es importante no interrumpir el ensayo; si se detiene, se ha de realizar de nuevo.

Al llegar al número de ciclos indicado, el tribómetro se detiene automáticamente, retirando el pin hacia arriba, y desplazando la plataforma hasta una posición cómoda para retirar el disco. Una vez detenida, se puede cortar la corriente del servomotor, para evitar peligro al manipular el disco.

El usuario retira las probetas, y las limpia de cualquier residuo suelto que puedan tener, prestando atención a las características de las huellas de desgaste: protuberancias, material desplazado, decoloración, grietas o picado.

Una vez retiradas, se vuelven a medir estas, secándolas y siguiendo las indicaciones mencionadas anteriormente tanto para masa como para dimensiones. Se tomarán las mediciones de la huella pertinentes, y se repetirá el procedimiento de ensayo hasta obtener datos estadísticamente significativos.

5

Cálculos justificativos

Índice

5.1 Selección de materiales para las escuadras.	47
5.2 Simulación de la estructura del puente	49
5.3 Calibración del sensor de posición.	56
5.4 Selección del muelle para la suspensión.	59
5.5 Selección del servomotor	61
5.6 Comprobación del árbol	63
5.7 Cálculo del apriete árbol-disco	66
5.8 Descripción de los procesos de fabricación	69
5.8.1 Escuadras	69
5.8.2 Piezas metálicas.	70

5.1 Selección de materiales para las escuadras

Las escuadras del tribómetro presentan una geometría que requeriría un elevado número de operaciones, herramientas y horas de mano de obra si se realizaran por un proceso típico como podría ser mecanizado por arranque de material (fresado), por lo que se decide fabricarlas mediante FDM (impresión 3D típica).

Este método permite trabajar habitualmente con polímeros, que presentan unos valores de rigidez y resistencia mucho menores que los que podría tener un material metálico, aunque en piezas con bajas solicitaciones, como es el caso de las escuadras, este proceso permite realizar geometrías muy intrincadas sin requerir prácticamente atención de un operario.

Los principales materiales empleados en este método son en PLA, el ABS y el PETG, ya que presentan un comportamiento mecánico aceptable con respecto a su dificultad de impresión. Hay oferta de polímeros técnicos, como el PA, el PEEK o el POM, o polímeros con cargas como fibra de vidrio o de carbono, sin embargo, requieren máquinas con modificaciones (extrusores con mayor temperatura de funcionamiento, boquillas resistentes a la abrasión, etc) y presentan dificultades de adhesión, deformación, temperatura de fusión y generación de vapores.

Por tanto, se procede a comparar los tres primeros materiales mencionados al principio. Las propiedades mecánicas se toman a partir de los valores aproximados existentes en la base de datos de Granta Edu-pack, y los precios se consultan para una bobina de filamento Smartfil (750 g).

Material	σ_Y (MPa)	E (GPa)	T_{max} (°C)	C (€/bob.)
PLA	~ 50	~ 3,3	50	19,95
ABS	~ 30	~ 2,4	70	17,95
PETG	~ 50	~ 2,0	55	26,95

Tabla 5.1: Tabla comparativa de materiales para FDM.

- El PLA es el material más rígido de los tres, aunque esto también conlleva cierta fragilidad. Su temperatura máxima de trabajo es la más baja y sufre cierta degradación al aire libre, aunque esto no es un factor eliminador ya que las piezas van a trabajar en condiciones de laboratorio. Su límite elástico es el más elevado en la gama baja de polímeros para FDM, y su precio es relativamente bajo. Cabe destacar que procede de fuentes renovables, como el maíz o la caña de azúcar.

- El ABS es el material más barato de los tres, y su módulo de elasticidad, que es la propiedad más importante, es el intermedio. Por lo tanto, puede ser un material adecuado para esta aplicación. Además, presenta la temperatura de trabajo máxima más elevada de los tres, tiene una buena resistencia a impacto y sufre poco las condiciones ambientales. No obstante, presenta dificultades a la hora de la impresión, ya que produce vapores nocivos, y presenta una elevada deflexión térmica que puede provocar deformaciones en la pieza.
- El PETG es el material más caro, y menos rígido, por lo tanto, se descarta directamente su utilización. No obstante, puede ser un material adecuado para otras aplicaciones, sobre todo alimentarias y farmacéuticas. Últimamente está siendo empleado en la fabricación FDM por su buen aspecto y su buena resistencia a fluencia.

Valorados todos estos aspectos, se decide emplear el PLA, ya que presenta el mayor valor de módulo de elasticidad, que es la principal característica deseada ya que la estructura debe flexionar lo mínimo posible. Además, su empleo es fácil y no suele presentar problemas, permitiendo fabricar múltiples piezas en una sola impresión con pocas desviaciones geométricas.

Desde el punto de vista medioambiental, el PLA también es la mejor opción en cuanto a materiales poliméricos, ya que procede de fuentes sostenibles y es compostable.

5.2 Simulación de la estructura del puente

El puente está realizado en perfilera de aluminio de 20 mm unida mediante escuadras de material polimérico. Estas escuadras, realizadas mediante fabricación aditiva (FDM) en PLA, pueden parecer un punto débil de esta estructura, pues su módulo de rigidez ($E_{PLA} = 1280 MPa$ [11]) es del orden de 50 veces menor que el del aluminio.

Esta falta de rigidez podría suponer una gran deformación en la estructura, provocando la desalineación del pin con la probeta, y, por tanto, falseando la medición de las componentes de fuerza, por lo que es de gran importancia comprobar el desempeño de la estructura para garantizar el correcto funcionamiento del tribómetro. Esta comprobación se realizará mediante un cálculo de elementos finitos mediante el programa ANSYS Workbench 2021, empleando el módulo '*Static structural*'.

El primer paso para realizar el cálculo es el establecimiento de los materiales. En este caso, en el cálculo se introducen una aleación típica de aluminio para la perfilera, poliamida para las ruedas de las guías lineales, y PLA para las escuadras. Los datos del aluminio se obtienen de la librería de '*General materials*' de Ansys, la poliamida se obtiene de la librería '*ANSYS Granta materials*' bajo el nombre PA6, y el PLA se introduce manualmente partiendo de los datos de una caracterización previa [11].

Cabe destacar que el PLA se trata como un material lineal, ya que, al contrario que la mayoría de materiales poliméricos, que tienen un comportamiento a lineal que lleva al uso de modelos aproximados, como el tangencial, el secante o el multilineal, el PLA es prácticamente lineal en la zona elástica y su comportamiento tiende a ser frágil.

En cuanto a la geometría (figura 5.1), que se importa directamente desde SOLIDWORKS, el programa en el que se ha realizado el modelado 3D de la máquina. Acto seguido, se eliminan todos los elementos no estructurales como el sensor, el sistema de suspensión y el motor paso a paso. Además, se simplifica el sistema de sujeción de las ruedas, eliminando los rodamientos.

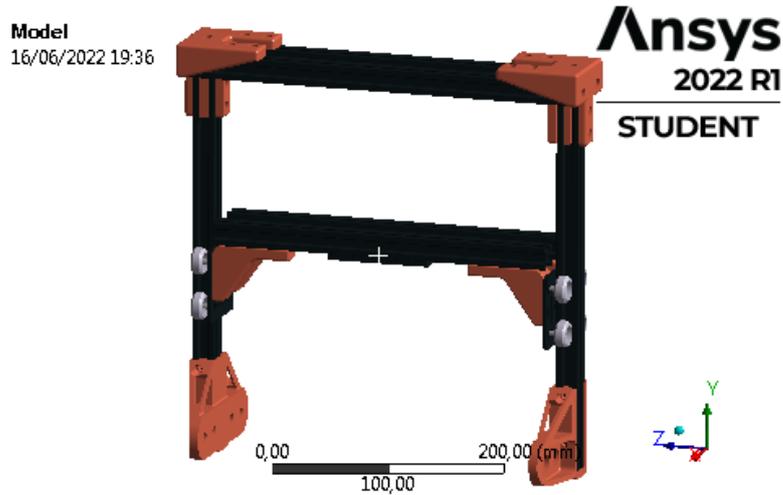


Figura 5.1: Modelo empleado para el cálculo.

Hecha esta preparación, se comienza el trabajo dentro del módulo ANSYS Mechanical, que consta de un visor 3D y permite la manipulación del modelo, las condiciones de contorno y los cálculos. El primer paso es asignar los materiales correspondientes a cada una de las piezas. También se revisan los contactos, que han sido generados automáticamente, para evitar, por ejemplo, la unión directa entre perfiles. Se presuponen todos los contactos como *'Bonded'*, es decir, uniones rígidas, como hipótesis simplificativas, eliminando de esta manera los tornillos.

Además, los rodamientos y los ejes de los patines se simplifican sustituyéndolos por una conexión de tipo *'Beam'*, que simula la rigidez aproximada que tendría el sistema, pero facilitando en gran medida el cálculo y simplificando el mallado, ya que se trabaja con un número de elementos muy elevado.

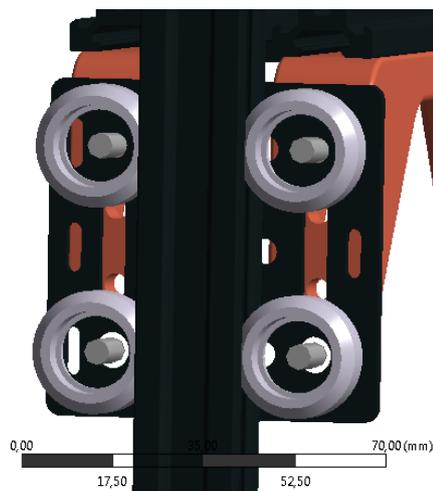


Figura 5.2: Simplificación aplicada a los rodamientos.

El siguiente paso es la generación de la malla. Si se emplea la configuración por defecto, se genera una malla con 1097191 elementos, un número que sobrepasa con creces el límite de 128000 elementos que ofrece la licencia para estudiantes del programa. Aún así, se observa que el mayor número de elementos está concentrado en los perfiles de aluminio por su complicada geometría, por lo que se decide aplicar un modelo de mallado diferente a estos, aplicando el método MultiZone, que detecta ciertas características topológicas del modelo.

En este caso, al tratarse de perfiles extruídos, el sistema de mallado permite realizar un mallado de la sección, y repetir este en intervalos regulares. Si se ajusta este intervalo a 25 mm , se observa que el número de elementos se reduce drásticamente. Este efecto, sumado a la eliminación de los redondeos mediante la opción '*Virtual topology*' permite reducir el número de elementos a 127643, un valor ajustado al límite existente.

La calidad de la malla, si se observa simplemente en las métricas que calcula ANSYS, puede parecer muy baja en el mallado de los perfiles de aluminio (la figura 5.3(a)), ya que la malla es muy fina en su plano de sección, pero gruesa en la dirección longitudinal del perfil. No obstante, y como se observará más adelante, esta malla es correcta, ya que se obtienen unas tensiones homogéneas, y el error de cálculo de estas es reducido. Además, uno de los parámetros más importantes, que es el valor jacobiano de los puntos de Gauss (la figura 5.3(b)), tiene una buena distribución de valores, valor indicador de que los resultados serán coherentes.

El resto de mallado, como se puede observar en las figuras 5.3(c) y la figura 5.3(d), presenta unos valores de calidad correctos.

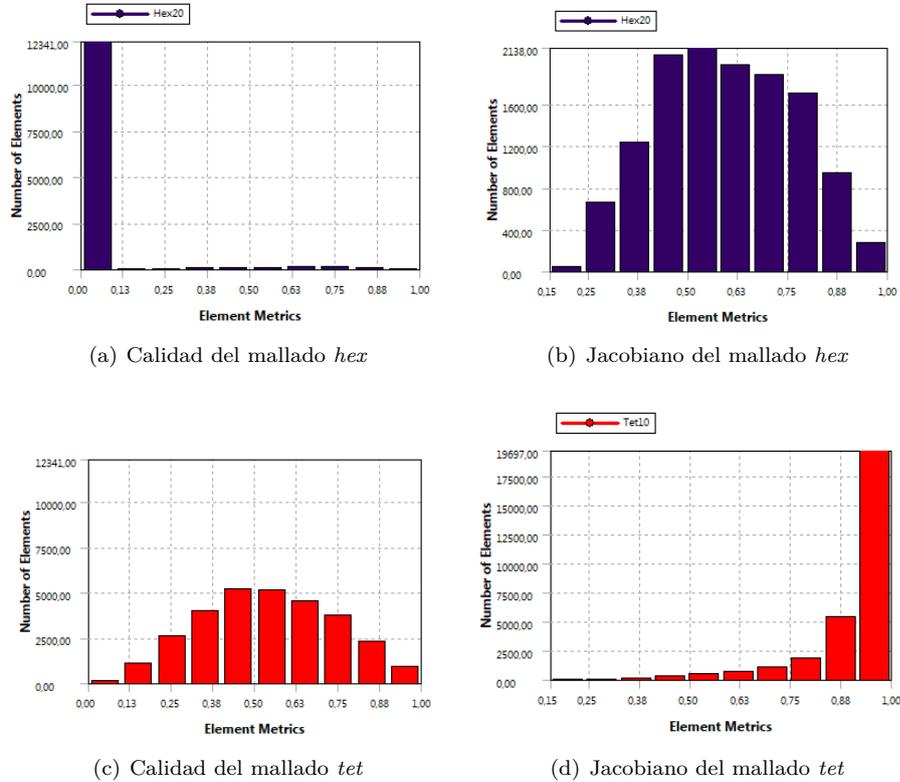


Figura 5.3: Gráficos de calidad del mallado.

Ahora se puede proceder a insertar las condiciones de contorno. La fijación de este sistema se realizará en las escuadras inferiores; como se ha simplificado el modelo y no se han introducido tornillos, en vez de fijar la cara que va apoyada sobre los perfiles de la estructura principal, se fijan los agujeros de estos de manera que el caso es más desfavorable. Esto se consigue introduciendo un *Fixed support*, seleccionando estos ocho agujeros.

Acto seguido, se introduce la carga. Como se ha eliminado el sensor de la geometría, se introduce una fuerza remota sobre la placa de anclaje de este, a 50 mm de su superficie en la dirección X (vertical) y sentido descendente, simulando la superficie de contacto. La única carga que es interesante simular es la fuerza de rozamiento máxima (100 N), ya que la fuerza normal es transmitida directamente a las barras superiores y no afecta a la dirección del sensor.

El modelo ya está listo para ejecutar un cálculo. En cuanto a soluciones, se decide graficar la tensión equivalente de Von Mises y su

respectivo error, la deformación unitaria, la deflexión total, y el factor de seguridad.

La tensión (figura 5.4) máxima observada es de $14,7 \text{ MPa}$, y aparece en el extremo superior de uno de los perfiles verticales. Las piezas de PLA no sufren esfuerzos significativos, fenómeno que puede ser debido a su reducida rigidez en comparación con el aluminio. Este efecto se manifiesta de igual manera en la gráfica de deformaciones unitarias (figura 5.6); al ser el PLA menos rígido, sufre unas deformaciones significativamente menores que el aluminio.

Este efecto podría ser indeseable en una estructura con mayores solicitaciones, puesto que uno de los dos materiales actúa como 'cuello de botella', impidiendo el aprovechamiento total de las propiedades mecánicas del otro. No obstante, en este caso es totalmente aceptable, puesto que la deflexión (figura 5.5) máxima tiene un valor inferior a $0,5 \text{ mm}$, y la placa de anclaje del sensor se desplaza $0,26 \text{ mm}$, siendo el valor de deflexión igual en los dos agujeros de montaje, por lo que se puede afirmar que este no sufrirá un cambio significativo de dirección. Además, el coeficiente de seguridad a fluencia es mayor de 15 en todos los casos.

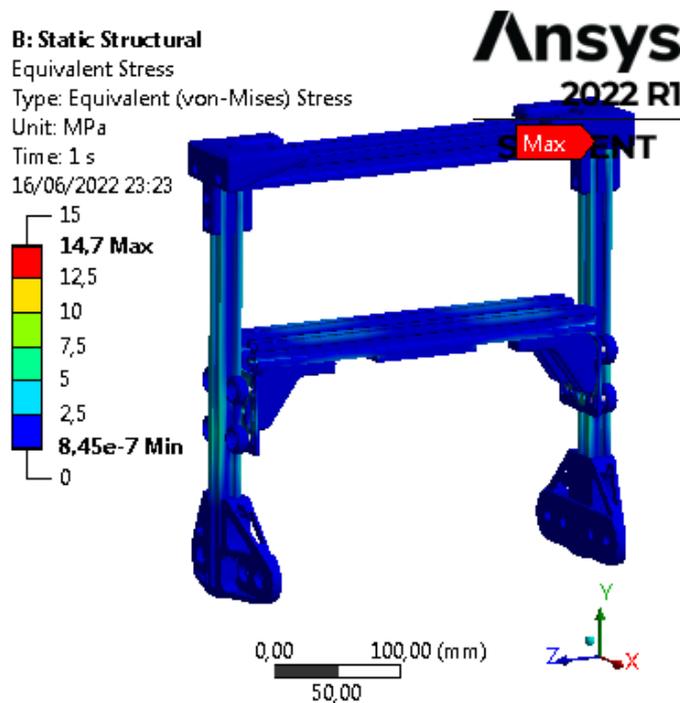


Figura 5.4: Resultados de tensión del cálculo.

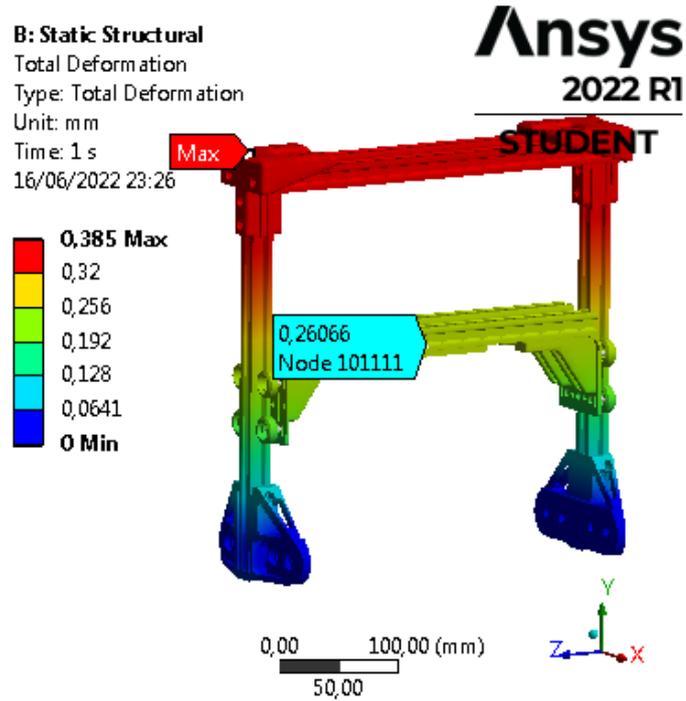


Figura 5.5: Resultados de deflexión del cálculo.

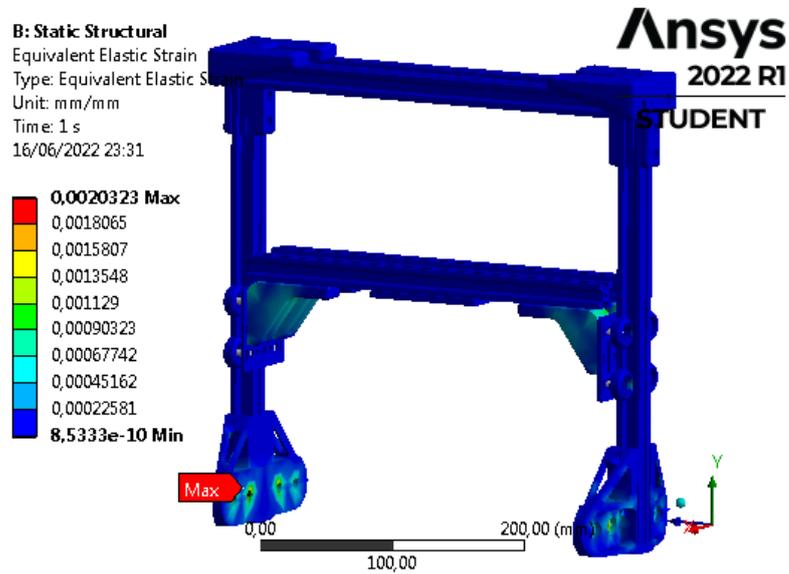


Figura 5.6: Resultados de deformación del cálculo.

Si se ejecuta el mismo cálculo pero asignando aluminio a la geometría de las escuadras, la tensión máxima disminuye sustancialmente, hasta $6,87 \text{ MPa}$, y la deflexión en el soporte del sensor disminuye hasta no

superar la centésima de milímetro, no obstante, el comportamiento de la estructura con escuadras poliméricas es completamente aceptable, por lo que se decide emplear estas en beneficio de la facilidad de fabricación y la libertad de geometrías a la hora del diseño.

5.3 Calibración del sensor de posición

El sensor de posición (la figura 5.7) de la plataforma es un sensor de tipo potenciométrico. Es, en esencia, un potenciómetro lineal cuya resistencia está correlacionada con su extensión de manera cuasilineal. En el caso del tribómetro, se le aplica una tensión de 5 V , y se mide el voltaje a su salida.

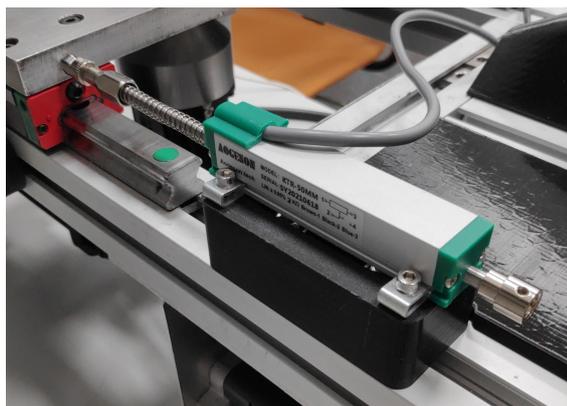


Figura 5.7: Sensor de posición potenciométrico KTR-50.

Para la calibración de este sensor, se carga un programa básico en el tribómetro, que simplemente muestra la lectura en bruto del sistema de captación del radio. Hecho esto, se colocan una serie de calzos (la figura 5.8) cuya dimensión ha sido comprobada previamente con un pie de rey (1 centésima de resolución) y se relaciona el desplazamiento con la lectura en bruto. Una vez se tiene un conjunto de datos lo suficientemente significativo, se realiza un ajuste lineal, para correlacionar la lectura en bruto con la lectura en milímetros.



Figura 5.8: Calzos calibrados.

Cabe destacar que el sensor, al ser potenciométrico, tiene un tramo no lineal al inicio del recorrido (los primeros 5 mm), de manera que se comienza la calibración con un primer calzo de esta dimensión. En el

tribómetro, se colocará el sensor con una ligera precarga, de manera que se evite trabajar en esta región alineal.

Los valores obtenidos para realizar el ajuste quedan recogidos en la tabla 5.2. El ajuste se encuentra reflejado en la figura la figura 5.10.

Lectura	
Bruto	mm
-7	0
1062	5
4367	14,9
5953	19,9
7589	24,7
9238	29,8
12450	39,6
15669	49,4

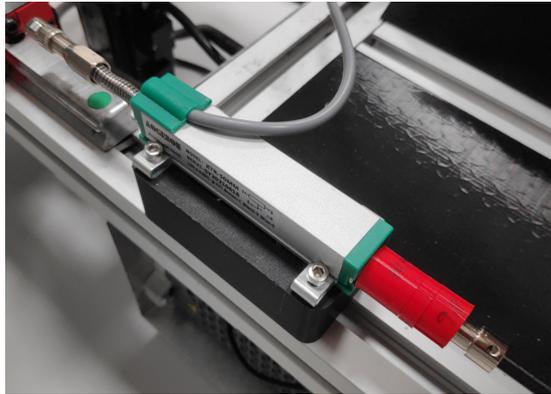


Tabla 5.2: Mediciones

Figura 5.9: Sensor en proceso de calibración.

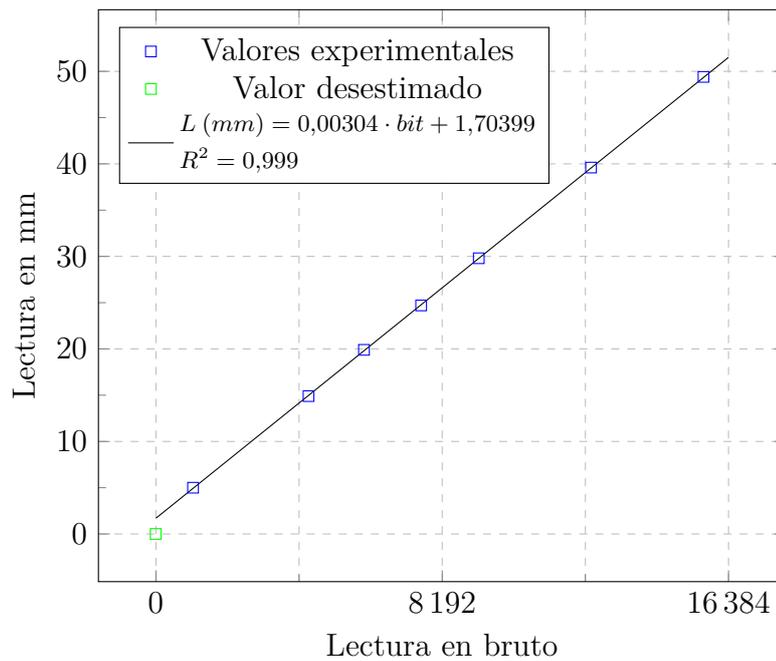


Figura 5.10: Recta de calibración del sensor de posición.

Como se observa, la recta de calibración obtenida tiene una calidad muy alta ($R^2 = 0,99998$); como era de esperar, puesto que el sensor tiene una linealidad nominal del 0,1%. Mediante el sistema de captación actual, se tiene una resolución de $3 \mu m$, valor que sobrepasa con creces las necesidades de precisión manteniendo un coste reducido.

Una vez hecha la calibración, se ha de tarar el sensor. Para realizar esto, se fabrica un útil de centrado, que encaja en el portadisco del tribómetro, de manera que, desplazando la plataforma manualmente, se hace coincidir el pin con un alojamiento existente en el centro de este útil. Este será el punto de radio cero, por lo que se introduce en la ecuación de calibración un parámetro más, cuyo valor coincide con la lectura actual, pero de signo contrario.

De esta manera, la recta de calibración es la siguiente:

$$L (mm) = 0,00304 \cdot bit + 1,70399 - 2,30895 \quad (5.1)$$

$$\boxed{L (mm) = 0,00304 \cdot bit - 0,60496}$$

5.4 Selección del muelle para la suspensión

Para la selección del muelle, se ha de establecer un rango de valores de rigidez aceptables, de manera que se tenga cierto margen de libertad para poder escoger uno con la geometría adecuada.

El valor inferior vendrá establecido por la fuerza máxima que sea capaz de ejercer el muelle, de manera que se pueda alcanzar el valor máximo requerido (100 N). Teniendo 30 mm de carrera, y considerando útiles 15 mm, la constante mínima de rigidez se calcula mediante la ley de Hooke, de la siguiente manera:

$$F = K \cdot \Delta L \rightarrow K_{min} = F_{max} / \Delta L_{max} = 100 / 15$$

$$\rightarrow \boxed{K_{min} = 6,7 \text{ N/mm}} \quad (5.2)$$

F	Fuerza ejercida	(N)
K	Constante de rigidez del elemento.	(N/mm)
L	Longitud del elemento.	(mm)

El criterio para determinar el valor superior del rango será que el incremento mínimo de fuerza realizable por el husillo no supere el valor de la mitad de la resolución del sistema de captación de fuerza. De esta manera, el control será capaz de funcionar de manera suave.

El husillo tiene un paso de 1 mm, y al tener una sola entrada su avance toma el mismo valor, y el motor paso a paso permite, mediante el control electrónico, realizar hasta 6400 *pasos/vuelta*, de manera que el incremento mínimo de longitud realizable por el sistema será el siguiente:

$$\Delta L_{min} = P / n_{pasos} = 1 / 6400 \rightarrow \boxed{\Delta L_{min} = 0,156 \cdot 10^{-4} \text{ mm}} \quad (5.3)$$

La resolución real del sistema se calcula dividiendo la escala completa entre la resolución del sistema de adquisición de datos. La escala completa son $\pm 100 \text{ N}$, es decir, 200 N, y la resolución del sistema AD7606 es de 16 bits. Por tanto, la resolución real es la siguiente:

$$\Delta F_{min} = \Delta F / 2^{bits} = 200 / 2^{16} \rightarrow \boxed{\Delta F_{min} = 0,003 \text{ N}} \quad (5.4)$$

Una vez conocidos estos datos, se calcula la constante máxima:

$$K_{max} = 0,5 \cdot \Delta F_{min} / \Delta L_{min} = 0,5 \cdot 0,003 / 0,156 \cdot 10^{-4} \rightarrow \boxed{K_{max} = 9,8 \text{ N/mm}} \quad (5.5)$$

El muelle, por tanto, deberá tener una constante de rigidez de entre $6,7 \text{ N/mm}$ y $9,8 \text{ N/mm}$. Existe una gran variedad de muelles que cumplirían con este requisito; por ejemplo, un muelle con 16 mm de diámetro, fabricado de alambre de acero de 2 mm y un paso de 4 mm , que resultaría en unas 5 espiras activas, constaría de la siguiente constante de rigidez:

$$K = \frac{G \cdot d^4}{8 \cdot D^3 \cdot n_a} = \frac{85000 \cdot 2^4}{8 \cdot 16^3 \cdot 5} = 8,3 \text{ N/mm} \quad (5.6)$$

G	Módulo de elasticidad transversal.	(MPa)
d	Diámetro del alambre.	(mm)
D	Diámetro del muelle.	(mm)
n_a	Nº de espiras activas.	-

Por tanto, el empleo de un muelle de estas dimensiones en el sistema de suspensión permitirá al tribómetro desempeñar su tarea de manera efectiva.

5.5 Selección del servomotor

La elección del servomotor se podrá realizar con la ayuda de la tabla 3.1 donde se recogen las especificaciones del tribómetro. A partir del requisito de par y velocidad máximas, se puede obtener la potencia requerida. Cabe destacar que estos requisitos no han sido arbitrarios; la velocidad máxima se ha tomado de un valor igual que el MCT de Anton-Paar, que está destinado a polímeros, y el par se ha tomado del TRB de la misma casa, puesto que es el mayor entre los tribómetros destinados a materiales poliméricos. El de Bruker está orientado tanto a polímeros como a materiales cerámicos y metálicos, por lo que su fuerza máxima realizable, par y velocidad son significativamente mayores, aunque no tiene sentido aplicar estos límites a un tribómetro para polímeros, cuyas cargas de trabajo son menores. (la tabla 2.1).

La potencia mínima, por tanto, se calcula a partir de la velocidad de rotación máxima y el par máximo:

$$P = T \cdot \omega = 0,5 \cdot 3000 \cdot \frac{2\pi}{60} = 157 \text{ W} \quad (5.7)$$

A partir de este parámetro, acompañado de las revoluciones por minuto máximas y el par máximo, se puede realizar sin problemas la elección del servomotor.

Consultando los catálogos de diferentes marcas (ABB, Schneider Electric y Omron), se observa que el tamaño de servomotor inmediatamente superior a los requisitos presentados, sigue un patrón consistente entre todas las marcas, teniendo pequeñas variaciones en la masa del motor, sus dimensiones, y, en especial, el coste del conjunto motor-controlador, quedando recogidos estos en la tabla 5.3.

	Schneider	ABB	Omron
Serie	<i>BCH2</i>	<i>ESM06</i>	<i>R88M</i>
P_{nom} (W)	200	200	200
n_{nom} (rpm)	3000	3000	3000
n_{max} (rpm)	5000	6000	5000
T_{nom} (Nm)	0,64	0,64	0,64
T_{max} (Nm)	1,92	1,91	1,78
C_{motor} (€)	302,87	—	526,00
C_{driver} (€)	476,54	—	1074,00

Tabla 5.3: Tabla comparativa de servomotores

Como se puede observar, la opción de Omron, a pesar de ofrecer un motor y controlador más compactos, no presenta ninguna ventaja significativa que justifique el coste elevado en relación a los otros, por lo que la decisión se reduce a Schneider o ABB. Observando los planos, dimensiones y masa, no se observan diferencias significativas; los motores son prácticamente idénticos, incluso en su funcionamiento e interfaz electrónica.

Por lo tanto, se optará por el motor de Schneider Electric (Motor BCH2LD0233CA5C y Controlador LXM28AU02M3X), puesto que este fabricante ofrece más información en forma de manuales, tanto para el motor como para el controlador, por lo que se facilita la configuración de este, y la comunicación con la placa de control del tribómetro.



Figura 5.11: Servomotor elegido.

A efectos de comprobación, para garantizar el correcto funcionamiento del servomotor, se confecciona una gráfica (la figura 5.12) que permita observar gráficamente las capacidades de este tribómetro. En su eje horizontal presentará la velocidad de deslizamiento, y en el eje vertical, la fuerza de rozamiento. En la gráfica, se trazará la línea correspondiente a la potencia nominal del motor (200 W), de manera que el tribómetro podrá ser capaz de funcionar bajo cualquier punto de funcionamiento que esté por debajo de esta.

En la figura 5.12 se han graficado puntos correspondientes a ensayos previos realizados por el departamento, a modo de comprobación de la capacidad del tribómetro para cumplir con los requerimientos de un equipo de investigación.

Se observa que todos los puntos están sobradamente por debajo de la línea de 200 W , por lo que se puede afirmar que el servomotor está correctamente dimensionado.

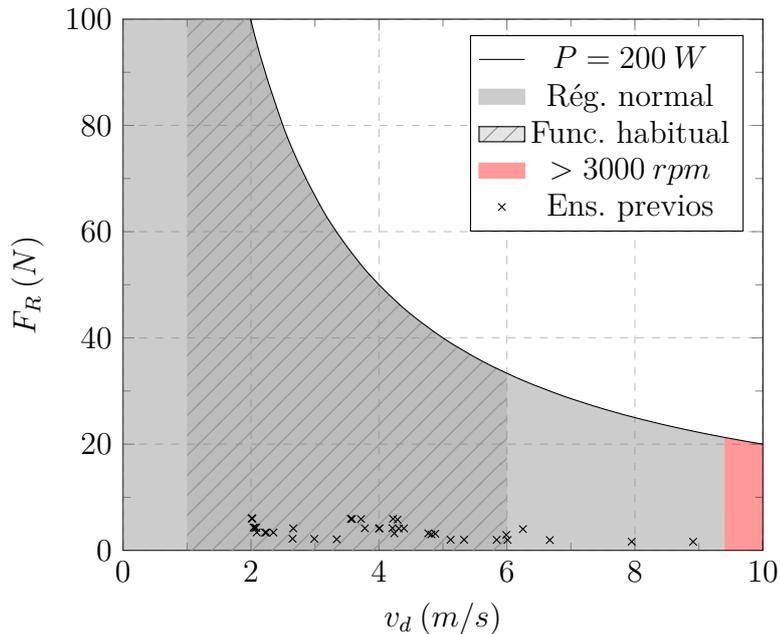


Figura 5.12: Curva de funcionamiento del servomotor.

5.6 Comprobación del árbol

El árbol del tribómetro se modela en el programa KISSSoft, un software de cálculo de elementos de máquinas como pueden ser aprietes, árboles, rodamientos, ruedas dentadas, transmisiones por correa, etc. En este caso, se emplea el módulo de cálculo de árboles.

El primer paso es modelizar la geometría del propio árbol, sus rodamientos y las condiciones de contorno; temperatura de trabajo (20°C), velocidad (3000 rpm), y orientación del árbol en el espacio (vertical).

Hecho esto, se procede a añadir en el cálculo la entrada y salida de potencia. En cuanto a entrada, se añade el acoplamiento en la parte del árbol donde irá montado (a la derecha en la la figura 5.13) y el portadisco (a la izquierda), ambos con una potencia de $0,2\text{ kW}$, que es la máxima realizable por el servomotor. A parte, se añade una carga excéntrica de 100 N en Z y 100 N en Y, descentrada 30 mm , simulando las fuerzas normal y de rozamiento máximas absolutas realizables por el tribómetro.

Cabe destacar que la probabilidad de fallo empleada en todos los cálculos es del 99% .

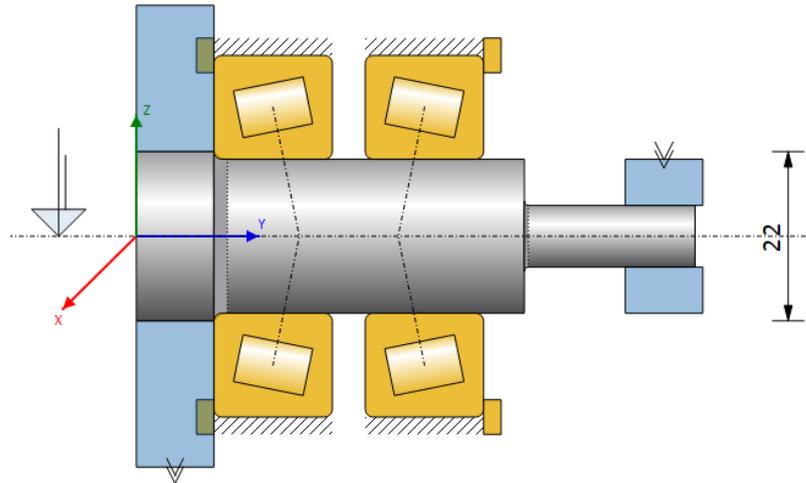


Figura 5.13: Modelo del árbol en KISSSoft.

Hecho esto, se ejecuta el cálculo. Se obtiene una serie de advertencias; la más importante es la que indica que los rodamientos no alcanzan su carga mínima, cosa que puede provocar un mal funcionamiento de estos por deslizamiento de los elementos rodantes en vez de rodadura. Este problema, por tanto, se solucionará empleando una tuerca KM para introducir precarga en el sistema.

Atendiendo a la duración de los rodamientos, se obtiene una duración de 248332 h en ambos, que se traduce a un valor superior a 10000 días de funcionamiento continuo; aunque este valor se verá algo reducido por la precarga, se puede afirmar que la vida de los rodamientos no supondrá un problema en el funcionamiento a largo plazo del tribómetro.

La velocidad de giro térmicamente admisible, teniendo en cuenta que el ambiente se encontrará a $20^{\circ}C$ y los rodamientos trabajarán a un máximo de $90^{\circ}C$, es de 2956,83 rpm . Este valor está un tanto ajustado, no obstante, el tribómetro trabajará en raras ocasiones en este régimen, y, cuando lo haga, requerirá un sistema de ventilación para evitar que la probeta se derrita. Por lo tanto, se supone válida.

En cuanto a resistencia mecánica del árbol, la máxima tensión equivalente que se desarrolla, como se observa en la la figura 5.14 toma un valor de $11,52 N/mm^2$

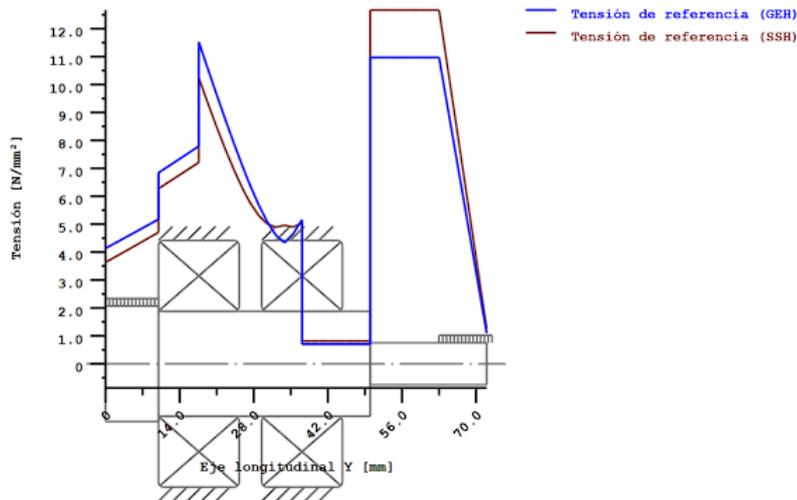


Figura 5.14: Gráfica de distribución de tensiones en el árbol.

Este valor tan reducido de tensión, muy por debajo del límite de fatiga del acero C45 ($S_e \approx 260 \text{ MPa}$), lleva a ignorar directamente el cálculo de fatiga, suponiendo infinita la duración del árbol debidas las bajas sollicitaciones a las que está sometido.

La deflexión máxima se da en el extremo donde irá sujeto el portadiscos, y su valor es de $1,39 \mu\text{m}$, un valor totalmente admisible. En el extremo del árbol donde va sujeto el acoplamiento, el valor es inferior a $1 \mu\text{m}$, que es prácticamente desestimable, pues el acoplamiento ROTEX-14 permite una desalineación axial de hasta $0,11 \text{ mm}$ a 3000 rpm . La desalineación admisible a esta velocidad es de $1,1^\circ$ o $0,019 \text{ rad}$, valor muy superior al existente ya que no supera $0,1 \text{ mrad}$.

Por lo tanto, observados todos estos valores, se puede afirmar que el árbol está correctamente dimensionado y su duración será muy superior al resto de elementos del tribómetro, como el servomotor. Los detalles del cálculo se pueden encontrar en el anejo 1 (pág. 139).

5.7 Cálculo del apriete árbol-disco

Para calcular el apriete entre el árbol y el disco, primero se han de calcular las presiones resultantes de las cargas que actúan sobre estos, de manera acorde a la norma DIN 7190[12]. Una vez obtenidas, se determinará el intervalo de tolerancia necesario en el ajuste, y, a partir de este, se seleccionará un ajuste estandarizado según la norma ISO 286[13].

En el ajuste aparecen presiones ocasionadas por los siguientes parámetros: el par torsor, fuerza radial, fuerza axial, momento asociado a la fuerza axial y fuerza centrífuga. Se dividen en cuatro componentes, que se han calculado mediante una hoja de cálculo a partir de los datos de las tablas 5.4 y 5.5, y se detallan a continuación.

La p_1 es debida a la fuerza axial y el par. En este caso, la fuerza axial no actúa de ninguna manera ya que el disco hace tope con el árbol.

$$p_1 = \frac{\sqrt{\left(\frac{T}{b}\right)^2 + F_a^2}}{2 \cdot \pi \cdot l \cdot b \cdot \sqrt{\mu_r^2 + \mu_t^2}} = 0,71 \text{ MPa} \quad (5.8)$$

La p_2 es debida a la fuerza radial, y toma el siguiente valor de forma aproximada:

$$p_2 = \frac{3 \cdot F_R}{8 \cdot l \cdot b} = 0,48 \text{ MPa} \quad (5.9)$$

La p_3 es debida al momento flector, causado por la aplicación de una fuerza axial descentrada; al existir un apoyo en la unión, esta no surte efecto alguno.

$$p_3 = \frac{9 \cdot M}{4 \cdot b \cdot l^2} = \frac{9 \cdot F_A \cdot d}{4 \cdot b \cdot l^2} = 0,0 \text{ MPa} \quad (5.10)$$

La p_4 es el resultado de la fuerza centrífuga, y toma un valor despreciable en elementos de poca masa, como se puede observar:

$$p_4 = \rho \cdot \left(\frac{3 + \nu_{cubo}}{8}\right) + (\omega \cdot c_{max})^2 = 0,0 \text{ MPa} \quad (5.11)$$

Hecho esto, se calcula la presión total, sumando las anteriores y aplicando un factor de seguridad;

$$p = (p_1 + p_2 + p_3 + p_4) \cdot n_s = 2,39 \text{ MPa} \quad (5.12)$$

Una vez conocida la presión total y las dimensiones y propiedades del conjunto eje-cubo, se puede calcular la interferencia necesaria.

$$\delta = p \cdot b \cdot \left[\frac{1}{E_{cubo}} \cdot \left[\frac{b^2 + c^2}{c^2 - b^2} + \nu_{cubo} \right] + \frac{1}{E_{eje}} \cdot \left[\frac{b^2 + a^2}{b^2 - a^2} + \nu_{eje} \right] \right] = 0,58 \mu m \quad (5.13)$$

Y a esta interferencia se añaden los efectos de la rugosidad absoluta de los dos materiales, obteniendo la interferencia real necesaria:

$$\delta_{real} = \delta + 0,8 \cdot (R_{Zcubo} + R_{Zeje}) = 5,80 \mu m \quad (5.14)$$

Hecho esto se selecciona un ajuste ISO 286 de agujero base, ya que estos ofrecen mayor versatilidad permitiendo realizar el agujero con una broca fija, acelerando el proceso.

Parámetro		Valor	
a	Radio interior del eje	0	mm
b	Radio exterior del eje	22	mm
c	Radio exterior del cubo	60	mm
l	Longitud de la unión	10	mm
T	Par a transmitir	0,5	Nm
F_t	Fuerza tangencial	100	N
F_r	Fuerza radial	100	N
F_a	Fuerza axial	0	N
M_a	Momento asociado a F_a	0	Nm
μ_l	Coef. de rozamiento longitudinal	0,07	—
μ_r	Coef. de rozamiento radial	0,06	—
ω	Velocidad de giro	3000	rpm
ρ	Densidad del cubo	2700	kg/m^3
n_s	Coef. de seguridad a adherencia	2	—
T_a	Temperatura ambiente	25	$^{\circ}C$

Tabla 5.4: Lista de parámetros del apriete.

Realizando una comprobación de manera rápida de las tensiones empleando una hoja de cálculo, se observa que para no superar el límite de fluencia del material del cubo, no se pueden superar los $22 \mu m$ de

Parámetro		Eje	Cubo	
Material		C45	AlMgSi	
S_{ut}	Límite de rotura	565	200	MPa
S_y	Límite elástico	310	160	MPa
E	Módulo de elasticidad	210000	70000	MPa
ν	Coef. de Poisson	0,30	0,26	—
α	Coeficiente de deflexión térmica	$12 \cdot 10^{-6}$	$23 \cdot 10^{-6}$	—
Acabado superficial		N6	N6	
R_a	Rugosidad media	0,80	0,80	μm
R_z	Rugosidad pico	3,20	3,20	μm

Tabla 5.5: Parámetros de los materiales del apriete.

interferencia. Por tanto, la suma de los dos intervalos de tolerancia deberá ser inferior a $22 - 5,80 = 16,20 \mu m$.

El ajuste más basto que cumple esta condición será un IT4-IT5, asignando el IT5 (el mayor) al agujero, que es el base, quedando como H5 ($0 : +9\mu m$). El eje, para cumplir con el ajuste mínimo de $5,80 \mu m$, deberá tener una d_i mayor o igual que $9 + 5,80 = 14,80 \mu m$, como por ejemplo el ajuste n4 ($15 \mu m$). Además, el ajuste **H5 n4** tiene un apriete máximo de $21 \mu m$, por lo que no se supera el límite de fluencia de los materiales.

Para el montaje de esta unión, se ha de utilizar una prensa. La fuerza mínima requerida por esta se calcula mediante la siguiente expresión:

$$F_m = \mu_l \cdot p \cdot \pi \cdot 2b \cdot l = 3072 N \quad (5.15)$$

Cabe destacar que para el cálculo se ha vuelto a calcular la presión empleando el apriete máximo ($21 \mu m$) mediante la ecuación 5.13. esta es la fuerza máxima absoluta que se podrá dar en el montaje, por lo que el valor real será menor en cualquier caso.

Una vez montados, y como se reflejará en el apartado de planos, es necesario comprobar la oscilación entre las dos piezas unidas por este montaje, ya que un valor elevado de oscilación puede suponer un grave problema para el funcionamiento del tribómetro y la vida útil de este.

5.8 Descripción de los procesos de fabricación

Este apartado tiene como objetivo la descripción justificativa de los procesos de fabricación. Para el planteamiento de estos procesos, se ha tenido en cuenta, desde el primer instante de la concepción y diseño de las piezas, que el tribómetro ha de ser fácil de fabricar, por lo que estos procesos son realizables en cualquier taller que tenga un torno y una fresadora básicos, a parte de una máquina FDM de bajo coste. Esto proporciona una gran versatilidad a la hora de la fabricación, pudiéndose fabricar el tribómetro incluso en un taller doméstico, disminuyendo los costes de producción y asegurando la capacidad de fabricación de este.

5.8.1 Escuadras

Las escuadras de la estructura, como se ha justificado anteriormente, se fabricarán mediante FDM (impresión 3D). Este proceso es relativamente sencillo, ya que se emplean máquinas de control numérico que, en combinación con el software adecuado, permiten pasar directamente desde el modelo CAD a la pieza en cuestión, con la mínima intervención del operario.

Para el caso en cuestión, se emplea el programa Ultimaker Cura. Los principales parámetros a editar son la altura de capa, el tipo y porcentaje de relleno (ya que las piezas rara vez se fabrican macizas para evitar problemas de deformación por dilatación térmica), las temperaturas de extrusor y plataforma y las velocidades de impresión y desplazamiento.

En este caso, para piezas funcionales realizadas en PLA, se ha elaborado un perfil de impresión 5.6 basado en la experiencia previa con las máquinas (Artillery Genius). Los parámetros son los siguientes:

Parámetro	Valor
Velocidad de impresión	50 <i>mm/s</i>
Velocidad de desplazamiento	100 <i>mm/s</i>
Temperatura del cabezal	205 °C
Temperatura de la plataforma	65 °C
Tipo de relleno	<i>Giroide</i>
Porcentaje de relleno	65 –
Altura de capa	0,16 <i>mm</i>

Tabla 5.6: Perfil de impresión para piezas funcionales.

5.8.2 Piezas metálicas

Las piezas metálicas, como pueden ser las existentes en el subsistema 2 (plataforma de ensayos) se realizarán mediante arranque de viruta convencional, empleándose torneado, fresado o taladrado principalmente y según convenga. La simplicidad de las geometrías permite la fabricación de estas piezas en cualquier taller convencional, como es el existente en la Universidad.

En el mecanizado por arranque de viruta, existen dos parámetros fundamentales para el correcto acabado de las piezas y durabilidad de las herramientas de corte, estos son la velocidad de corte (v_s) y la velocidad de avance (v_f), que habrá que escoger de forma acorde tanto al material de la herramienta de corte como de la pieza a mecanizar. Cabe destacar que la velocidad de avance depende de la velocidad de corte y de la herramienta empleada, por lo que en la tabla se recogerá el avance unitario, a partir del cual se podrá calcular la velocidad de avance en caso de desear realizar el programa CNC.

Material	v_s (m/min)	f_z (mm)
<i>Acero C45</i>	80	0,20
<i>Aluminio AlMgSi</i>	200	0,15

Tabla 5.7: Parámetros de corte para los diferentes materiales.

Las velocidades asignadas, al tratarse de máquinas herramienta convencionales sin control numérico, se conseguirán de la siguiente manera:

- Las velocidades de corte, asignando la velocidad de giro del cabezal de la máquina mediante la consulta de tablas que relacionan la velocidad de giro de este en *rpm* con la velocidad de corte en *m/min*.
- Las velocidades de avance, al tratarse de herramientas manuales, servirán de valor orientativo al operario, que se basará en su experiencia previa para lograr el equilibrio entre acabado superficial y celeridad de fabricación. En caso de realizarse mediante un torno de control numérico, se podrán programar.

A continuación se adjuntan imágenes de algunos ejemplos de mecanizado que se han dado en la obtención de las piezas del tribómetro.

En la la figura 5.15 se muestra la torreta en su etapa final de torneado, lista para pasar a la fresadora para realizar los agujeros de montaje, que permitirán unir el servomotor a la torreta, y la torreta a

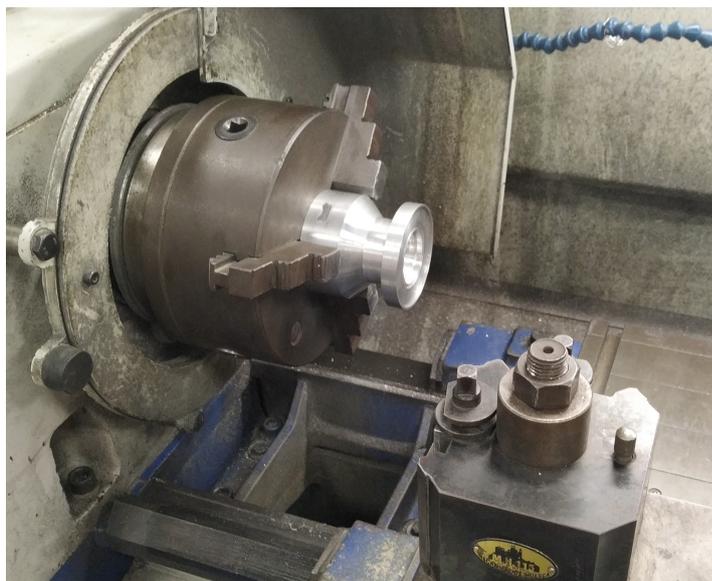


Figura 5.15: Torreta en la etapa final de torneado.

la plataforma de ensayos, y al taladro para abrir el orificio del puerto de engrase. Esta geometría ha sido obtenida por una combinación de tronzado, refrentado, ranurado, cilindrado y mandrinado.



Figura 5.16: Torreta en el taladro.

En la la figura 5.16 se observa la torreta, una vez finalizadas las etapas de fresado y torneado, montada en el taladro y sobre la que se está realizando el puerto de engrase.



Figura 5.17: Portabolas en el paso de roscado.

Existe una serie de piezas con roscas; parte de ellas, las que son concéntricas al eje de rotación (en piezas de revolución) y además tienen un gran diámetro o pasos no normales, se han realizado en el torno como se muestra en la la figura 5.17. Las roscas de menor tamaño se han realizado de forma manual con un macho, como se muestra en la la figura 5.18.



Figura 5.18: Roscado con macho.

En este caso particular, también se emplean métodos manuales que serían más costosos de realizar al tratarse de una máquina de la que

se van a fabricar pocas unidades. Por ejemplo, el chavetero del acoplamiento se realiza a mano mediante el uso de una lima.



Figura 5.19: Limado manual del chavetero.

6

Presupuesto

Índice

6.1 Análisis de viabilidad.	78
----------------------------------	----

Material electrónico			
Cantidad	Elemento	Precio unit. (€)	Subtotal (€)
1	Interruptor magnetotérmico GV2ME14	74,62	74,62
1	Interruptor automático ABB S201-C3	21,05	21,05
1	Fuente de alimentación 24V 5A	32,00	32,00
1	Regulador Traco Power TSR 2-2450	12,45	12,45
2	Carril DIN 500mm	4,12	8,24
4	Terminal conexión atornillado	1,05	4,20
1	Controlador SE Lexium 28	205,36	205,36
1	Servomotor SE BCH2 200W	525,35	525,35
2	Controlador TB6600	13,50	27,00
2	Motor stepper Nema 17-completar	11,85	23,70
1	ESP32-Devkit	7,95	7,95
1	Placa stripboard 220x10	17,96	17,96
1	Fungibles soldadura	15,00	15,00
1	Componentes pasivos	5,00	5,00
2	Soportes carril DIN para placa	1,80	3,60
1	40 Headers conexión macho	0,50	0,50
1	40 Headers conexión hembra	0,50	0,50
1	Conector acodado SCSI 50 pines	5,42	5,42
10	Conector hembra JST 4 pines	0,12	1,21
10	Conector macho JST 4 pines - con cable	0,05	0,50
30	Terminales crimpados 1,5mm2	0,05	1,56
20	Terminales crimpados 6mm2	0,03	0,65
1	Pantalla Nextion basic 3,2"	43,97	43,97
1	Módulo tarjeta SD	0,95	0,95
1	Soplador Delta electronics 108BFB	31,39	31,39
1	Sensor triaxial K3D60a-100N	1435,00	1435,00
1	Amplificador GSV-1A4 M12/2	695,00	695,00
1	Módulo conversor AD7606	15,41	15,41
1	Módulo conversor MAX31855	14,20	14,20
1	Termopar tipo K	1,79	1,79
1	Sensor KTR-50	40,83	40,83
TOTAL			3272,36 €

Material mecánico			
Cantidad	Elemento	Precio unit. (€)	Subtotal (€)
4	Pata M8	9,15	36,60
36	Tuerca perfil 40mm M8	1,06	38,16
36	Tornillo DIN912 M8x20 A2	0,54	19,44
14	Escuadra 40mm	3,52	49,28
4	Perfil aluminio 40x40 1000mm	28,31	113,24
3	Perfil aluminio 20x20 1000mm	8,00	24,00
4	Tapón perfil 40mm	1,11	4,44
2	Placa con patines 40x40mm	5,91	11,82
1	Tornillería	25,00	25,00
3	Bobina 750g PLA True black Smartfil	16,30	48,90
1	Conjunto 2 guías lineales HGR20 320mm	89,99	89,99
2	Cojinete KFL08	0,88	1,76
2	Acoplamiento para motor paso a paso	1,99	3,98
1	Husillo T8x8 300mm con tuerca	3,59	3,59
1	Husillo T8x1 300mm con tuerca	3,99	3,99
1	Tocho aluminio Ø85x150	30,00	30,00
1	Tocho acero Ø25x150	5,00	5,00
1	Plancha aluminio 304x210x15	30,00	30,00
1	Plancha aluminio 60x90x5	5,00	5,00
2	Rodamiento SKF 30204 J2/Q	10,15	20,30
1	Tuerca retención KM4	5,40	5,40
1	Arandela retención KM4	1,63	1,63
2	Junta tórica 40x44x2	1,56	3,12
1	Engrasador MT506 M6 45°	1,07	1,07
1	Retén radial doble labio 8x22x7	2,37	2,37
TOTAL			578,08 €

Mano de obra			
Concepto	€/hora	Horas	Subtotal
Desarrollo de electrónica	16,00	80	1280,00
Programación	16,00	80	1280,00
Mecanizado de piezas	20,00	40	800,00
Montaje	10,00	10	100,00
Desarrollo mecánico	16,00	75	1200,00
Modelado 3D	16,00	75	1200,00
Delineado de planos	16,00	50	800,00
Redacción del proyecto	16,00	150	2400,00
TOTAL		560	9060,00 €

Total del proyecto	
Concepto	Subtotal (€)
Material electrónico	3272,36
Material mecánico	578,08
Mano de obra	9060,00
TOTAL	12910,44 €

6.1 Análisis de viabilidad

En cuanto a viabilidad técnica, el tribómetro se ha concebido desde un primer instante teniendo en cuenta la simplicidad de la fabricación, por lo que su fabricación es totalmente viable, incluso en un taller simple con torno, fresadora e impresora 3D, ya que la mayoría de componentes son estandarizados, y los que se han de fabricar tienen un diseño simple.

Económicamente, el tribómetro también es viable, ya que su fabricación presenta un coste inferior a los 5000 €, dejando un amplio margen para los beneficios en caso de que se fabricara un volumen mayor de unidades. Por ejemplo, para la fabricación de 10 unidades, el coste unitario de producción de cada una será de 5430,44 €.

Comparando con la mayoría de tribómetros de estas características existentes en el mercado, que superan los 10000 €; este bajo coste facilitará en gran medida la competencia. De hecho, los tribómetros automatizados provenientes de China tienen un coste aproximado de 18000 €.

7

Código

Índice

7.1 Diagrama de flujo	81
7.2 Código.....	83

7.1 Diagrama de flujo

Para facilitar el desarrollo del programa, se traza un diagrama de flujo (fig. 7.1) que habrá de seguir el programa, de manera que se tiene una representación gráfica del funcionamiento de este, permitiendo una mejor estructuración de las tareas.

Esta representación, además, es útil para que una persona sin conocimientos en programación pueda entender el funcionamiento de la máquina.

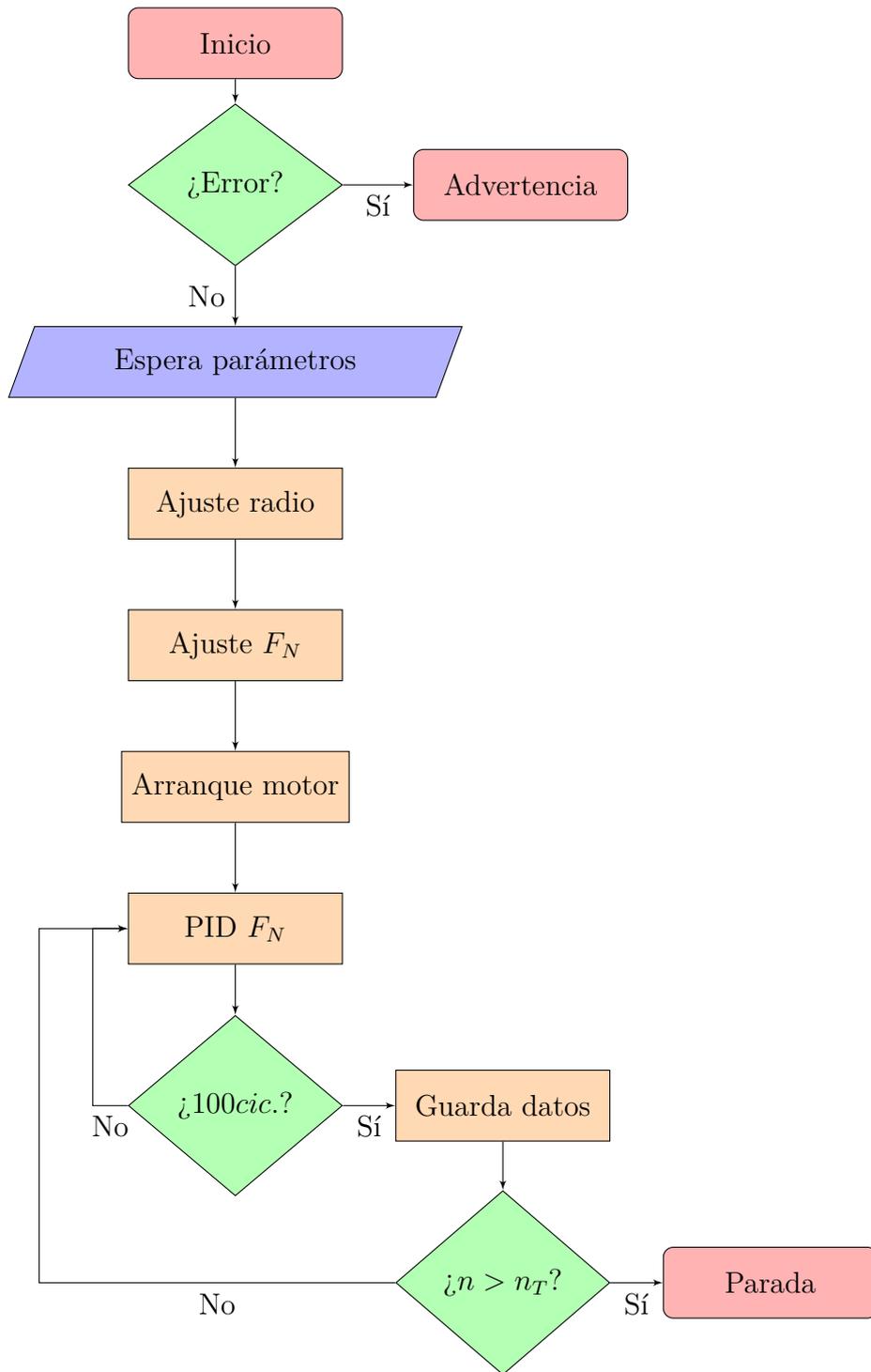


Figura 7.1: Diagrama de flujo del programa del tribómetro.

7.2 Código

Listing 7.1: Código del microcontrolador del tribómetro.

```

1 // #####
2 // # LIBRERIAS #
3 // #####
4
5 #include "FS.h"
6 #include "SD.h"
7 #include <SPI.h>
8
9 #include <PID_v2.h>
10 #include <HardwareSerial.h>
11
12 // #####
13 // # CLASES #
14 // #####
15
16 class PulseMotor {
17
18     private:
19         int GPIO_P;
20         int GPIO_D;
21         int GPIO_E;
22         int CHA;
23         int RES;
24         int DUT;
25
26     public:
27
28         // CONFIGURACION *****
29         void Init(int pul, int dir, int chan, int reso, int duty) ←
30         {
31             GPIO_P = pul;
32             GPIO_D = dir;
33             CHA = chan;
34             RES = reso;
35             DUT = duty;
36
37             // Configuracion
38             pinMode(GPIO_D, OUTPUT);
39             ledcSetup(CH A, 0, RES);
40             ledcAttachPin(GPIO_P, CH A);
41             ledcWrite(CH A, DUT);
42         }
43
44         //CAMBIO VELOCIDAD *****
45         void SetFreq(double freq) {
46             if (freq < 0) {
47                 digitalWrite(GPIO_D, LOW);
48             } else if (freq > 0) {
49                 digitalWrite(GPIO_D, HIGH);
50             }
51         }
52     };
53
54     };
55
56     };
57
58     };
59
60     };
61
62     };
63
64     };
65
66     };
67
68     };
69
70     };
71
72     };
73
74     };
75
76     };
77
78     };
79
80     };
81
82     };
83
84     };
85
86     };
87
88     };
89
90     };
91
92     };
93
94     };
95
96     };
97
98     };
99
100    };

```

```

50
51     ledcWriteTone(CHA, abs(freq));
52 }
53 void Disable() {
54     ledcDetachPin(GPIO_P);
55 }
56 };
57
58 // #####
59 // #   PARaMETROS ENSAYO   #
60 // #####
61
62 float rad, rpm, fn, cyc;
63
64 unsigned long  tini;
65 unsigned long  tfin;
66 unsigned long  telap;
67 float data[5];
68
69 // #####
70 // # DEFINICION DE VARIABLES #
71 // #####
72
73 // Variables PID actuador
74
75 int    ACT_FREQ = 0;
76 int    ACT_DUTY = 127;
77 int    ACT_CHAN = 0;
78 int    ACT_RESO = 8;
79 int    ACT_GPIO_PUL = 12;
80 int    ACT_GPIO_DIR = 27;
81 double ACT_Kp = 42.1875 * 4;
82 double ACT_Ki = 0.1646 * 6;
83 double ACT_Kd = 0;
84
85 PulseMotor ACT;
86 double ACT_Setpoint, ACT_Input, ACT_Output;
87 PID act_PID(&ACT_Input, &ACT_Output, &ACT_Setpoint, ACT_Kp, ←
            ACT_Ki, ACT_Kd, REVERSE);
88
89 // Variables PID bancada
90
91 int    BAN_FREQ = 0;
92 int    BAN_DUTY = 127;
93 int    BAN_CHAN = 1;
94 int    BAN_RESO = 8;
95 int    BAN_GPIO_PUL = 13;
96 int    BAN_GPIO_DIR = 33;
97 double BAN_Kp = 130.5 * 0.5 * 30;
98 double BAN_Ki = 0.33 * 0.5 * 30;
99 double BAN_Kd = 0;
100
101 PulseMotor BAN;
102 double BAN_Setpoint, BAN_Input, BAN_Output;

```

```

103 PID ban_PID(&BAN_Input, &BAN_Output, &BAN_Setpoint, BAN_Kp, ←
        BAN_Ki, BAN_Kd, REVERSE);
104
105 // Variables Lexium 28
106
107 int SER_FREQ = 0;
108 int SER_DUTY = 127;
109 int SER_CHAN = 2;
110 int SER_RESO = 8;
111 int SER_GPIO_PUL = 25;
112 int SER_GPIO_DIR = 26;
113
114 PulseMotor SER;
115
116 // Variables AD7606
117
118 #define AD_BUSY 18
119 #define AD_RESET 19
120 #define AD_CVST 21
121 #define AD_CS 22
122 #define AD_TOTAL_RAW_BYTES 16
123
124 SPISettings _spiSettings;
125
126 int bytesToRead = AD_TOTAL_RAW_BYTES;
127 uint8_t raw[AD_TOTAL_RAW_BYTES];
128 int16_t parsed[8];
129 float adval[8];
130 float past = 0;
131
132 double calar [8][2] = {{0.00305175, 0},
133     {0.00305175, 0},
134     {0.00305175, 0},
135     {0.00304, -0.60496},
136     {0.00305175, 0},
137     {0, 0},
138     {0, 0},
139     {0, 0}
140 };
141
142 // ***** Puerto serie Nextion *****
143
144 int SER_GPIO_TX = 17;
145 int SER_GPIO_RX = 16;
146
147 String inChar;
148 String inputString = " "; // Datos de entrada
149 int val = 0; // variable to store the ←
        read value
150
151 bool Listen = false; // Si no esta en true, no llena la ←
        inputString
152 bool Comp = false; // booleano para saber si ←
        ha recibido Comando o no
153 String Com = " "; // Nombre del Comando

```

```

154 float Par; // Parametro del Comando
155
156 char startChar = '<'; // Caracter de Compienzo de Comando
157 char endChar = '>'; // Caracter de final de Comando
158 int espacio = 0; // variable para detectar el espacio
159
160 // ***** Tarjeta SD *****
161
162 #define SD_MISO 15
163 #define SD_MOSI 2
164 #define SD_SCK 14
165 #define SD_CS 4
166 char FileName[16];
167 int startTime = 0;
168
169 SPIClass spi;
170
171 // ***** LOOP NATIVO FIJO *****
172 const unsigned long AloopPeriod = 50; //milliseconds
173 static unsigned long AlastLoop = 0;
174
175 const unsigned long BloopPeriod = 100; //milliseconds
176 static unsigned long BlastLoop = 0;
177
178 // ***** Bucle 2 *****
179
180 TaskHandle_t Task1;
181
182
183
184
185
186 // #####
187 // # INICIALIZACIoN DE CompONENTES #
188 // #####
189
190 void setup()
191 {
192 // ***** Bucle 2 *****
193
194 // xTaskCreatePinnedToCore(
195 // loop2, // name of the task function
196 // "buttonCheck", // name of the task
197 // 10000, // memory assigned for the task
198 // NULL, // Par to pass if any
199 // 1, // priority of task, starting from 0(↔
Highestpriority) *IMPORTANT*( if set to 1 and there is ↔
no activity in your 2nd loop, it will reset the esp32)
200 // &Task1, // Reference name of taskHandle ↔
variable
201 // 0); // choose core (0 or 1)
202
203 delay(50);
204 // ***** Puerto Serie *****
205 Serial.begin(115200);

```

```
206     delay(50);
207     Serial2.begin(115200, SERIAL_8N1, SER_GPIO_RX, SER_GPIO_TX);
208     inputString.reserve(100);
209
210     delay(50);
211     Serial2.print("page 0"); // pagina de checkeo
212     Serial2.write(0xff);
213     Serial2.write(0xff);
214     Serial2.write(0xff);
215     Serial2.flush();
216     delay(500);
217
218     Serial2.print("page 9"); // pagina de checkeo
219     Serial2.write(0xff);
220     Serial2.write(0xff);
221     Serial2.write(0xff);
222     Serial2.flush();
223
224     delay(5);
225
226     Serial.println("[1/5] Puerto serie OK");
227     delay(50);
228
229     // ***** AD7606 *****
230
231     pinMode(AD_BUSY, INPUT);
232     pinMode(AD_RESET, OUTPUT);
233     pinMode(AD_CVST, OUTPUT);
234     pinMode(AD_CS, OUTPUT);
235
236     digitalWrite(AD_CVST, HIGH);
237     digitalWrite(AD_CS, HIGH);
238     digitalWrite(AD_RESET, HIGH);
239     delay(250);
240     digitalWrite(AD_RESET, LOW);
241     delay(250);
242     digitalWrite(AD_RESET, HIGH);
243     delay(250);
244     digitalWrite(AD_RESET, LOW);
245     delay(250);
246
247     Serial.println("[1/5] Conversor A-D OK");
248     delay(50);
249
250     // ***** GPIO Actuador *****
251
252     //ACT.Init(ACT.GPIO_PUL, ACT.GPIO_DIR, ACT.CHAN, ACT.RESO, ←
253             ACT.DUTY);
254     // (Se inicia puntualmente ya que solo hay 2 timers para el ←
255         PWM)
256
257     act_PID.SetMode(AUTOMATIC);
258     act_PID.SetOutputLimits(-32000, 32000); // 300 rpm o 5mm/s. ←
259         Hay que probar con mas.
```

```

257     act_PID.SetSampleTime(5); // Se podra sustituir por ↔
        loopPeriod?
258
259     Serial.println("[3/5] Control actuador OK");
260     Serial2.print("act.txt=\"Control actuador: OK\"");
261     Serial2.write(0xff);
262     Serial2.write(0xff);
263     Serial2.write(0xff);
264     Serial2.flush();
265     delay(50);
266
267     // ***** GPIO Bancada *****
268
269     //BAN.Init(BAN_GPIO_PUL, BAN_GPIO_DIR, BAN_CHAN, BAN_RESO, ↔
        BANDUTY);
270     // (Se inicia puntualmente ya que solo hay 2 timers para el ↔
        PWM)
271
272     ban_PID.SetMode(AUTOMATIC);
273     ban_PID.SetOutputLimits(-32000, 32000); // 300 rpm o 40mm/s.↔
        Hay que probar con mas.
274     ban_PID.SetSampleTime(5); // Se podra sustituir por ↔
        loopPeriod?
275
276     Serial.println("[4/5] Control bancada OK");
277     Serial2.print("ban.txt=\"Control bancada: OK\"");
278     Serial2.write(0xff);
279     Serial2.write(0xff);
280     Serial2.write(0xff);
281     Serial2.flush();
282     delay(50);
283
284     // ***** Tarjeta SD *****
285
286     spi = SPIClass(HSPI);
287     spi.begin(SD_SCK, SD_MISO, SD_MOSI);
288
289     pinMode(SD_CS, OUTPUT);
290
291     if (!SD.begin(SD_CS, spi)) {
292         Serial.println("[5/5] ERROR SD");
293         Serial2.print("sdc.txt=\"Adaptador SD: ERROR\"");
294         Serial2.write(0xff);
295         Serial2.write(0xff);
296         Serial2.write(0xff);
297     } else {
298
299         uint8_t cardType = SD.cardType();
300
301         if (cardType == CARD_NONE) {
302             Serial.println("Inserta la tarjeta SD");
303             return;
304         }
305
306         Serial.print("Tipo de tarjeta SD: ");

```

```

307     if (cardType == CARD_MMC) {
308         Serial.println("MMC");
309     } else if (cardType == CARD_SD) {
310         Serial.println("SDSC");
311     } else if (cardType == CARD_SDHC) {
312         Serial.println("SDHC");
313     } else {
314         Serial.println("Desconocido");
315     }
316
317     Serial.println("[5/5] Adaptador tarjeta SD OK");
318     Serial2.print("sdc.txt=\"Adaptador SD: OK\"");
319     Serial2.write(0xffff);
320     Serial2.write(0xffff);
321     Serial2.write(0xffff);
322     delay(100);
323
324     digitalWrite(AD_RESET, HIGH);
325     delay(250);
326     digitalWrite(AD_RESET, LOW);
327     delay(250);
328     digitalWrite(AD_RESET, HIGH);
329     delay(250);
330     digitalWrite(AD_RESET, LOW);
331     delay(250);
332
333     delay(5000);
334
335     Serial2.print("page 1"); // Tribometro listo
336     Serial2.write(0xffff);
337     Serial2.write(0xffff);
338     Serial2.write(0xffff);
339     Serial2.flush();
340 }
341 }
342
343 // #####
344 // #          SUPERLOOP          #
345 // #####
346
347 bool Working = false;
348
349 void loop() // Core 1
350 {
351     SerialListen();
352     //AdRead();
353     delay(200);
354 }
355
356 // #####
357 // #          FUNCIONES AD7606          #
358 // #####
359
360 void AdRead()
361 {

```

```

362     digitalWrite(SD_CS, HIGH);
363     // int i = 0;
364     digitalWrite(AD_CVST, LOW);
365     delayMicroseconds(2);
366     digitalWrite(AD_CVST, HIGH);
367     delayMicroseconds(350); // Esperamos a que se realice ←
                             la conversion
368     spi.beginTransaction(SPISettings(115200, MSBFIRST, SPI_MODE2←
                             ));
369     digitalWrite(AD_CS, LOW);
370     while (bytesToRead > 0) { // Lectura del bus SPI
371         raw[AD_TOTAL_RAW_BYTES - bytesToRead] = spi.transfer(0x00)←
                             ;
372         bytesToRead--;
373     }
374     digitalWrite(AD_CS, HIGH);
375     spi.endTransaction(); // Final de la lectura
376
377     bytesToRead = AD_TOTAL_RAW_BYTES; // Reiniciamos el contador←
                             de bytes
378
379
380     parsed[0] = (raw[0] << 8) + raw[1];
381     parsed[1] = (raw[2] << 8) + raw[3];
382     parsed[2] = (raw[4] << 8) + raw[5];
383     parsed[3] = (raw[6] << 8) + raw[7];
384     parsed[4] = (raw[8] << 8) + raw[9];
385     parsed[5] = (raw[10] << 8) + raw[11];
386     parsed[6] = (raw[12] << 8) + raw[13];
387     parsed[7] = (raw[14] << 8) + raw[15];
388
389     for (int i = 0; i < 8 ; i++) {
390         adval[i] = (float)parsed[i] * calar[i][0] + calar[i][1];
391
392         if (abs(adval[i]) > 100) { // Si pasamos de 100N, se ←
                                 retira el pin.
393             Serial.println("Sobrecarga");
394             SER.Disable();
395             ACT.SetFreq(-25000);
396             delay(3000);
397             ACT.Disable();
398             ACT_Setpoint = 0;
399             Working = false;
400
401             MoverDisco(45, 0.010);
402         }
403     }
404     adval[1] = -adval[1];
405     // Serial.println(adval[1],3);
406 }
407
408
409 // #####
410 // # FUNCIONES TARJETA SD #
411 // #####

```

```

412
413 void writeFile(fs::FS &fs, const char * path, const char * ←
      message) {
414   Serial.printf("Writing file: %s\n", path);
415
416   File file = fs.open(path, FILE_WRITE);
417   if (!file) {
418     Serial.println("Failed to open file for writing");
419     return;
420   }
421   if (file.print(message)) {
422     Serial.println("File written");
423   } else {
424     Serial.println("Write failed");
425   }
426   file.close();
427 }
428
429 void appendFile(fs::FS &fs, const char * path, const char * ←
      message) {
430   // Serial.printf("Appending to file: %s\n", path);
431
432   File file = fs.open(path, FILE_APPEND);
433   if (!file) {
434     // Serial.println("Failed to open file for appending");
435     return;
436   }
437   if (file.print(message)) {
438     // Serial.println("Message appended");
439   } else {
440     // Serial.println("Append failed");
441   }
442   file.close();
443 }
444
445 // #####
446 // #   FUNCIONES P.SERIE   #
447 // #####
448
449 void SerialListen()
450 {
451   while (Serial2.available() > 0) {
452
453     char inChar = (char)Serial2.read();
454     //Serial.println(inChar);
455
456     if ( inChar != endChar && Listen == true ) {           //Si ←
457         se ha empezado la linea , a ade bits a la entrada.
458         inputString += inChar;
459     } else if (inChar == endChar) {                         // Si ←
460         detecta el caracter de corte , para de leer
461         inputString.trim();                                 // ←
462         Quita los espacios de la string – IMPORTANTE: al ←
463         repetir Comandos, hay un espacio al principio ( ←
464         inputString = " " )

```

```

460     espacio = inputString.indexOf(' '); // ←
        Detectamos la posición del espacio dentro del ←
        Comando
461
462     Par = inputString.substring(espacio, inputString.length←
        ()).toFloat();
463     Com = inputString.substring(0, espacio);
464
465     inputString = " ";
466     Listen = false;
467     Comp = true;
468 }
469 if ( inChar == startChar ) { // ←
        Empieza la línea
470     Listen = true;
471 }
472 }
473
474 if (Serial2.available() < 1 && Comp == true) {
475
476     // PARO DEL ENSAYO
477     if (Com == "stop") {
478         SER.Disable();
479         ACT.SetFreq(-25000);
480         delay(3000);
481         ACT.Disable();
482         ACT_Setpoint = 0;
483         Working = false;
484
485         MoverDisco(45, 0.010);
486
487         Serial.println("Ensayo detenido");
488         Serial.flush();
489
490         ESP.restart();
491     }
492
493     // AJUSTE DE LA FUERZA
494     else if (Com == "Set") {
495         Serial.println("Fuerza recibida.");
496         Serial.flush();
497         fn = Par;
498         ACT_Setpoint = -Par;
499         Serial2.print("page 4"); // siguiente página
500         Serial2.write(0xff);
501         Serial2.write(0xff);
502         Serial2.write(0xff);
503     }
504
505     else if (Com == "R") {
506         Serial.println("Radio recibido.");
507         Serial.flush();
508         MoverDisco(Par, 0.010);
509         rad = Par;
510         Serial2.print("page 3"); // siguiente página

```

```

511     Serial2.write(0xffff);
512     Serial2.write(0xffff);
513     Serial2.write(0xffff);
514     Serial2.flush();
515 }
516
517 else if (Com == "maxcicles") {
518     Serial.println("Ciclos recibidos.");
519     Serial.flush();
520     cyc = Par;
521     Serial2.print("page 5"); // siguiente pagina
522     Serial2.write(0xffff);
523     Serial2.write(0xffff);
524     Serial2.write(0xffff);
525 }
526
527 else if (Com == "run") {
528     rpm = Par;
529     past = fn;
530
531     char first[10];
532     char *second = ".txt";
533     ltoa(millis(), first, 10);
534     strcpy(FileName, "/");
535     strcat(FileName, first);
536     strcat(FileName, second);
537
538     char intro[250];
539     memset(intro, '\0', sizeof(intro));
540     strcat(intro, "*****\n");
541     strcat(intro, "* PIN-ON-DISK *\n");
542     strcat(intro, "*****\n\n");
543     strcat(intro, "radius = ");
544     char Trad[6];
545     dtostrf(rad, 6, 2, Trad);
546     strcat(intro, Trad);
547     strcat(intro, "\nrpm = ");
548     char Trpm[4];
549     dtostrf(rpm, 4, 0, Trpm);
550     strcat(intro, Trpm);
551     strcat(intro, "\nforce = ");
552     char Tfn[6];
553     dtostrf(fn, 6, 2, Tfn);
554     strcat(intro, Tfn);
555     strcat(intro, "\ncycles = ");
556     char Tcyc[8];
557     dtostrf(cyc, 8, 0, Tcyc);
558     strcat(intro, Tcyc);
559     strcat(intro, "\n*****\n");
560     strcat(intro, "datafile ");
561     strcat(intro, FileName);
562     strcat(intro, "\n*****\n");
563     strcat(intro, "time cycles Fx Fy Fz Fr mu\n");
564
565

```

```

566     writeFile(SD, FileName, intro);
567
568     Working = true;
569     Serial.println("Ensayo en marcha.");
570     Comp = false;
571     inChar = ' ';
572     Serial2.print("page 6"); // siguiente pagina
573     Serial2.write(0xffff);
574     Serial2.write(0xffff);
575     Serial2.write(0xffff);
576     Ensayo();
577 }
578
579 // Final de la lista de Comandos
580 Comp = false;
581 inChar = ' ';
582 }
583 }
584
585 float ExpFil(float lectura, float pastInput, float alpha) //←
    Filtro exponencial
586 {
587     float out;
588     out = pastInput + alpha * (lectura - pastInput); //filtrado ←
        exponencial
589     return out;
590 }
591
592 void MoverDisco(float r, float tol) {
593     int BC = 0;
594     BAN.Init(BAN_GPIO_PUL, BAN_GPIO_DIR, BAN_CHAN, BAN_RESO, ←
        BAN_DUTY); // Inicializa el control del motor
595     BAN_Setpoint = r; // Convertir el radio a bits
596     while (BC < 5) {
597         AdRead();
598         BAN_Input = adval[3]; // Lectura del sensor
599         ban_PID.Compute(); // Calculo de la velocidad
600         BAN.SetFreq(BAN_Output); // Configuracion de la velocidad
601         BC++;
602         // Serial.println(abs(BAN_Input - BAN_Setpoint));
603         if (abs(BAN_Input - BAN_Setpoint) > tol) {
604             BC = 0;
605         }
606         while (millis() - BlastLoop < BloopPeriod) {
607             //Espera hasta que pase el tiempo fijo para el loop.
608         }
609         BlastLoop = millis();
610     }
611     BAN.Disable();
612     return;
613 }
614
615 void Ensayo() { // HAY QUE ADAPTAR LAS FUNCIONES DEL PROGRAMA ←
    ANTIGUO!

```

```

616 //          → Lectura del ADC, ahora lo hace para ↔
        las 3 componentes a la vez
617 //          → Filtrado exponencial FIR
618 //          → Cambio de velocidad del Stepper
619 //          → Retirar el pin con un final de ↔
        carrera? Hay que ver si quedan pines...
620 //          → A adir la escritura a la SD cada ↔
        cierta cantidad de ciclos , en el CORE 1
621 ACT.Init(ACT_GPIO_PUL, ACT_GPIO_DIR, ACT_CHAN, ACT_RESO, ↔
        ACT_DUTY);
622 double tol = 0.10;
623 bool Trans = true;
624 int ContTrans = 0;
625 int sdi = 0;
626
627 while (Working == true) {
628     //2 - PASO A REGIMEN FIJO
629
630     while ( (abs(ACT_Setpoint - ACT_Input) < tol) && (Trans ==↔
        true)) // Si el error es menor que la tolerancia , ↔
        sigue midiendo.
631     {
632         AdRead();
633         ACT_Input = adval[1];
634         ACT_Input = ExpFil(ACT_Input, past, 0.25);
635         past = ACT_Input;
636         act_PID.Compute();
637         ACT.SetFreq(ACT_Output);
638
639         ContTrans++;
640         //Serial.println(ContTrans);
641         if ( ContTrans > 50 )
642         {
643             // Ponemos en marcha el servomotor.
644             SER.Init(SER_GPIO_PUL, SER_GPIO_DIR, SER_CHAN, ↔
                SER_RESO, SER_DUTY);
645             SER.SetFreq(rpm * 10);
646             startTime = millis();
647             //Pasamos al PID de regimen fijo.
648             Trans = false;
649             break;
650         }
651     }
652
653     ContTrans = 0; // Si sale del bucle anterior, reinicia el ↔
        contador.
654     // esto se contempla por si hay sobreoscilaciones.
655
656     //-----
657     // 1 - PID TRANSITORIO - Con el disco parado.
658     if (Trans == true)
659     {
660         AdRead();
661         ACT_Input = adval[1];
662         ACT_Input = ExpFil(ACT_Input, past, 0.25);

```

```

663     Serial.println(ACT_Input);
664     past = ACT_Input;
665
666     while (ACT_Input > -0.5)
667     {
668         ACT.SetFreq(15000); // Mientras no haya contacto, ←
                             movimiento rap do.
669         AdRead();
670         ACT_Input = adval[1];
671         ACT_Input = ExpFil(ACT_Input, past, 0.25);
672         past = ACT_Input;
673     }
674     act_PID.Compute();
675     ACT.SetFreq(ACT_Output);
676 }
677 //-----
678
679
680 //-----
681 // 3 - PID FIJO - Con el ensayo en marcha.
682 if (Trans == false)
683 {
684     AdRead();
685
686     Serial.print(adval[1]);
687     Serial.print(" , ");
688     Serial.println(String(millis() / 1000.0));
689     ACT_Input = adval[1];
690     ACT_Input = ExpFil(ACT_Input, past, 0.015);
691     past = ACT_Input;
692     AdRead();
693
694     Serial.print(adval[1]);
695     Serial.print(" , ");
696     Serial.println(String(millis() / 1000.0));
697     ACT_Input = adval[1];
698     ACT_Input = ExpFil(ACT_Input, past, 0.015);
699     past = ACT_Input;
700     AdRead();
701     ACT_Input = adval[1];
702     ACT_Input = ExpFil(ACT_Input, past, 0.015);
703     past = ACT_Input;
704
705     Serial.print(adval[1]);
706     Serial.print(" , ");
707     Serial.println(String(millis() / 1000.0));
708
709     act_PID.SetTunings(32, 0.6, 0); // ***** FALTA ←
                                     AJUSTAR (aunque funciona decentemente) *****
710
711     act_PID.Compute();
712     ACT.SetFreq(ACT_Output);
713
714     // Guardado de datos en la tarjeta SD.

```

```

715 // Es importante que SoLO ejecutemos aqui la preparacion↵
       de la string de datos. El grabado a
716 // la tarjeta SD se realizara en una Task asignada al ↵
       otro nucleo ( Core 0?).
717 sdi++;
718 if (sdi == 100) {
719     char datos[250];
720     char cycles[15];
721     char Fx[8];
722     char Fy[8];
723     char Fz[8];
724     char Fr[8];
725     char mu[8];
726     int n = 0;
727     memset(datos, '\0', sizeof(datos));
728     ltoa(millis() - startTime, datos, 10);
729     strcat(datos, " ");
730     n = (millis() - startTime) * rpm / 60000;
731     ltoa(n, cycles, 10);
732     strcat(datos, cycles);
733     strcat(datos, " ");
734     dtostrf(adval[0], 3, 2, Fx);
735     strcat(datos, Fx);
736     strcat(datos, " ");
737     dtostrf(adval[2], 3, 2, Fy);
738     strcat(datos, Fy);
739     strcat(datos, " ");
740     dtostrf(adval[1], 3, 2, Fz);
741     strcat(datos, Fz);
742     strcat(datos, " ");
743     dtostrf(sqrt(pow(adval[0], 2) + pow(adval[2], 2)), 3, ↵
       2, Fr);
744     strcat(datos, Fr);
745     strcat(datos, " ");
746     dtostrf(abs(sqrt(pow(adval[0], 2) + pow(adval[2], 2)) ↵
       / adval[1]), 3, 2, mu);
747     strcat(datos, mu);
748     strcat(datos, "\n");
749
750     Guarda(datos);
751
752     // PING PANTALLA
753
754     Serial2.print("p[6].fnor.txt=\"Fn: " + String(Fz) + " ↵
       N\"");
755     Serial2.write(0xff);
756     Serial2.write(0xff);
757     Serial2.write(0xff);
758     Serial2.print("p[6].froz.txt=\"Fr: " + String(Fr) + " ↵
       N\"");
759     Serial2.write(0xff);
760     Serial2.write(0xff);
761     Serial2.write(0xff);
762     Serial2.print("p[6].coef.txt=\"Mu: " + String(mu) + " ↵
       \"");

```

```

763     Serial2.write(0xff);
764     Serial2.write(0xff);
765     Serial2.write(0xff);
766     Serial2.print("p[6].fx.txt=\"Fx: " + String(Fx) + " N↵
        \"");
767     Serial2.write(0xff);
768     Serial2.write(0xff);
769     Serial2.write(0xff);
770     Serial2.print("p[6].fy.txt=\"Fy: " + String(Fy) + " N↵
        \"");
771     Serial2.write(0xff);
772     Serial2.write(0xff);
773     Serial2.write(0xff);
774     Serial2.print("p[6].fz.txt=\"Fz: " + String(Fz) + " N↵
        \"");
775     Serial2.write(0xff);
776     Serial2.write(0xff);
777     Serial2.write(0xff);
778     Serial2.print("p[6].ciclos.txt=\"Ciclos: " + String(↵
        cycles) + " \"");
779     Serial2.write(0xff);
780     Serial2.write(0xff);
781     Serial2.write(0xff);
782     Serial2.print("p[6].prog.val=" + String(int(n / float(↵
        cyc) * 100)));
783     Serial2.write(0xff);
784     Serial2.write(0xff);
785     Serial2.write(0xff);
786     Serial2.print("p[6].ens.txt=\" " + String(FileName) + ↵
        " \"");
787     Serial2.write(0xff);
788     Serial2.write(0xff);
789     Serial2.write(0xff);
790
791     if (n >= cyc) {
792         SER.Disable();
793         ACT.SetFreq(-25000);
794         delay(3000);
795         ACT.Disable();
796         ACT_Setpoint = 0;
797         Working = false;
798
799         MoverDisco(45, 0.010);
800
801         Serial.println("Ensayo detenido");
802         Serial.flush();
803
804         ESP.restart();
805     }
806     sdi = 0;
807 }
808
809
810 }
811 //_____

```

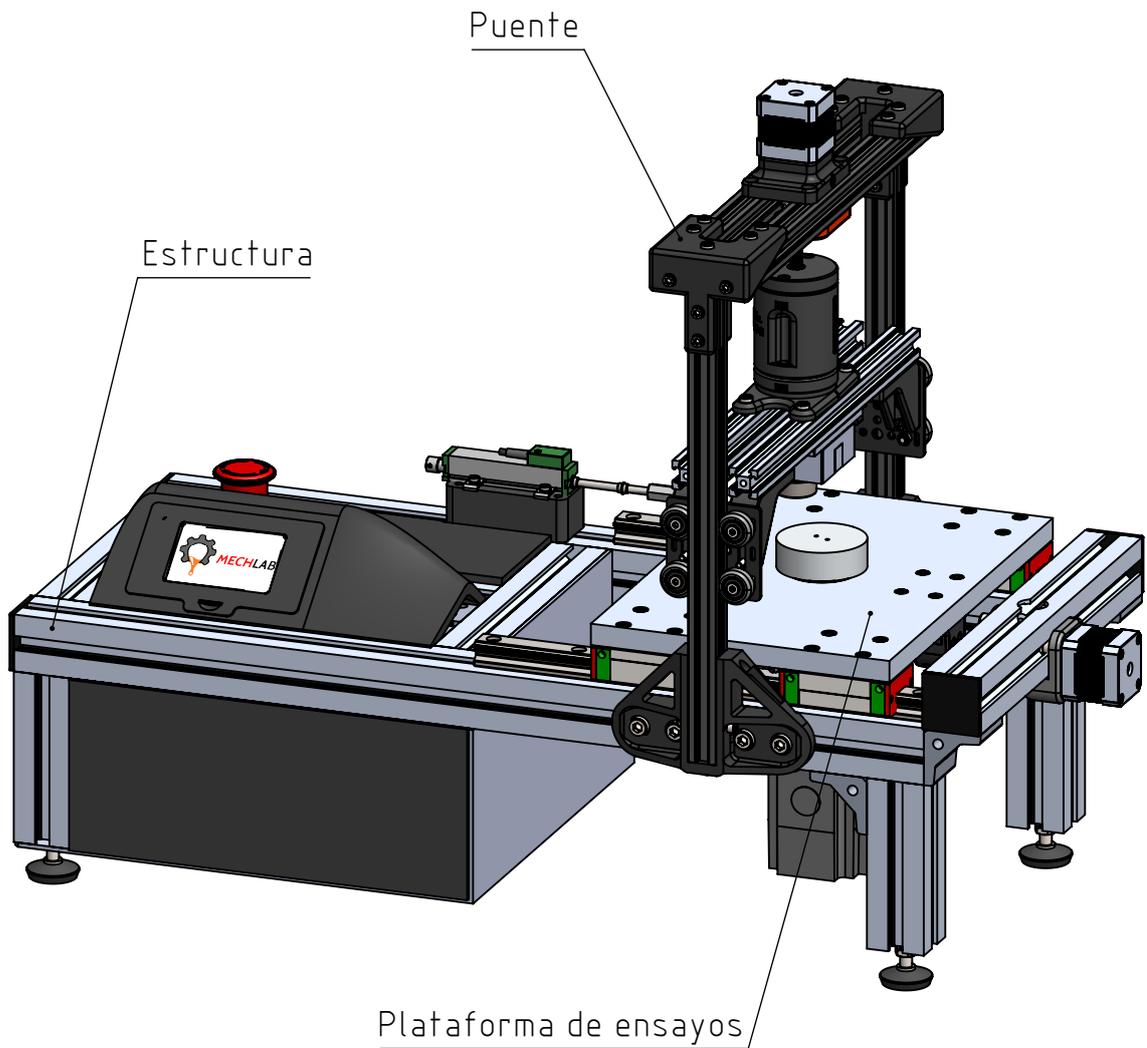
```
812
813     SerialListen();
814
815     while (millis() - AlastLoop < AloopPeriod) {
816         //Espera hasta que pase el tiempo fijo para el loop.
817     }
818     AlastLoop = millis();
819 }
820 }
821
822 void Guarda(char * d) {
823     appendFile(SD, FileName, d);
824     return;
825 }
```


8

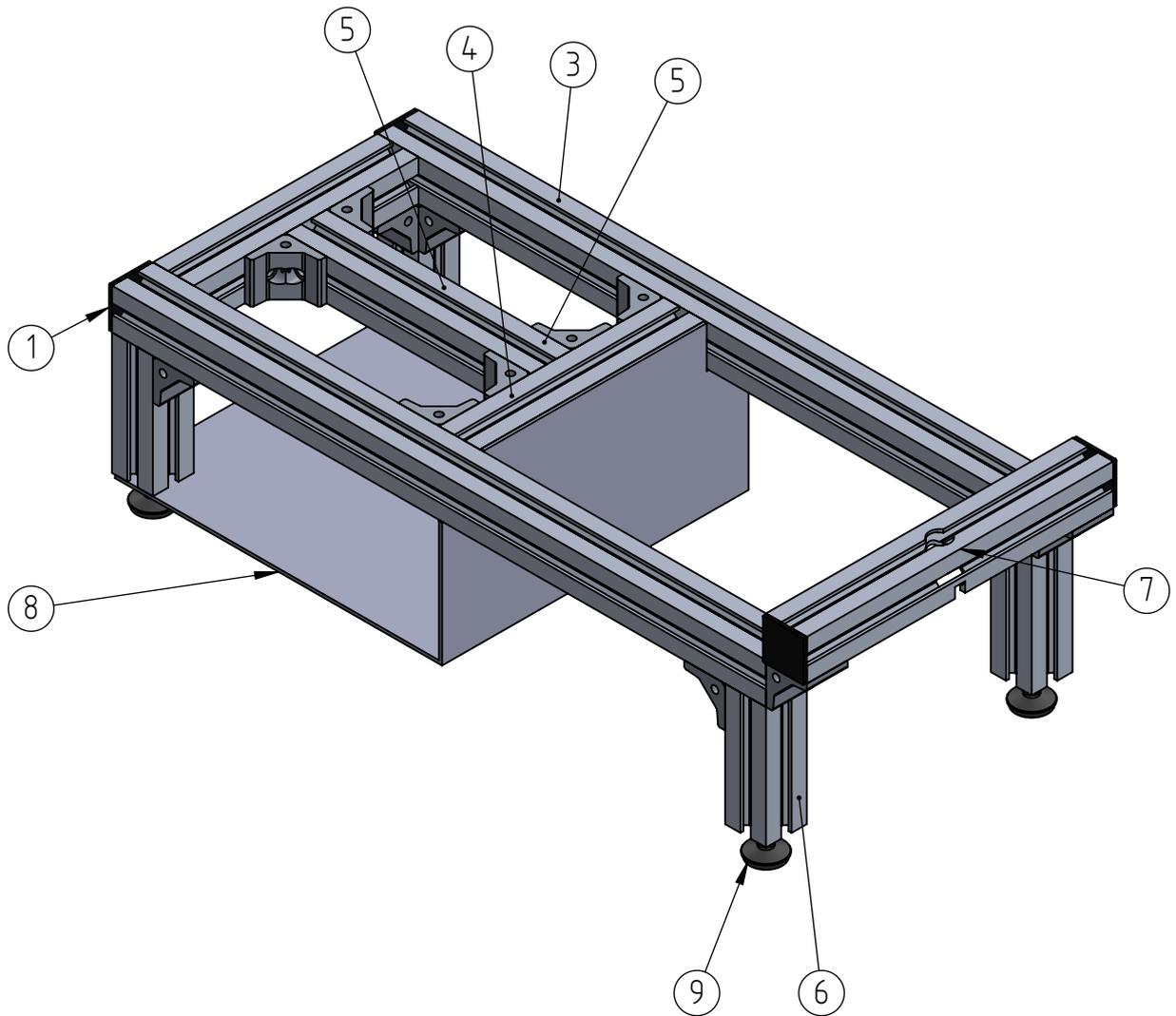
Planos

8.1 Índice de planos

1. Vista general
2. Estructura - vista general
3. Plataforma - vista general
 - a)* Torreta
 - b)* Soporte del rodamiento inferior
 - c)* Plataforma
 - d)* Árbol del portadiscos
 - e)* Portadiscos
4. Puente - vista general
 - a)* Soporte del portabolas
 - b)* Tuerca del portabolas
 - c)* Placa de anclaje del sensor
 - d)* Escuadra inferior (plano de inspección)
 - e)* Escuadra superior (plano de inspección)
 - f)* Escuadra media (plano de inspección)

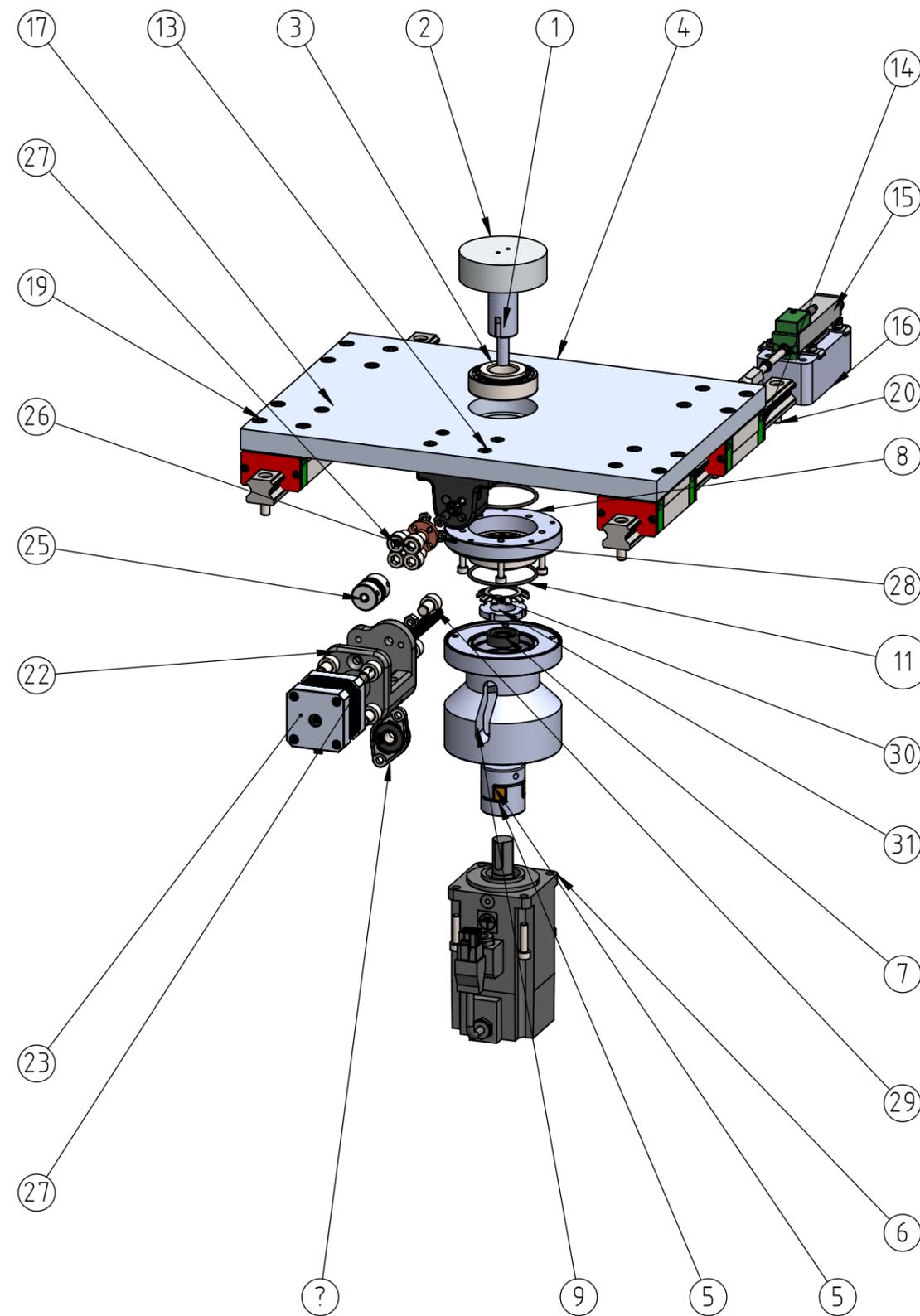


Diseño, desarrollo e instrumentación de un tribómetro para materiales poliméricos		Autor: Sergio García Carrasco		Fecha: 04/07/2022	
 UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA CAMPUS D'ALCOI	Escala: 1:5		Subconjunto: -		Nº Plano: 00.01
	Material: -		Denominación: Vista general		Tol. no indicadas: UNE 22768-m



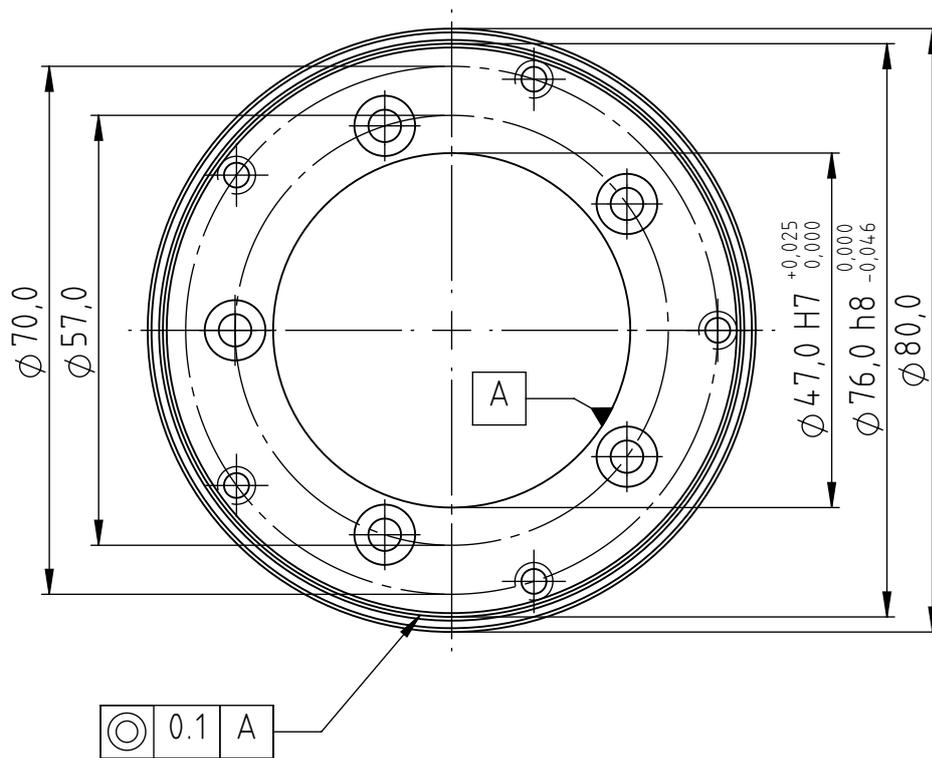
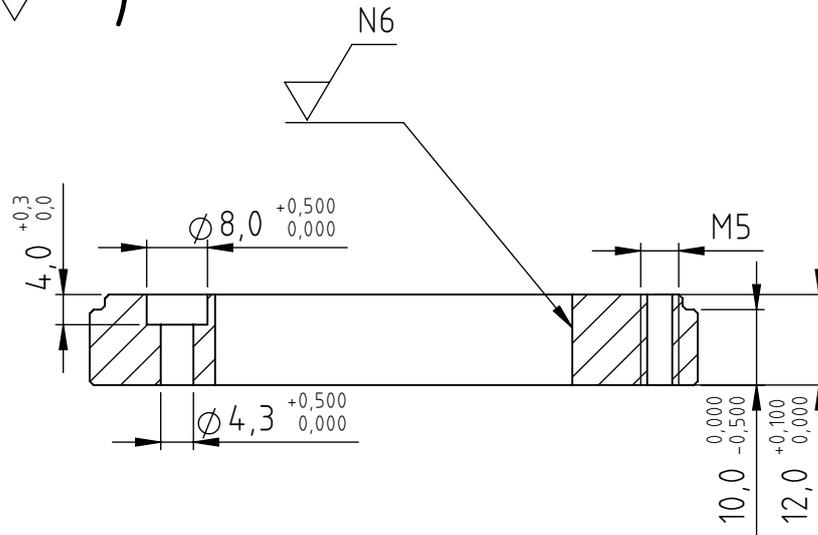
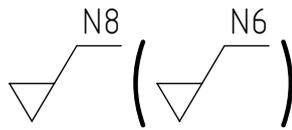
Nº GLOBO	N.º DE PIEZA	CANTIDAD
1	Tapón	4
2	Escuadra 40mm	14
3	Perfil-640mm	2
4	Perfil-220mm	2
5	Perfil-240mm	1
6	Perfil-120mm	4
7	Perfil-300mm	1
8	Caja de la electrónica	1
9	Pata M8	4

Diseño, desarrollo e instrumentación de un tribómetro para materiales poliméricos		Autor: Sergio García Carrasco		Fecha: 04/07/2022	
 UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA CAMPUS D'ALCOI	Escala: 1:5		Subconjunto: Estructura		Nº Plano: 01.00
	Material: -		Denominación: Vista general de la estructura		Tol. no indicadas: UNE 22768-m

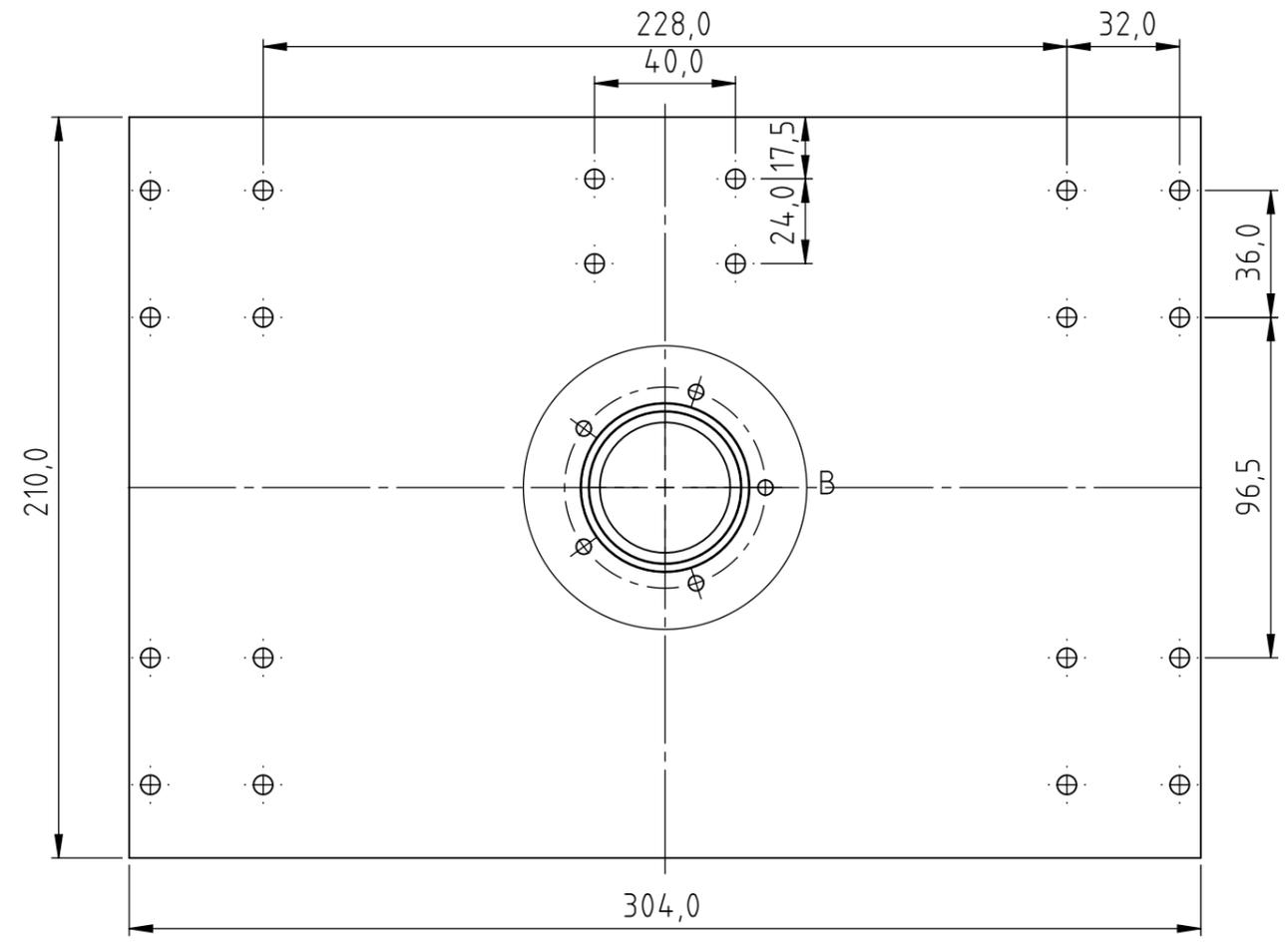
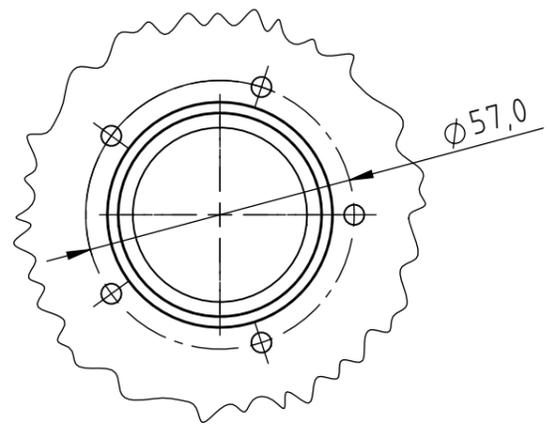
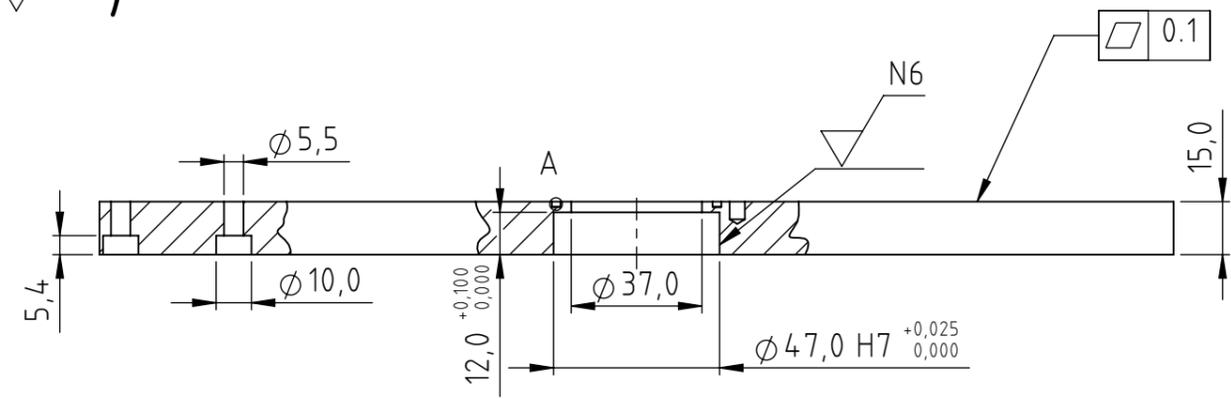
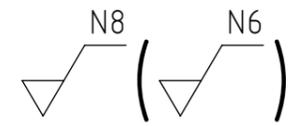
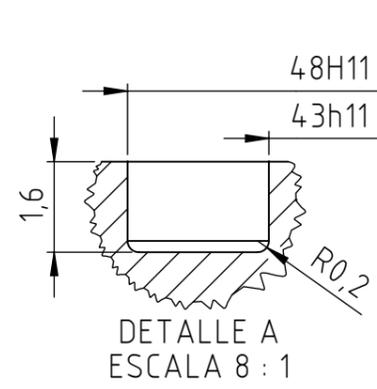


N.º GLOBO	N.º DE PIEZA	CANTIDAD
1	Eje del disco	1
2	Soporte del disco	1
3	SKF - 30204	2
4	Plataforma	1
5	Acoplamiento rotex-14	1
6	Servomotor BCH2	1
7	Retén radial 8x22x7mm	1
8	Soporte del rod. inferior	1
9	Castillo	1
10	Engrasador MT506	1
11	Junta tórica 44x2	2
12	DIN 912 M4 x 12 --- 12C	5
13	DIN 912 M5 x 20 --- 20C	13
14	Guía lineal HGH20	4
15	Sensor KTR-50	1
16	Soporte del sensor	1
17	Raíl HGR20R-20x320	2
18	Soporte de la tuerca	2
19	DIN 912 M5 x 20 --- 20N	16
20	DIN 912 M8x20	14
21	Tuerca M5	6
22	Soporte del motor paso a paso	1
23	Nema 17 17HS4401 SB	1
24	Cojinete KFL08	1
25	Acoplamiento elástico stepper	1
26	Tuerca husillo M8x8	1
27	DIN 912 M8 x 12 --- 12N	10
28	Tuerca M3	4
29	Husillo M8x8	1
30	Arandela MB4	1
31	Tuerca KM4	1

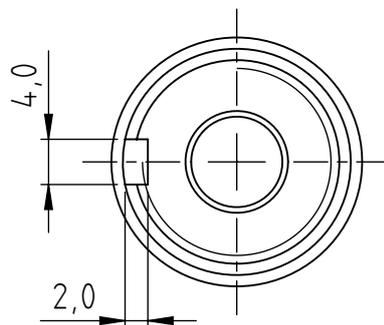
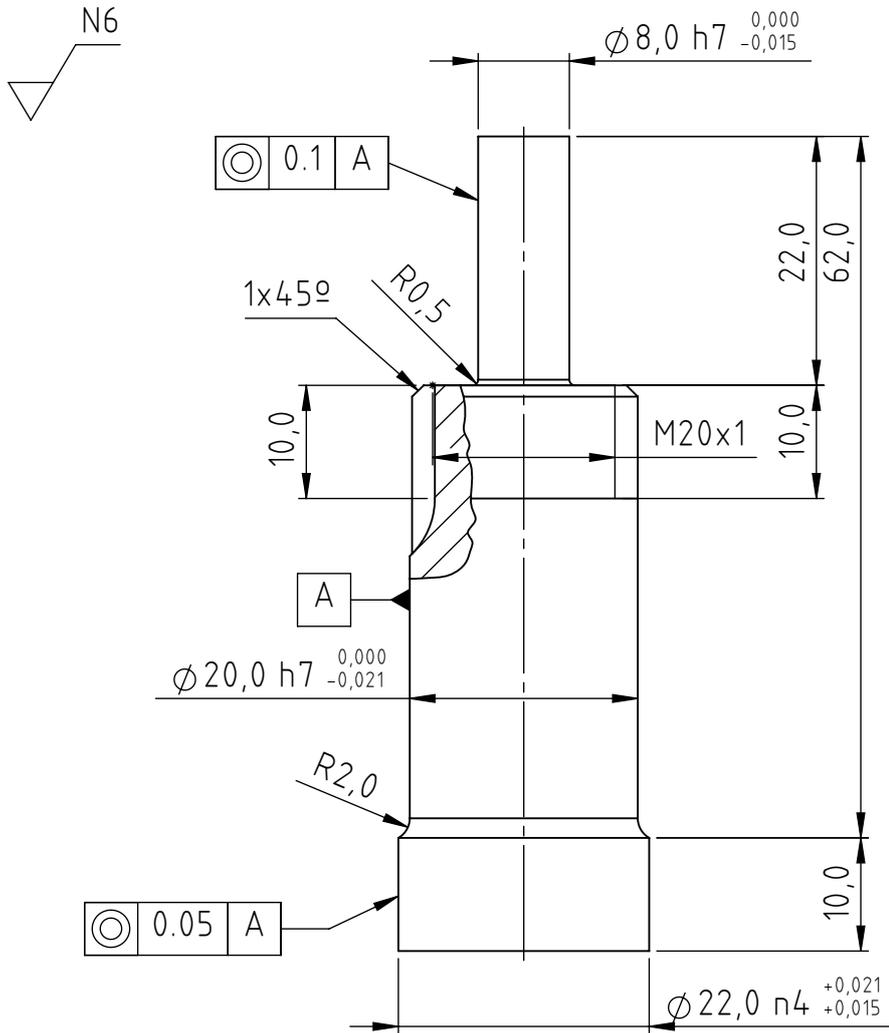
Diseño, desarrollo e instrumentación de un tribómetro para materiales poliméricos		Autor: Sergio García Carrasco		Fecha: 04/07/2022	
UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA		Escala: 1:4		Subconjunto: Plataforma de ensayos	
CAMPUS D'ALCOI		Material: -		Denominación: Vista general de la plataforma	
				Nº Plano: 02.00	
				Tol. no indicadas: UNE 22768-m	



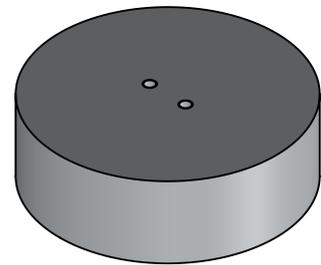
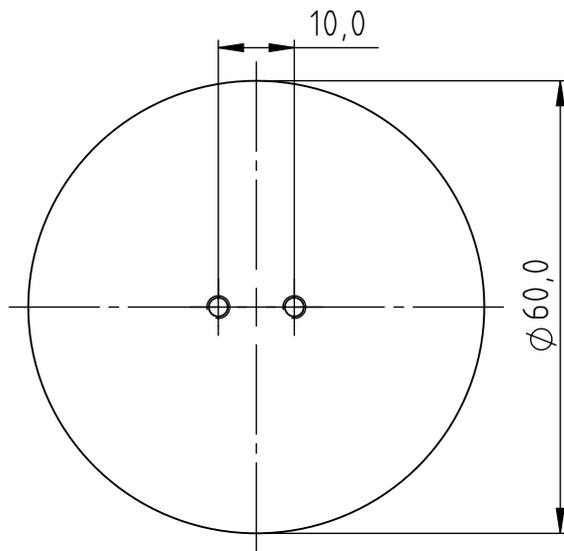
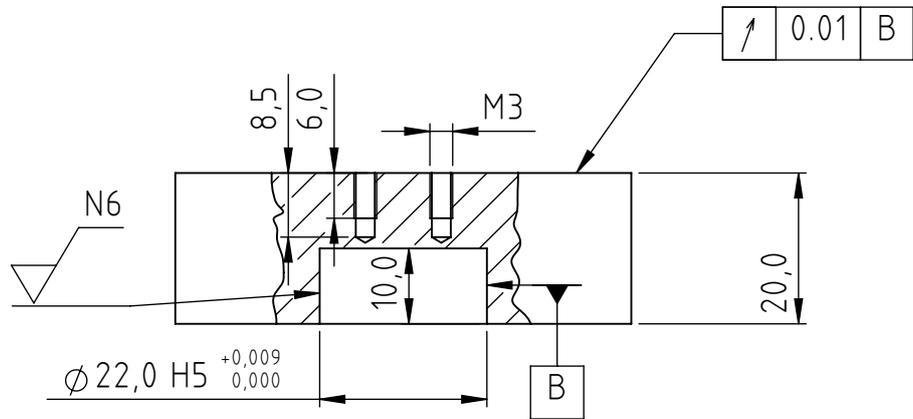
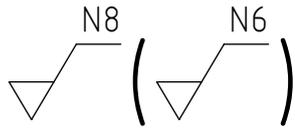
Diseño, desarrollo e instrumentación de un tribómetro para materiales poliméricos		Autor: Sergio García Carrasco		Fecha: 03/07/2022	
UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA CAMPUS D'ALCOI	Escala: 1:1		Subconjunto: Plataforma de ensayos		Nº Plano: 02.02
	Material: Aluminio		Denominación: Soporte del rodamiento inferior		Tol. no indicadas: UNE 22768-m

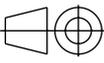


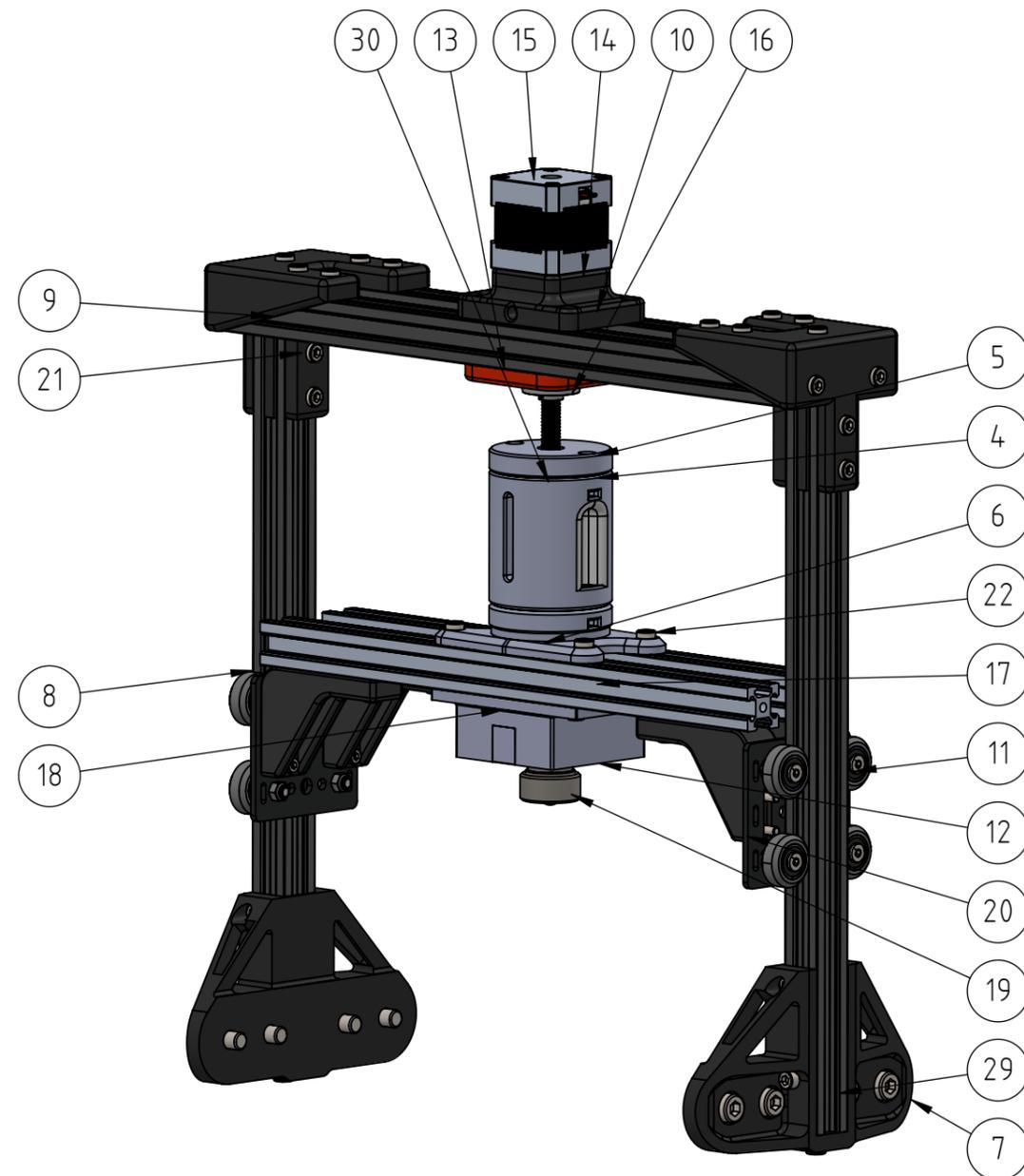
Diseño, desarrollo e instrumentación de un tribómetro para materiales poliméricos		Autor: Sergio García Carrasco		Fecha: 03/07/2022	
UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA		Escala: 1:2		Subconjunto: Plataforma de ensayos	
CAMPUS D'ALCOI		Material: Aluminio		Denominación: Placa principal	
				Tol. no indicadas: UNE 22768-m	



Diseño, desarrollo e instrumentación de un tribómetro para materiales poliméricos		Autor: Sergio García Carrasco		Fecha: 03/07/2022	
 UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA CAMPUS D'ALCOI	Escala: 3:2		Subconjunto: Plataforma de ensayos		Nº Plano: 02.04
	Material: Acero C45		Denominación: Arbol del portadiscos		Tol. no indicadas: UNE 22768-m

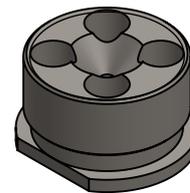
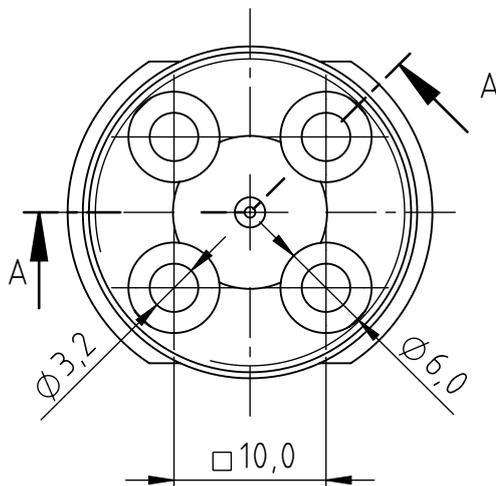
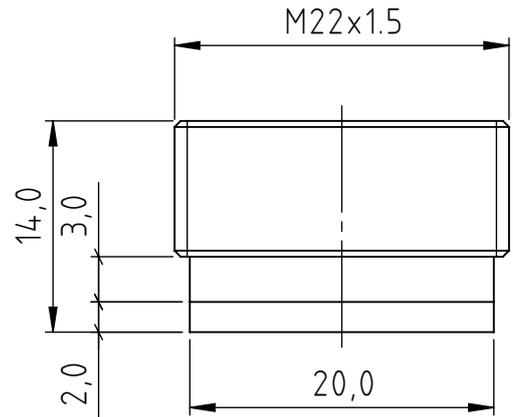
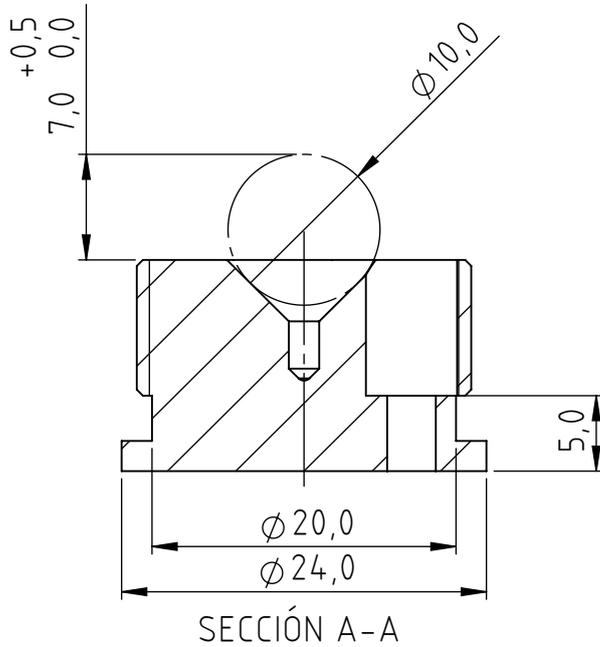


Diseño, desarrollo e instrumentación de un tribómetro para materiales poliméricos		Autor: Sergio García Carrasco		Fecha: 03/07/2022	
 UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA CAMPUS D'ALCOI	Escala: 1:1		Subconjunto: Plataforma de ensayos		Nº Plano: 02.05
	Material: Aluminio		Denominación: Portadiscos		Tol. no indicadas: UNE 22768-m

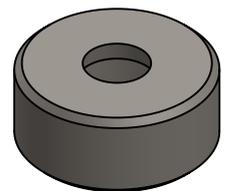
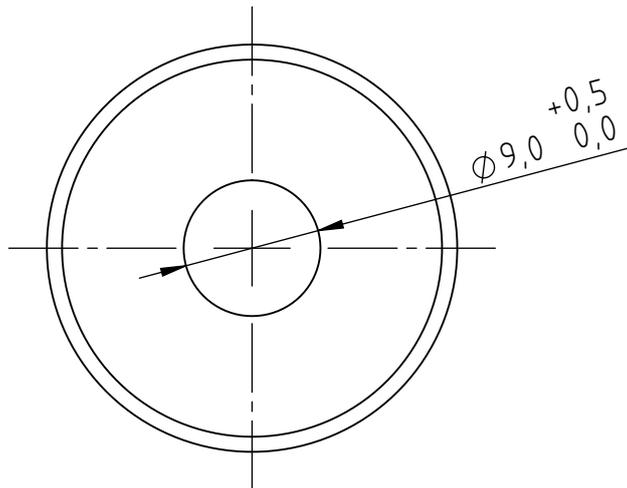
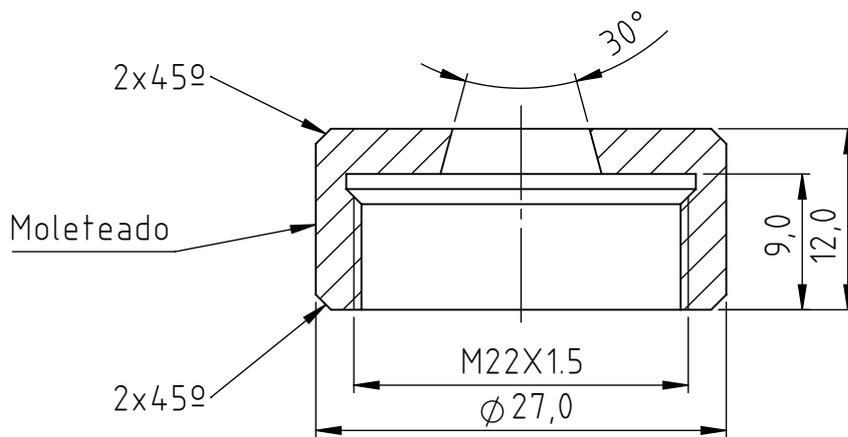


N.º DE ELEMENTO	N.º DE PIEZA	CANTIDAD
1	Cojinete 8mm	1
2	Taco flotante	1
3	Tapa del taco flotante	1
4	Alojamiento de la suspensión	1
5	Tapa del alojamiento	1
6	Torreta de la suspensión	1
7	Escuadra inferior	2
8	Perfil 20mmx350 roscado	2
9	Escuadra superior	2
10	Perfil 20mmx350	2
11	Guía lineal	2
12	Sensor K3D60a_000_K(b)	1
13	Soporte del cojinete	1
14	Torreta del motor	1
15	Motor NEMA 17 4401	1
16	Cojinete KFL08	1
17	Perfil 20mmx302	2
18	Anclaje del sensor	1
19	Portabolas	1
20	Escuadra intermedia	4
21	DIN 912 M5 x 12 --- 12C	32
22	DIN 912 M5 x 8 --- 8N	4
23	DIN 912 M4 x 16 --- 16N	10
24	DIN 912 M4 x 8 --- 8N	4
25	DIN 912 M3 x 12 --- 12N	4
26	DIN 912 M4 x 12 --- 12N	8
28	DIN 6902-A3.6	1
29	DIN 912 M8 x 12 --- 12N	8
30	Husillo 8mmx105	1
31	Acoplamiento- stepper	1
32	Tuerca M4 perfil 20mm	20
33	Tuerca M5 perfil 20mm	36
34	Tuerca M5	8

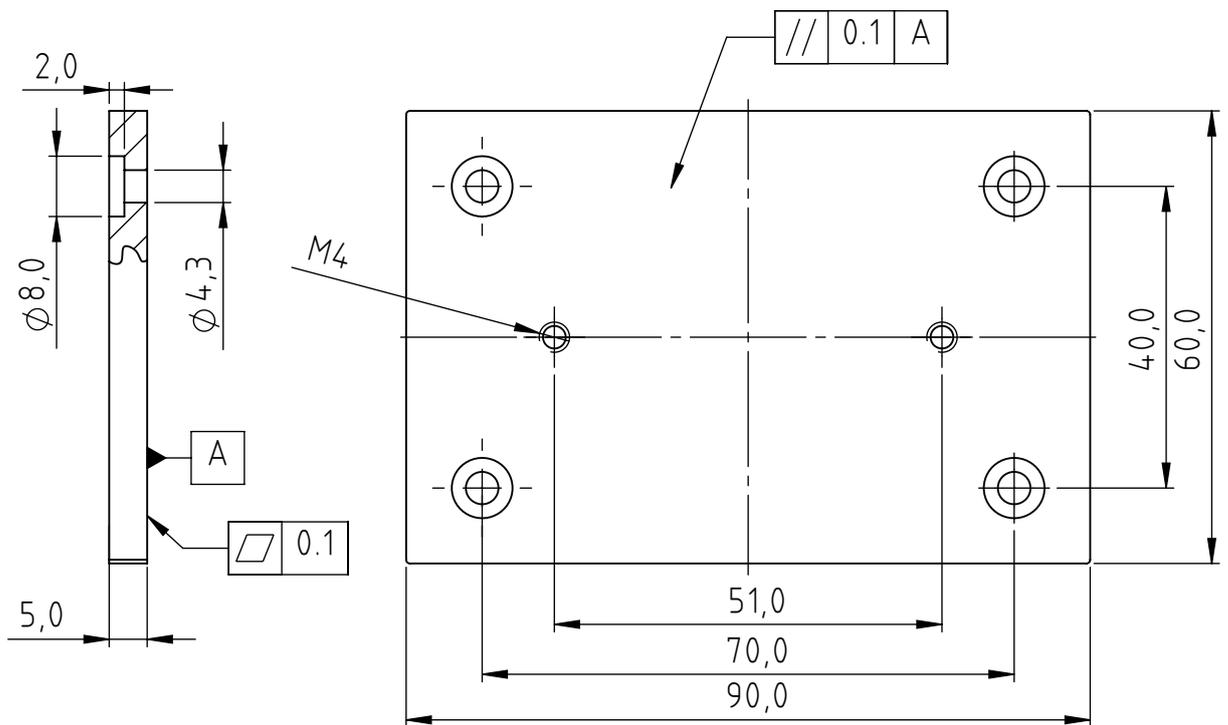
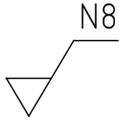
Diseño, desarrollo e instrumentación de un tribómetro para materiales poliméricos		Autor: Sergio García Carrasco		Fecha: 04/07/2022	
 UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA CAMPUS D'ALCOI	Escala: 1:3		Subconjunto: Puente		Nº Plano: 03.00
	Material: -		Denominación: Vista general del puente		Tol. no indicadas: UNE 22768-m



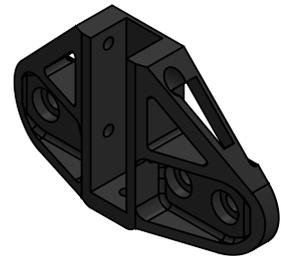
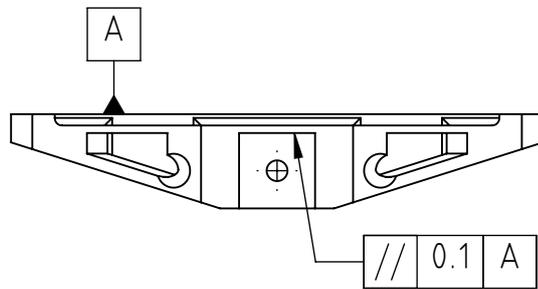
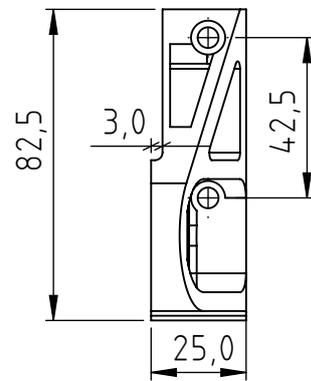
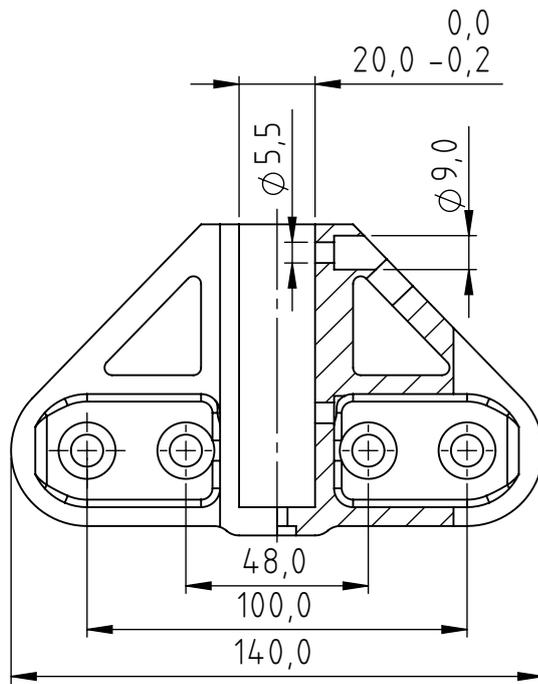
Diseño, desarrollo e instrumentación de un tribómetro para materiales poliméricos		Autor: Sergio García Carrasco		Fecha: 04/07/2022	
UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA CAMPUS D'ALCOI	Escala: 2:1		Subconjunto: Puente		Nº Plano: 03.01
	Material: Acero C45		Denominación: Soporte del portabolas		Tol. no indicadas: UNE 22768-m



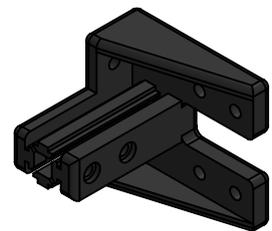
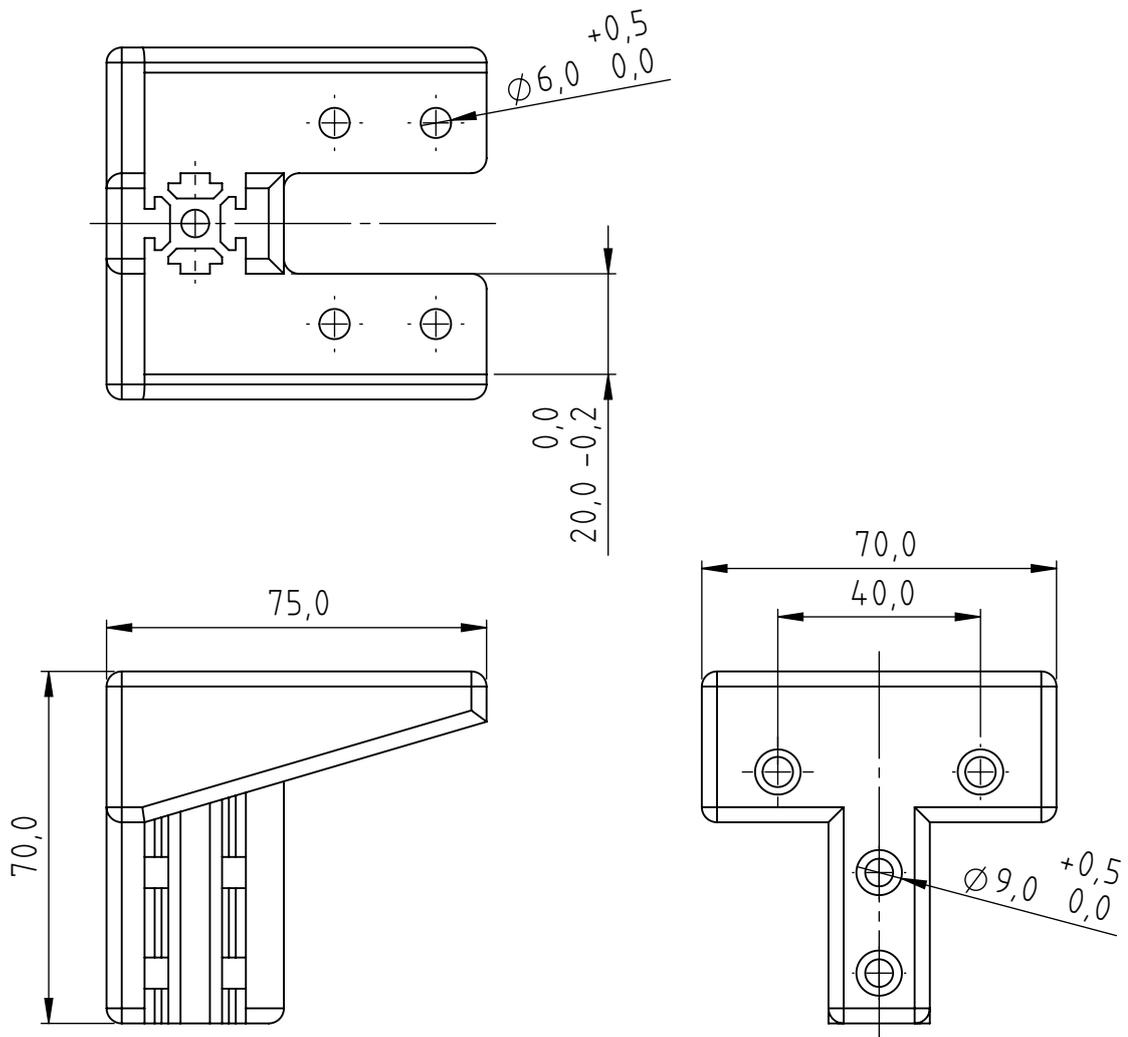
Diseño, desarrollo e instrumentación de un tribómetro para materiales poliméricos		Autor: Sergio García Carrasco		Fecha: 04/07/2022
UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA CAMPUS D'ALCOI	Escala: 2:1		Subconjunto: Puente	Nº Plano: 03.02
	Material: Acero C45		Denominación: Tuerca del portabolas	Tol. no indicadas: UNE 22768-m



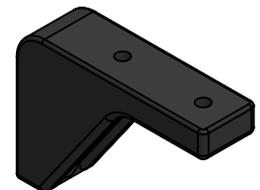
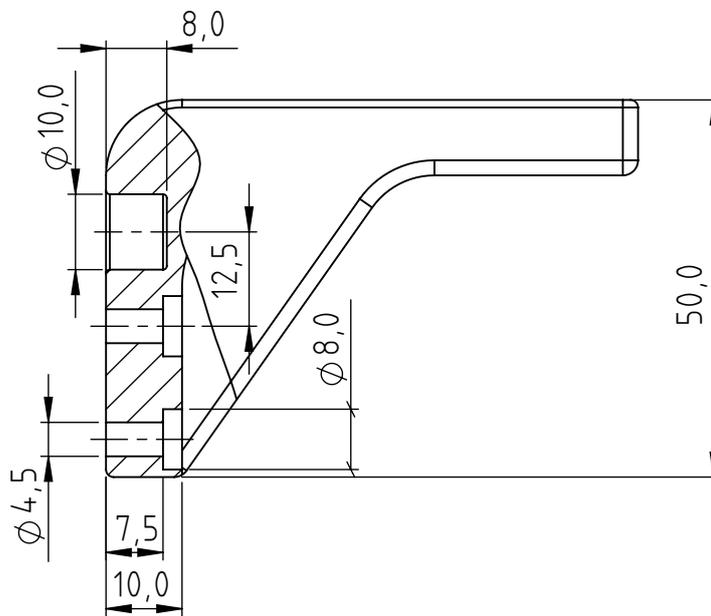
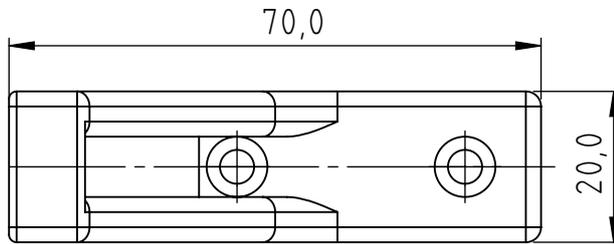
Diseño, desarrollo e instrumentación de un tribómetro para materiales poliméricos		Autor: Sergio García Carrasco		Fecha: 04/07/2022	
UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA CAMPUS D'ALCOI	Escala: 1:1		Subconjunto: Puente		Nº Plano: 03.03
	Material: Aluminio		Denominación: Placa de anclaje del sensor		Tol. no indicadas: UNE 22768-m



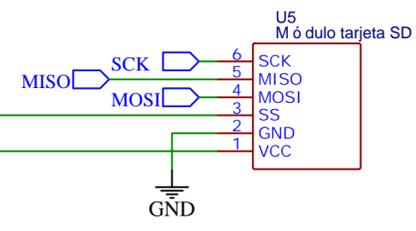
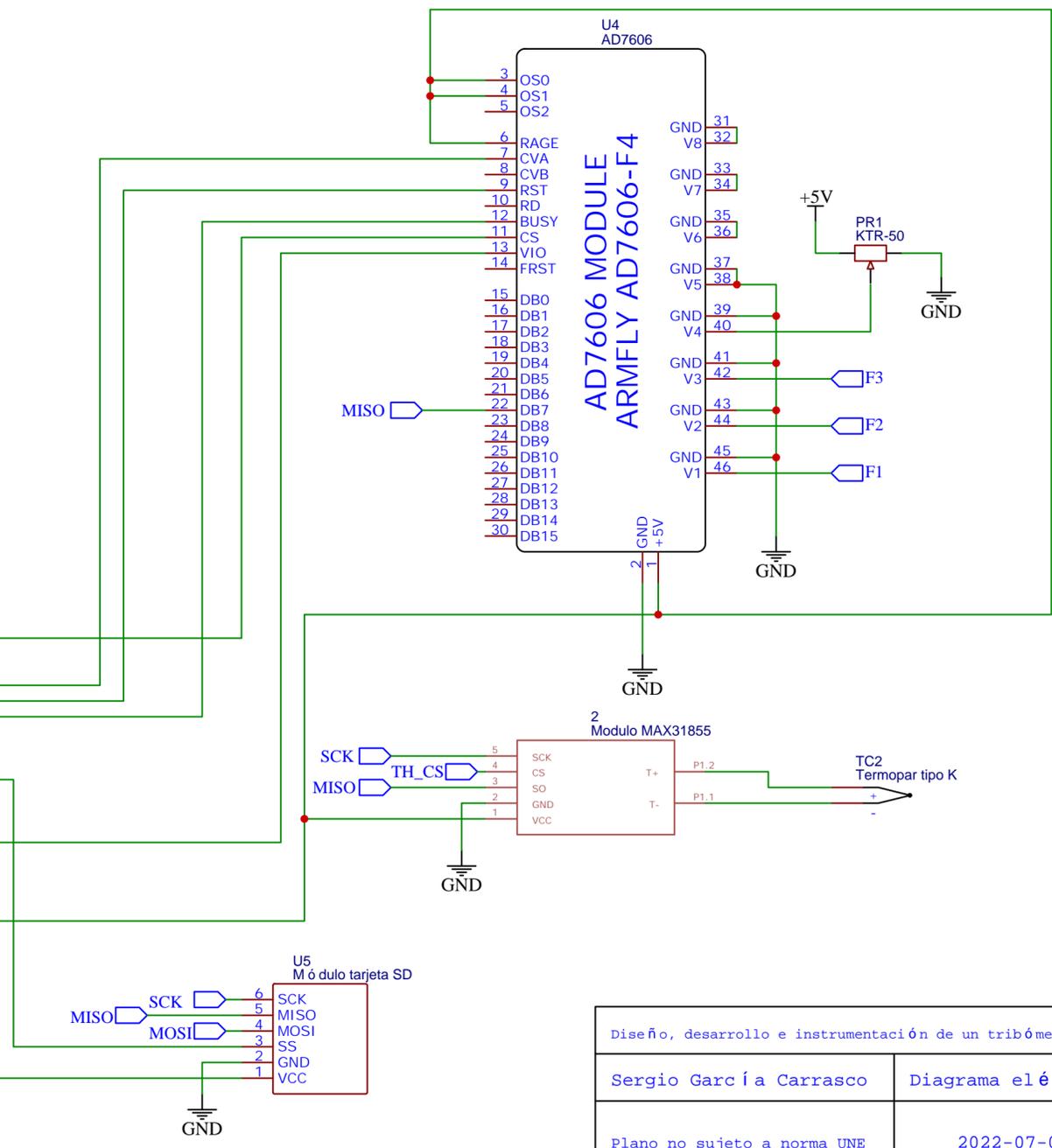
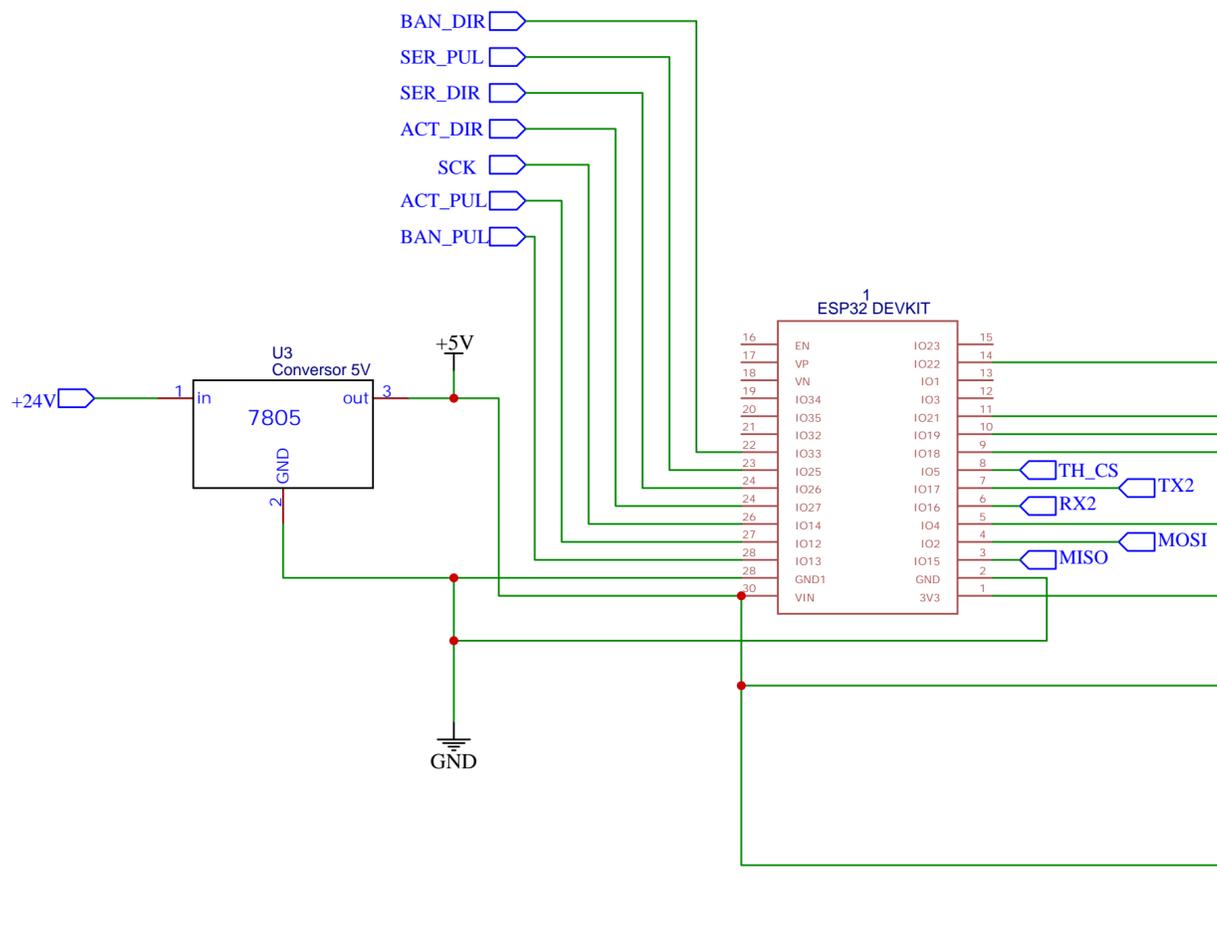
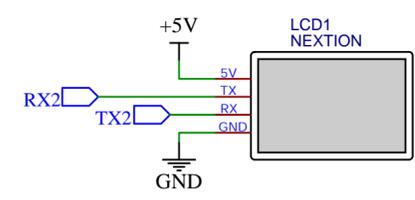
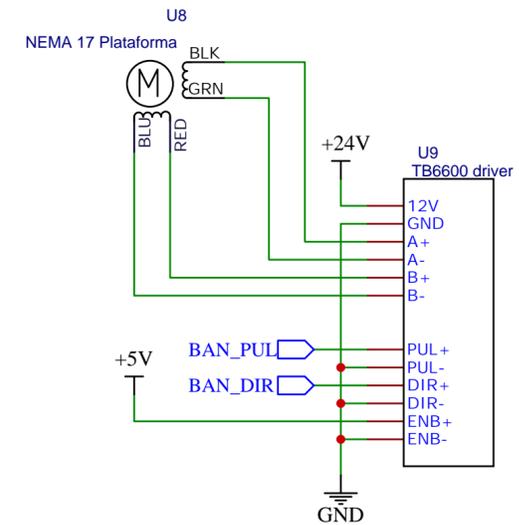
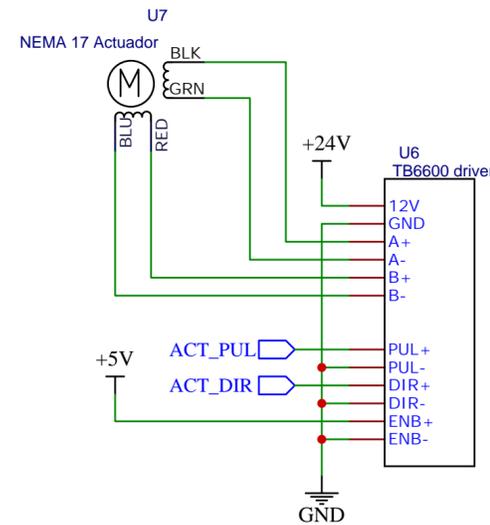
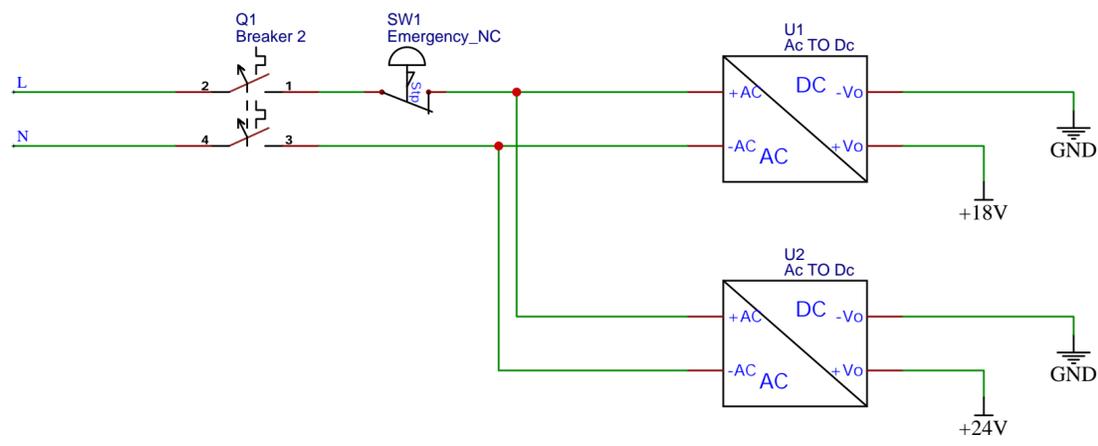
Diseño, desarrollo e instrumentación de un tribómetro para materiales poliméricos		Autor: Sergio García Carrasco		Fecha: 10/07/2022	
 UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA CAMPUS D'ALCOI	Escala: 1:2		Subconjunto: Puente		Nº Plano: 03.04
	Material: PLA		Denominación: Escuadra inferior		Tol. no indicadas: UNE 22768-m



Diseño, desarrollo e instrumentación de un tribómetro para materiales poliméricos		Autor: Sergio García Carrasco		Fecha: 10/07/2022	
 UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA CAMPUS D'ALCOI	Escala: 2:3		Subconjunto: Puente		Nº Plano: 03.05
	Material: PLA		Denominación: Escuadra superior		Tol. no indicadas: UNE 22768-m



Diseño, desarrollo e instrumentación de un tribómetro para materiales poliméricos		Autor: Sergio García Carrasco		Fecha: 10/07/2022	
 UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA CAMPUS D'ALCOI	Escala: 1:1		Subconjunto: Puente		Nº Plano: 03.06
	Material: PLA		Denominación: Escuadra media		Tol. no indicadas: UNE 22768-m



9

Pliego de condiciones

Índice

9.1 Normativa aplicada	121
9.2 Manual de montaje	121
9.3 Manual de utilización	125
9.4 Manual de mantenimiento	126
9.4.1 Árbol, rodamientos y transmisión	126
9.4.2 Electrónica	127
9.4.3 Motores	127
9.4.4 Estructura	127

Al tratarse el presente trabajo del diseño y desarrollo de una máquina, no es conveniente redactar un Pliego de Condiciones al uso, como es necesario en proyectos técnicos de instalaciones y/o construcción. Por tanto, este apartado consistirá en un manual de montaje, utilización y mantenimiento del tribómetro. La fabricación se encuentra detallada en el apartado 5.8, siendo obligado el empleo de los materiales indicados, o en su defecto, otros con mejores propiedades mecánicas y similares propiedades físicas (densidad), y la normativa a aplicar se estipula a lo largo del documento, quedando recogida en el punto siguiente.

9.1 Normativa aplicada

- **ISO 286-2:2010(E)**: Geometrical product specifications (GPS) — ISO code system for tolerances on linear sizes — Part 2: Tables of standard tolerance classes and limit deviations for holes and shafts.
- **ISO 281:2007** Rolling bearings — Dynamic load ratings and rating life.
- **DIN 7190**: Pressverbände - Berechnungsgrundlagen und Gestaltungsregeln.
- **ASTM G99-17**: Standard Test Method for Wear Testing with a Pin-on-Disk Apparatus.
- **UNE-EN 22768**: Tolerancias generales.
- **UNE 157 001:2014** Criterios generales para la elaboración formal de los documentos que constituyen un proyecto técnico.

9.2 Manual de montaje

Antes de proceder al montaje, se deberá de haber seguido los planos, tanto los de conjunto como los de fabricación e inspección, para cerciorarse de que se consta de todos los elementos necesarios y estos tienen las medidas correctas.

El primer paso es el montaje de la estructura, ayudándose de una escuadra, y posteriormente montar sobre esta el sistema electrónico con su respectivo cableado.

Hecho esto, se empieza con el montaje de la *plataforma de ensayos*. El primer paso será montar las pistas exteriores de los rodamientos

sobre sus respectivos alojamientos; la plataforma y el soporte inferior, teniendo en cuenta la orientación de las superficies cónicas para permitir el montaje de las pistas internas y las jaluas con los rodillos.

Acto seguido, se monta el portadiscos sobre el árbol, y se verifica que la superficie de montaje del disco presenta una oscilación menor de $0,01\text{ mm}$ respecto a la superficie de apoyo de los rodamientos. Si es favorable, se monta la pista interior del rodamiento superior, y se introduce este conjunto en la plataforma. A continuación, se monta el soporte del rodamiento inferior con su respectiva pista sin colocar todavía los tornillos (habiendo colocado la junta tórica superior), y se monta la pista exterior del rodamiento inferior.

Ahora que se tienen los rodamientos montados, para evitar desalineaciones en el sistema, antes que nada se aplica la precarga en los rodamientos montando la tuerca KM-4 con su respectiva arandela. Esto hará que los rodamientos se alineen; acto seguido, se colocan los cinco tornillos de sujeción del rodamiento inferior, y se aprietan siguiendo un orden de estrella.

El siguiente paso es el montaje de la torreta. Primero, se montará el retén radial en su respectivo alojamiento, dejando la superficie lisa encarada hacia la parte inferior (donde se aloja el acoplamiento), y el puerto de engrase se roscará en su respectivo orificio. Hecho esto, se coloca la junta tórica en su ranura, y se monta la torreta poniendo especial cuidado en encajar el árbol sobre el retén. Se colocan los 5 tornillos correspondientes, y se aprietan en orden de estrella.

Hecho esto, se monta la parte superior del acoplamiento sobre el árbol, apretando el tornillo prisionero para fijarla. La parte inferior se monta sobre el árbol del servomotor, colocando la pieza de polímero sobre esta.

Acto seguido, se monta el servomotor sobre la torreta, poniendo atención en que la posición de las dos mitades del acoplamiento coincida correctamente, y se aprietan sus correspondientes 4 tornillos.

Ahora que la transmisión está montada, se procede al montaje de las guías lineales de la plataforma. Con los carriles colocados sobre estas (y habiendo colocado las tuercas con sus respectivos tornillos en los carriles), se aprietan los tornillos con poca fuerza, de manera que se permite el desplazamiento. Hecho esto, se coloca uno de los carriles en un lado de la estructura. Se aprietan las guías correspondientes a este lado.

Para asegurar que los dos carriles están montados en paralelo, ahora se aprieta el tornillo de uno de los extremos del carril que estaba suelto. Se desplaza la plataforma de un extremo a otro de su recorrido, de manera que el carril se asiente en su posición correcta, y se aprieta el resto de los tornillos.

El siguiente paso es el montaje del sistema de traslación de la plataforma. La tuerca se monta sobre su soporte, y este se monta sobre la parte inferior de la plataforma con sus respectivas tuercas y tornillos.

Ahora, se procederá a retirar la barra de la estructura correspondiente al elemento N°7 del plano 01.00 para montar sobre ella el motor paso a paso, el cojinete y el husillo. La única precaución a tener en cuenta en este paso es que el husillo se encuentre centrado, aunque existe cierto margen, y que todos los tornillos estén correctamente apretados, especialmente los del cojinete, por su reducido tamaño.

Hecho esto, se presenta el conjunto sobre las dos escuadras del extremo de la estructura, se hace interactuar el husillo sobre la tuerca, y se monta la barra sobre las escuadras. Ahora se procede al montaje del puente.

Para el puente, el primer paso es montar la parte flotante, donde se alojará el sistema de suspensión y el sensor. El montaje del sensor es simple; se monta el portabolas sobre este (plano 03.01 y 03.02), todo este conjunto se monta sobre la placa de anclaje (plano 03.03), y la placa se monta sobre las dos barras transversales (elemento 17 del plano 03.00). El sistema de suspensión se monta en el lado opuesto de las barras. Acto seguido, se montan las escuadras y las guías lineales en los extremos de las barras, al mismo lado que el sensor.

Ahora que se tiene montada la parte flotante del puente, se procede a montar la estructura. Primero se montan los perfiles sobre las escuadras superiores, empleando un mazo y apretando los tornillos y las tuercas correctamente, y se coloca el sistema del motor paso a paso de igual manera que se hizo para el motor de traslación de la plataforma. Acto seguido, se introducen las guías lineales en los perfiles verticales, y se rosca el husillo en la tuerca.

Para unir el puente con la estructura principal, se colocan las escuadras inferiores sobre los flancos de esta, presentando las tuercas y los tornillos sin apretarlos, se fija el puente sobre estas, y se aprietan los tornillos en la posición que se desee. Esta posición se podrá ajustar más adelante, para aprovechar el máximo rango posible del husillo y el sensor de posición.

Finalmente, se monta el sensor de posición de manera que el muelle está ligeramente comprimido ($\approx 5\text{ mm}$) en la posición extrema de la plataforma más cercana al motor paso a paso, cuando el husillo hace tope con la torreta. Hecho esto, se ha de centrar el sensor de fuerza, y tarar el sensor de posición de manera acorde al montaje.

9.3 Manual de utilización

Este manual aporta indicaciones respecto al uso del tribómetro, sin atender a los pasos propios del ensayo, que son los correspondientes a la norma ASTM G99, explicada en el punto 3.2.2 de este trabajo.

1. Insertar la tarjeta de memoria micro-SD en su alojamiento, situado en la parte inferior de la pantalla.
2. Colocar las probetas en sus respectivos alojamientos; una esfera de $d = 10 \text{ mm}$ en el portabolas y un disco de $d_{max} = 60 \text{ mm}$ en el portadisco.
3. Alimentar el sistema electrónico del tribómetro, accionando el interruptor general y el interruptor del servomotor, situados en el panel lateral izquierdo de la máquina, además del interruptor de seguridad, situado en la parte superior. *A partir de este paso, es importante que el operario no introduzca las manos dentro del espacio de trabajo, para evitar accidentes.*
4. Aportar los parámetros de ensayo a la máquina a través de la pantalla táctil, mediante la interfaz gráfica. Una vez se introducen, comienza el ensayo.
5. Dejar que el tribómetro llegue a los ciclos objetivo del ensayo, o, en su defecto, interrumpir el ensayo pulsando el botón de 'Detener'.
6. Cortar la alimentación del tribómetro, ya sea accionando el interruptor general o el de seguridad, para evitar accidentes en el siguiente paso.
7. Retirar las probetas, y la tarjeta SD que contiene los datos derivados del ensayo.

9.4 Manual de mantenimiento

El tribómetro está ideado para ser una máquina de bajo mantenimiento. No obstante, existe una serie de puntos que han de ser tratados con regularidad.

9.4.1 Árbol, rodamientos y transmisión

- El árbol, los rodamientos y la transmisión están diseñados para tener una duración prácticamente infinita. No obstante, es importante comprobar con regularidad el estado de estos, sobre todo el rodamiento superior, que puede estar sujeto a contaminación de pequeñas partículas de material polimérico generadas durante los ensayos. Es importante mantener limpio el tribómetro, y engrasar periódicamente los rodamientos a través del puerto de engrase de la torreta.
- El engrase de los rodamientos se realizará cada 2000 *h* de trabajo, empleando una bomba de grasa como se observa en la la figura 9.1.



Figura 9.1: Engrase de los rodamientos.

- Si los rodamientos se encuentran dañados, se deben sustituir inmediatamente, a no ser que se trate del rodamiento de agujas del servomotor. En este caso, se ha de sustituir el servomotor en su totalidad.
- El estado del sistema se puede comprobar mediante la rotación manual del portadiscos con la alimentación del tribómetro corta-

da, atendiendo a irregularidades en su rotación, o sonidos anómalos.

9.4.2 Electrónica

- Revisar periódicamente los cables y conexiones eléctricas, revisando que los cables no presenten daños en su aislamiento, y las conexiones estén correctamente sujetas, además de comprobar que el apriete de los tornillos en las conexiones eléctricas sea el correcto.
- Revisar la limpieza del cajón de la electrónica, para evitar la acumulación de polvo, que podría causar sobrecalentamientos en el variador, acortando su vida útil.
- La vida útil del sistema de seguridad del servomotor es de 20 años, contando a partir de la fecha indicada en la placa de información del variador.

9.4.3 Motores

- Revisar el apriete correcto de toda la tornillería incumbente a los motores. Comprobar que los elementos de salida (acoplamientos) asientan correctamente. Revisar que no exista holgura entre los dos husillos y sendos cojinetes.
- Revisar el estado de limpieza de los motores. En caso de existir contaminación, limpiarla inmediatamente de la forma menos invasiva posible (evitar chorros de agua o aire a alta presión, disolventes agresivos, etc).
- Revisar periódicamente la holgura presente en el husillo de la plataforma de ensayos. Cuando supere $0,5mm$, cambiar la tuerca.
- Revisar periódicamente la holgura presente en el husillo de la plataforma de ensayos. Cuando supere $1,5mm$, cambiar la tuerca.

9.4.4 Estructura

- Revisar el apriete de la tornillería existente en la estructura. Comprobar que no existan grietas u otras anomalías en los elementos estructurales, en especial las escuadras de material polimérico.
- Revisar el estado de las guías lineales. En caso de desgaste excesivo, sustituir totalmente.

10

Conclusiones

En el presente trabajo se ha conseguido desarrollar y fabricar un tribómetro para materiales poliméricos cuyas características están a la altura de los tribómetros existentes en el mercado, presentando un coste muy competitivo y además empleando una gran cantidad de componentes estandarizados y electrónica de código abierto, facilitando el mantenimiento o posibles reparaciones, y acercando la tecnología al consumidor.

De esta manera, se abre la posibilidad de desarrollar cualquier módulo adicional que se desee para expandir las posibilidades de ensayos de la máquina, como podrían ser cámaras de lubricación, módulos de control de temperatura o ensayos de otra índole, como ring-on-ring o block-on-disk.

Además, el funcionamiento estable de este está garantizado, habiéndose comprobado los puntos esenciales como la potencia del servomotor, la rigidez de la estructura o la calibración del sensor de posición, entre otros. Por tanto, se puede afirmar que el tribómetro desarrollado presenta un gran potencial competitivo.

Bibliografía

- [1] K. Holmberg and A. Erdemir, “Influence of tribology on global energy consumption, costs and emissions,” *Friction*, vol. 5, pp. 263–284, Sep 2017.
- [2] S. Owen-Jones and M. G. Gee, “Wear testing standards database,” 1997.
- [3] *ASTM D2266-01: Standard Test Method for Wear Preventive Characteristics of Lubricating Grease (Four-Ball Method)*. 2001.
- [4] *ASTM D4172-94: Standard Test Method for Wear Preventive Characteristics of Lubricating Fluid (Four Ball Method)*. 1999.
- [5] *ASTM G98-02: Standard Test Method for Galling Resistance of Materials1*. 2002.
- [6] *ASTM G83-96: Standard Test Method for Wear Testing with a Crossed-Cylinder Apparatus*. 1996.
- [7] *ASTM D3233-19: Standard Test Methods for Measurement of Extreme Pressure Properties of Fluid Lubricants (Falex Pin and Vee Block Methods)*. 2019.
- [8] *ASTM G77-17: Standard Test Method for Ranking Resistance of Materials to Sliding Wear Using Block-on-Ring Wear Test*. 2017.
- [9] *ASTM G99-17: Standard Test Method for Wear Testing with a Pin-on-Disk Apparatus*. 2017.
- [10] D. Pavkovic, N. Kranjčević, and M. Kostelac, “Design of normal force control system for a pin-on-disk tribometer including active and passive suppression of vertical vibrations,” *Automatika*, vol. 54, pp. 364–375, 10 2013.
- [11] S. Farah, D. G. Anderson, and R. Langer, “Physical and mechanical properties of PLA, and their functions in widespread applications - a comprehensive review,” *Adv Drug Deliv Rev*, vol. 107, pp. 367–392, June 2016.

- [12] *DIN 7190: Pressverbände - Berechnungsgrundlagen und Gestaltungsregeln*. 2001.
- [13] *ISO 286-2:2010(E): Geometrical product specifications (GPS) — ISO code system for tolerances on linear sizes — Part 2: Tables of standard tolerance classes and limit deviations for holes and shafts*. 2010.
- [14] M. Hoic, M. Hrgetic, and J. Deur, “Design of a pin-on-disc-type cnc tribometer including an automotive dry clutch application,” *Mechatronics*, vol. 40, 11 2016.
- [15] K. Åström and T. Hägglund, *PID Controllers: Theory, Design, and Tuning*. ISA - The Instrumentation, Systems and Automation Society, 1995.
- [16] R. M. Phelan, *Dynamics of Machinery*. McGraw-Hill, Inc., 1967.
- [17] *UNE-EN 22768: Tolerancias generales*. 1994.

Índice de figuras

2.1	Resultados del análisis de la competencia en Scopus . . .	26
2.2	TRB de Anton-Paar	27
2.3	MCT de Anton-Paar	27
2.4	UMT TriboLab de Bruker	28
3.1	Diagrama explicativo del tribómetro según ASTM G99.	36
4.1	Vista general del tribómetro.	37
4.2	Alternativas matizadas para la estructura.	39
4.3	Plataforma de ensayo.	39
4.4	Vista seccionada del sistema de traslación.	41
4.5	Vista general del puente.	42
5.1	Modelo empleado para el cálculo.	50
5.2	Simplificación aplicada a los rodamientos.	51
5.3	Gráficos de calidad del mallado.	52
5.4	Resultados de tensión del cálculo.	53
5.5	Resultados de deflexión del cálculo.	54
5.6	Resultados de deformación del cálculo.	54
5.7	Sensor de posición potenciométrico KTR-50.	56
5.8	Calzos calibrados.	56
5.9	Sensor en proceso de calibración.	57
5.10	Recta de calibración del sensor de posición.	57

5.11	Servomotor elegido.	62
5.12	Curva de funcionamiento del servomotor.	63
5.13	Modelo del árbol en KISSSoft.	64
5.14	Gráfica de distribución de tensiones en el árbol.	65
5.15	Torreta en la etapa final de torneado.	71
5.16	Torreta en el taladro.	71
5.17	Portabolas en el paso de roscado.	72
5.18	Roscado con macho.	72
5.19	Limado manual del chavetero.	73
7.1	Diagrama de flujo del programa del tribómetro.	82
9.1	Engrase de los rodamientos.	126

Índice de tablas

2.1	Resumen de los tribómetros de la competencia	29
3.1	Requisitos de funcionamiento del tribómetro	33
3.2	Parámetros de ensayo estándar ASTM G99.	36
5.1	Tabla comparativa de materiales para FDM.	47
5.2	Mediciones	57
5.3	Tabla comparativa de servomotores	61
5.4	Lista de parámetros del apriete.	67
5.5	Parámetros de los materiales del apriete.	68
5.6	Perfil de impresión para piezas funcionales.	69
5.7	Parámetros de corte para los diferentes materiales.	70

Nombre : ArbolTribometro
 Modificado por: siergo día: 07.07.2022 hora: 22:52:05

Nota importante: En el cálculo han aparecido advertencias:

1-> Rodamiento núm. Árbol 'Árbol 1', Rodamientos 'Rodamientos':

¡No se alcanza la carga mínima del cojinete!

(P = 0.6 kN, Pmin = 0.7 kN, condición: P/C > 2.000 %)

2-> El límite de velocidad de giro del cojinete 'Árbol 'Árbol 1', Rodamientos 'Rodamientos' es desconocido (en la base de datos).

Controle el límite de velocidad de giro según las disposiciones del fabricante.

3-> La velocidad térmicamente admisible del cojinete 'Árbol 'Árbol 1', Rodamientos 'Rodamientos' puede ser crítica.

Realice los cálculos de las velocidades de giro térmicamente admisibles bajo «Cálculo».

4-> Rodamiento núm. Árbol 'Árbol 1', Rodamientos 'Rodamientos':

¡No se alcanza la carga mínima del cojinete!

(P = 0.7 kN, Pmin = 0.7 kN, condición: P/C > 2.000 %)

5-> El límite de velocidad de giro del cojinete 'Árbol 'Árbol 1', Rodamientos 'Rodamientos' es desconocido (en la base de datos).

Controle el límite de velocidad de giro según las disposiciones del fabricante.

6-> La velocidad térmicamente admisible del cojinete 'Árbol 'Árbol 1', Rodamientos 'Rodamientos' puede ser crítica.

Realice los cálculos de las velocidades de giro térmicamente admisibles bajo «Cálculo».

Cálculo de árboles, ejes y vigas

Datos de entrada

Sistema de coordenadas del árbol: véase Fig. W-002

Denominación	Árbol 1
Plano	
Posición de inicio (mm)	0.000
Longitud (mm)	72.000
Velocidad (1/min)	3000.00
Sentido de giro: en el sentido de las agujas del reloj	
Material	C45 (1)
Módulo de elasticidad (N/mm ²)	206000.000
Número de Poisson un	0.300
Densidad (kg/m ³)	7830.000

Coefficiente de dilatación térmica	(10 ⁻⁶ /K)	11.500
Temperatura (°C)		20.000
Peso del árbol (kg)		0.137
(Nota: El peso se aplica para los árboles sin tener en cuenta las ruedas dentadas)		
Peso del árbol, incluidas masas adicionales (kg)		0.137
Momento de inercia de masa (kg*mm ²)		6.790
Momento de inercia GD2 (Nm ²)		0.000
Posición en el espacio (°)		270.000
Engranajes con rigidez según ISO		
Las deformaciones por cizallamiento se tendrán en cuenta		
Factor de corrección del cizallamiento		1.100
No se tendrá en cuenta el ángulo de presión de rodamientos		
Posición de tolerancia: Valor medio		
Temperatura de referencia (°C)		20.000

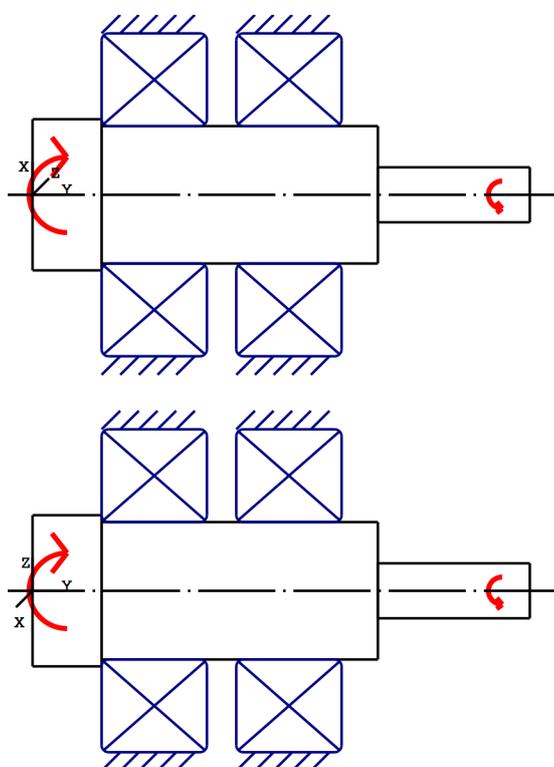


Figura: Introducciones de carga

Definición del árbol (Árbol 1)

Contorno exterior

Cilindro (Cilindro)			0.000mm ...	10.000mm
Diámetro (mm)	[d]	22.0000		
Longitud (mm)	[l]	10.0000		
Rugosidad (µm)	[Rz]	8.0000		

Cilindro (Cilindro)			10.000mm ...	50.000mm
---------------------	--	--	--------------	----------

Diámetro (mm)	[d]	20.0000
Longitud (mm)	[l]	40.0000
Rugosidad (µm)	[Rz]	8.0000

Radio izquierda (Radio izquierda)
 r=2.00 (mm), Rz=8.0, Girado (Ra=3.2µm/125µin)

<u>Cilindro (Cilindro)</u>			50.000mm ...	72.000mm
Diámetro (mm)	[d]	8.0000		
Longitud (mm)	[l]	22.0000		
Rugosidad (µm)	[Rz]	8.0000		

Radio izquierda (Radio izquierda)
 r=0.50 (mm), Rz=8.0, Girado (Ra=3.2µm/125µin)

Fuerzas

Tipo del elemento de fuerza		Acoplamiento
Denominación en el modelo		Acoplamiento
Posición en el árbol (mm)	[y _{local}]	68.0000
Posición en el sistema global (mm)	[y _{global}]	68.0000
Diámetro activo (mm)		20.0000
Factor de fuerza radial (-)		0.0000
Sentido de la fuerza radial (°)		0.0000
Factor de fuerza axial (-)		0.0000
Longitud de la aplicación de la fuerza (mm)		10.0000
Potencia (kW)		0.2000 accionado (accionamiento)
Momento torsor (Nm)		0.6366
Fuerza axial (N)		0.0000
Fuerza transversal X (N)		0.0000
Fuerza transversal Z (N)		0.0000
Momento flector X (Nm)		0.0000
Momento flector Z (Nm)		0.0000
Masa (kg)		0.0000
Momento de inercia de masa J _p (kg*m ²)		0.0000
Momento de inercia de masa J _{xx} (kg*m ²)		0.0000
Momento de inercia de masa J _{zz} (kg*m ²)		0.0000
Excentricidad (mm)		0.0000

Tipo del elemento de fuerza		Fuerza excéntrica
Denominación en el modelo		Fuerza excéntrica
Posición en el árbol (mm)	[y _{local}]	-10.0000
Posición en el sistema global (mm)	[y _{global}]	-10.0000
Centro de la aplicación de la fuerza, coordenada x (mm)		0.0000
Centro de la aplicación de la fuerza, coordenada z (mm)		30.0000
Longitud de la aplicación de la fuerza (mm)		0.0000
Potencia (kW)		0.0000
Momento torsor (Nm)		0.0000
Fuerza axial (N)		100.0000
Fuerza transversal X (N)		0.0000
Fuerza transversal Z (N)		100.0000
Momento flector X (Nm)		-3.0000
Momento flector Z (Nm)		0.0000

Tipo del elemento de fuerza		Acoplamiento
Denominación en el modelo		Acoplamiento
Posición en el árbol (mm)	[ylocal]	5.0000
Posición en el sistema global (mm)	[yglobal]	5.0000
Diámetro activo (mm)		60.0000
Factor de fuerza radial (-)		0.0000
Sentido de la fuerza radial (°)		0.0000
Factor de fuerza axial (-)		0.0000
Longitud de la aplicación de la fuerza (mm)		10.0000
Potencia (kW)		0.2000 impulsor (salida)
Momento torsor (Nm)		-0.6366
Fuerza axial (N)		0.0000
Fuerza transversal X (N)		0.0000
Fuerza transversal Z (N)		0.0000
Momento flector X (Nm)		0.0000
Momento flector Z (Nm)		0.0000
Masa (kg)		0.0000
Momento de inercia de masa Jp (kg*m ²)		0.0000
Momento de inercia de masa Jxx (kg*m ²)		0.0000
Momento de inercia de masa Jzz (kg*m ²)		0.0000
Excentricidad (mm)		0.0000

Cojinetes

Denominación en el modelo		Rodamientos
Tipo de cojinete		SKF 30204
Tipo de cojinete		Rodamiento de rodillos cónicos (de una hilera)
		SKF EXPLORER
Posición del cojinete (mm)	[ylocal]	17.625
Posición del cojinete (mm)	[yglobal]	17.625
Fijación del anillo exterior		Cojinete fijo colocado a la izquierda
Diámetro interior (mm)	[d]	20.000
Diámetro exterior (mm)	[D]	47.000
Ancho (mm)	[b]	15.250
Radio angular (mm)	[r]	1.000
El ángulo de presión del cojinete se tendrá en cuenta en el cálculo		
Posición (punto de intersección de presión)(mm)		
21.0280		
Capacidad de carga estática (kN)	[C ₀]	28.000
Capacidad de carga dinámica (kN)	[C]	34.100
Capacidad de carga fatiga (kN)	[C _u]	3.000
Valores para la geometría aproximada:		
Capacidad de carga dinámica (kN)	[C _{theo}]	0.000
Capacidad de carga estática (kN)	[C _{0theo}]	0.000
Factor de corrección capacidad de carga dinámica		
	[f _C]	1.000
Factor de corrección capacidad de carga estática		
	[f _{C0}]	1.000

Denominación en el modelo		Rodamientos
Tipo de cojinete		SKF 30204
Tipo de cojinete		Rodamiento de rodillos cónicos (de una hilera)
		SKF EXPLORER
Posición del cojinete (mm)	[ylocal]	37.125

Posición del cojinete (mm)	[yglobal]	37.125
Fijación del anillo exterior		Cojinete fijo colocado a la derecha
Diámetro interior (mm)	[d]	20.000
Diámetro exterior (mm)	[D]	47.000
Ancho (mm)	[b]	15.250
Radio angular (mm)	[r]	1.000
El ángulo de presión del cojinete se tendrá en cuenta en el cálculo		
Posición (punto de intersección de presión)(mm)		33.7220
Capacidad de carga estática (kN)	[C ₀]	28.000
Capacidad de carga dinámica (kN)	[C]	34.100
Capacidad de carga fatiga (kN)	[C _u]	3.000
Valores para la geometría aproximada:		
Capacidad de carga dinámica (kN)	[C _{theo}]	0.000
Capacidad de carga estática (kN)	[C _{0theo}]	0.000
Factor de corrección capacidad de carga dinámica	[f _C]	1.000
Factor de corrección capacidad de carga estática	[f _{C0}]	1.000

Resultados

Árbol

Flexión máxima (µm)	1.386
Posición del máximo (mm)	0.000
Gravicentro de masa (mm)	26.523
Suma del esfuerzo axial (N)	100.000
Deformación bajo momento torsor (°)	0.022

Cojinetes

Probabilidad de fallo	[n]	10.00	%
Juego axial	[u _A]	10.00	µm
Lubricante	Aceite: ISO-VG 220		
Temperatura de servicio - lubricante	[T _B]	20.00	°C
Rodamientos clásicos (considerar el ángulo de presión)			

Árbol 'Árbol 1' Rodamientos 'Rodamientos'

Posición (coordinada Y)	[y]	17.63	mm
carga equivalente dinámica	[P]	0.58	kN
Esfuerzo equivalente	[P ₀]	0.58	kN
Factor de probabilidad de fallo	[a ₁]	1.000	
Vida nominal rodamiento	[L _{nh}]	> 1000000	h
Viscosidad operacional	[v]	912.87	mm ² /s
Factor de seguridad estático	[S ₀]	48.21	
Fuerza de reacción del cojinete	[F _x]	-0.000	kN
Fuerza de reacción del cojinete	[F _y]	0.171	kN
Fuerza de reacción del cojinete	[F _z]	-0.581	kN
Fuerza de reacción del cojinete	[F _r]	0.581	kN (-90°)

Par de reacción de cojinete	[Mx]	-1.98	Nm
Par de reacción de cojinete	[My]	0.00	Nm
Par de reacción de cojinete	[Mz]	-0.00	Nm
Par de reacción de cojinete	[Mr]	1.98	Nm (-180°)
Nivel de aceite	[H]	0.000	mm
Momento de fricción de rodadura	[M _{rr}]	0.108	Nm
Momento de fricción por resbalamiento	[M _{sl}]	0.001	Nm
Momento de fricción de juntas	[M _{seal}]	0.000	Nm

Momento de fricción de juntas determinado según el catálogo principal 10000/1 EN:2013

Momento de fricción de pérdidas de flujo[M _{drag}]		0.000	Nm
Momento de rozamiento	[M _{loss}]	0.109	Nm
Potencia disipada	[P _{loss}]	34.332	W

El momento de fricción se calcula con datos del catálogo SKF 2013.

Siempre se calcula con un coeficiente para aditivos en el lubricante $\mu_{bl}=0.15$.

Desplazamiento de cojinete	[u _x]	0.000	µm
Desplazamiento de cojinete	[u _y]	10.082	µm
Desplazamiento de cojinete	[u _z]	-0.000	µm
Desplazamiento de cojinete	[u _r]	0.000	µm
Inclinación de cojinete	[r _x]	-0.049	mrad (-0.17')
Inclinación de cojinete	[r _y]	0.006	mrad (0.02')
Inclinación de cojinete	[r _z]	0.000	mrad (0')
Inclinación de cojinete	[r _r]	0.049	mrad (0.17')

Árbol 'Árbol 1' Rodamientos 'Rodamientos'

Posición (coordinada Y)	[Y]	37.13	mm
carga equivalente dinámica	[P]	0.65	kN
Esfuerzo equivalente	[P ₀]	0.49	kN
Factor de probabilidad de fallo	[a ₁]	1.000	
Vida nominal rodamiento	[L _{nh}]	> 1000000	h
Viscosidad operacional	[V]	912.87	mm ² /s
Factor de seguridad estático	[S ₀]	57.70	
Fuerza de reacción del cojinete	[Fx]	0.000	kN
Fuerza de reacción del cojinete	[Fy]	-0.272	kN
Fuerza de reacción del cojinete	[Fz]	0.481	kN
Fuerza de reacción del cojinete	[Fr]	0.481	kN (90°)
Par de reacción de cojinete	[Mx]	-1.64	Nm
Par de reacción de cojinete	[My]	0.00	Nm
Par de reacción de cojinete	[Mz]	0.00	Nm
Par de reacción de cojinete	[Mr]	1.64	Nm (180°)
Nivel de aceite	[H]	0.000	mm
Momento de fricción de rodadura	[M _{rr}]	0.123	Nm
Momento de fricción por resbalamiento	[M _{sl}]	0.001	Nm
Momento de fricción de juntas	[M _{seal}]	0.000	Nm

Momento de fricción de juntas determinado según el catálogo principal 10000/1 EN:2013

Momento de fricción de pérdidas de flujo[M _{drag}]		0.000	Nm
Momento de rozamiento	[M _{loss}]	0.124	Nm
Potencia disipada	[P _{loss}]	38.871	W

El momento de fricción se calcula con datos del catálogo SKF 2013.

Siempre se calcula con un coeficiente para aditivos en el lubricante $\mu_{bl}=0.15$.

Desplazamiento de cojinete	[u _x]	0.000	µm
Desplazamiento de cojinete	[u _y]	10.000	µm
Desplazamiento de cojinete	[u _z]	0.000	µm
Desplazamiento de cojinete	[u _r]	0.000	µm
Inclinación de cojinete	[r _x]	-0.012	mrad (-0.04')
Inclinación de cojinete	[r _y]	0.016	mrad (0.05')
Inclinación de cojinete	[r _z]	0.000	mrad (0')

Inclinación de cojinete [r] 0.012 mrad (0.04')

Daños (%) [Lreq] (20000.000)

Caso de carga	B1	B2
1	2.00	2.00

Σ 2.00 2.00

Utilización (%) [Lreq] (20000.000)

B1	B2
30.92	30.92

Nota: Utilización = (Lreq/Lh)^(1/k)

Rodamiento de bolas: k = 3, rodamiento de rodillos: k = 10/3

B1: Rodamientos

B2: Rodamientos

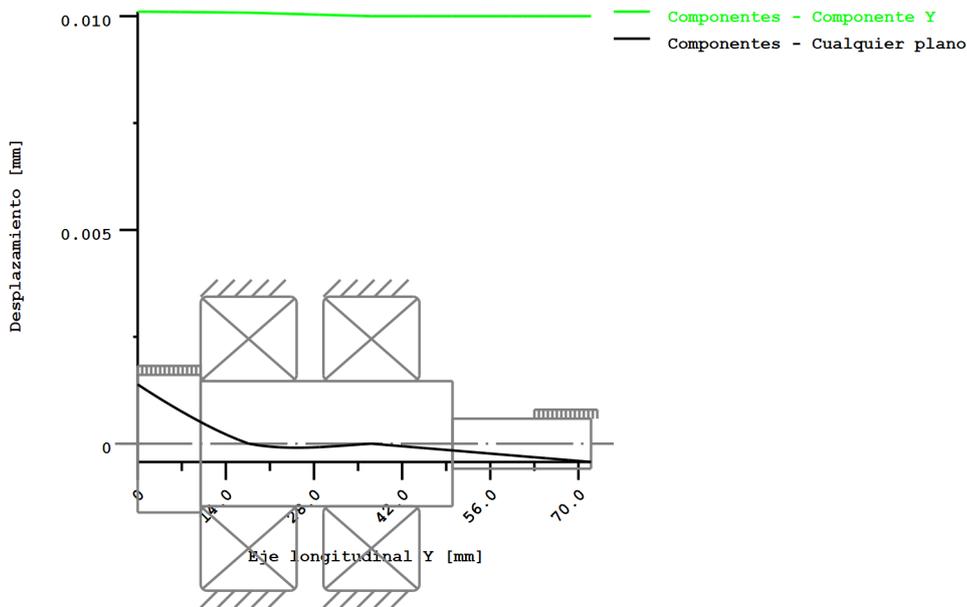
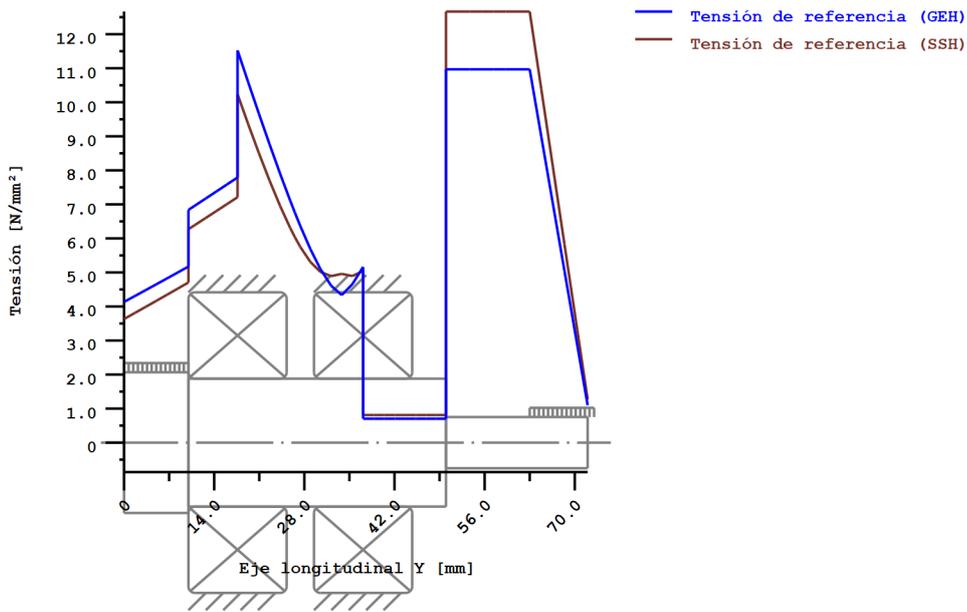


Figura: Deformación (líneas de flexión, etc.) (Cualquier plano 90 121)



Tensiones nominales, sin tener en cuenta las concentraciones de tensión

GEH(von Mises): $\text{sigV} = ((\text{sigB} + \text{sigZ},D)^2 + 3 * (\text{tauT} + \text{tauS})^2)^{1/2}$

SSH(Tresca): $\text{sigV} = ((\text{sigB} - \text{sigZ},D)^2 + 4 * (\text{tauT} + \text{tauS})^2)^{1/2}$

Figura: Tensión de referencia