



UNIVERSIDAD DE GRANADA

Facultad de Ciencias

GRADO EN INGENIERÍA
ELECTRÓNICA INDUSTRIAL

TRABAJO FIN DE GRADO
**Desarrollo de banco de
pruebas de flexión y
estiramiento para
dispositivos
electrónicos flexibles.**

Presentado por:
D. Alberto García Cruz

Tutor:
Prof. Dª Almudena Rivadeneyra Torres
Prof. D. Diego Pedro Morales Santos

Curso académico 2021/2022



UNIVERSIDAD DE GRANADA

GRADO EN INGENIERIA ELECTRÓNICA INDUSTRIAL

Desarrollo de banco de pruebas de flexión y estiramiento para dispositivos electrónicos flexibles.

Autor: Alberto García Cruz

Directores: Almudena Rivadeneyra Torres

Diego Pedro Morales Santos

Departamento: Electrónica y Tecnología de Computadores

Palabras clave: Banco de pruebas, Arduino, Motor paso a paso, Electrónica flexible, Impresión 3D, SolidWorks, Mecanismos, Circuitos impresos.

Keyword: Test bench, Arduino, Stepper motor, Flexible electronics, 3D printing, SolidWorks, Mechanisms, Printed circuits.



UNIVERSIDAD DE GRANADA

GRADO EN INGENIERIA ELECTRÓNICA INDUSTRIAL

AUTORIZACIÓN DE LECTURA DE TRABAJO FIN DE CARRERA

Dña. Almudena Rivadeneyra Torres y D. Diego Pedro Morales Santos profesores del Departamento de Electrónica y Tecnología de Computadores de la Universidad de Granada, como director/es del Trabajo Fin de Grado titulado “Desarrollo de banco de pruebas de flexión y estiramiento para dispositivos electrónicos flexibles” y realizado por el alumno D. Alberto García Cruz.

CERTIFICA/N: que el citado Trabajo Fin de Grado, ha sido realizado y redactado por dicho alumno y autorizan su presentación.

Granada,

Fdo. Almudena Rivadeneyra Torres

Fdo. Diego Pedro Morales Santos



UNIVERSIDAD DE GRANADA

GRADO EN INGENIERIA ELECTRÓNICA INDUSTRIAL

AUTORIZACIÓN DE DEPÓSITO EN LA BIBLIOTECA

Yo, D. Alberto García Cruz con DNI 26510250-J, autor del Trabajo Fin de Grado titulado "Desarrollo de banco de pruebas de flexión y estiramiento para dispositivos electrónicos flexibles." realizado en la Universidad de Granada

DECLARO: explícitamente que asumo la originalidad del trabajo, entendida en el sentido de que no ha utilizado fuentes sin citarlas debidamente.

AUTORIZO: al depósito de dicho Trabajo en la Biblioteca de la Universidad de Granada, y de la visualización a través de Internet.

Granada,

Fdo. D. Alberto García Cruz

A handwritten signature in black ink that reads "Alberto" in a cursive style.

Resumen

El presente proyecto consiste en el diseño y desarrollo de un banco de pruebas de flexión y estiramiento para dispositivos electrónicos flexibles. Este banco de pruebas se basará en una parte mecánica diseñada en SolidWorks e impresa mediante impresión 3D, gobernada por una parte eléctrica que consta de una placa Arduino con la que se controlará el controlador de motores DRV882, los finales de carrera y se usará una fuente de alimentación y convertidor DC/DC para la alimentación de todo el circuito.

Estos componentes se ensamblarán sobre una base de madera conformando el banco de pruebas que servirá para caracterizar el efecto del estiramiento y flexión de sensores realizados en substratos flexibles. Mostrando un pequeño experimento para concluir con el correcto funcionamiento del banco diseñado.

En este proyecto constan todas las etapas de diseño tanto pruebas como errores que llevaron hasta el diseño final, mencionando el equipo utilizado, tanto software como hardware. Con todo el material necesario para replicarlo y poder realizar las pruebas pertinentes.

Abstract

The present project consists of the design and development of a bending and stretching test bench for flexible electronic devices. This test bench will be based on a mechanical part designed in SolidWorks and printed by 3D printing, governed by an electrical part consisting of an Arduino board that will control the DRV882 motor controller, the limit switches and a power supply and DC/DC converter will be used to power the entire circuit.

These components will be assembled on a wooden base forming the test bench that will be used to characterize the effect of stretching and bending of sensors made on flexible substrates. Showing a small experiment to conclude with the correct operation of the designed bench.

This project includes all the design stages, both tests and errors that led to the final design, mentioning the equipment used, both software and hardware. With all the necessary material to replicate it and to be able to carry out the pertinent tests.

Agradecimientos

Quiero agradecer a mi familia, amigos y profesores por ayudarme durante todos estos años permitiendo que alcancase todas las metas que me he propuesto.

También quiero felicitar a Juanjo por su enorme paciencia aguantándome durante todos estos meses en los que no he parado de pedirle ayuda y él no ha dudado en brindármela.

Gracias también al personal del Bibliomaker en donde he aprendido a usar la mayoría de la maquinaria disponible y que sin ellos esto no hubiera sido posible.

A mis compañeros que han hecho más amenos este trabajo y me han acompañado tantos días en el laboratorio.

Índice general

1	Introducción.....	11
1.1	Objetivos.....	11
1.2	Planificación	12
1.3	Estructura de la memoria.....	14
2	Estado del arte	15
2.1	Usos de la electrónica flexible.....	16
2.2	Materiales usados en los substratos	17
2.3	Métodos de fabricación. (Albrecht, Printed Sensors for the, 2018)	18
3	Componentes utilizados	21
3.1	Componentes mecánicos	21
3.1.1	Base	21
3.1.2	Base del motor.....	23
3.1.3	Pieza corredera	24
3.1.4	Pieza Fija	25
3.1.5	Pieza de sujeción	26
3.1.6	Husillo	27
3.1.7	Acoplamiento flexible	28
3.1.8	Rodamientos.....	29
3.2	Componentes eléctricos	30
3.2.1	Motor paso a paso	30
3.2.2	Especificaciones técnicas	33
3.2.3	Microcontroladores	33
3.2.4	Controlador de motores DRV8825	35
3.2.5	Otras alternativas de controladores estudiadas.....	39
3.2.6	Convertidor DC-DC LM2596	39

3.2.7	Fuente de alimentación.....	40
3.2.8	Finales de carrera	41
3.2.9	Otros componentes	41
3.3	Presupuesto.....	41
4	Diseño del banco de pruebas	43
4.1	1º Diseño.....	43
4.2	Mecanismo tornillo-tuerca.....	45
4.3	2º Diseño.....	45
4.4	Diseño final.....	48
4.5	Circuito eléctrico	49
4.5.1	Configuración del controlador	50
4.5.2	Pruebas con el microcontrolador.....	51
4.5.3	Finales de carrera	53
4.6	PCB.....	54
4.7	Círculo	58
4.8	Programación.....	61
4.9	Interfaz gráfica de usuario (GUI)	63
4.10	Parámetros del banco de pruebas	65
4.10.1	Consumos	65
4.10.2	Temperaturas.....	66
4.10.3	Ruido	67
4.10.4	Torque	69
5	Validación del sistema.....	70
5.1	Tira de plata impresa	70
5.2	Método de medición a cuatro hilos (Método de Kelvin).....	71
5.3	Justificación de los datos	73
6	Conclusiones	75

6.1	Trabajo a futuro	75
7	Material utilizado	77
7.1	Software.....	77
7.1.1	SolidWorks.....	77
7.1.2	Ultimaker Cura	77
7.1.3	Eagle.....	78
7.1.4	Arduino IDE.....	78
7.1.5	Visual Studio	78
7.2	Equipos utilizados.....	79
7.2.1	Impresoras 3D	79
7.2.2	Impresoras FSM	79
7.2.3	Osciloscopio	80
7.2.4	Taladro de columna	80
7.2.5	Dremel	81
7.2.6	Sierra de calar.....	81
7.2.7	Soldador de estaño	81
7.2.8	Fuente de alimentación.....	81
7.2.9	Dinamómetro.....	82
8	Bibliografía	83
9	Anexos	85
9.1	Código de Arduino	85
9.2	Código del GUI	88
9.3	Planos de las piezas.	92

Índice de figuras

Figura 1: Diagrama de Gantt.....	13
Figura 2: Cronología de desarrollos en materiales, procesamiento y aplicaciones para electrónica flexible (Wong, 2009).....	16
Figura 3: Galaxy Z Fold 3 con tecnología OLED flexible. (Chicharro, 2021)	17
Figura 4: Stackup de una placa de cuatro caras, con una capa de sustrato y dos de prepreg. Incluye dos capas externas y dos internas, una para alimentación y otra para masa. (Fernández, 2022).....	18
Figura 5: Esquema que muestra el principio básico de la impresión en huecograbado (izquierda) y la impresión flexográfica (derecha), así como el entintado de los cilindros de impresión y la transferencia al sustrato (Rivadeneyra, 2017)).....	19
Figura 6: Esquema de una impresora de inyección de tinta que muestra los componentes clave y muestra el modo operativo. (Rivadeneyra, 2017)	19
Figura 7: Esquema que muestra una boquilla de atomización asistida por aire típica que incluye elementos clave en una configuración de deposición por pulverización. (Rivadeneyra, 2017)	20
Figura 8: Tablón de madera reciclado de una estantería.....	21
Figura 9: Tablón de pino con asas y patas niveladoras	22
Figura 10: Tablón de pino con asas y patas niveladoras	22
Figura 11: Taladro de columna	23
Figura 12: Renderizado base de motor en SolidWorks.....	24
Figura 13: Base del motor impresa y atornillada	24
Figura 14: Renderizado de la corredera en SolidWorks	25
Figura 15: Pieza corredera impresa y atornillada.....	25
Figura 16: Renderizado de la pieza fija en SolidWorks.....	26
Figura 17: Pieza fija impresa.....	26
Figura 18: Renderizado de la sujeción final en SolidWorks	27
Figura 19: Pieza de sujeción impresa y montada	27
Figura 20: Husillo. (Createc3D, 2022)	28
Figura 21: Acoplamiento flexible. (Amazon, 2022)	29
Figura 22: Rodamiento radial. (Components, 2022).....	29
Figura 23: Rodamiento lineal. (Fervi3d, 2022).....	30

Figura 24: Motor paso a paso de 1, 8°/step. (Dejan, 2022)	30
Figura 25: Modelo conceptual de un motor unipolar y bipolar. (Llamas, luisllamas.es, 2016)	31
Figura 26: Arduino Nano Every. (Arduino, 2022).....	34
Figura 27: Circuito de control de motores. (Instrument, 2014)	36
Figura 28: Esquema de funcionamiento de un puente H. (Anghel, s.f.)	37
Figura 29: Conexión del driver DRV8825. (Llamas, luisllamas.es, 2016).....	38
Figura 30: Convertidor LM2596. (naylampmechatronics, 2022)	40
Figura 31: Fuente de alimentación. (Farnell, Farnell, 2022).....	40
Figura 32: Final de carrera. (FC, 2022).....	41
Figura 33: Caracterización del setup con un rail y correa de distribución. (Albrecht, Over-Stretching Tolerant Conductors on Rubber Films by Inkjet-Printing Silver Nanoparticles for Wearables, 2018).....	43
Figura 34: Renderizado del 1º diseño en SolidWorks.....	44
Figura 35: Mecanismo de tornillo-tuerca implementado en un tornillo de banco. (Blanco, 2016)	45
Figura 36: Renderizado del 2º diseño en SolidWorks.....	45
Figura 37: Eje de referencia sobre el que atornillar las piezas en la base de madera	46
Figura 38: Acoplamiento de ejes.....	46
Figura 39: Proceso de montaje del 2º diseño	47
Figura 40: Pieza corredera con la tuerca y los rodamientos lineales	47
Figura 41: Montaje del 2º diseño	47
Figura 42: Renderizado del diseño final en SolidWorks.....	48
Figura 43: Cableado de los finales de carrera trenzado por la cara de abajo	49
Figura 44: Montaje mecánico final	49
Figura 45: Configuración de la corriente máxima del controlador	51
Figura 46: Frecuencia medida en el pin STEP	52
Figura 47: Frecuencia medida en el pin STEP	53
Figura 48: Resistencia Pull-Up para los finales de carrera	53
Figura 49: Circuito esquemático de la PCB	54
Figura 50: IPC2221 (Fernández, 2022).....	56
Figura 51: Placa del banco de pruebas	57
Figura 52: Placa del banco de pruebas con plano de masa	58
Figura 53: Montaje del circuito final.....	59

Figura 54: Pistas de estaño del circuito	59
Figura 55: Montaje final del circuito en su caja	60
Figura 56: Placa atornillada a la caja con las conexiones realizadas	60
Figura 57: Diagrama de flujo del código de Arduino	61
Figura 58: Diagrama de flujo de las funciones mover a la izquierda o a la derecha.....	62
Figura 59: Diagrama de flujo para la función estirar	63
Figura 60: Interfaz gráfica de usuario (GUI)	64
Figura 61: GUI en funcionamiento	64
Figura 62: Medición de la potencia de entrada	65
Figura 63: Medición de voltaje y corriente	66
Figura 64: Temperatura del motor y del driver	67
Figura 65: Ruido de fondo en el laboratorio	67
Figura 66: Ruido del banco de pruebas en el segundo diseño	68
Figura 67: Ruido del banco en el diseño final.....	68
Figura 68: Torque máximo que es capaz de proporcionar el banco.....	69
Figura 69: Tira impresa de plata	70
Figura 70: Lateral izquierdo de la tira impresa de plata.....	71
Figura 71: Lateral derecho de la tira impresa de plata	71
Figura 72: Esquema de medición a 4 hilos	72
Figura 73: Medida a 4 hilos de la resistencia eléctrica de la tira de plata.....	72
Figura 74: Colocación de la tira en el banco de estiramientos.....	73
Figura 75: Resultados después de varios ciclos de estiramientos	73
Figura 76: Tira de plata antes de los estiramientos	74
Figura 77: Tira de plata después de los estiramientos.....	74
Figura 78: Planteamiento para realizar la flexión	76
Figura 79: Impresora 3D	79

Índice de tablas

Tabla 1: Tabla de materiales para substratos. (Fernández, 2022)	17
Tabla 2:Tabla comparativa de motores bipolares y unipolares. (330ohms, 2022)	32
Tabla 3: Especificaciones técnicas del motor. (Farnell, Farnell, 2022)	33
Tabla 4: Especificaciones técnicas del Arduino Nano Every.	35
Tabla 5: Posibles estados de conmutación del puente H. (García, 2014)	38
Tabla 6: Formato de pasos. (Instrument, 2014)	39
Tabla 7: Presupuesto del banco de pruebas.....	42
Tabla 8: Componentes del primer diseño junto con sus parámetros.....	44
Tabla 9: Componentes utilizados en la PCB	55

Capítulo

1 Introducción

Este Trabajo de Fin de Grado ha sido realizado en el curso 2021-2022 para el Departamento de Electrónica y Tecnología de Computadores de la Universidad de Granada, situado en la Facultad de Ciencias. El objetivo de este proyecto es la automatización de un sistema de caracterización del estiramiento y flexión de sensores realizados en substratos flexibles. Con el que se pretende medir las variaciones en los parámetros eléctricos causadas por la deformación de los sustratos flexibles sobre los que están impresos.

Debido a las nuevas tecnologías y a las posibilidades de imprimir diferentes tipos de circuitos en materiales flexibles, cada vez es más importante comprender el comportamiento de estos circuitos flexibles durante el proceso de estiramiento o después del estiramiento o después de muchos ciclos de estiramientos, lo cual causa que sus parámetros eléctricos se ven alterados (simplemente por el hecho de aumentar la distancia de una pista de cobre esta aumenta su resistencia eléctrica). Conforme los circuitos flexibles sufren estiramientos/estrechamientos el grabado conductorivo impreso en ellos también se ve sometido a deformaciones que llegado a un punto pueden dejar de ser conductoras, con lo cual es importante estudiar cómo afecta el estiramiento y el estrechamiento a las propiedades de los circuitos flexibles para analizar como de duraderas son estas características y estudiar cuánto y cuantas veces pueden usarse después de haber sido sometidas a un estrés que dejaron de ser conductoras. Esto sirve para determinar cuántos usos tendrían los circuitos flexibles antes de tener que ser desechados o reparados y estudiar diferentes geometrías que permitan extender su vida útil.

El objetivo de este trabajo es construir un montaje que permita medir la influencia de la flexión o el estiramiento en estos sustratos flexibles. La idea es tener un montaje en el que se pueda fijar el dispositivo bajo prueba (DUT), doblarlo o estirarlo y tomar medidas durante este proceso.

1.1 Objetivos

El objetivo del proyecto debe traducirse en un concepto utilizable. Por lo tanto, se deben considerar muchos enfoques diferentes. Lo principal es tener una flexión o estiramiento lineal

a la misma distancia que se pueda repetir muchas veces. Por supuesto, debe ser exacto y reproducible. Algunos dispositivos deben comprobarse después de muchos ciclos de flexión para ver el impacto de la tensión mecánica sobre ellos, pero otros deben medirse después de cada paso de movimiento para analizar la dependencia de sus propiedades eléctricas y el grado de flexión.

Luego se decidió hacer los ajustes y el control mediante el ordenador. Para facilitar el control del banco de pruebas se decidió diseñar una interfaz gráfica de usuario (GUI) del tipo User-Friendly, utilizando el software ‘Visual Studio’ (Versión 17.2.2 2022, Microsoft) comunicándose mediante puerto serie para la transmisión de datos y órdenes.

En resumen, la configuración se puede dividir en dos partes, una parte mecánica y una parte eléctrica. Empezando por la parte mecánica ya que esta condicionará a la parte eléctrica y su circuito de control.

Los objetivos abordados en este proyecto son:

- Objetivo 1: Diseño e implementación de un sistema mecánico que convierta el movimiento circular de un motor en movimiento rectilíneo con una correcta transmisión de potencia que permita estirar una probeta.
- Objetivo 2: Programación del sistema de control que permita controlar fácilmente y con precisión el sistema mecánico anterior, permitiendo automatizar funciones como la repetición de estiramientos un número de veces determinado, a una velocidad concreta y una distancia especificada anteriormente.
- Objetivo 3: Validación del sistema, en donde se pondrá aprueba el banco, midiendo sus parámetros como su torque, consumos, ruido, temperatura de trabajo, para posteriormente realizar una prueba de concepto.

1.2 Planificación

Una vez planteados los objetivos principales del proyecto se buscó organizar el tiempo disponible con las tareas a desarrollar, marcando objetivos a corto y medio plazo hasta la confección final del banco de pruebas. Puede observarse en Figura 1: Diagrama de Gantt la realización de este.

Desarrollo de banco de pruebas de flexión y estiramiento para dispositivos electrónicos flexibles

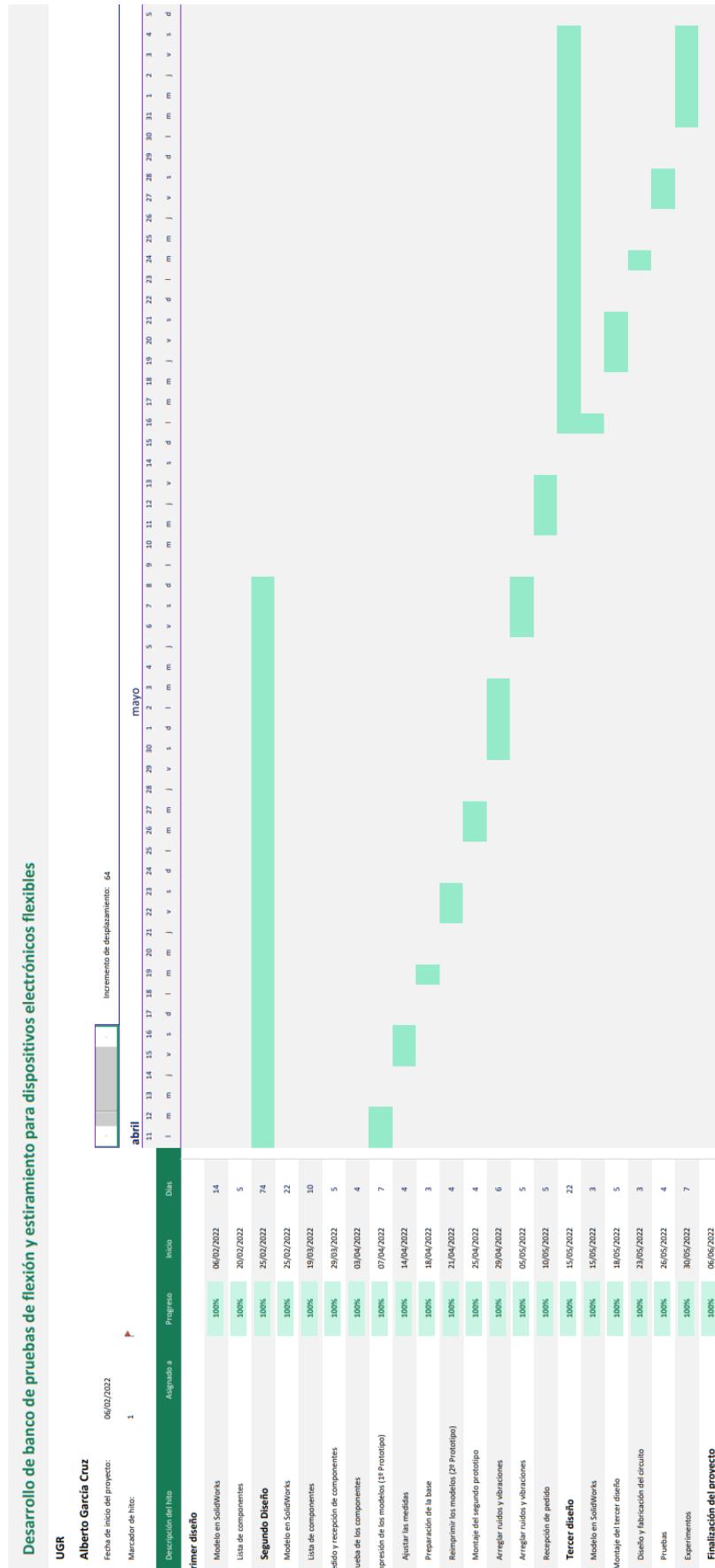


Figura 1: Diagrama de Gantt

1.3 Estructura de la memoria

Esta memoria redactada para el Trabajo Fin de Grado se divide en varios capítulos los cuales se resumen como:

1. El primer capítulo se trata de la introducción del proyecto con sus objetivos y la planificación realizada.
2. El segundo capítulo se comenta el estado del arte de la electrónica flexible comentando la evolución que ha sufrido esta rama en los últimos años y las proyecciones de futuro.
3. El tercer capítulo se explican los componentes utilizados, tanto eléctricos como mecánicos, comentando también los instrumentos y software utilizados. Además, se incluye el presupuesto del banco de pruebas.
4. El cuarto capítulo es el más extenso ya en él se habla del proceso de diseño llevado para lograr el último prototipo del banco de pruebas, como todos los problemas e inconvenientes surgidos durante la confección de este y como se solventaron. También se explica el código realizado tanto para el control del motor con el Arduino como para el GUI realizado, comentando el software y los instrumentos utilizados.
5. En el quinto capítulo se trata de una validación del sistema en donde se comentan los datos obtenidos en la realización de los estiramientos de una tira de plata impresa sobre un sustrato flexible, caracterizando su resistencia eléctrica. Demostrando el correcto funcionamiento del banco de pruebas.
6. En el sexto capítulo se comentan las conclusiones del proyecto y unas ideas de trabajo a futuro para seguir mejorando el banco de pruebas, añadiendo funcionalidades nuevas o arreglando problemas del banco actual.
7. En el séptimo capítulo se explica el material utilizado para la elaboración del banco, tanto del software como de los equipos.

Capítulo

2 Estado del arte

La electrónica flexible es una tecnología que utiliza materiales plásticos flexibles para la fabricación de circuitos electrónicos. Los circuitos construidos con esta tecnología usan componentes estándar como transistores y resistencias, pero se pueden moldear a una forma específica permitiendo crear dispositivos muy compactos y resistentes. Un dispositivo electrónico construido con electrónica flexible tiene varias ventajas como la capacidad de envolver una placa de circuito en una forma deseada permitiendo crear diseños muy compactos y eficientes. Algunos dispositivos que usan electrónica flexible están diseñados específicamente para doblarse o deformarse durante el uso diario.

El concepto de electrónica flexible existe desde hace varias décadas. En principio, cualquier cosa delgada o muy larga puede volverse flexible. El mejor ejemplo de esto podrían ser los cables y el cableado por la flexibilidad que muestra y lo útil que resulta está a la hora de realizar un prototipado o diseño temporal. No fue hasta la carrera espacial que las obleas de silicio utilizadas para las células solares en los satélites se adelgazaron para aumentar su relación potencia por peso, lo que permitió un cierto grado de deformación. Dando paso a las primeras células solares flexibles en la década de 1960 como se muestra en la Figura 2. El desarrollo de polímeros conductores semiconductores orgánicos y silicio en las décadas siguientes significó grandes avances hacia la flexibilidad y la procesabilidad, y por lo tanto estos materiales se convirtieron en la base para dispositivos electrónicos en aplicaciones que requieren doblado, enrollado, doblado y estiramiento, entre otras propiedades que no pueden cumplir la electrónica convencional.

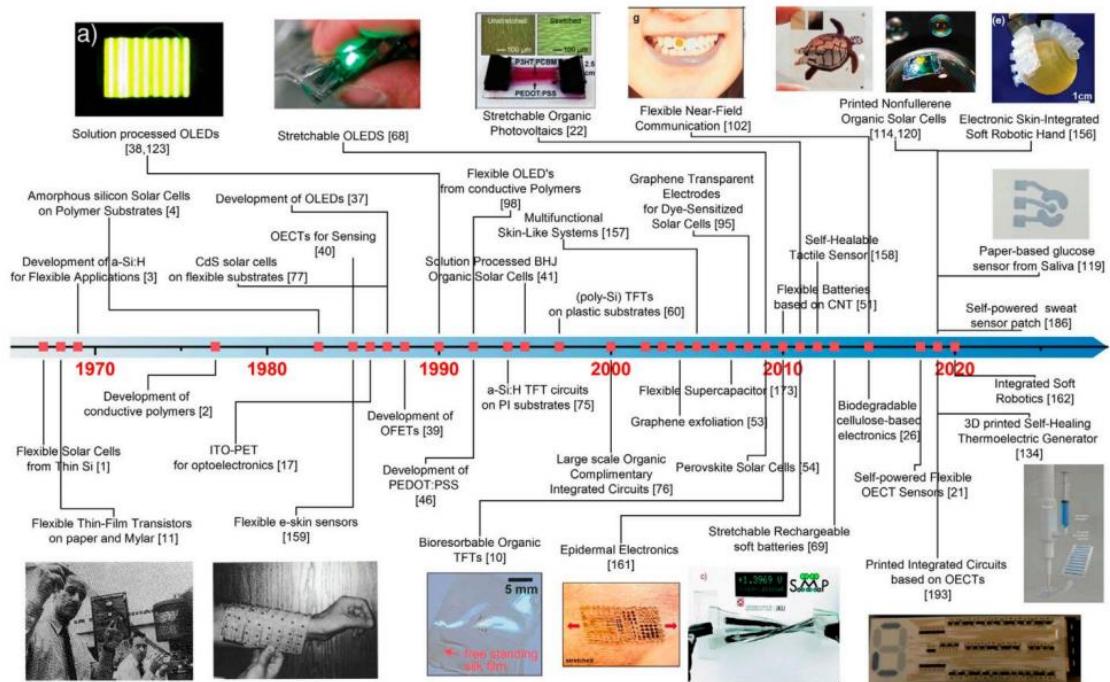


Figura 2: Cronología de desarrollos en materiales, procesamiento y aplicaciones para electrónica flexible (Wong, 2009).

2.1 Usos de la electrónica flexible.

Actualmente los teléfonos plegables utilizan circuitos flexibles para resistir el estrés causado por abrir y cerrar constantemente la pantalla. Los circuitos flexibles se pueden usar para construir dispositivos resistentes que no se dañan fácilmente cuando se caen o se abusa de ellos. La electrónica flexible permite resistir fuerzas dañinas que romperían una pantalla ordinaria como vibraciones, impactos... ya que la estructura de un plástico absorbe mejor la energía sin verse permanentemente afectado, por lo que muchos investigadores persiguen el uso de estos circuitos para la próxima generación de dispositivos electrónicos móviles como se ve en la Figura 3. Todo esto hace que la electrónica flexible sea una tecnología cada vez más interesante dadas sus útiles aplicaciones como por ejemplo para la fabricación de pantallas flexibles, células solares flexibles, baterías impresas, etiquetas inteligentes, implantes biocompatibles y ropa inteligente entre otras muchas más aplicaciones.



Figura 3: Galaxy Z Fold 3 con tecnología OLED flexible. (Chicharro, 2021)

2.2 Materiales usados en los substratos

Los materiales más utilizados en la fabricación de substratos son los mostrados en la Tabla 1.

Tabla 1: Tabla de materiales para substratos. (Fernández, 2022)

Material	Temperatura (Tg)	Cons. dieléctrica	Comentarios
FR2	105	4,55 @ 1MHz	
FR4 estándar	125-135	4,8 @ 1MHz	El más habitual
FR5	140-170	4,6 @ 1MHz	
CEM-1	110	4,4 @ 1MHz	
CEM-3	132	4,6 @ 1MHz	
Rogers R5000	280	2,3 @ 1MHz	Alta velocidad
Poliamida	260	4,3 @ 1MHz	Placas flexibles
Prepreg RO4450B	280	2,6 @ 1MHz	
Prepreg goreSpeed LF	220	2,6 @ 1MHz	

Las placas flexibles tienen un núcleo con capas flexibles y rígidas. La parte rígida se elimina en ciertas partes para otorgar la flexibilidad al conjunto. Las capas flexibles pueden ser de algún derivado de FR4 muy delgado o poliamida. Normalmente, esta parte flexible se limita a sustituir conectores entre placas, ya que poner ahí otros componentes o vías no es recomendable por el estrés mecánico al que serían sometidos. En la Figura 4 se muestra la configuración típica de una placa de cuatro caras.

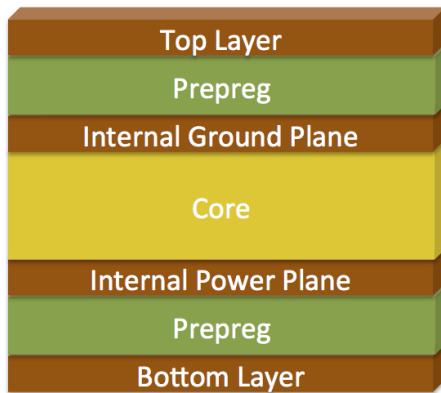


Figura 4: Stackup de una placa de cuatro caras, con una capa de sustrato y dos de prepreg. Incluye dos capas externas y dos internas, una para alimentación y otra para masa. (Fernández, 2022)

2.3 Métodos de fabricación. (Albrecht, Printed Sensors for the, 2018)

De las distintas formas de fabricar circuitos flexibles destacamos la electrónica impresa, una tecnología basada en el montaje de dispositivos electrónicos en sustratos de plástico flexibles, como por ejemplo la poliimida, PET, poliéster transparente... La electrónica impresa ha demostrado el uso de técnicas de impresión estándar para desarrollar dispositivos electrónicos con nuevas características tales como fabricación de gran superficie, flexibilidad mecánica, respeto al medio ambiente y rentabilidad. En ámbitos como el IoT, la electrónica impresa resulta muy útil ya que el número de dispositivos electrónicos empleados aumenta de forma masiva, siendo el costo y el impacto ambiental una variable cada vez más importante que considerar. Algunos métodos son la flexografía, huecograbado, deposición mediante pulverización, inyección de tinta conductora, serigrafía que serán explicados brevemente.

La impresión flexográfica es una técnica de impresión en relieve que emplea una placablanda similar a un estampado. En la impresión en huecograbado, la imagen se graba al agua fuerte o se escribe con láser en una placa de metal, creando cavidades para ser llenadas con tinta conductora. Figura 5.

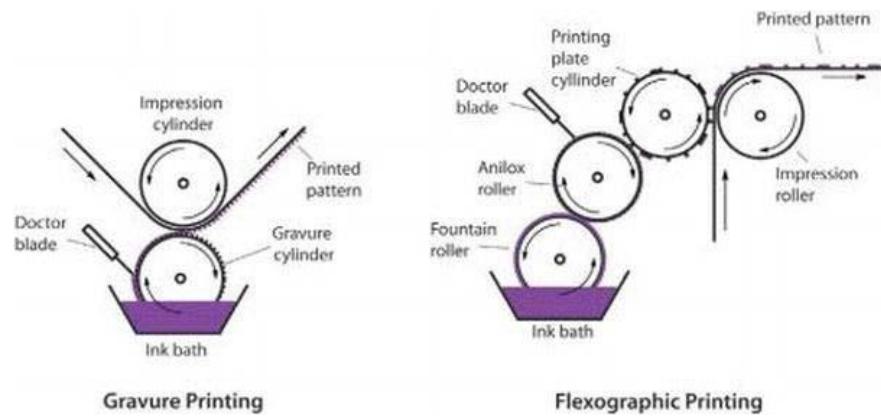


Figura 5: Esquema que muestra el principio básico de la impresión en huecograbado (izquierda) y la impresión flexográfica (derecha), así como el entintado de los cilindros de impresión y la transferencia al sustrato (Rivadeneyra, 2017))

La inyección de tinta es una tecnología muy extendida ya que es muy útil en la creación rápida de prototipos. Esta tecnología funciona con la inyección de gotas individuales desde un cabezal de impresión como se observa en Figura 6.

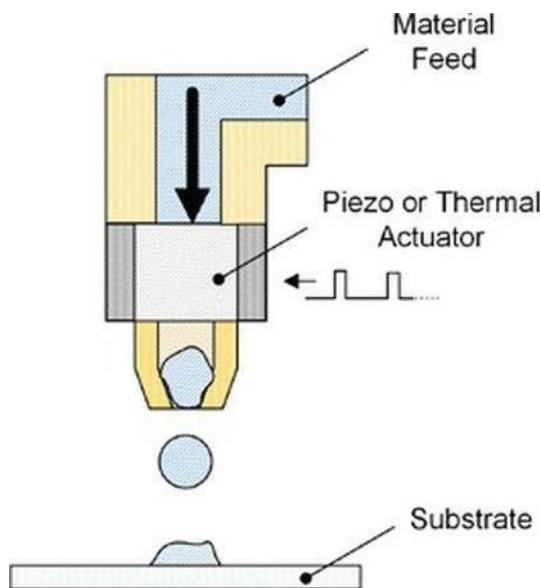


Figura 6: Esquema de una impresora de inyección de tinta que muestra los componentes clave y muestra el modo operativo. (Rivadeneyra, 2017)

La deposición por pulverización es la deposición, generalmente de un material en estado líquido, con la ayuda de una corriente de gas. El líquido a granel se separa engotitas; este proceso se conoce como atomización y posteriormente se lleva al sustrato en una mezcla de gas y una corriente de pequeñas gotas, como se muestra en la Figura 7.

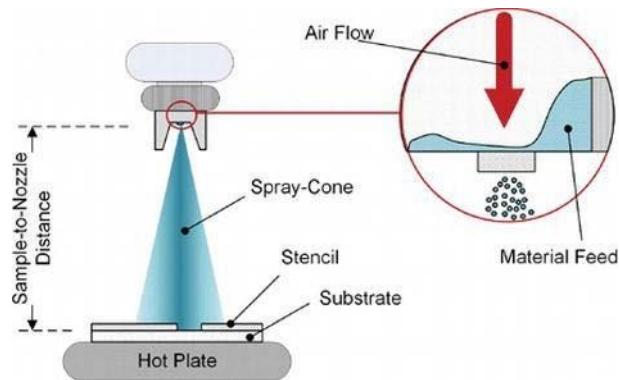


Figura 7: Esquema que muestra una boquilla de atomización asistida por aire típica que incluye elementos clave en una configuración de deposición por pulverización. (Rivadeneira, 2017)

La serigrafía es un método de impresión por contacto que utiliza una malla estampada para definir estructuras en una variedad de sustratos. Se empuja tinta muy viscosa a través de la malla que soporta una plantilla bloqueadora de tinta, con la ayuda de una escobilla de goma.

Capítulo

3 Componentes utilizados

En este capítulo se presentarán los componentes utilizados para el desarrollo del banco de pruebas, explicando su funcionamiento y parámetros. Cabe destacar que en el modelo final del mismo no se encuentran todos los componentes explicados aquí ya que se hicieron diversas pruebas para optar por unos componentes u otros hasta lograr elegir los componentes óptimos para el caso propuesto.

Como este proyecto abarca diferentes áreas se clasificarán los componentes en dos grandes grupos, los componentes mecánicos y los componentes eléctricos.

3.1 Componentes mecánicos

3.1.1 Base

En un primer lugar se intentó reutilizar un tablón de madera existente para intentar reciclar materiales, Figura 8. Al cortar el tablón se observó que no cabría en el la parte mecánica y eléctrica junta por lo que al final se optó por adquirir un tablero de madera de pino con el tamaño adecuado quedando con un acabado más profesional.



Figura 8: Tablón de madera reciclado de una estantería

En una visita al Leroy Merlin se ha encontrado un tablón con unas dimensiones de 80 x 30 x 1,8 cm de madera de pino blanda, perfecta para atornillar las piezas a ella con tirafondos para madera (Figura 9). Una vez comprada tuvo que dejarse abierta unas 48 horas para adquirir la humedad del ambiente y evitar luego grietas en su uso.



Figura 9: Tablón de pino con asas y patas niveladoras



Figura 10: Tablón de pino con asas y patas niveladoras

Al tablón se le agregaron cuatro patas niveladoras de métrica 8 en las esquinas. Los agujeros se realizaron con un taladro de columna (Figura 11) al que se le cambiaban las brocas de madera para los diferentes diámetros utilizados. Para realizar los agujeros de las esquinas se ha utilizado una broca de diámetro 8,5 mm ya que con el diámetro 8 mm (que es el mismo que el tornillo de las niveladoras) tiene demasiada estrechez (Figura 10).



Figura 11: Taladro de columna

Las patas niveladoras se colocan ajustando las tuercas para que al colocar un nivel de burbuja este se quede en el centro, en los dos ejes, tanto en el ancho como en profundidad. Una vez las tuercas inferiores están colocadas correctamente, se procede a apretar con una llave inglesa las tuercas de arriba dejando firmes las patas. Al colocar estas patas nos aseguramos de disminuir las vibraciones hacia la mesa.

Las asas se añadieron después para facilitar el transporte del banco de pruebas, se buscaron unas asas donde dejara un hueco suficientemente grande para meter la mano y agarrar con firmeza el banco. Estos agujeros también se realizaron con el taladro vertical y una broca de madera de 3 mm de diámetro.

3.1.2 Base del motor

Al utilizar un motor paso a paso normalizado como es el NEMA 17 es fácil obtener piezas para este modelo, pero se quiso diseñar también esta pieza e imprimirla en 3D, como se ve en el renderizado hecho con SolidWorks en la Figura 12. Para diseñar esta pieza se tuvieron en cuenta las dimensiones de un motor de este estilo para alinear los tornillos y la altura del eje del motor, luego se añadieron otros dos tornillos a cada lado para atornillar bien la base del motor a la base de madera. El resto de la base se dejó abierta para facilitar la refrigeración del motor y ahorrar en PLA.

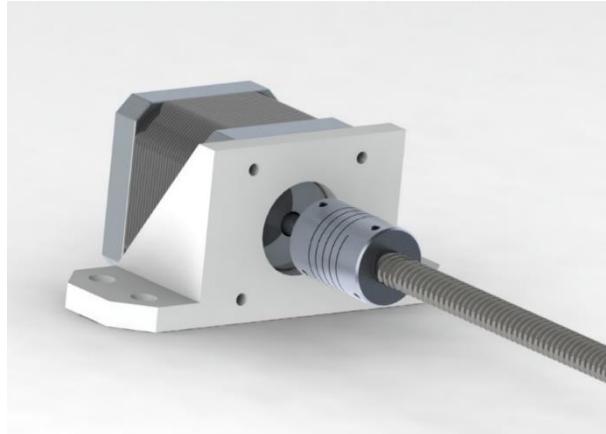


Figura 12: Renderizado base de motor en SolidWorks

Esta pieza tuvo que ser reimpressa varias veces ya que atornillar con demasiada fuerza los tirafondos hacía que se rompieran las sujeciones laterales. Y finalmente quedó como se aprecia en la Figura 13.

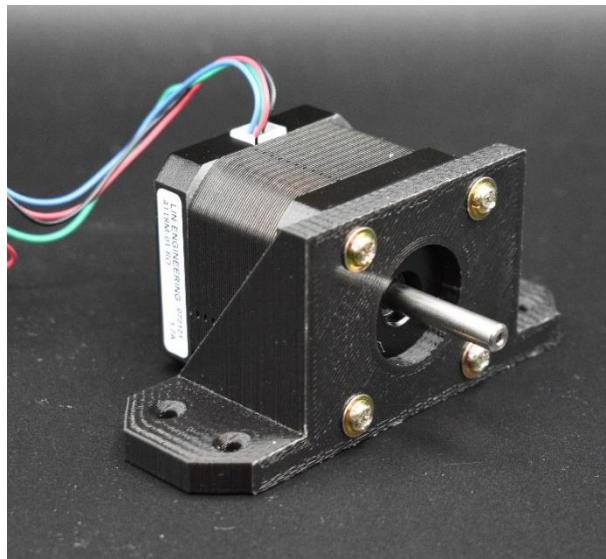


Figura 13: Base del motor impresa y atornillada

3.1.3 Pieza corredera

El motor se encargaba de hacer girar un husillo para mover en el eje horizontal una tuerca, esta tuerca se mueve por que se le impide su movimiento sobre sí misma, impidiendo que gire por lo que solo le queda la opción de desplazarse en el eje horizontal. Esta tuerca se atornilla a la pieza corredera como se observa en la Figura 14 y el movimiento circular lo bloquea mediante las guías situadas en los laterales las cuales llevan rodamientos lineales para reducir al máximo su rozamiento, evitando perder así fuerza. En lo alto de esta pieza se coloca una pieza similar con el mismo acabado para hacer una pinza y sujetar ahí las probetas. En esta parte hay que tener en cuenta la altura de la pieza ya que el motor NEMA 17 tiene la altura del

eje a una distancia de 26,5 mm por lo que no se puede hacer una pieza con una distancia mayor ya que si no chocaría con el suelo y desviaría el eje.



Figura 14: Renderizado de la corredera en SolidWorks

Quedando la pieza implementada con la tuerca y los rodamientos lineales como se ve en la Figura 15.



Figura 15: Pieza corredera impresa y atornillada

3.1.4 Pieza Fija

Para realizar el estiramiento se propuso que un extremo quedase fijo y el otro extremo fuese el que se moviese, por eso se realizó esta pieza (Figura 16). Para mantener concéntricos los agujeros de la tuerca y los rodamientos se realizó una simetría respecto a la línea que unen los centros de las circunferencias y alargar los extremos para poder atornillarlo a la base fácilmente.

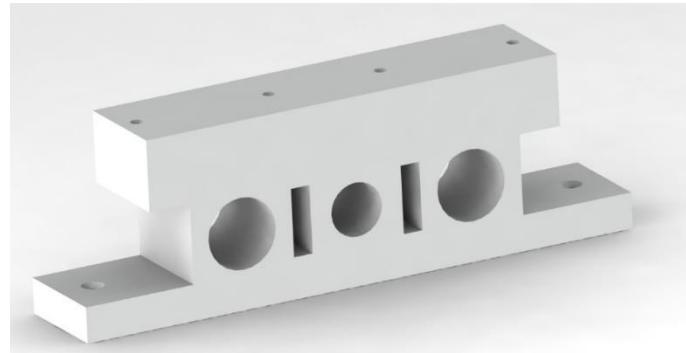


Figura 16: Renderizado de la pieza fija en SolidWorks

Al igual que la base del motor esta pieza tuvo que ser impresa varias veces ya que el diámetro del husillo dejaba muy poca holgura y por culpa de la desviación entre el husillo y el acoplamiento esta rozaba, perdiendo mucha fuerza, por lo que se reimprimió ajustando los diámetros, quedando finalmente la Figura 17.

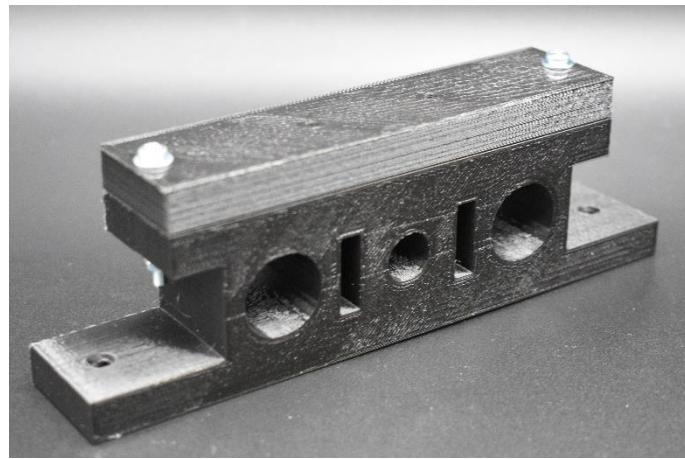


Figura 17: Pieza fija impresa

3.1.5 Pieza de sujeción

La pieza de sujeción se encarga de mantener el husillo fijo para que este solo pueda moverse sobre sí mismo en un movimiento de rotación sobre su eje (Figura 18). Esta pieza es utilizada dos veces en ambos extremos del husillo, a los laterales se encuentran dos orificios usados para mantener las guías de acero por donde deslizarán los rodamientos lineales, y en el centro se coloca un rodamiento de bolas para mantener el husillo sujeto, pero a su vez permitir su movimiento, reduciendo así el ruido generado en el husillo por la acción del motor.

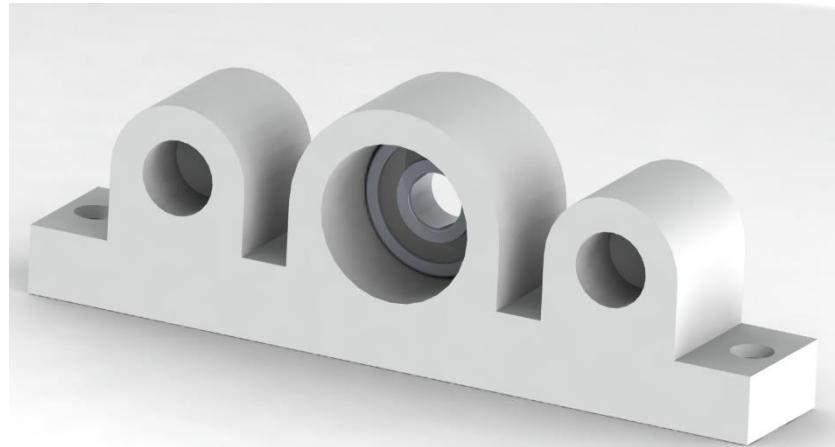


Figura 18: Renderizado de la sujeción final en SolidWorks

La pieza una vez fijada y montada queda como se ve en la Figura 19.



Figura 19: Pieza de sujeción impresa y montada

3.1.6 Husillo

El husillo y la tuerca utilizados son THSL 400 8D utilizado normalmente como recambio para impresoras 3D (Figura 20), entre sus características se destacan un diámetro del husillo de 8 mm con una precisión de paso (pitch) de 2 mm y un avance por vuelta (lead) de 8mm con una longitud total de 400 mm. El avance por vuelta es importante ya que con este dato podremos saber cuánto avanzará la tuerca por cada vuelta completa del husillo.



Figura 20: Husillo. (Createc3D, 2022)

3.1.7 Acoplamiento flexible

Para unir el eje del motor de 5 mm con el husillo de 8 mm se utiliza un acoplamiento flexible.

Existen muchos tipos de acoplamientos como pueden ser:

- Acoplamientos rígidos
 - Acoplamiento de manguito
 - Acoplamiento rígido de platos
 - Acoplamiento de manguito partido
- Acoplamiento flexible
 - Acoplamiento flexible metálico
 - Acoplamiento elástico con elemento flexible.

En nuestro caso tras un estudio hemos concluido que la mejor opción es utilizar un acoplamiento flexible (Figura 21), ya que la alineación entre ejes debe ser perfecta para una correcta transmisión de potencia entre un eje y otro y para esto se necesitan instrumentos de precisión para alienar y nivelar los ejes, que en nuestro caso al manejar torques moderados no son necesarios. Si se quisieran utilizar acoplamientos rígidos, una mínima desalineación de los ejes podría partir el acoplamiento pudiendo causar daños materiales y humanos. En cambio, los acoplamientos flexibles permiten unas tolerancias entre ejes para facilitar esta alineación. El acoplamiento utilizado es de aluminio con un diámetro exterior de 19 mm y una longitud de 25 mm, con diámetros interiores de 5 mm a 8 mm con un diseño flexible que ayuda a compensar ejes paralelos desalineados.



Figura 21: Acoplamiento flexible. (Amazon, 2022)

3.1.8 Rodamientos

Los rodamientos soportan y guían elementos giratorios u oscilantes, con una baja fricción y una gran precisión, reduciendo así el ruido, el desgaste, el calor y el consumo de energía

3.1.8.1 Rodamiento radial

Dentro de los rodamientos radiales destacamos el rodamiento de bolas, utilizado para sujetar el husillo desde sus dos extremos, pero permitiendo su giro gracias al anillo interno que lo sujeta que permite un movimiento giratorio relativo entre el anillo exterior (Figura 22).



Figura 22: Rodamiento radial. (Components, 2022)

3.1.8.2 Rodamiento lineal

Los rodamientos de movimiento lineal están diseñados para ejes o superficies planas. Estos rodamientos funcionan por recirculación de bolas, disponiendo así de un movimiento lineal casi sin fricción. Estos rodamientos son utilizados en la pieza corredera para permitir el movimiento lineal con respecto a la guía, pero no permitir el movimiento giratorio de la tuerca sobre el husillo (Figura 23).



Figura 23: Rodamiento lineal. (Fervi3d, 2022)

3.2 Componentes eléctricos

3.2.1 Motor paso a paso

El motor paso a paso está compuesto por rotor y estator. El estator es una parte estacionaria, mientras que el rotor montado en el eje con un cojinete gira siguiendo el campo magnético giratorio creado alrededor del estator.

Los motores paso a paso son motores de corriente continua que se mueven en pasos discretos. Tienen múltiples bobinas que se organizan en grupos llamados "fases". Al energizar cada fase en secuencia, el motor girará, un paso a la vez.

Con un motor paso a paso controlado por ordenador se puede conseguir un posicionamiento y/o un control de velocidad muy precisos. Por esta razón, los motores paso a paso son el motor elegido para muchas aplicaciones de control de movimiento de precisión como es nuestro caso (Figura 24).

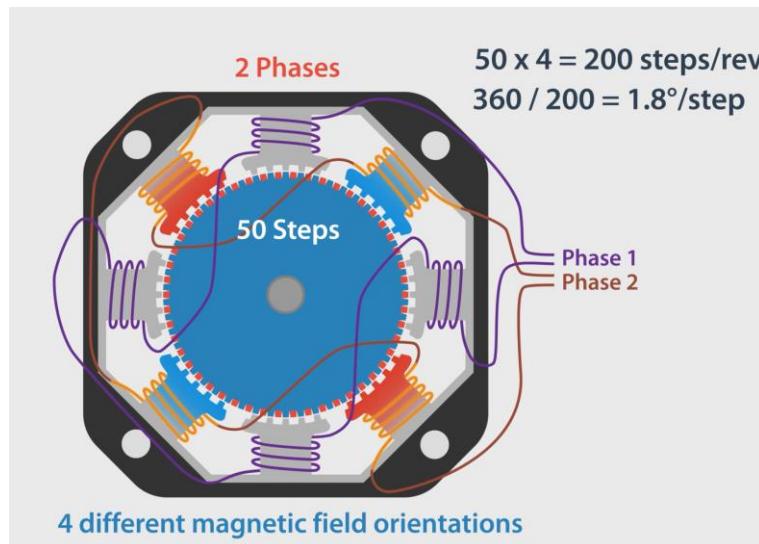


Figura 24: Motor paso a paso de 1, 8%/step. (Dejan, 2022)

Existen varias formas de diferenciar los tipos de motores paso a paso como podrían ser los motores de paso a paso de imán permanente (los cuales tienen un paso de $7,5^\circ$ a 15°), los motores de reluctancia variable, que fueron los primeros modelos de motores paso a paso creados, los motores de paso a paso híbrido siendo estos unos de los motores paso a paso más utilizados en la industria ya que se caracterizan por una elevada resolución (realizando saltos de $0,9^\circ$ hasta $3,6^\circ$). Pero en nuestro caso los diferenciaremos en motores unipolares y bipolares.

- Motores unipolares

En estos motores la corriente circula siempre en el mismo sentido en cada bobina. Cuentan con dos bobinas con un punto medio por donde salen los cables hacia el exterior; estos cables se conectan a la fuente mientras que los extremos de las bobinas son aterrizados para cerrar el circuito. El motor tiene dos bobinas conectadas a un punto en común. Ahora, y dependiendo de qué media bobina se energice, se puede tener un polo norte o un polo sur; si se energiza la otra mitad, se obtiene un polo opuesto al otro.

- Motores bipolares

En estos motores la corriente sigue una secuencia alterna que cambia el sentido de la intensidad. Se trata de dos bobinas sin ningún punto medio, por lo que se tienen cuatro cables y cada par corresponde a los terminales de una bobina.

En resumen, en el motor bipolar al momento de energizar las bobinas del estator se generan simultáneamente dos polos magnéticos, uno norte y uno sur, y en el motor unipolar al tener un cable que es común para dos bobinas, se puede energizar una sola bobina y con esto crear un polo magnético para atraer a un polo del rotor; al no tomar en cuenta ese cable común el motor unipolar puede ser usado como un bipolar. Una comparación del bobinado de los motores unipolares y bipolares se muestra en la Figura 25.

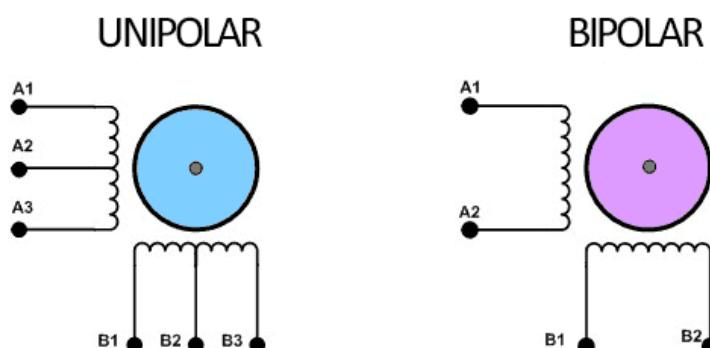


Figura 25: Modelo conceptual de un motor unipolar y bipolar. (Llamas, luisllamas.es, 2016)

A la hora de elegir un motor u otro nos fijamos en la Tabla 2 y finalmente optamos por la opción de usar un motor bipolar.

Tabla 2:Tabla comparativa de motores bipolares y unipolares. (330ohms, 2022)

Motores bipolares	Motores unipolares
Mayor torque	Menor torque
Más pequeño	Menor anclaje
Más barato	Mayor volumen
Mayor anclaje debido a los embobinados	Más caro
Mayor complejidad para el control (es necesario un controlador)	Control más sencillo

NEMA corresponde a la Asociación Nacional de Fabricantes Electrónicos, esta asociación se encarga de crear un estándar industrial aplicado al campo de la electricidad. Por lo que los motores NEMA 17 hacen referencia a los motores de paso a paso con un encapsulado de 1,7 x 1,7 pulgadas de área transversal, de ahí viene el número 17. La longitud de estos motores ya depende de otros factores como a la corriente máxima o el torque generado. Optamos por usar los motores paso a paso NEMA 17 ya que son los más utilizados en el mercado y se encuentran ampliamente documentados con una gran variedad de sujeteciones ya adaptadores diseñados específicamente para estos. Las especificaciones técnicas del motor elegido se encuentran en la Tabla 3.

3.2.2 Especificaciones técnicas

Tabla 3: Especificaciones técnicas del motor. (Farnell, Farnell, 2022)

Motor paso a paso 4118M-01RO		Valores
Tipo de motor	Eje doble	
Tamaño de motor	42 mm	
Par máximo	0.44 N·m	
Tipo de bobina	Bipolar	
Corriente nominal	1.7 A	
Ángulo de paso	1.8°	
Número de fases	Dos Fases	
Resistencia	1.5 Ω	
Inductancia	3 mH	
Tensión nominal	24 VDC	
Número de Hilos	4	
Diámetro del eje	5 mm	
Peso	0.286 Kg	

3.2.3 Microcontroladores

En este apartado se presentará el microcontrolador utilizado en el proyecto y las alternativas valoradas. El microcontrolador es el encargado de coordinar las distintas partes del sistema.

3.2.3.1 Arduino (*Arduino, 2022*)

Arduino nació en el año 2005 en el Instituto de Diseño Interativo de Ivrea (Italia) y cuyo propósito era desarrollar una placa de hardware libre integrada con un microcontrolador y una interfaz de programación. Está diseñado y construido para que sea muy fácil de utilizar y para que en él se pueden desarrollar proyectos multidisciplinarios. El hardware es una placa compuesta por un microcontrolador Atmel y varios puertos de entrada/salida digitales y analógicos.

Los principales motivos por los cuales elegir Arduino como microcontrolador son:

- **Tiene una amplia documentación:** Se dispone de una amplia cantidad de información sobre este microcontrolador, complementándose con la extensa comunidad de usuarios que la mantiene y la actualiza. Esto se debe a que Arduino se trata de un hardware y software libre.
- **Bajo costo:** El precio de una placa Arduino oscila entre 5 € y 20 €.
- **Es fácil de programar:** Existe una gran cantidad de librerías predeterminadas en el IDLE de Arduino con multitud de ejemplos que facilitan la creación de nuevo código.

Al contar con un software autoprogramable (bootloader) integrado, hace que no sea necesaria ninguna tarjeta de programación.

- **Variedad de placas:** En función del proyecto a realizar existen diferentes familias de placas, con características diferentes, como un mayor número de entradas/salidas para aplicaciones que demanden un mayor número de periféricos (como podría ser el Arduino Mega), o placas de tamaño reducido y bajos consumos (como la familia de Arduino Nano).

3.2.3.2 Arduino Mega

Se utilizó una placa de la familia de las Arduino Mega para realizar las pruebas y el prototipado del motor y del controlador, para posteriormente dar el salto al Arduino Nano Every y minimizar el tamaño de la placa controladora.

3.2.3.3 Arduino Nano Every

Las placas Arduino son reconocidas como las mejores placas para comenzar a adentrarse en la electrónica y la programación por la gran comunidad que se encuentra detrás respaldándola, existiendo incontables proyectos y tutoriales que facilitan la comprensión de estos circuitos (Figura 26).

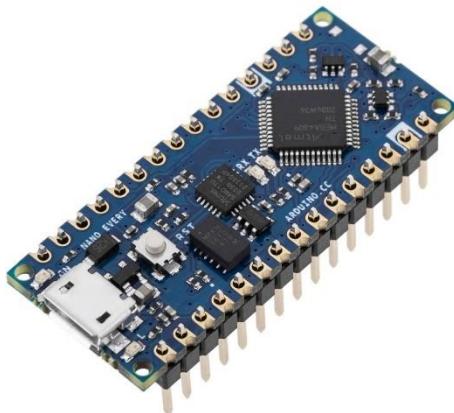


Figura 26: Arduino Nano Every. (Arduino, 2022)

Arduino Nano Every es una placa electrónica basada en el microcontrolador ATMega4809. Siendo esta la placa de 5V más pequeña compatible con Arduino con un factor de forma de 45x18mm. Arduino Nano es la placa preferida para muchos proyectos que requieren una placa de microcontrolador pequeña y fácil de usar. El tamaño reducido y el bajo precio hacen que Nano Every sea particularmente adecuado para nuestro proyecto, siendo una evolución de la placa Arduino Nano tradicional, con un procesador más potente, pudiendo hacer programas más grandes que incluso con el Arduino Nano y con más variables ya que esta tiene

un 200% más de RAM, por esto y su bajo precio es por lo que se ha elegido este microcontrolador.

Especificaciones técnicas (Tabla 4).

Tabla 4: Especificaciones técnicas del Arduino Nano Every.

Arduino Nano Every	Valores
Microcontrolador	ATMega4809
Voltaje de operación	5 V
Voltaje de entrada máximo	7-21 V
Corriente por I/O pin	20 mA
Corriente por 3.3V pin	50 mA
Velocidad del reloj	20 MHz
Memoria flash	48 KB (ATMega4809)
SRAM	6 KB (ATMega4809)
EEPROM	256 Byte (ATMega4809)
PWM PINS	5 (D3, D5, D6, D9, D10)
UART	Sí
SPI	Sí
I2C	Sí
USB	Usa el ATSAMD11D14A
Pines analógicos de entrada	8 (ADC 10 bit)
Pines analógicos de salida	Solo por PWM (Sin DAC)
Pines digitales de E/S	14
Longitud	45 mm
Ancho	18 mm
Peso	5 gr

3.2.4 Controlador de motores DRV8825

El controlador utilizado para el motor NEMA 17 es un controlador integrado que contiene dos controladores de puente H y un indexador de micro pasos, diseñado para controlar un motor paso a paso bipolar (Figura 27). La salida del controlador consiste en MOSFETs de potencia configurados como puentes H completos para alimentar los devanados del motor. Este controlador es capaz de dar hasta 2.5 A de corriente a cada bobina (Con un disipador de calor

apropiado y a una tensión de 24V a 25°C). La tensión de funcionamiento del controlador varía de 8.2 V hasta 45 V.

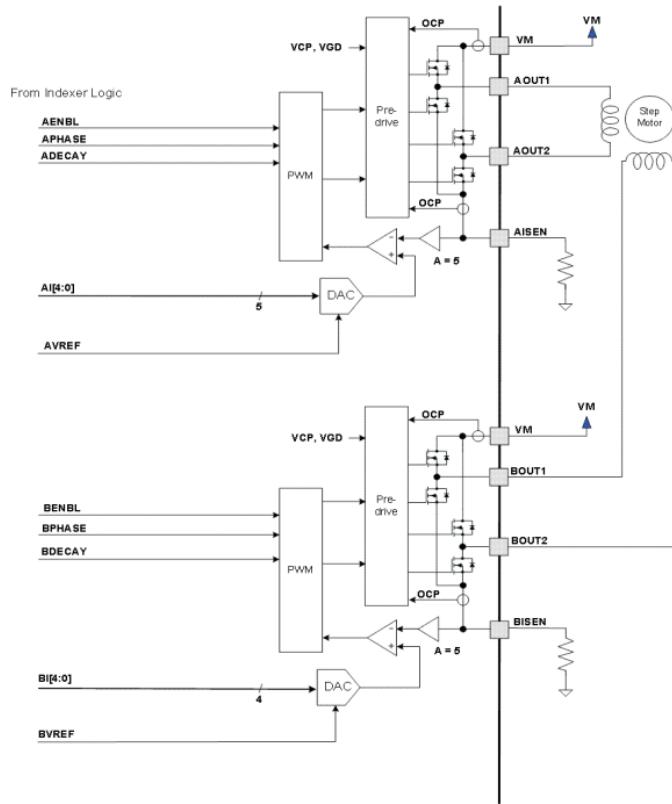


Figura 27: Circuito de control de motores. (Instrument, 2014)

Este también posee protecciones como:

- Protección contra sobretensiones (OPC): Un circuito limitador de corriente analógico en cada MOSFET que limita la corriente a través de estos. Si se prolonga la corriente por un tiempo mayor que el tiempo OCP todos los MOSFETS del puente H se desactivaran y el pin nFAULT tendrá un valor bajo. Este estado se mantendrá hasta que se reinicie el controlador usando el pin NReset o quitando la alimentación del driver.
- Apagado térmico (TSD): Si la temperatura excede los límites seguros todos los MSOFETS del puente H se desactivarán y el pin nFAULT tendrá un valor bajo. Cuando la temperatura descienda el circuito se activarán automáticamente.
- Bloqueo por bajo voltaje de alimentación (UVLO): Si en algún momento el voltaje en los pines VM cae por debajo del umbral de voltaje UVLO, todos los circuitos en el dispositivo serán deshabilitada y la lógica interna será reiniciada. La operación se reanudará cuando V(VMx) supere el umbral de UVLO.

Puente H

Un puente H es una configuración de 4 puertas activadas por pequeñas señales y que abiertas en parejas de dos dejan la corriente fluir en un sentido u otro.

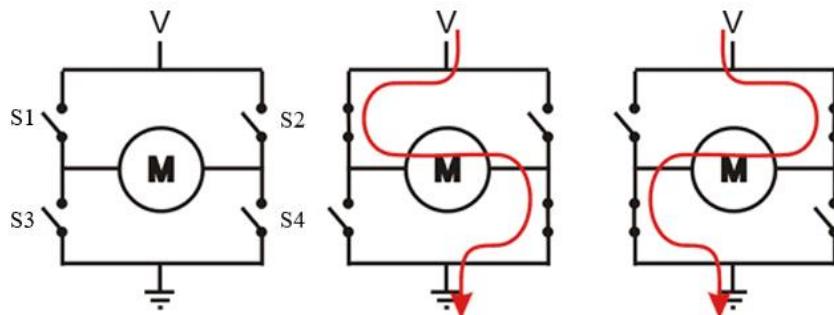


Figura 28: Esquema de funcionamiento de un puente H. (Anghel, s.f.)

Cuando los interruptores S1 y S4 están cerrados, S2 y S3 estarán abiertos y circulará una corriente por el motor en la dirección mostrada en la segunda imagen. En el caso en el que S1 y S4 estén abiertos, S2 y S3 estarán cerrados y circulará una corriente en sentido puesto al caso anterior por el motor, como se muestra en la tercera imagen, invirtiendo el sentido de giro del motor, en la Figura 28 se muestra un esquema de funcionamiento de un puente H. Los interruptores S1 y S3 o S2 y S4 nunca deberán estar cerrados al mismo tiempo o se causará un cortocircuito entre Vmot y GND.

Según el datasheet del DRV8825 los MOSFETS tienen una resistencia de conducción de 0.2Ω por lo que la corriente de cortocircuito causada por un fallo al cerrar S1 y S3 o S2 y S4 sería de (1):

$$I_{cc} = \frac{V_{mot}}{2 * R_{DS(on)}} = \frac{24V}{2 * 0.2\Omega} = 60A \quad (1)$$

Si los interruptores S1, S2, S3 y S4 están abiertos, el motor estará libre. Mientras que, si el motor está girando y queremos frenarlo o pararlo, se debe derivar la tensión inducida (fcem) generada por la inercia del motor hacia un sistema llamado frenado dinámico.

En resumen, el puente H puede dar lugar a los siguientes estados (Tabla 5):

Tabla 5: Posibles estados de conmutación del puente H. (García, 2014)

Motor	S1	S2	S3	S4
Libre	Abierto	Abierto	Abierto	Abierto
Gira =>	Abierto	Cerrado	Abierto	Cerrado
Frenado	Abierto	Abierto	Cerrado	Cerrado
Gira <=	Cerrado	Abierto	Cerrado	Abierto
Frenado	Cerrado	Cerrado	Abierto	Abierto
Cortocircuito	Cerrado	X	Cerrado	X
Cortocircuito	X	Cerrado	X	Cerrado

3.2.4.1 Conexión y pines del DRV8825

El controlador DRV8825 se controla mediante una interfaz de 2 pines STEP/DIR facilitando mucho su control (Figura 29). También existen pines M0, M1 y M2 para configurar del modo de paso completo hasta el modo de 1/32 de paso.

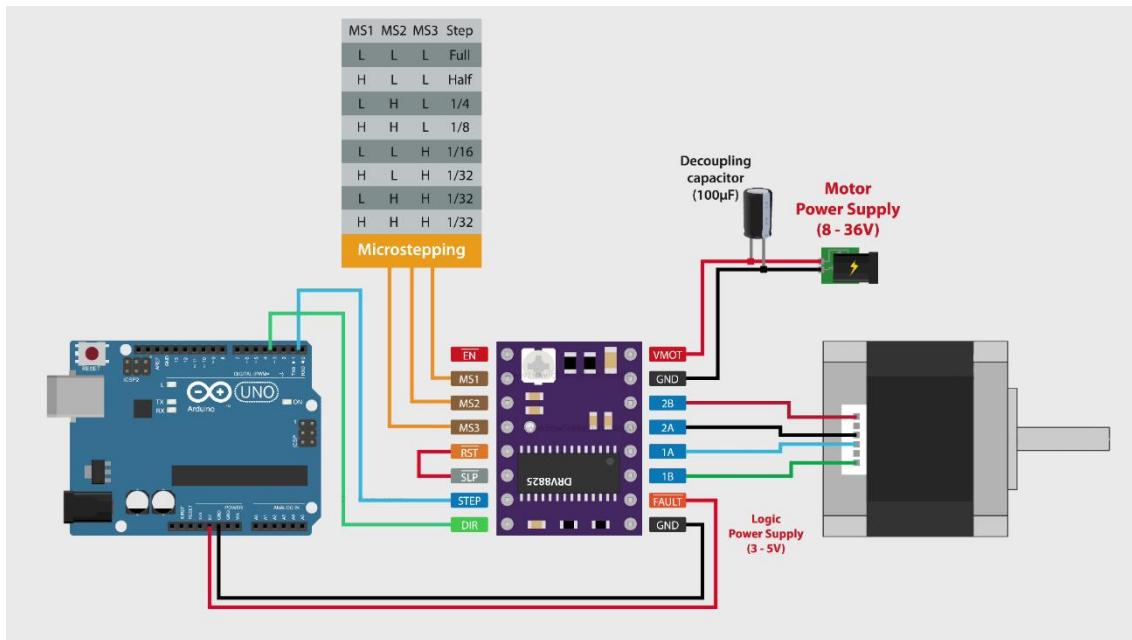


Figura 29: Conexión del driver DRV8825. (Llamas, luisllamas.es, 2016)

3.2.4.2 Micropasos

Los micropasos o microstepping es una funcionalidad de los drivers de motores que permiten dividir los pasos en pasos adicionales, pudiendo dividir los comunes 200 pasos de la mayoría de estos motores a 400 o hasta 6400 (con el controlador DRV8825). Para lograr esto en vez de cargar las bobinas al 100% se juega cargando ambas bobinas consecutivas al 50% o

similares, en función del microstepping que se desé, esto hace que se puedan dar pasos menores de los que el motor podría realizar de forma nominal, pero hay que tener en cuenta que esto lleva a una reducción del torque total ejercido por el motor, por lo que para nuestro propósito debemos estudiar si merece la pena el uso de esta función o no. Otras ventajas del microstepping es la reducción de ruido y vibraciones, ya que al aumentar la resolución del motor los movimientos del motor serían más suaves. Las configuraciones de microstepping que posee el driver DRV8825 son las mostradas en la Tabla 6.

Tabla 6: Formato de pasos. (Instrument, 2014)

M2	M1	M0	STEP MODE
0	0	0	Full Step
0	0	1	$\frac{1}{2}$ Step
0	1	0	$\frac{1}{4}$ Step
0	1	1	8 Microsteps/step
1	0	0	16 Microsteps/step
1	0	1	32 Microsteps/step
1	1	0	32 Microsteps/step
1	1	1	32 Microsteps/step

3.2.5 Otras alternativas de controladores estudiadas

3.2.5.1 A4988

El A4988 es un controlador de la empresa Pololu utilizado para controlar motores paso a paso, sus pines y funcionalidades son casi las mismas que el DRV8825, se podría decir que el A4988 es una versión anterior del DRV8825 con menor ya que este solo llega hasta 35V de tensión máxima admisible y una corriente de 1^a crón un microstepping máximo de 1/16 mientras que el DRV8825 llega hasta 45V con una corriente de 1.5A y la posibilidad de hacer 1/32 de microstepping.

3.2.5.2 L298N

El módulo L298N es un controlador de motores con un doble puente H para manejar dos motores de corriente continua o motores paso a paso bipolares de entre 5V y 35V, este módulo está formado por un regulador de voltaje 5V LM7805 y son necesarios 4 pines para controlar la intensidad que circularán por las bobinas. Al igual que con el A4988 este controlador presenta mayores limitaciones que el DRV8825. La poca diferencia de precio entre uno y otro hace que la opción más acertada sea el controlador DRV8825.

3.2.6 Convertidor DC-DC LM2596

Los reguladores de la serie LM2596 son circuitos integrados que proporcionan todas las funciones de un regulador de conmutación reductor (buck), capaz de manejar una carga de 3 A con regulación de línea y de carga. Estos dispositivos están disponibles en tensiones de salida fijas salida fija de 3,3 V, 5 V, 12 V, y una versión de salida ajustable. La serie LM2596 funciona a una frecuencia de conmutación de conmutación de 150 kHz, permitiendo así componentes de filtro de menor tamaño. Un ejemplo de un convertidor DC/DC implementado con el integrado LM2596 puede verse en la Figura 30.

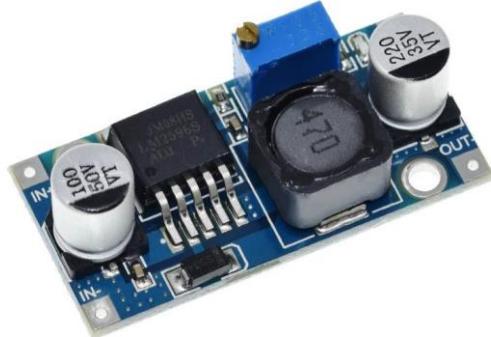


Figura 30: Convertidor LM2596. (naylampmechatronics, 2022)

3.2.7 Fuente de alimentación

Para alimentar tanto el motor como el circuito auxiliar se ha utilizado una fuente de alimentación AC-DC de 75 W refrigerada por convección dado su diseño abierto con orificios por donde disipar el calor generado. Esta fuente otorga 24 V ajustables mediante un potenciómetro con una corriente máxima de salida de hasta 3.2 A. A pesar de su bajo precio esta fuente tiene muy buenas prestaciones ya que tiene hasta un 91% de eficiencia y protección ante cortocircuito, sobrecarga y sobretensiones (Figura 31).



Figura 31: Fuente de alimentación. (Farnell, Farnell, 2022)

3.2.8 Finales de carrera

Los finales de carrera son interruptores de acción rápida utilizados normalmente para establecer los límites de movimiento de un actuador. Estos son colocados en los extremos y al colisionar se activa el interruptor mandando un pulso al microcontrolador que detiene el movimiento del actuador (Figura 32).



Figura 32: Final de carrera. (FC, 2022)

3.2.9 Otros componentes

Adicionalmente se han utilizado:

- Cables de alimentación para enchufar directamente a la pared y alimentar la fuente de alimentación.
- Conectores macho y hembra circulares de 2.1 mm para facilitar la alimentación del circuito eléctrico.
- Condensador de $100 \mu\text{F}$ de desacoplo para la entrada de 24V del controlador.
- Resistencias para realizar el interruptor pull-up de los finales de carrera.
- Conectores terminal cable a placa.
- Estaño para las vías en la cara trasera de la placa.

3.3 Presupuesto

Tras haber realizado la lista de todos los componentes necesarios para la confección del banco de pruebas podemos estimar el precio de un único banco de pruebas en la Tabla 7 (sin tener en cuenta la mano de obra).

Tabla 7: Presupuesto del banco de pruebas

Componentes finales del banco	Cantidad	Cantidad/banco	Precio	Precio/banco	Vendedor
Controlador DRV8825	5	1	19,99 €	4,00 €	Amazon
Motor paso a paso NEMA 17	1	1	113,05 €	113,05 €	Farnell
Acoplamiento flexible 5mm->8mm	6	1	11,06 €	1,84 €	Amazon
Husillo + tuerca	1	1	4,50 €	4,50 €	Createc 3D
Guía	4	2	28,93 €	14,47 €	RS
Rodamiento lineal	8	2	23,28 €	5,82 €	Amazon
Fuente de alimentación	1	1	13,84 €	13,84 €	Farnell
Cable de alimentación	1	1	6,23 €	6,23 €	Farnell
de alimentación con conector cilíndrico n	1	1	0,94 €	0,94 €	Farnell
de alimentación con conector cilíndrico h	1	1	1,17 €	1,17 €	Farnell
Final de carrera	1	2	2,94 €	5,88 €	Farnell
Arduino nano every	1	1	13,21 €	13,21 €	Farnell
Rodamiento de bolas	1	2	2,27 €	4,54 €	RS
Tablón de pino	1	1	9,49 €	9,49 €	Leroy Merlin
Niveladores	1	4	1,45 €	5,80 €	Ferreteria
Asa	1	2	2,69 €	5,38 €	Leroy Merlin
PLA	1	1	39,41 €	39,41 €	RS
Placa agujereada	1	1	4,50 €	4,50 €	Sonytel
Tornillos/tuercas y similares	1	1	10,00 €	10,00 €	Ferreteria
LM2596S DC-DC	5	1	7,99 €	1,60 €	Amazon
TOTAL			316,94 €	265,66 €	

Como podemos ver el precio unitario por banco de pruebas sería de 265,66 €. En comparación con otras soluciones comerciales, la fabricación de este banco de pruebas resulta muy rentable, ya que los precios por bancos de pruebas de parámetros similares suelen costar en torno a 1500€ - 3000€.

Las horas de trabajo de este proyecto equivalen a unas 380 horas aproximadamente que teniendo en cuenta el sueldo medio de un ingeniero electrónico industrial ronda los 25€/hora nos deja un total de 9500€.

Capítulo

4 Diseño del banco de pruebas

Primero se ha realizado una investigación sobre diferentes bancos de pruebas utilizados para la realización de ensayos de flexión y estiramientos para extraer de ellos ideas para el diseño. Existen soluciones comerciales para la realización de estos ensayos, pero suelen ser muy costosas por lo que se propone este trabajo para desarrollo de un banco de pruebas con funcionalidades similares.

Una herramienta importante para el diseño del banco de pruebas son programas de diseño asistido por ordenador, pudiendo así hacer escalado de las piezas y un primer acercamiento al prototipo que se pretende fabricar. Se ha utilizado el programa SolidWorks como programa de diseño 3D. Primero nos preguntamos qué es lo que queremos hacer, a lo que respondemos que buscamos un movimiento rectilíneo que soporte bien la tensión.

4.1 1º Diseño

Como primera idea de diseño se tomó como inspiración un banco de pruebas realizado en “Over-Stretching Tolerant Conductors on Rubber Films by Inkjet-Printing Silver Nanoparticles for Wearables” que constaba de un rail por donde iba a deslizar un soporte usando una correa de distribución movida por un motor paso a paso (Figura 33).

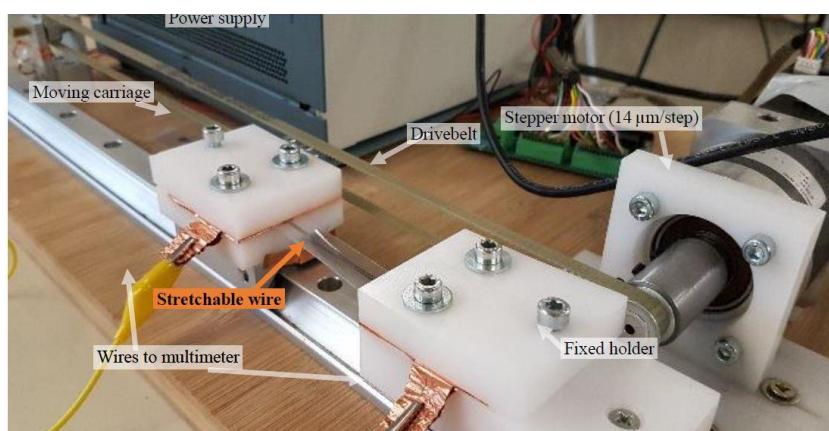


Figura 33: Caracterización del setup con un rail y correa de distribución. (Albrecht, Over-Stretching Tolerant Conductors on Rubber Films by Inkjet-Printing Silver Nanoparticles for Wearables, 2018)

Se ha diseñado en SolidWorks como sería el funcionamiento (Figura 34) y la lista de materiales para utilizar.

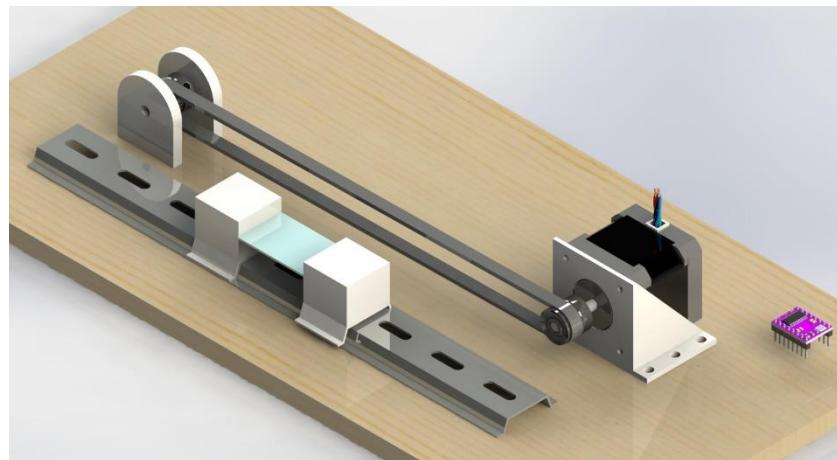


Figura 34: Renderizado del 1º diseño en SolidWorks

Para la realización de la lista de componentes se han tenido en cuenta los valores nominales y medidas de estos ya que son necesarios para que todos los componentes conecten entre ellos (Tabla 8).

Tabla 8: Componentes del primer diseño junto con sus parámetros

Componente	Voltaje (V)	Corriente (A)	Diámetro del eje(mm)	Ancho(mm)	Longitud(mm)	Espaciado(mm)
Controlador: drv8825	De 8 a 42	1,7				
Motor paso a paso	24		5			
Adaptador Eje-Correa			6	15		5
Correa				9	500	5
Encoder	5		6			
Oled	5					
Microcontrolador	5					
Teclado	24					
Fuente de alimentación	De 5 - 24	2				

Después de considerarlo durante un tiempo se decidió ver otras alternativas, ya que este diseño puede presentar unos inconvenientes como por ejemplo la elongación de la correa de distribución al estar sometida a una tensión, ya que teniendo en cuenta este efecto, podríamos tener errores en la lectura de la distancia recorrida.

Por lo que al analizar el caso que se tenía, lo que se buscaba era convertir un movimiento giratorio en uno lineal, y buscando mecanismos que realizarán esto se buscó implementar el mecanismo de tuerca de tornillo de potencia.

4.2 Mecanismo tornillo-tuerca

La tuerca de tornillo de potencia se utiliza para transformar el movimiento de rotación en otro rectilíneo, transmitiendo potencia (Figura 35). Ya que existe un movimiento relativo de translación y rotación entre dos piezas como lo son un husillo y una tuerca. Este mecanismo es el usado en la mayoría de las máquinas CNC e impresoras 3D, ya que se consigue mucha precisión con una buena conservación del torque del motor.

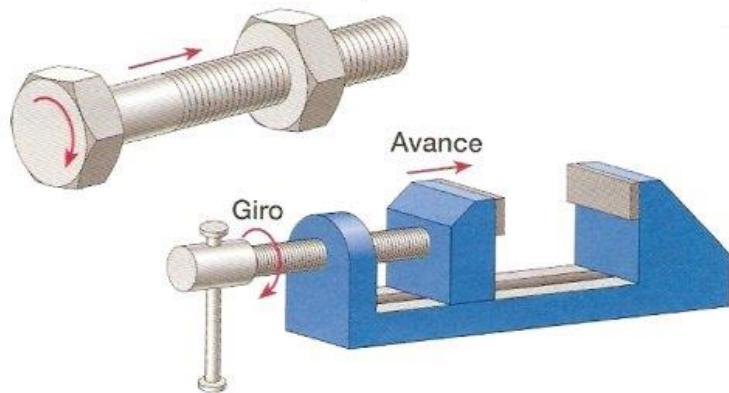


Figura 35: Mecanismo de tornillo-tuerca implementado en un tornillo de banco. (Blanco, 2016)

4.3 2º Diseño

Buscando aplicar el mecanismo anteriormente mencionado se diseñó el siguiente modelo (Figura 36)

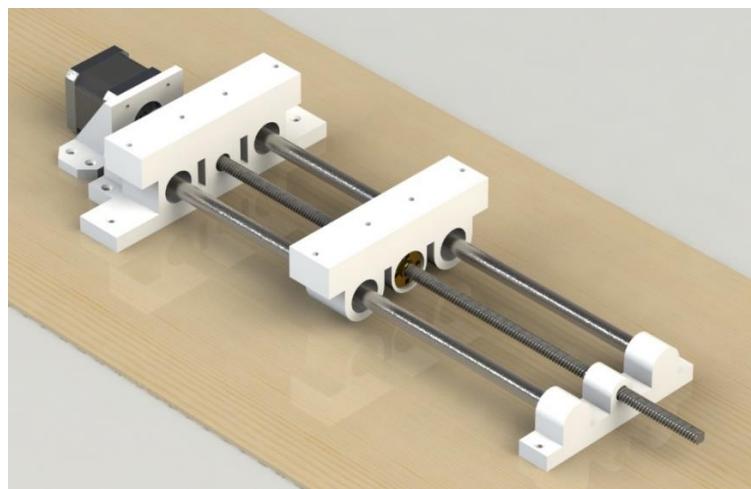


Figura 36: Renderizado del 2º diseño en SolidWorks

Como se observa el diseño consta de un motor paso a paso NEMA 17 atornillado a la base de madera mediante una pieza que va atornillada al motor mediante los cuatro tornillos métrica 3 por la cara frontal del motor y atornillada a la base mediante cuatro tirafondos de madera de 3 mm de diámetro.

Primero se procede a realizar un eje de referencia en la mitad de la base para alinear todos los demás componentes y así reducir al máximo la desviación entre el husillo y el eje del motor (Figura 37).



Figura 37: Eje de referencia sobre el que atornillar las piezas en la base de madera

Posteriormente se agrega el acoplador y el husillo de forma que la cara con diámetro interno de 5 mm se conecte con el eje del motor y la cara que tiene un diámetro interno de 8 mm se conecte con el husillo. Estos han de colocarse a una profundidad suficiente, pero sin que toquen internamente los ejes, como se muestra en la Figura 38.

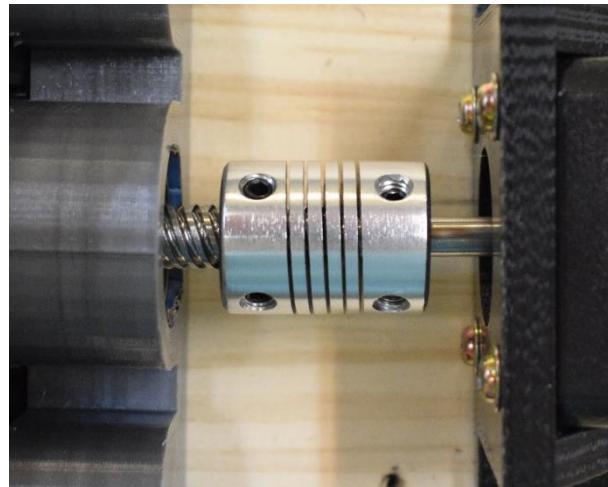


Figura 38: Acoplamiento de ejes

Una vez colocado el eje se colocaba una pieza para mantener en su posición el acoplamiento flexible y también encargada de sujetar las guías laterales de acero plateado de 10 mm. A continuación, se colocaba la pieza fija, atornillada a la base lo más cerca posible de la pieza de sujeción anterior para aprovechar toda la longitud de las guías, ya que estas son de 330 mm de longitud, limitando la distancia máxima que puede haber entre la pieza fija y la pieza corredera (Figura 39).



Figura 39: Proceso de montaje del 2º diseño

En la pieza corredera se atornilla la tuerca del husillo mediante cuatro tornillos métrica 2 y se colocan los rodamientos lineales en sus respectivos agujeros, quedando como se observa en la Figura 40.



Figura 40: Pieza corredera con la tuerca y los rodamientos lineales

Finalmente colocamos la pieza de sujeción en el otro extremo del husillo fijando así las guías de acero plateado y finalizando el montaje.

Quedando el segundo diseño como se ve en la Figura 41.



Figura 41: Montaje del 2º diseño

Una vez terminado el montaje del banco se procedió a hacer una serie de pruebas para verificar el correcto funcionamiento de este. En las pruebas se vio que había mucho ruido mecánico por parte del motor causado por las vibraciones del eje, el excesivo torque y la falta de sujeción del husillo. Además, había mucho rozamiento de piezas en la parte de sujeción del acoplamiento y en el extremo final del husillo. El motivo por el cual había tanto rozamiento era que al atornillar las piezas en la base de madera se desplazaban un poco en relación con los agujeros preparados para ellos, por lo que al final existía una desviación bastante considerable entre el eje del motor y el husillo, lo que causaba que rozaran piezas como la sujeción del acoplamiento.

4.4 Diseño final

Para arreglar todos los problemas que surgieron en el montaje del 2º diseño del banco de pruebas se rediseñaron algunas piezas y se añadieron dos rodamientos radiales en los extremos del husillo para mantener sujeto el husillo por ambos extremos reduciendo en gran parte el ruido en este. Por lo que se rediseñaron las piezas de sujeción y en un extremo se dejó de sujetar el acoplamiento ya que esta parte tenía mucho rozamiento y se pasó a redimensionar esta pieza con un diámetro de 10 mm para colocar los rodamientos en su interior y en vez de pasar a dos piezas distintas, una para cada extremo se pasó a una única pieza que se colocaría en ambos extremos del husillo (Figura 42). Lo cual es algo idóneo ya que diseñar una pieza con múltiples usos reduce tiempo de fabricación, favorece la economía de escala. La pieza de sujeción fija se rediseño agrandando el agujero por donde pasa el husillo para asegurarnos que no aumenta el rozamiento del sistema.

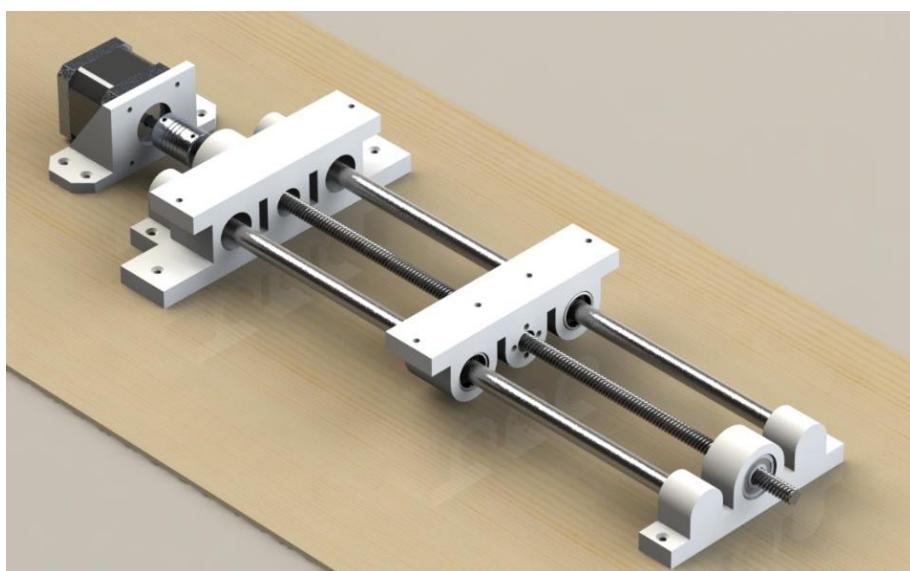


Figura 42: Renderizado del diseño final en SolidWorks

Aprovechando el nuevo montaje a realizar se añadieron los dos finales de carrera para proteger el sistema interrumpiendo el motor en el caso de que se alcance alguna de las dos posiciones límite del sistema (Figura 43).



Figura 43: Cableado de los finales de carrera trenzado por la cara de abajo

Quedando el montaje final del banco de pruebas como se observa en la Figura 44.

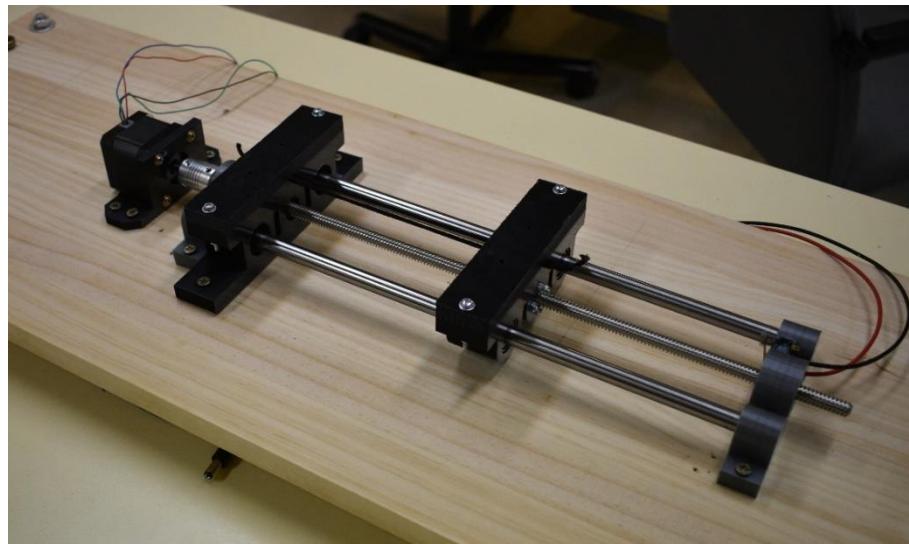


Figura 44: Montaje mecánico final

4.5 Circuito eléctrico

Partiendo del montaje mecánico anterior ahora queda desarrollar la parte eléctrica del banco, que estará constituido por:

- El motor NEMA 17 que se encargará de proporcionar el movimiento giratorio al husillo.
- El controlador DRV8825 para el control preciso del motor en cuanto a pasos y dirección.
- El microcontrolador Arduino Nano Every, para mandar la cantidad de pasos a realizar y la forma en que proceder.
- Una fuente de alimentación AC/DC de 24VDC para alimentar el motor y el resto del circuito.

- Un convertidor DC/DC para alimentar el microcontrolador partiendo de los 24 VDC de la fuente de alimentación.
- Dos finales de carrera para establecer los límites de movimiento de la pieza corredera.
- Un interruptor de alimentación.
- Un led de encendido.

4.5.1 Configuración del controlador

Para empezar a realizar el circuito primero debemos comprobar el motor, midiendo la continuidad de sus bobinas y la resistencia de ellas para ver si se corresponden con los parámetros del fabricante y comprobar que no haya algún cortocircuito entre ellas. Como hemos visto en los parámetros del motor el voltaje nominal de este es de 24VDC, por lo que realizaremos todos los ajustes teniendo esta tensión como entrada.

La resistencia eléctrica de las bobinas del motor es de 1.5Ω que al aplicarle 24VDC generaría una corriente de 16 amperios, una corriente muy elevada que llevaría a fundir el hilo de cobre utilizado en el bobinado (2).

$$I = \frac{24 \text{ VDC}}{1.5 \Omega} = 16 \text{ A} \quad (2)$$

Por lo que el driver se encarga de regular mediante una regulación de corriente PWM de frecuencia fija (current coping). Cuando se habilita un puente H, la corriente aumenta a través del devanado a un ritmo que depende del voltaje de CC y la inductancia del devanado. Una vez que la corriente alcanza el umbral de corte actual, el puente desactiva la corriente hasta el comienzo del siguiente ciclo PWM. Y esta corriente máxima se introduce mediante un voltaje de referencia situado en el potenciómetro. Observando el datasheet del DRV8825, vemos que se configura como se ve en la ecuación (3).

$$I_{CHOP} = \frac{V_{XREF}}{5 * R_{ISENSE}} \quad (3)$$

La R_{ISENSE} de nuestro driver es una resistencia SMD de valor $0,1 \Omega$. Por lo que la ecuación quedará como se ve en la ecuación (4).

$$I_{CHOP} = V_{XREF} \times 2 \quad (4)$$

Del mismo modo que vimos que el voltaje nominal del motor era de 24VDC, vemos que la corriente máxima nominal es de 1.7A por lo que deberemos de tener un voltaje de referencia entre el potenciómetro y GND de (5).

$$V_{XREF} = \frac{I_{CHOP}}{2} = \frac{1.7A}{2} = 0.85V \quad (5)$$

Por alejarnos de la corriente nominal ya que no necesitamos un torque tan grande y buscando aumentar la vida útil del motor reconfiguraremos el potenciómetro para obtener un voltaje de referencia de 0.7V como se observa en la Figura 45.

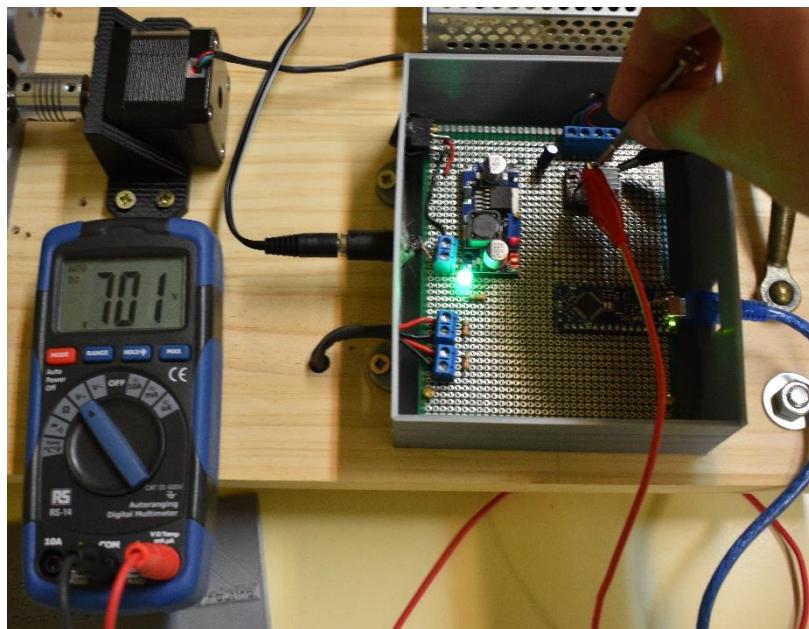


Figura 45: Configuración de la corriente máxima del controlador

Hay que tener en cuenta el modo de operación del controlador, ya que si utilizamos los micropasos deberemos de reajustar la corriente máxima del driver. Como en nuestro caso utilizaremos el modo de paso completo la corriente máxima que habrá en la bobina será un 70% de la I_{CHOP} , por lo que tendremos una corriente máxima en los devanados de 1A.

4.5.2 Pruebas con el microcontrolador

Una vez el controlador esta correctamente configurado, probamos a controlar el motor mediante el microcontrolador. Para ello conectaremos dos pines digitales del microcontrolador a los pines STEP y DIR del controlador, por cada pulso recibido en el pin STEP el motor avanzará un paso, y en función del valor del pin DIR avanzará en un sentido horario o antihorario.

La velocidad con la que se darán los pasos está definida por la ecuación (6)

$$F_{step} \left(\frac{\mu step}{segundo} \right) = \frac{v \left(\frac{Rotaciones}{minuto} \right) \times 360 \left(\frac{\text{°}}{\text{minuto}} \right) \times n_m \left(\frac{\mu step}{segundo} \right)}{60 \left(\frac{\text{segundos}}{\text{minuto}} \right) \times \theta \left(\frac{\text{°}}{\text{step}} \right)} \quad (6)$$

Por lo que en función de la frecuencia del tren de pulsos en el pin STEP el eje del motor se moverá una velocidad u otra.

Frecuencia del pin STEP al mandar un tren de pulsos con un tiempo de $800\mu\text{s}$ de tiempo en alto y $800\mu\text{s}$ en bajo, calculada en la ecuación (7) y medida con el osciloscopio en la Figura 46.

$$f = \frac{1}{800 \times 10^{-6} \text{ s} * 2} = 625 \text{ Hz} \quad (7)$$

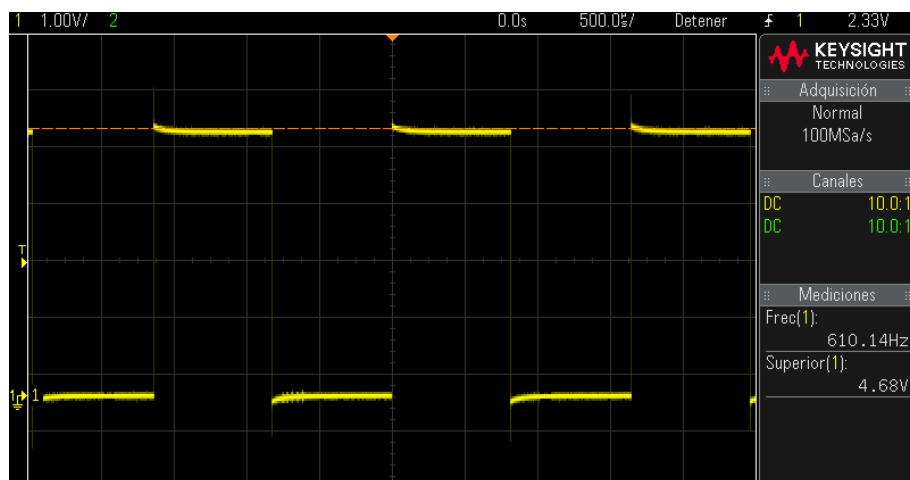


Figura 46: Frecuencia medida en el pin STEP

Frecuencia del pin STEP al mandar un tren de pulsos con un tiempo de $300\mu\text{s}$ de tiempo en alto y $300\mu\text{s}$ en bajo calculada en la ecuación (8) y medida con el osciloscopio en la Figura 47.

$$f = \frac{1}{300 \times 10^{-6} \text{ s} * 2} = 1666.6 \text{ Hz} \quad (8)$$

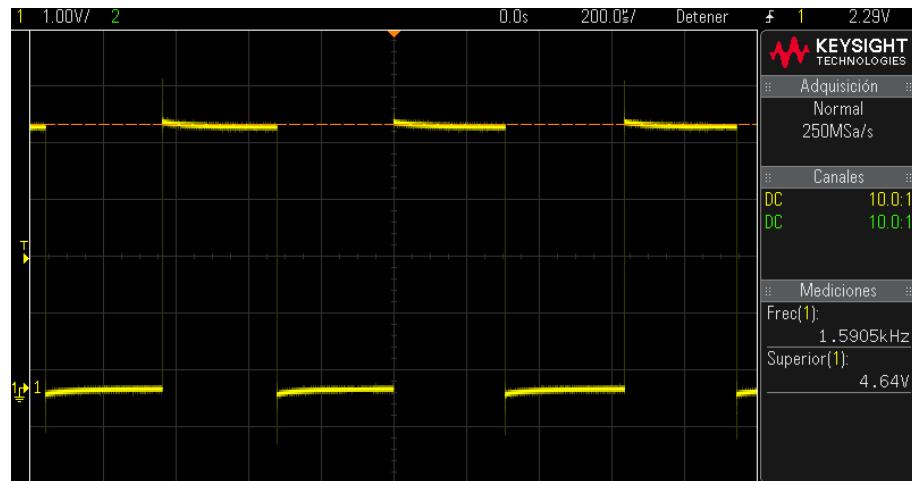


Figura 47: Frecuencia medida en el pin STEP

4.5.3 Finales de carrera

A partir de aquí podemos controlar la dirección, los pasos y la velocidad de estos. Ahora queda establecer los límites del banco por seguridad, colocando los finales de carrera en los extremos debemos hacer que cuando se activen cualquiera de ellos el motor se detenga, evitando así posibles roturas de las piezas. Por lo que se montan dos resistencias pull-up (Figura 48).

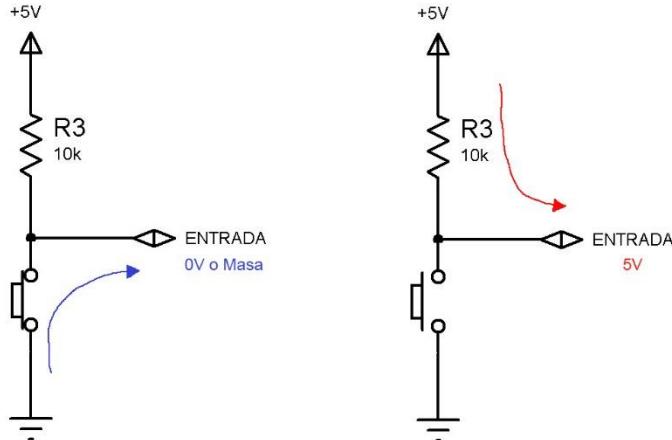


Figura 48: Resistencia Pull-Up para los finales de carrera

De esta manera podemos comprobar si se ha alcanzado alguno de los extremos si leemos un valor bajo en los pines digitales de entrada.

Por último, queda configurar el potenciómetro del convertidor DC/DC para obtener unos 7 V en la salida ya que este es el voltaje recomendado para alimentar el Arduino Nano Every por el pin de Vin y que el regulador interno se encargue de alimentar los componentes del

Arduino a 5 y 3.3 V. Para ello alimentamos el convertidor a 24VDC y midiendo a la salida vamos girando el potenciómetro hasta obtener 7V.

4.6 PCB

Para optimizar el espacio y minimizar ruidos y elementos parásitos en el circuito proponemos una PCB con los componentes utilizados.

El circuito esquemático muestra todas las conexiones de los componentes, en nuestro caso en vez de hacer las conexiones con vías se han utilizado tags para dejar un esquemático más limpio, como se observa en la Figura 49.

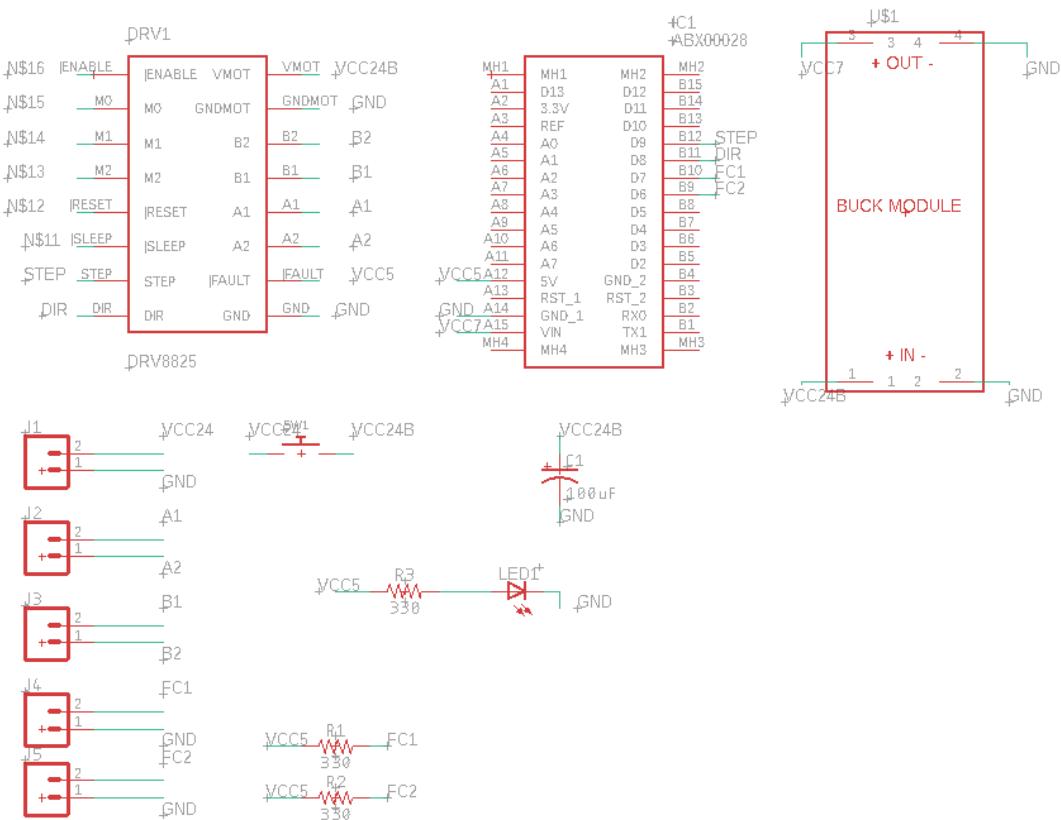


Figura 49: Circuito esquemático de la PCB

La tabla con los componentes utilizados en el esquemático con sus respectivas librerías se hayan en la Tabla 9.

Tabla 9: Componentes utilizados en la PCB

Componente	Valor	Dispositivo	Encapsulado	Librería
C1	100uF	POLAR-RADIAL-2.5MM-25POL-RADIAL-2.5MM-6.5MI	SparkFun-Capacitors	
DRV1	DRV8825	DRV8825	DRV8825	DRV8825
IC1	ABX00028	ABX00028	ABX00028	ABX00028
J1		CONN_02	1X02	SparkFun-Connectors
J2		CONN_02	1X02	SparkFun-Connectors
J3		CONN_02	1X02	SparkFun-Connectors
J4		CONN_02	1X02	SparkFun-Connectors
J5		CONN_02	1X02	SparkFun-Connectors
LED1		LED5MM	LED5MM	adafruit
R1	330	330OHM-HORIZ-1/10W-5%	AXIAL-0.3	SparkFun-Resistors
R2	330	330OHM-HORIZ-1/10W-5%	AXIAL-0.3	SparkFun-Resistors
R3	330	330OHM-HORIZ-1/10W-5%	AXIAL-0.3	SparkFun-Resistors
SW1		SWITCH_PUSHBUTTONEVQ-	TACT_PANA-EVQ	adafruit
U\$1	JLEWITH_SMDPADS&THR JLEWITH_SMDPADS&THR		BUCK_MODULE	BUCK_MODULE (1)

A partir del esquemático se realiza la PCB de la siguiente forma:

- El tamaño de la placa es de 60x80mm.
- El enrutado se realiza a una sola cara.
- El mínimo tamaño de pista es de 16 mil.
- Las pistas de potencia tienen un tamaño de 32 mil.
- La separación entre la pista y el plano de masa es de 12 mil.

El tamaño de la pista de potencia se ha escogido calculando el ancho de pista necesaria para una disipación de 2 A utilizando la IPC2221(Figura 50) para un ancho de pista de 1oz/ft^2., teniendo en cuenta que el incremento máximo de temperatura podrá ser de 20°C.

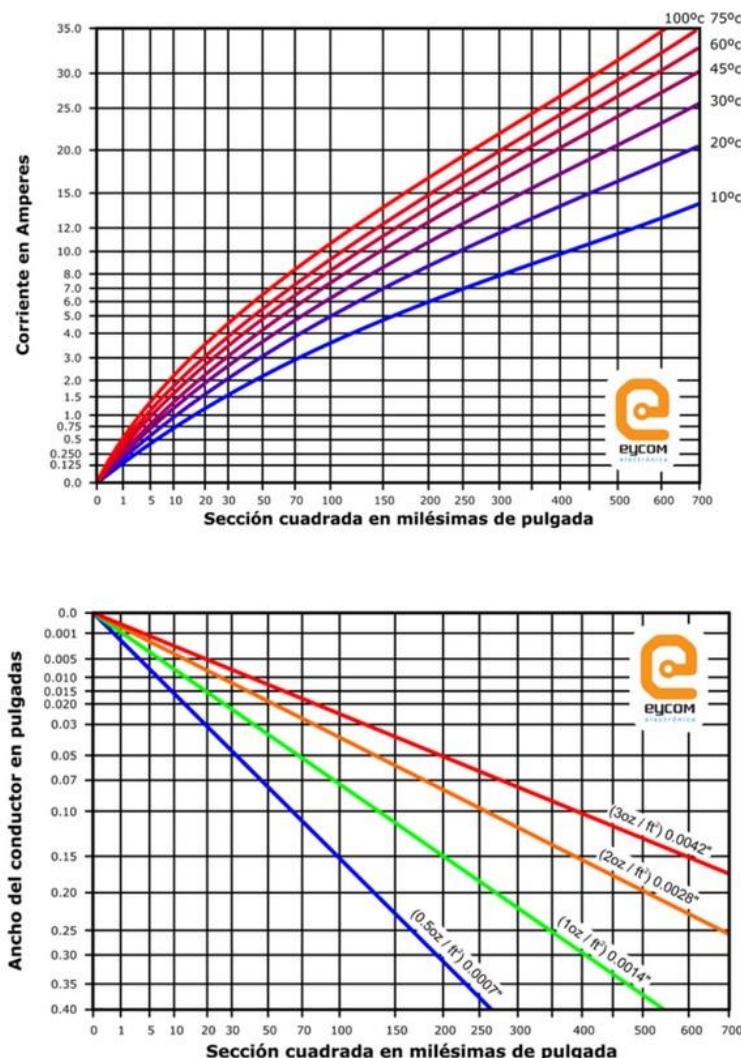


Figura 50: IPC2221 (Fernández, 2022)

Quedando la placa, con sus vías de diferente tamaño dependiendo de la corriente que fluya por ellas, como se observa en la Figura 51.

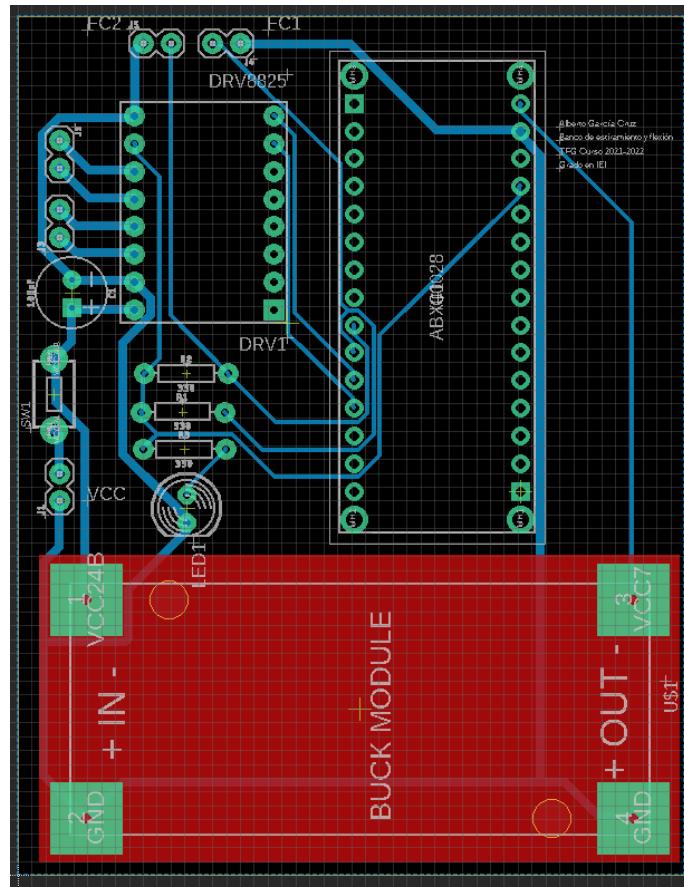


Figura 51: Placa del banco de pruebas

Al circuito se le añadido un plano de masa con la intención de suprimir la EMI, interferencias y bucles de puesta a tierra como se observa en la Figura 52.

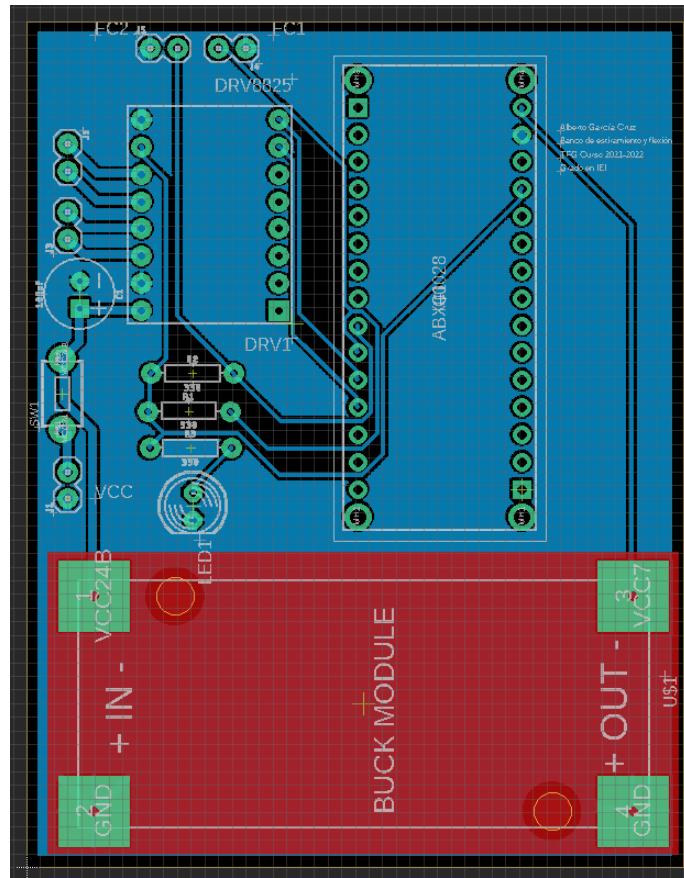


Figura 52: Placa del banco de pruebas con plano de masa

4.7 Circuito

Al no disponer del tiempo necesario para pedir la fabricación de la PCB. Se utilizó una placa perforada para circuitos y prototipos para dejar un circuito funcional y presentable. Para ello se realizaron varios intentos sobre papel viendo de qué manera se podrían unir las pistas de estaño por la cara trasera sin la necesidad de hacer puentes entre ellas.

Para las conexiones externas se han utilizado regletas de conectores PCB, y la parte de la tarjeta sobrante se cortó con cortador de papel de guillotina. Se trató de realizar el circuito más compacto posible sin utilizar puentes, por lo que en algunas partes del circuito se dan algunas vueltas para dejar hueco a otras vías comunes. El circuito final se puede ver en la Figura 53 y sus conexiones en la Figura 54.

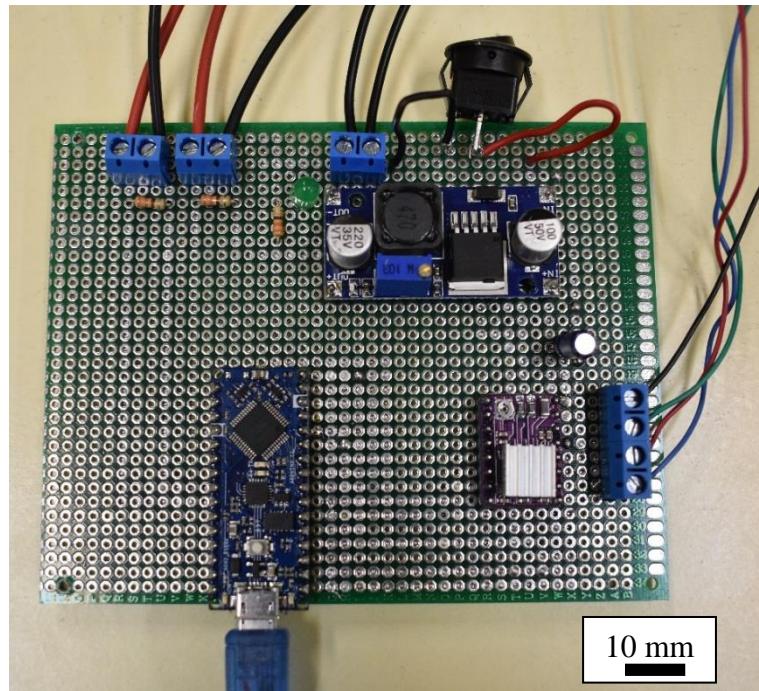


Figura 53: Montaje del circuito final

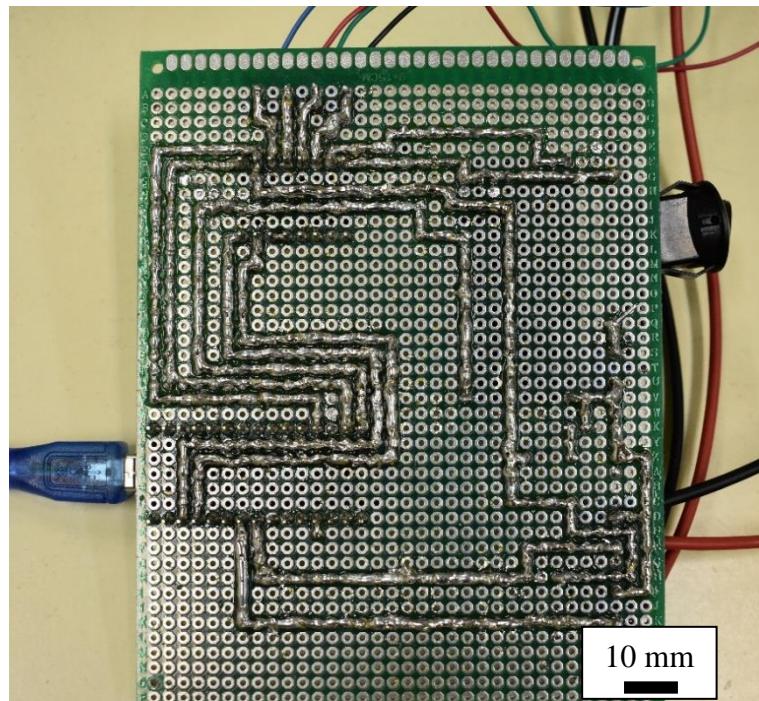


Figura 54: Pistas de estaño del circuito

Una vez se completó el diseño del circuito se diseñó una caja en 3D para proteger el circuito y atornillarlo a la base de madera junto con la fuente de alimentación en el lateral derecho del banco, como se muestra en la Figura 55.

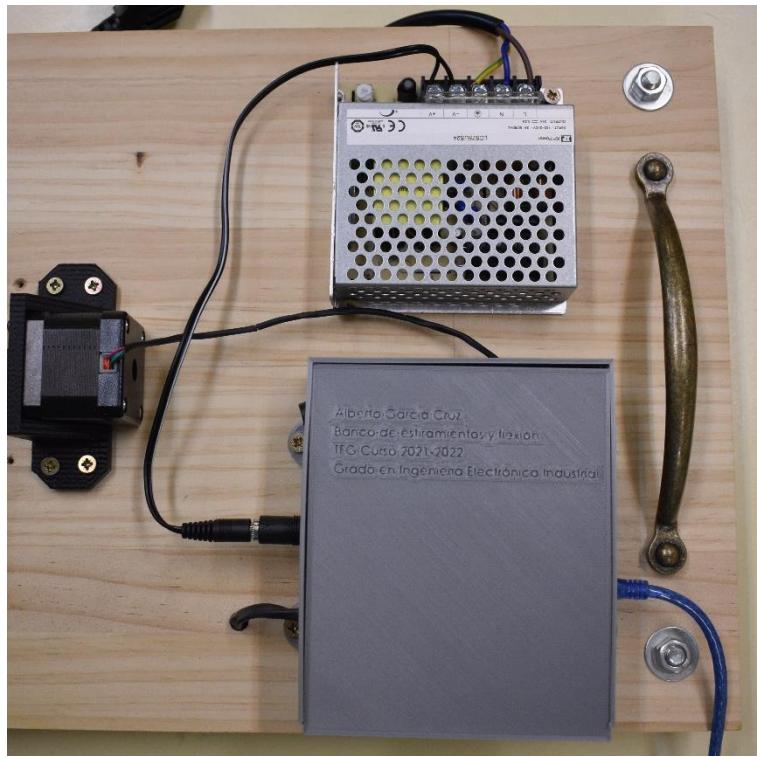


Figura 55: Montaje final del circuito en su caja

Se usaron termoplásticos para juntar los cables comunes y dotar de limpieza visual el equipo (Figura 56).

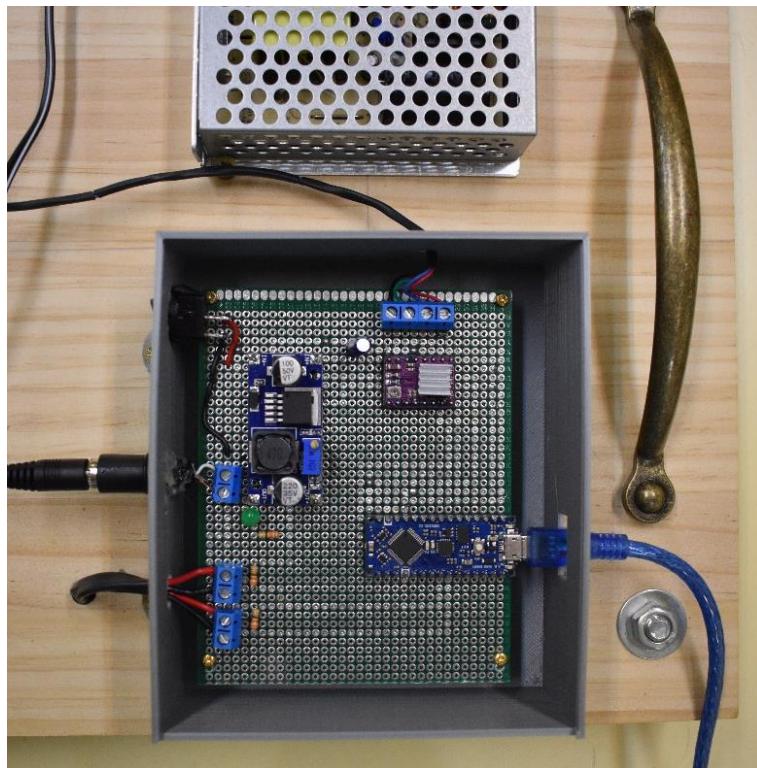


Figura 56: Placa atornillada a la caja con las conexiones realizadas

4.8 Programación

Para la programación se ha utilizado el IDLE de Arduino y se han creado una serie de funciones que usadas alternativamente permite el correcto funcionamiento del banco de pruebas.

El diagrama de flujo principal (Figura 57) muestra como el loop del Arduino está hecho de forma que este se encuentra en stand by esperando a que llegue un comando que procesar, una vez llega un comando se procesa para ver que función activar. De esta forma se reciben los comandos vía puerto serie a una velocidad de 9600 BPS.

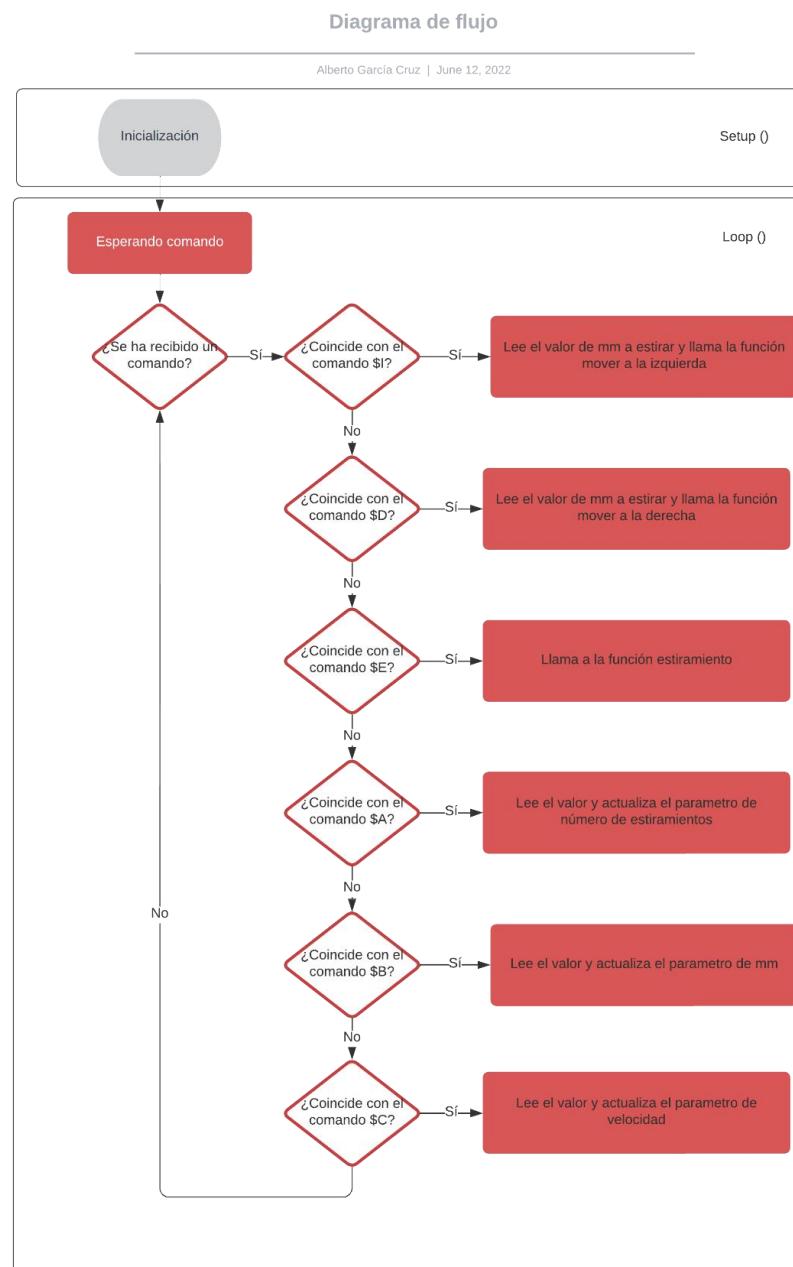


Figura 57: Diagrama de flujo del código de Arduino

Dos funciones básicas son las de mover a la izquierda o derecha, activadas con el comando \$I o \$D respectivamente (Figura 58). Una vez se activan alguna de estas funciones, se selecciona la dirección a la que se moverá el motor, se calcularán el número de pasos a realizar según los mm introducidos junto con el comando (\$I10 equivaldría a moverse al a izquierda 10 mm). Antes de realizar cada paso se comprueba que los finales de carrera no están activados para así evitar dar un paso cuando se esté en el extremo de los soportes.

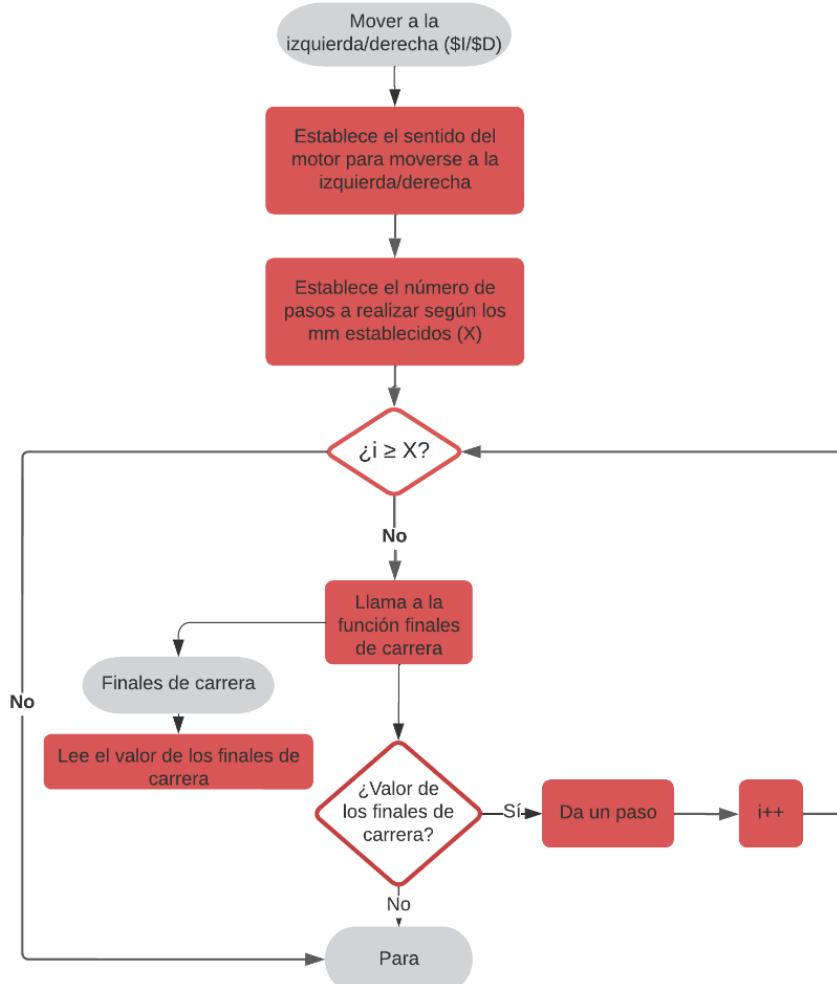


Figura 58: Diagrama de flujo de las funciones mover a la izquierda o a la derecha

La función más utilizada en el banco sería la de estirar, ya que esta es la función principal del banco de pruebas, como se ve en el diagrama de flujo de esta función (Figura 59). Es muy parecida a la función de mover a izquierda o derecha anteriormente explicada, pero añadiendo dos contadores, uno para alternar la dirección y hacer un ciclo de izquierda a derecha y otro para contar los ciclos de izquierda a derecha (estiramiento).

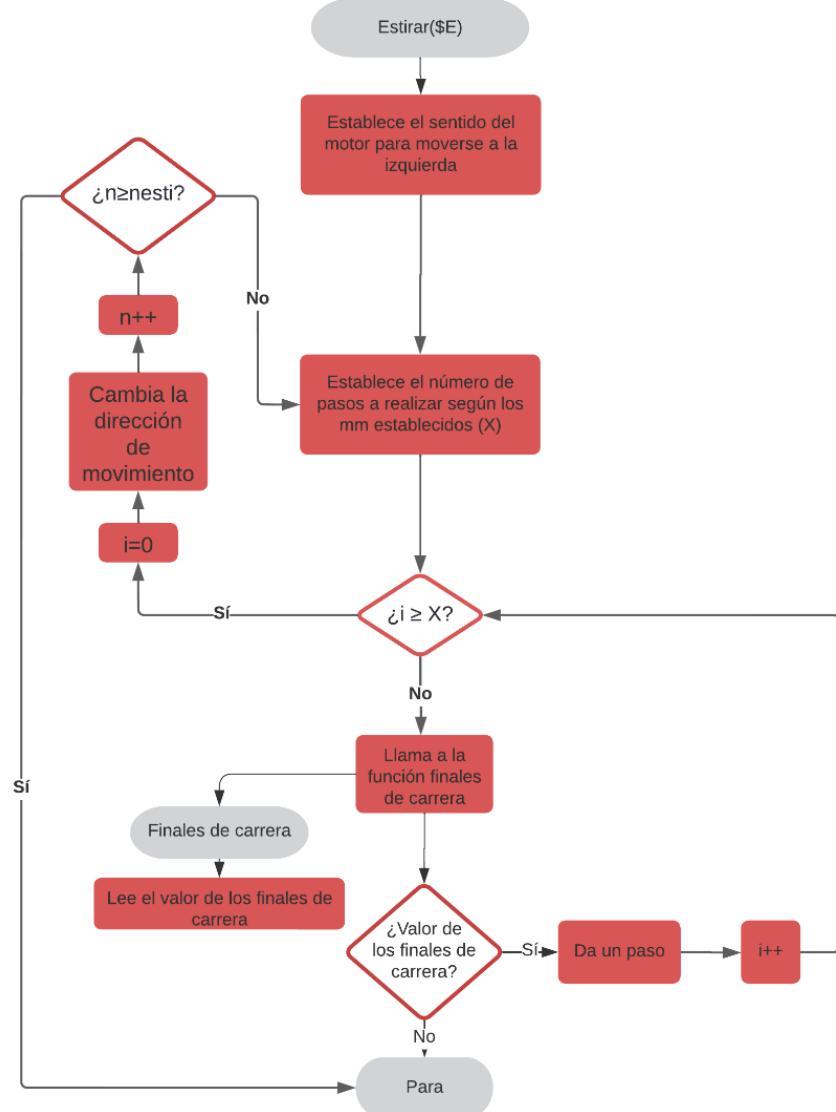


Figura 59: Diagrama de flujo para la función estirar

4.9 Interfaz gráfica de usuario (GUI)

Para facilitar el control del banco de pruebas se ha diseñado una interfaz gráfica de usuario muy simplificada, que consta de cuatro menús (Figura 60).

El primer menú se encarga de la conexión con el Arduino mediante comunicación serie. Al conectar el Arduino al ordenador por un puerto USB el programa se encargará de leer los puertos disponibles comprobando que existe un puerto disponible con comunicación serie. Se deberá de elegir que puerto usar y a qué velocidad (típicamente 9600 baudios) y ya se podrá usar el botón de conectar.

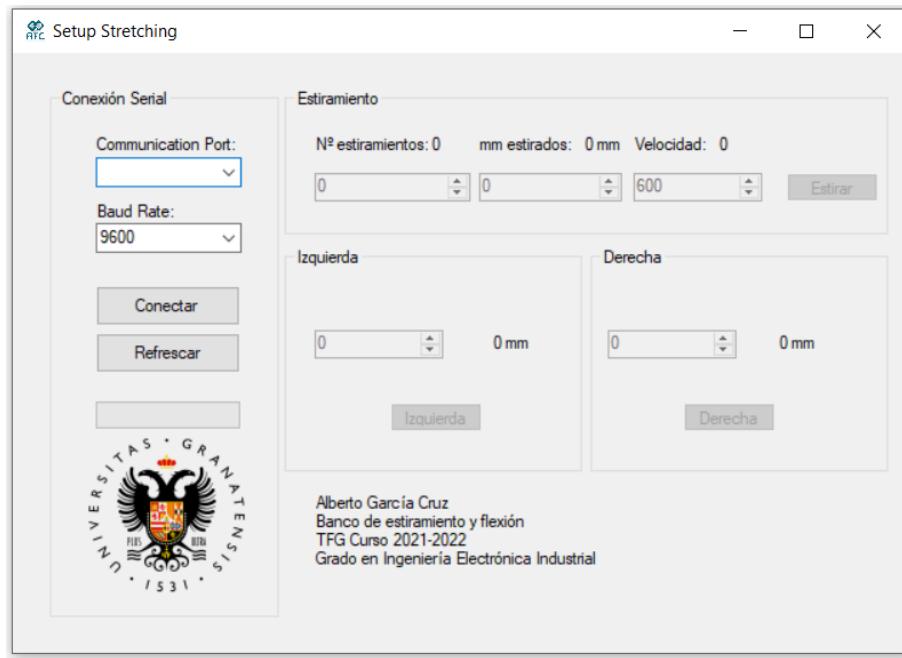


Figura 60: Interfaz gráfica de usuario (GUI)

Si se conecta el Arduino después de abrir el programa este no aparecerá en la lista, por lo que se deberá de clicar el botón de refrescar, para releer los puertos disponibles y proceder a la conexión. Si la conexión ha sido exitosa se cargará una barra de progreso al 100% y se habilitarán los demás menús (Figura 61).

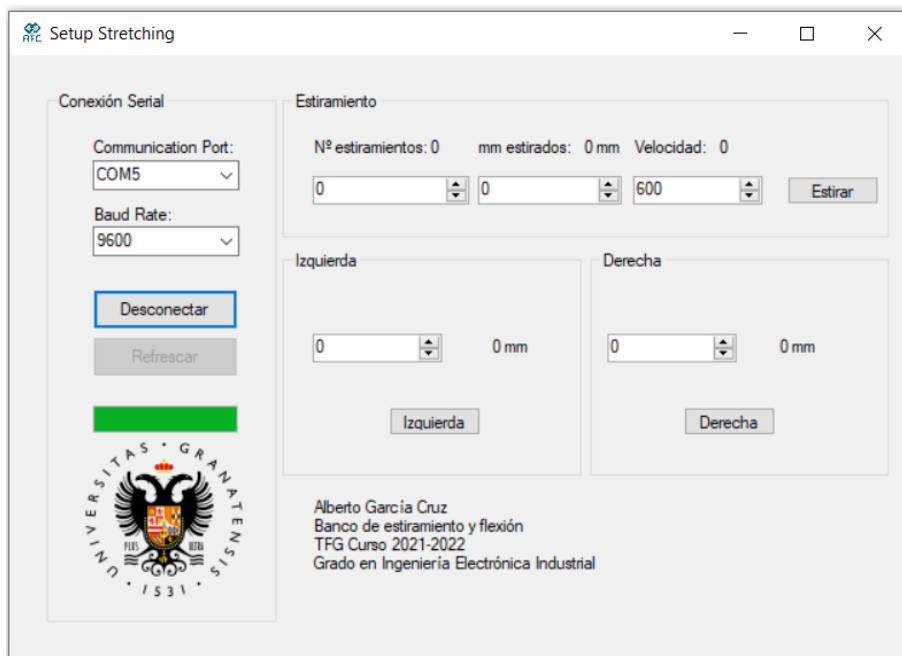


Figura 61: GUI en funcionamiento

El segundo menú se encarga de realizar los estiramientos, se colocan uno por uno los parámetros que se deseen y al presionar el botón estirar se enviará el comando con la orden de estirar. Los menús tres y cuatro son para mover la pieza corredera a izquierda o derecha la distancia que se deseé.

4.10 Parámetros del banco de pruebas

A continuación, se explican una serie de parámetros medidos sobre el banco de pruebas con el fin de conocer más sobre su funcionamiento y características.,

4.10.1 Consumos

Para comprobar los consumos de energía del banco realizamos una serie de mediciones sobre la fuente de alimentación como se observa en la figura Figura 62 y obteniendo la medición como se observa en la Figura 63.

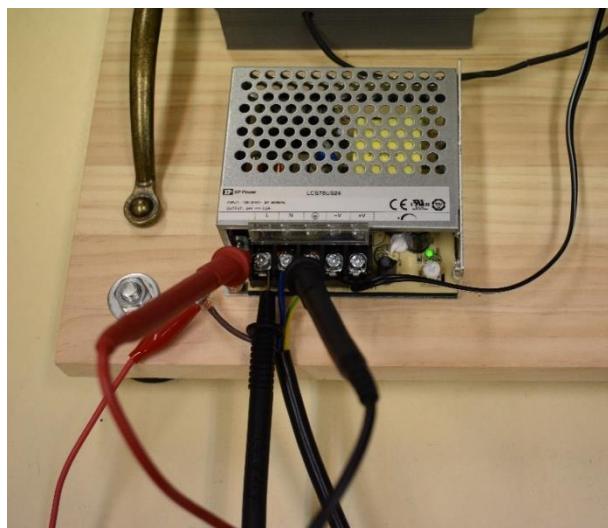


Figura 62: Medición de la potencia de entrada

Destacamos tres casos.

- Conectando únicamente la fuente (Con el interruptor de la placa apagado).



Figura 63: Medición de voltaje y corriente

$$P_{IN} = V_{IN} \times I_{IN} = 232V * 0.03A = 6.69W \quad (7)$$

- Con el interruptor de la placa encendido, pero sin movimiento en el motor.

$$P_{IN} = V_{IN} \times I_{IN} = 232V * 0.047A = 10,904W \quad (8)$$

- Durante el funcionamiento del banco.

$$P_{IN} = V_{IN} \times I_{IN} = 232V * 0.05A = 11,6W \quad (9)$$

4.10.2 Temperaturas

Tras dejar funcionar el banco en condiciones nominales durante 20 minutos se procede a capturar las temperaturas de funcionamiento tanto del motor como del controlador y observamos las siguientes temperaturas utilizando una cámara termográfica (Figura 64).

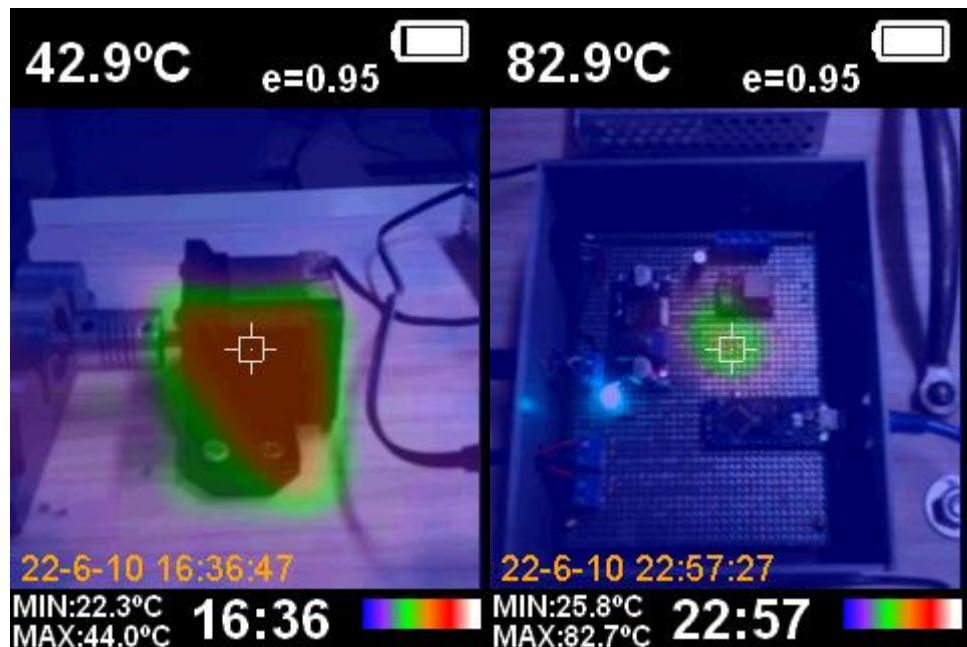


Figura 64: Temperatura del motor y del driver

Por lo que se observan temperaturas normales de funcionamiento. En el datasheet del driver encontramos que la temperatura máxima admisible es entre 150°C y 180°C, por lo que nos encontramos muy lejos de este margen y podemos utilizar el driver de forma segura.

4.10.3 Ruido

Mediante el uso de un analizador de espectro de sonido con una aplicación móvil podemos ver que ruido sonoro genera el banco de pruebas en su funcionamiento.

El ruido de fondo que encontramos en el laboratorio presenta las siguientes frecuencias (Figura 65).

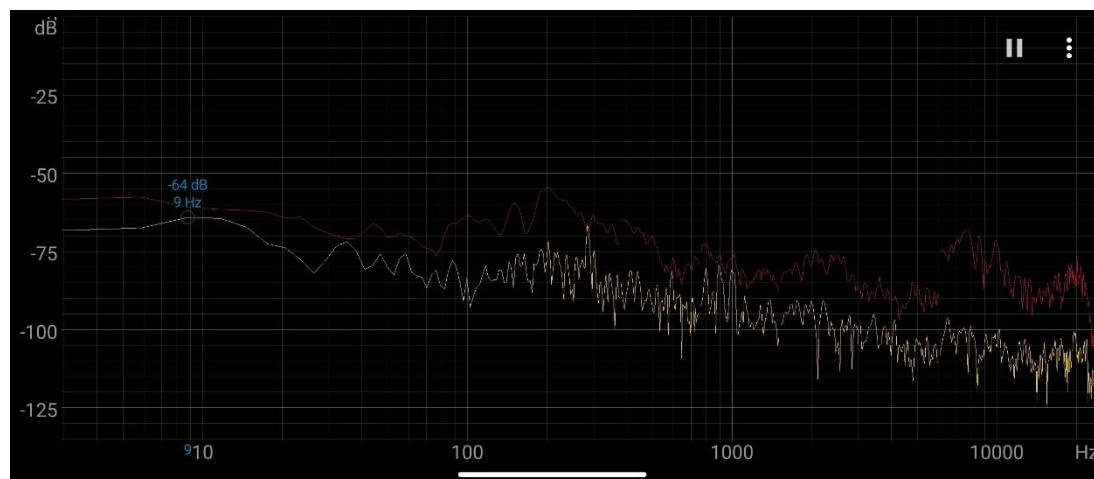


Figura 65: Ruido de fondo en el laboratorio

En el segundo diseño existía mucho ruido debido a los rozamientos y a la mala configuración del driver y obteníamos la siguiente muestra de sonido (Figura 66).

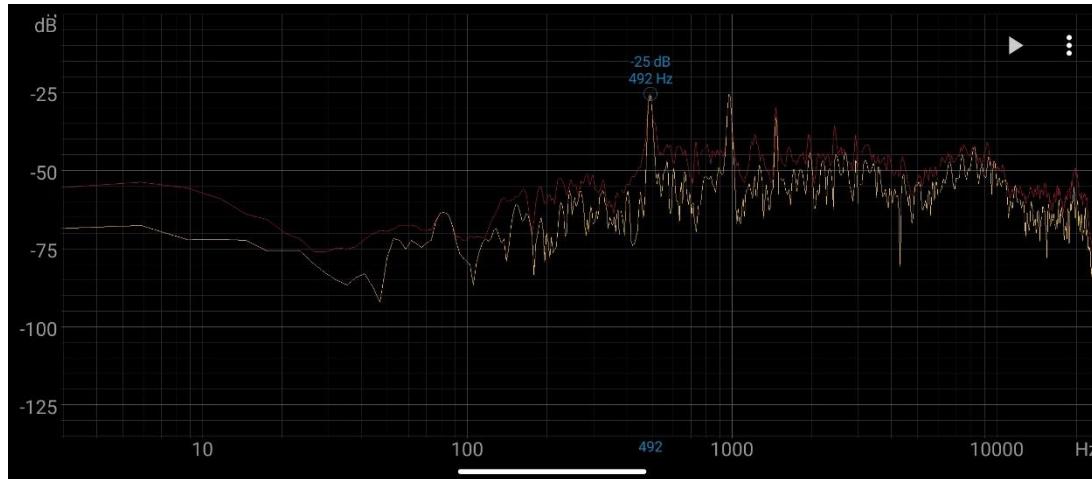


Figura 66: Ruido del banco de pruebas en el segundo diseño

Se pueden apreciar que las principales contribuciones del ruido son a 492 Hz y 950 Hz y una mayor densidad en todas las demás frecuencias comprendidas entre 100 Hz y 20000 Hz.

En el último diseño, con los rodamientos y el torque del driver configurado correctamente se reduce mucho el ruido que genera el banco en su funcionamiento (Figura 67).

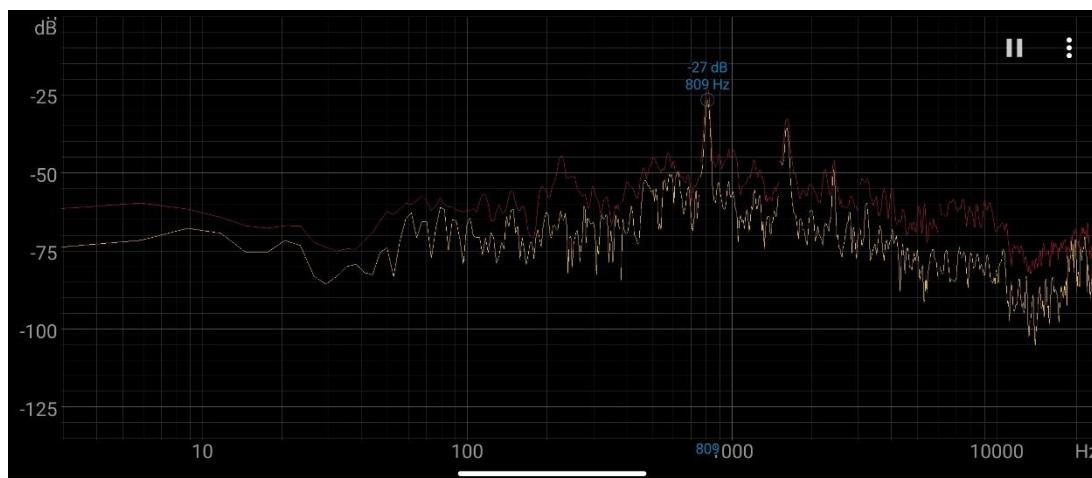


Figura 67: Ruido del banco en el diseño final

Como se puede ver existe un tono a 809 Hz que predomina, pero en conjunto la densidad espectral es mucho menor que en el segundo diseño, por lo que se puede ver que se ha reducido el ruido del banco de pruebas.

4.10.4 Torque

Para comprobar el torque máximo que puede proporcionar el banco de pruebas se ha utilizado un dinamómetro enganchado a la pieza corredera y manteniendo el otro extremo del dinamómetro fijo se ha ido incrementando los mm recorridos hasta que el motor no podía moverse más, quedándose este punto máximo en 40N (Figura 68).

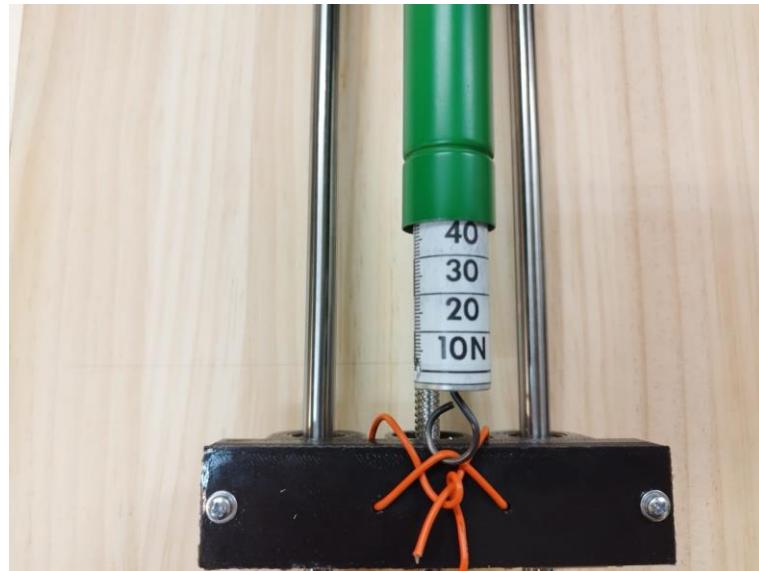


Figura 68: Torque máximo que es capaz de proporcionar el banco

Capítulo

5 Validación del sistema

En este capítulo se realizan unas mediciones con el banco de estiramientos con la finalidad de demostrar el correcto funcionamiento de este y las pruebas concluyentes del experimento.

5.1 Tira de plata impresa

Para caracterizar el efecto de los estiramientos sobre los circuitos en sustratos flexibles se realizó una tira de plata utilizando ‘Voltera V-One’.

Voltera es una empresa en Kitchener, Ontario, encargada de la fabricación de equipamiento eléctrico y especializada en electrónica. Voltera V-One es una impresora de PCBS pensada para departamentos de I+D en electrónica, escuelas o para investigadores. Capaz de imprimir circuitos sobre sustratos rígidos o flexibles. Taladrado automático, dispensado de pasta y función de horno para soldar componentes SMD.

Esta máquina fue utilizada en nuestro caso para realizar una tira impresa de plata sobre un sustrato flexible como es el nitrilo de un guante (Figura 68).



Figura 69: Tira impresa de plata

Las dimensiones de la tira de plata son de 5 mm de ancho por 40 mm de largo, pero en nuestro caso utilizables solo tenemos hasta 30 mm de largo ya que como se puede ver en la imagen, el lateral derecho presenta unas irregularidades que afectan a la medición eléctrica, por lo que se obviará este extremo (Figura 71).

Podemos ver con mayor resolución la muestra mediante el uso de un microscopio digital ‘Andonstar’ (Figura 70).

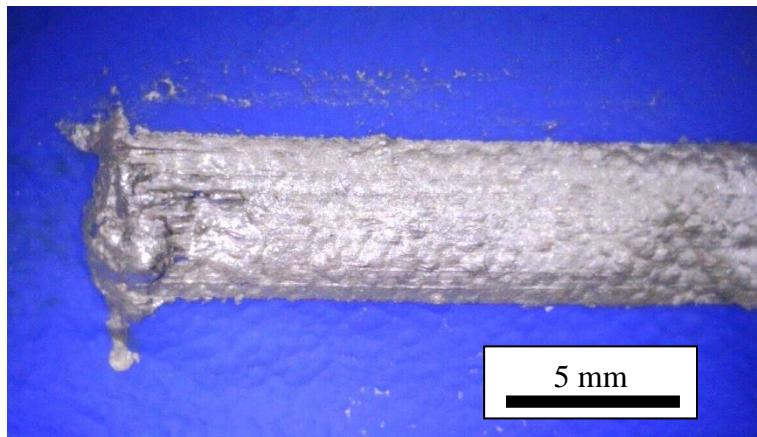


Figura 70: Lateral izquierdo de la tira impresa de plata

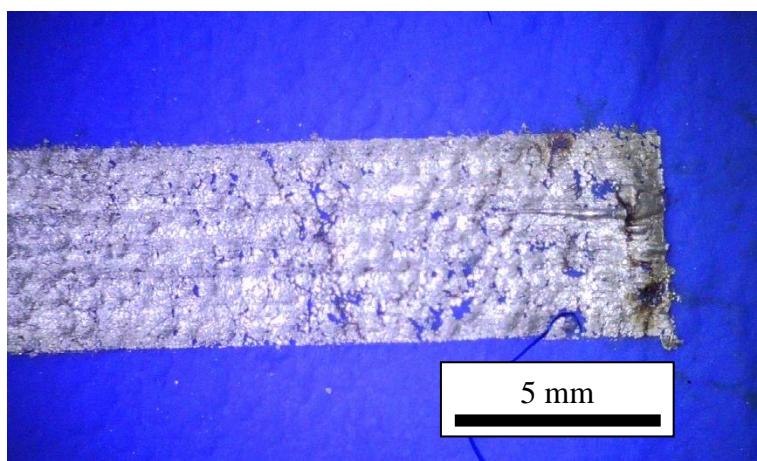


Figura 71: Lateral derecho de la tira impresa de plata

5.2 Método de medición a cuatro hilos (Método de Kelvin)

Se trata de un método de medición de impedancias eléctricas más exacta que la medición tradicional a dos puntas. Ya que la resistencia medida a dos hilos da la suma de las resistencias de cableado más la resistencia incógnita (Figura 72). Y como en nuestro caso la resistencia que ofrece la tira de plata es de apenas unos ohmios se hace comparable con la resistencia ofrecida por los cables. Para realizar la medición de la resistencia de la tira de plata se han utilizado dos multímetros, uno midiendo la corriente que atraviesa la tira de plata y otro midiendo el voltaje

que cae en ella y una fuente de alimentación limitada en corriente a 0.15 A con una tensión de 10 V (Figura 73).

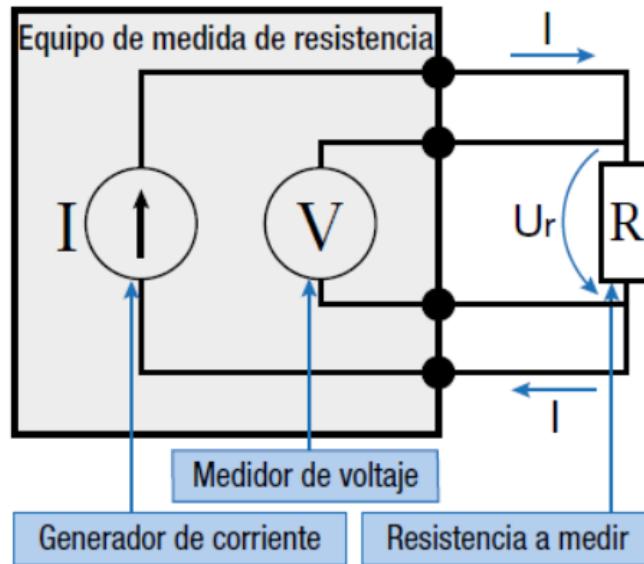


Figura 72: Esquema de medición a 4 hilos

Antes de realizar ninguna prueba a la tira de plata medimos su resistencia eléctrica con este método y obtenemos (11):

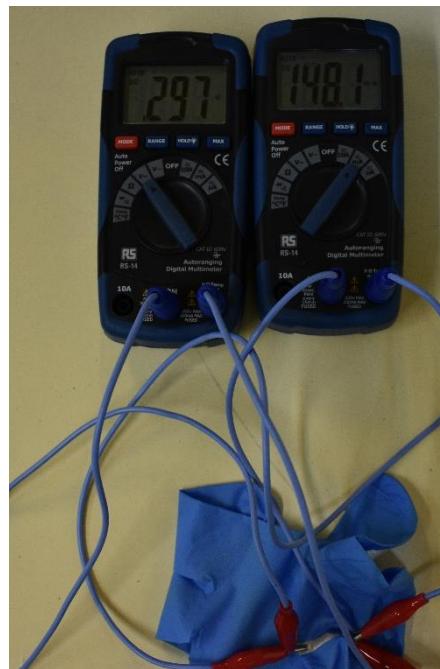


Figura 73: Medida a 4 hilos de la resistencia eléctrica de la tira de plata

$$\text{Resistencia eléctrica } (\Omega) = \frac{0,219 \text{ V}}{0,1499 \text{ A}} = 1,4609 \Omega \quad (10)$$

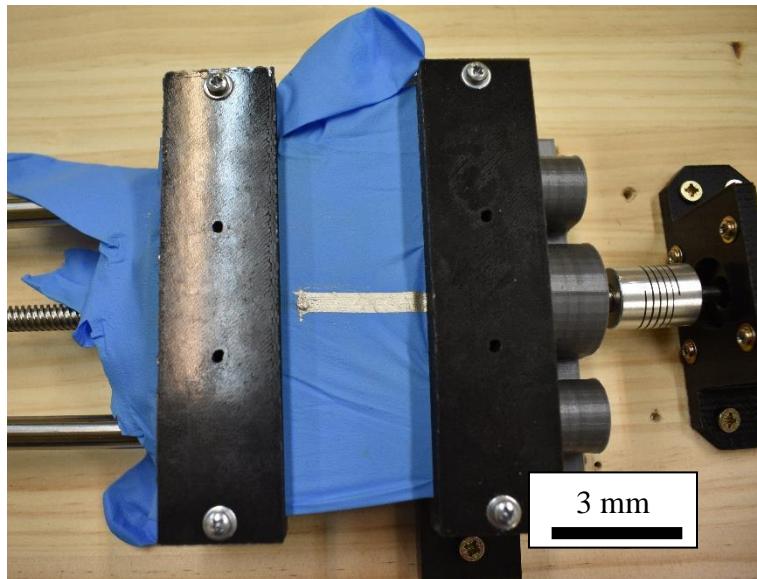


Figura 74: Colocación de la tira en el banco de estiramientos

Tras cada 100 estiramientos volvemos a medir la tira de plata utilizando la medición a 4 hilos y obtenemos los siguientes datos en la Figura 75.

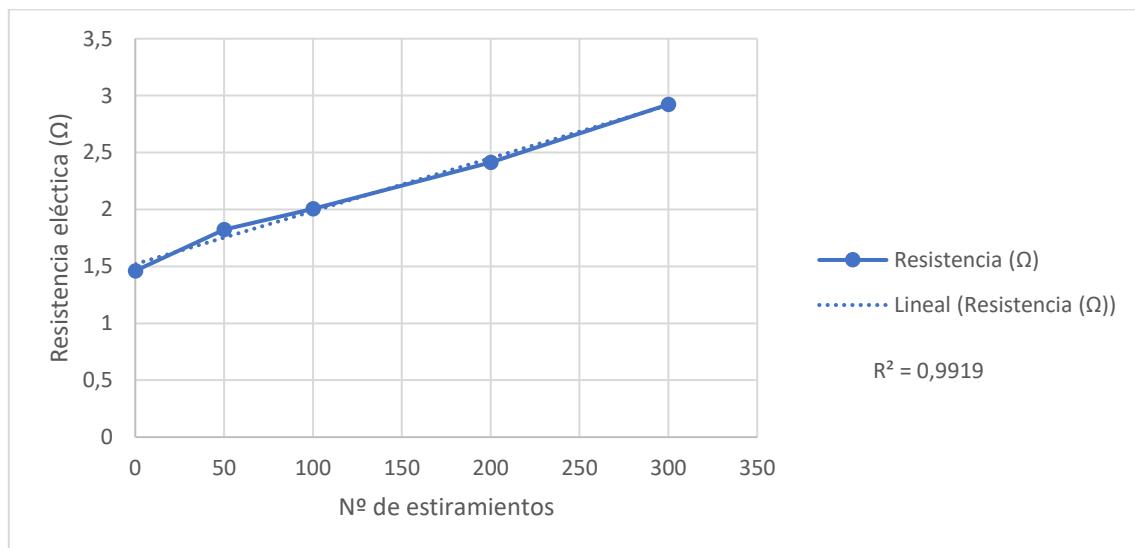


Figura 75: Resultados después de varios ciclos de estiramientos

Tras 300 estiramientos el sustrato se rompió por una grieta generada en un lateral al cortar el guante, por lo que no pudimos seguir haciéndole pruebas. Pero de todos se puede ver cómo va incrementando la resistencia eléctrica según los ciclos de estiramiento.

5.3 Justificación de los datos

Como podemos ver en las imágenes realizadas con el microscopio digital (Figura 76), la superficie impresa de plata comienza a cuartearse creando grietas (Figura 77). Lo que degenera

en una mayor oposición a la corriente eléctrica ya que el campo eléctrico se divide en los caminos alternativos que surgen entre un extremo y otro.

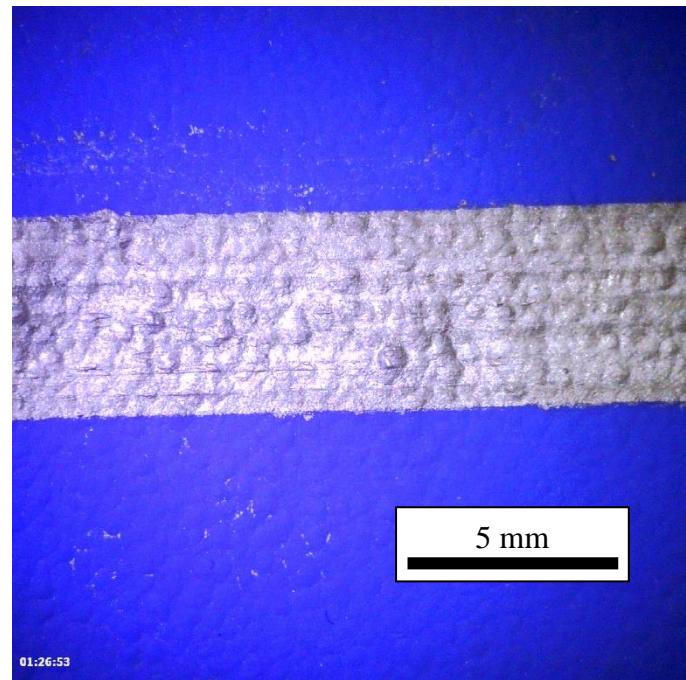


Figura 76: Tira de plata antes de los estiramientos

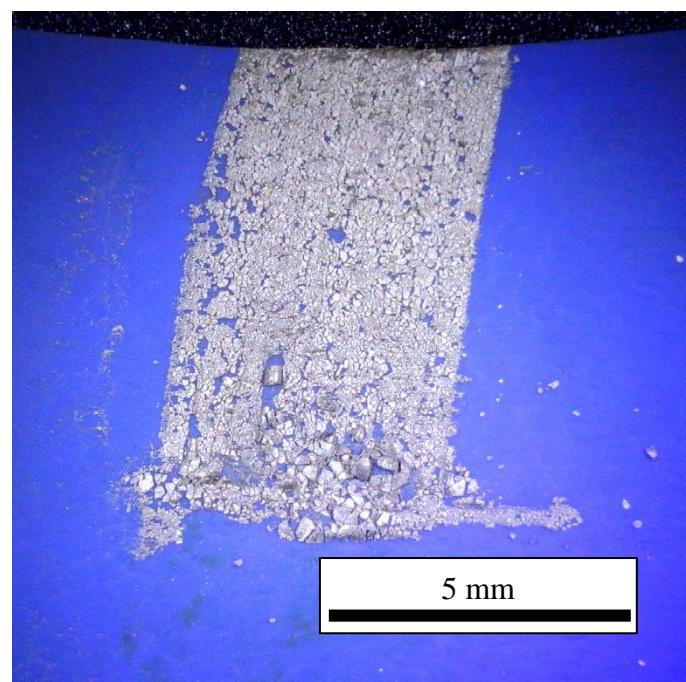


Figura 77: Tira de plata después de los estiramientos

Capítulo

6 Conclusiones

En esta documentación del proyecto se ha intentado mostrar todo el desarrollo seguido para el diseño del banco de pruebas de estiramientos. Antes del montaje se ha realizado los diseños 3D de los componentes para facilitar su construcción y emparejamiento de componentes (en medidas como en parámetros). Una vez obtenido el diseño final y todos los componentes se procedió al montaje y a la programación del sistema que permitía la automatización de este, pudiendo realizar medidas eficaces del desgaste sufrido por el efecto del estiramiento en el substrato flexible.

Por ahora el sistema ofrece unas prestaciones de bajo consumo, alto torque, manejo asequible dotando de la capacidad de obtener datos mientras se realiza el ciclo de estiramiento. A continuación, se resumen los hitos alcanzados en el proyecto en los siguientes puntos:

- Diseño de un banco de pruebas mecánico para la realización del estiramiento de probetas.
- Estudio e investigación de microcontroladores y componentes electrónicos utilizados para la realización del banco mostrando sus características y funcionamiento.
- Justificación de los componentes elegidos.
- Diseño y construcción del primer prototipo.
- Mejoras del primer diseño y construcción del segundo prototipo
- Programación e implementación de una interfaz de usuario gráfica (GUI) para facilitar el manejo del dispositivo.
- Medición de parámetros sobre un substrato para comprobar

6.1 Trabajo a futuro

Este proyecto deja abierto como posibles mejoras:

- Continuar con el diseño para ampliar el banco de pruebas como banco de pruebas de flexión (Figura 78).

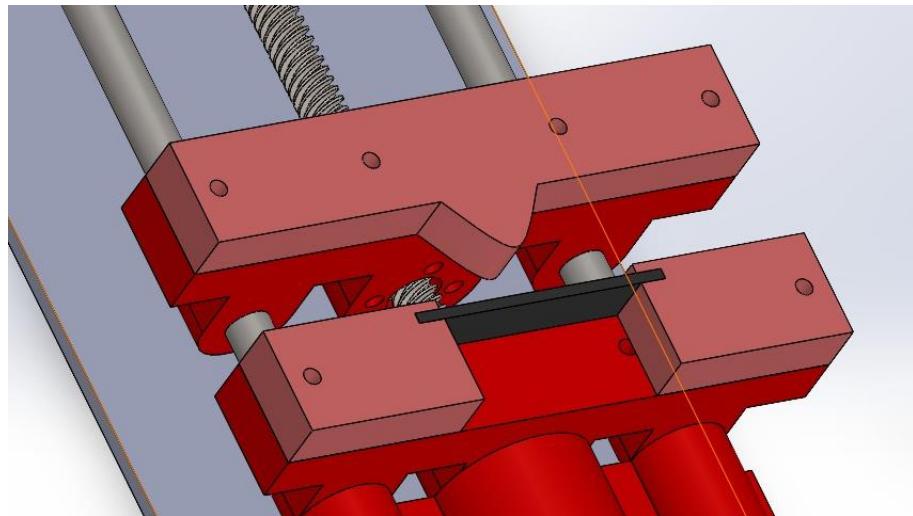


Figura 78: Planteamiento para realizar la flexión

- Automatizar el ajuste de la corriente máxima del microcontrolador ya que esto define el torque que utiliza el motor paso a paso y dependiendo de la velocidad, el material a analizar y demás parámetros este cambia. Actualmente el torque se debe de ajustar ajustando la corriente máxima del controlador mediante un potenciómetro situado en la placa.
- Ampliar el software para mejorar bugs como por ejemplo que no se realice correctamente la conexión con el puerto serie de Arduino.
- Agregar un botón en el GUI de parado de emergencia.
- Mejorar el agarre de las pinzas para que no se escurran las probetas.
- Agregar láminas de cobre en las pinzas con las que hacer contacto con las probetas y realizar mediciones en tiempo real.

Capítulo

7 Material utilizado

A continuación se resume el material utilizado para la elaboración del banco, tanto los programas utilizados como los equipos utilizados, la mayoría de los equipos utilizados son del Bibliomaker de la Universidad de Granada.

7.1 Software

Para el desarrollo de este TFG se han utilizado programas de diferentes ámbitos como programas de diseño 3D, impresión 3D, diseño de PCBs, programación.

7.1.1 SolidWorks



SolidWorks es un programa de diseño asistido por computadora (CAD) utilizado para el modelado mecánico 2D y 3D desarrollado por SolidWorks Corp. siendo Dassault Systèmes la actual propietaria de este. SolidWorks se ha usado para modelar piezas y ensamblajes 3D a partir de planos en 2D.

7.1.2 Ultimaker Cura



Ultimaker Cura es un programa diseñado para la impresión 3D transformando archivos de modelos 3D en formato STL a archivos G-code para su posterior uso en impresoras 3D. Este programa se centra en establecer las instrucciones necesarias a la impresora para crear el modelo 3D seleccionado. Estableciendo parámetros como por ejemplo que impresora se va a usar ya que dependiendo de la impresora se van a tener unas características u otras como por ejemplo el área disponible de impresión, el tamaño de paso mínimo de los motores, así como la altura de capa mínima, velocidad.

7.1.3 Eagle



Easily Applicable Graphical Layout Editor (EAGLE) es un programa de diseño de PCBs y diagramas con autoenrutador. Esta herramienta ofrece prestaciones similares a la de otros softwares comerciales mucho más caros. Existen varias opciones de Eagle, pero nosotros utilizaremos la edición gratuita con un tamaño máximo de placa de 80x80cm.

7.1.4 Arduino IDE



El entorno de desarrollo integrado de Arduino (IDE) es un programa utilizado para escribir y cargar programas en placas que usen los microcontroladores compatibles con Arduino (como el MEGA4809), está compuesto de varias herramientas de programación como un editor de código, un compilador, un depurador y un constructor de interfaz gráfica (GUI). El principal lenguaje de programación utilizado para Arduino es C. Este programa fue utilizado para realizar el código necesario para controlar el Arduino Nano Every utilizando funciones y los conectores de comunicación RX y TX para realizar la comunicación puerto serie con el ordenador facilitando el control del controlador.

7.1.5 Visual Studio



Visual Studio es un entorno de desarrollo integrado (IDE) utilizado para crear sitios y aplicaciones web compatibles con el framework .NET pudiendo crear aplicaciones que se comuniquen con dispositivos móviles, microcontroladores, páginas webs. Compatibles con lenguajes de programación como C++, C#, Python y muchos más. El uso dado a este programa es el de crear una interfaz user-friendly para facilitar el uso del banco de pruebas.

7.2 Equipos utilizados

7.2.1 Impresoras 3D

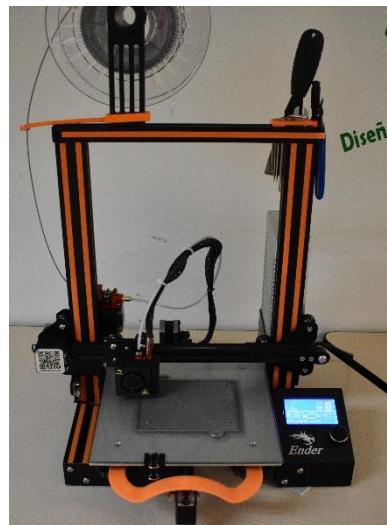


Figura 79: Impresora 3D

Las impresoras 3D (Figura 79) son máquinas utilizadas en prototipado rápido ya que son capaces de replicar modelos 3D creando piezas a partir de un modelo en ordenador. Actualmente se utilizan para todo tipo objetos como para prótesis médicas, alimentos.

De entre todos los tipos de impresoras 3D que existen, nos centraremos en el modelo que hemos utilizado para la fabricación de las piezas.

7.2.2 Impresoras FSM

Estas impresoras utilizan termoplásticos, fundiendo el plástico en uno o más cabezales de extrusión para depositar el plástico en capas muy finas superpuestas, creando así piezas muy resistentes, aunque el proceso puede ser más lento que con otras piezas. El plástico utilizado suele PLA ser que es un plástico derivado de materias primas naturales como el maíz, siendo un poliéster de polímero sintético. Para lograr la conversión de maíz a ácido poliláctico (PLA) se extrae el almidón de las plantas y por medio de la adición de enzimas se convierte en dextrosa. Normalmente para obtener 1kg de PLA se utilizan 2.65kg de maíz. Existen otros materiales como por ejemplo el acrilonitrilo butadieno estireno (ABS) o el polietilenotereftalato (PET) que son derivados del petróleo por lo que se ha evitado su uso ya que poseen cualidades similares al PLA y son contaminantes.

Las impresoras 3D funcionan con G-code, estableciendo un eje de coordenadas mediante finales de carrera y cuantizando los pasos mediante la resolución mínima de los motores paso a paso que se encargan de mover los ejes. Por lo que se utilizan programas que transforman los

modelos 3D en ordenador a instrucciones en G-code para que el extrusor vaya fundiendo capas en un orden específico, formando así las piezas 3D.

Las impresoras utilizadas para la confección del banco de pruebas son las Creality Ender 3 de las que dispone la Universidad de Granada, en el Bibliomaker, un espacio dotado con tecnología y herramientas para la implementación de ideas o proyectos. Estas son mantenidas por los trabajadores del Bibliomaker y se encargan de prestar y arreglar dichas máquinas. Estás deben ser calibradas y purgadas antes de ser usadas, por lo que antes de cada impresión se debe de calibrar la base utilizando un folio ya que se debe de dejar 1mm de separación entre la boquilla y la mesa en cada una de las cuatro esquinas que conforman la cama caliente. Para que la primera capa se pegue a esta superficie se suele utilizar laca, ya que si las impresiones a realizar son demasiado grandes se podría mover la base y estropear la impresión. Otra cosa a tener en cuenta son los parámetros del plástico a utilizar ya que según el fabricante se necesitan una temperatura de fusión u otra, normalmente se encuentra entre 195 °C y 210 °C para el PLA.

7.2.3 Osciloscopio

Un osciloscopio es un instrumento de medición electrónica. Sirve para representar señales eléctricas mediante gráficas de amplitud en un eje vertical frente al tiempo en el eje horizontal. El osciloscopio Keysight InfiniiVision MSOX2002a es un osciloscopio de 2 canales con 70 MHz de ancho de Banda y una frecuencia de muestreo de 2GSPS, estos osciloscopios son los utilizados en los laboratorios de Electrónica en la Universidad de Granada, por lo que el estudiantado está familiarizado con ellos. Estos osciloscopios fueron utilizados para leer las señales del controlador y comprobar la correcta transmisión de datos entre el microcontrolador y el controlador. Para el uso de este osciloscopio debemos colocar las tierras en común y configurar la escala a 1 V y una frecuencia alrededor de 1KHz, pero esta frecuencia depende de la velocidad del motor.

7.2.4 Taladro de columna

Para la realización de los agujeros en la base se ha utilizado un taladro de columna con distintas brocas, para obtener así agujeros simétricos y no desgarrar el material. En nuestro caso las brocas utilizadas eran específicas de madera y los diámetros utilizados varían de 1.5mm a 10mm. Con esta herramienta se hicieron los agujeros necesarios en la base de madera de pino para colocar las patas niveladoras, usadas para amortiguar vibraciones y separar la base de la mesa en la que se apoye, también se utilizó para los agujeros por donde pasarían las asas utilizadas para facilitar el transporte del setup y también se utilizó para realizar los agujeros de

la placa de circuito ya que esta debía de ser atornillada a su respectiva caja para evitar vibraciones que pudieran soltar los cables de los conectores o similares.

7.2.5 Dremel

La Dremel se trata de una amoledora con cabezal intercambiable, pudiendo cortar, perforar, lijar, pulir. Se caracteriza por usar un motor compacto de velocidad variable y un cabezal que puede acoger multitud de herramientas, como brocas, lijas, sierras circulares pequeñas, existen unos 130 cabezales compatibles. Esta herramienta fue utilizada para rematar las piezas impresas en 3D ya que por pequeños desajustes de los motores estas piezas suelen variar un par de milímetros y en este caso al estar las piezas encajadas unas con otras se deben de lijar para que presenten la holgura suficiente para encajar. Aunque, a veces es más rápido modificar el modelo y reimprimir la pieza que arreglarla manualmente, por lo que depende de cuanto se deba de lijar una pieza.

7.2.6 Sierra de calar

La sierra de calar es una herramienta utilizada para cortar maderas, chapados, PVC y darles la geometría plana que se deseó usando plantillas o similares. Dependiendo del material a cortar se utilizan unas sierras u otras ya que dependiendo del diente de la sierra cortará con mayor facilidad un material u otro. En nuestro caso fue utilizada para cortar un tablón de madera reutilizado de una mesa para hacer la base, aunque finalmente se decidió adquirir un tablón de pino para realizar la base.

7.2.7 Soldador de estaño

El soldador de estaño funciona con una resistencia eléctrica en la punta que se calienta con el paso de la corriente por lo que convierte la energía eléctrica en calor, este mantiene la temperatura mediante un sistema PID integrado con un rango de temperatura de hasta 480°C. Una vez se realizaron las pruebas necesarias sobre una protoboard se buscó implementar el circuito en una placa de circuito perforada, utilizando vías de estaño en vez de cables, reduciendo el tamaño, el ruido y el consumo. Ya que se disminuye en un factor apreciable la resistencia al paso de la corriente que presenta los cables y las conexiones rápidas de la placa de prototipado. Se usó estaño con plomo ya que el plomo hace bajar la temperatura de fusión del estaño de 231,9 °C a 185 °C facilitando la soldadura.

7.2.8 Fuente de alimentación

Se trata de un dispositivo que convierte la corriente alterna CA en una o varias corrientes continuas CC, usada para alimentar temporalmente circuitos de prototipado ya que son

regulables en tensión y corriente con un bajo rizado en la salida, protegidas ante sobrecargas y cortocircuitos.

7.2.9 Dinamómetro

Un dinamómetro es un instrumento utilizado para medir fuerzas aplicando la ley de elasticidad de Hooke.

$$\varepsilon = \frac{F}{A * E} \quad (11)$$

Por lo que conociendo los parámetros del muelle se puede conocer la fuerza ejercida en función del desplazamiento de este. Este fue utilizado para medir el torque máximo que podría ejercer el banco, entorno a unos 40N de fuerza.

8 Bibliografía

- 17, N. (s.f.). *Hetpro*. Obtenido de Hetpro-: <https://hetpro-store.com/nema-17/>
- 330ohms. (2022). *330ohms*. Obtenido de 330ohms: <https://blog.330ohms.com/2016/02/09/motores-a-pasos-unipolares-o-bipolares/>
- Albrecht, A. (2018). *Over-Stretching Tolerant Conductors on Rubber Films by Inkjet-Printing Silver Nanoparticles for Wearables*. Pubmed.
- Albrecht, A. (2018). *Printed Sensors for the*.
- Amazon. (2022). *Amazon*. Obtenido de Amazon: <https://www.amazon.es/HzdaDeve->
Impresora-acoplamiento-flexible-
m%C3%A1quina/dp/B091Y2VSCQ/ref=sr_1_2_sspa?__mk_es_ES=%C3%85M%C3
%85%C5%BD%C3%95%C3%91&qid=1YRQU9OUF81GR&keywords=Acoplamiento+flexible+de+5+a+8&qid=1655125718&s=industrial&sprefix=acoplamiento+
- Anghel, A. G. (s.f.). *Electronoobs*. Obtenido de Electronoobs: https://electronoobs.com/circuitos_tut1.php
- Arduino. (2022). *Arduino*. Obtenido de Arduino: <https://arduino.cl/que-es-arduino/>
- Blanco, G. (2016). *Mecanismos*. Obtenido de Mecanismos: <https://sites.google.com/site/mec04blanco/tema-2-elementos-de-maquinas/2-8-manivela-con-tornillo-y-tuerca>
- Chicharro, R. (1 de Septiembre de 2021). *Hipertextual*. Obtenido de <https://hipertextual.com/2021/09/samsung-aumenta-la-produccion-de-sus-pantallas-plegables-tras-el-exito-de-los-galaxy-z-flip-3-y-z-fold-3>
- Components, R. (2022). *RS Components*. Obtenido de RS Components: <https://es.rs-online.com/web/p/rodamientos-de-bola/6189957>
- Createc3D. (Junio de 2022). *Createc3D*. Obtenido de Createc3D: https://createc3d.com/es/varillas-barras-husillos/638-comprar-husillo-y-tuerca-thsl-400-8d-precio-oferta.html?search_query=husillo&results=26
- Dejan. (2022). *Howtomechatronic*. Obtenido de Howtomechatronic: <https://howtomechatronics.com/tutorials/arduino/stepper-motors-and-arduino-the-ultimate-guide/>

Farnell. (2022). *Farnell*. Obtenido de Farnell: <https://es.farnell.com/lin-engineering/4118m-01ro/motor-por-fases-bipolar-1-7a/dp/2292909>

Farnell. (2022). *Farnell*. Obtenido de Farnell: <https://es.farnell.com/xp-power/lcs75us24/fuente-de-alimentaci-n-ac-dc-24v/dp/3650234?st=fuente%20de%20alimentaci%C3%B3n%20ac/dc%2024v>

FC, F. (2022). *Farnell*. Obtenido de Farnell: <https://es.farnell.com/pro-power/ppw00008/lead-dc-power-2-1mm-skt-bare-end/dp/3498415?st=conector%20cil%C3%ADndrico%20hembra>

Fernández, P. G. (2022). *Apuntes de Prototipado y Test Electrónicos*. Granada.

Fervi3d. (2022). *Fervi3d*. Obtenido de Fervi3d: <https://fervi3d.com/rodamientos/155-rodamiento-lineal-lm8uu.html>

García, V. (2014). *EPA*. Obtenido de Electrónica Práctica Aplicada: <https://www.diarioelectronicohoy.com/blog/el-puente-h-h-bridge>

Instrument, T. (2014). *DRV8825 Stepper Motor Controller IC*.

Llamas, L. (Agosto de 2016). *luisllamas.es*. Obtenido de [luisllamas.es](https://www.luisllamas.es/tipos-motores-rotativos-proyectos-arduino/): <https://www.luisllamas.es/tipos-motores-rotativos-proyectos-arduino/>

Llamas, L. (2016). *luisllamas.es*. Obtenido de [luisllamas.es](https://www.luisllamas.es/motores-paso-paso-arduino-driver-a4988-drv8825/): <https://www.luisllamas.es/motores-paso-paso-arduino-driver-a4988-drv8825/>

naylampmechatronics. (2022). *naylampmechatronics*. Obtenido de naylampmechatronics: <https://naylampmechatronics.com/conversores-dc-dc/196-convertidor-voltaje-dc-dc-step-down-3a-lm2596.html>

Rivadeneyra, A. (2017). *Technological Integration in Printed Electronics*. Intechopen.

SCREENTEX. (2016). *INVESTIGACIÓN DE IMPRESIÓN ELECTRÓNICA SOBRE SUSTRATO*. Aitex.

TME. (2020). *tme*. Obtenido de tme: <https://www.tme.eu/es/news/library-articles/page/41861/Motor-paso-a-paso-tipos-y-ejemplos-del-uso-de-motores-paso-a-paso/>

Wong, W. S. (2009). *Flexible Electronics: Materials and Applications*.

9 Anexos

9.1 Código de Arduino

```

#define STEP 9 // Pin digital encargado de los pasos
#define DIR 10 // Pin digital encargado de la dirección
#define FC1 5 // Final de carrera derecho, Normalmente Alto
#define FC2 6 // Final de carrera izquierdo, Normalmente Alto

String inputString = ""; // Una String para almacenar los datos entrantes
bool stringComplete = false; //Para ver cuando se completa al string

// Inicialización de los parametros y sus valores iniciales

int vel = 600; // Tiempo en On y en Off (Ciclo de trabajo 50%)
String nesti; // N° de estiramientos
String mm; // mm por estirar
String vele; // Tiempo en On y en Off (Ciclo de trabajo 50%) en la función
de estirar
int v_fc1 = 0; // Valor del final de carrera derecho
int v_fc2 = 0; // Valor del final de carrera izquierdo
int n = 1; // N° Actual de estiramientos realizados
int pausa = 250; // Tiempo pausado entre estiramiento y vuelta

// Función encargada de leer el valor de los finales de carrera
void leerfc(){
    v_fc1 = digitalRead(FC1);
    v_fc2 = digitalRead(FC2);
}
// Función encargada de mover la pieza corredera hacia el lado derecho

void movder(int vder){
    digitalWrite(DIR, HIGH); // Establece sentido del motor
    for (int i=0; i < 25*vder; i++) { //Establece la cantidad de pasos que
realizar
        leerfc(); //Antes de cada paso comprueba que el final de carrera derecho
no esté activado
        if (v_fc1 == HIGH){
            digitalWrite(STEP, HIGH);
            delayMicroseconds (vel);
            digitalWrite(STEP, LOW);
            delayMicroseconds (vel);
        }
    }
}
// Función encargada de mover la pieza corredera hacia el lado izquierdo

void movizq(int vizq)
{
    digitalWrite(DIR, LOW); // Establece sentido del motor
    for (int i=0; i < 25*vizq; i++) { //Establece la cantidad de pasos //que
realizar
        leerfc(); //Antes de cada paso comprueba que el final de carrera //derecho
no esté activado
        if (v_fc2 == HIGH){
            digitalWrite(STEP, HIGH);
            delayMicroseconds (vel);
            digitalWrite(STEP, LOW);
        }
    }
}

```

```

        delayMicroseconds (vel);
    }
}
}

void idavuelta(int nesti, int mm, int vele){ // Función que realiza //la
ida y la vuelta con los parametros actualizados

while (n <= nesti) {
    digitalWrite(DIR, LOW);
    for (int i=0; i < 25*mm; i++) { //200 pasos = 1 vuelta = 2 mm //(paso de
rosca del husillo)
        leerfc();
        if (v_fc1 == HIGH){
            digitalWrite(STEP, HIGH);
            delayMicroseconds (vele);
            digitalWrite(STEP, LOW);
            delayMicroseconds (vele);
        }
        delay(pausa);
        digitalWrite(DIR, HIGH);
        for (int i=0; i < 25*mm; i++) {
            leerfc();
            if (v_fc2 == HIGH){
                digitalWrite(STEP, HIGH);
                delayMicroseconds (vele);
                digitalWrite(STEP, LOW);
                delayMicroseconds (vele);
            }
            delay(pausa);
            n=n+1;
        }
    }
}

// En el setup se establecen los pines de salida y se inicializa //la
comunicación serial
void setup() {
    pinMode(STEP, OUTPUT);
    pinMode(DIR, OUTPUT);
    pinMode(FC1, INPUT);
    pinMode(FC2, INPUT);
    Serial.begin(9600);
}

void loop() {

    if (stringComplete)
    {
        inputString.trim(); // Si hay alguna linea nueva devuelve un
//espacio en blanco
        // Procesa el comando

        if (inputString.indexOf("$I") != -1) // Si el comando empieza //por
$I lee el valor de mm a estirar y llama a la función izquierda
        {
            String vizq = inputString.substring(2);
            movizq(vizq.toInt());
        }
    }
}

```

```

        else if (inputString.indexOf("$D") != -1) // Si el comando //empieza
por $D lee el valor de mm a estirar y llama a la función //derecha
{
    String vder = inputString.substring(2);
    movder(vder.toInt());
}

        else if (inputString.equals("$E")) // Si el comando empieza //por
$E llama a la función estirar.
{
    n = 1;
    idavuelta(nesti.toInt(),mm.toInt(),vele.toInt());
}
        else if (inputString.indexOf("$A") != -1) // Si el comando //empieza
por $A lee el valor de nesti a estirar y actualiza el //parametro
{
    nesti = inputString.substring(2);
}
        else if (inputString.indexOf("$B") != -1) // Si el comando //empieza
por $B lee el valor de mm a estirar y actualiza el parametro
{
    mm = inputString.substring(2);
}
        else if (inputString.indexOf("$C") != -1) // Si el comando //empieza
por $C lee el valor de vel y actualiza el parametro
{
    vele = inputString.substring(2);
}
inputString = "";
stringComplete = false;
}

while (Serial.available())
{
    // Coge el nuevo byte
    char inChar = (char)Serial.read();
    // si el carácter entrante es una nueva linea, establezca una
//bandera para que el ciclo principal pueda hacer algo al respecto:
    if (inChar == '\n')
    {
        stringComplete = true;
    }
    else
    {
        // Lo añade al inputString
        inputString += inChar;
    }
}
}

```

9.2 Código del GUI

```

using System;
using System.Collections.Generic;
using System.ComponentModel;
using System.Data;
using System.Drawing;
using System.Linq;
using System.Text;
using System.Threading.Tasks;
using System.Windows.Forms;
using System.IO.Ports;

namespace Setupstretching
{
    public partial class Form1 : Form
    {
        public Form1()
        {
            InitializeComponent();
        }

        private void Form1_Load(object sender, EventArgs e) //Cuando se carga el
programa:
        {
            try // Todas las funciones se implementan en un try y catch para
evitar que crashee el programa ante algun error.
            {
                disableComponents(); // Desactiva los componentes como botones y
cajas numericas

                //comboBoxPuerto
                string[] ports = SerialPort.GetPortNames(); // Lee los puertos que
hay disponibles
                comboBoxPuerto.DataSource = ports;

                //comboBoxBaud
                string[] rates = { "9600", "38400", "57600", "115200" }; // Las
velocidades disponibles
                comboBoxBaud.DataSource = rates;
                //labelInfo.Text = "";

            }
            catch (Exception error)
            {
                MessageBox.Show(error.Message); // Si capta algún error lo muestra
en una MessageBox
            }
        }

        private void Form1_FormClosing(object sender, FormClosingEventArgs e) //Cuando se cierra el programa:
        {
            try
            {
                if (serialPort1.IsOpen) //Si el puerto está abierto
                {
                    serialPort1.Close(); // Se cierra
                }
            }
            catch (Exception error)
            {
                MessageBox.Show(error.Message);
            }
        }
    }
}

```

```

        }
    }

    private void disableComponents()
    {
        //Desactiva todos los accionables
        buttonIzq.Enabled = false;
        buttonDer.Enabled = false;
        buttonEstirar.Enabled = false;
        numericUpDownDer.Enabled = false;
        numericUpDownIzq.Enabled = false;
        numericUpDownMmestirados.Enabled = false;
        numericUpDownVvelocidad.Enabled = false;
        numericUpDownNestiramientos.Enabled = false;
    }

    private void enablecomponents()
    {
        // Activa todos los accionables
        buttonIzq.Enabled = true;
        buttonDer.Enabled = true;
        buttonIzq.Enabled = true;
        buttonDer.Enabled = true;
        buttonEstirar.Enabled = true;
        numericUpDownDer.Enabled = true;
        numericUpDownIzq.Enabled = true;
        numericUpDownMmestirados.Enabled = true;
        numericUpDownVvelocidad.Enabled = true;
        numericUpDownNestiramientos.Enabled = true;
    }

    private void buttonConectar_Click(object sender, EventArgs e) // Cuando se hace click en conectar:
    {
        try
        {
            if(!serialPort1.IsOpen) // Si el puerto no está abierto ya
            {
                serialPort1.BaudRate = Convert.ToInt32(comboBoxBaud.Text);
                serialPort1.PortName = comboBoxPuerto.Text;
                serialPort1.Open();

                progressBarConexion.Value = 100;
                buttonConectar.Text = "Desconectar";
                buttonRefrescar.Enabled = false;

                enablecomponents();
                // Se conecta al puerto, a la velocidad especificada, carga la barra al 100% y activa los componentes
            }
            else
            {
                // Si el puerto ya está abierto se cierra y desactiva los componentes
                progressBarConexion.Value = 0;
                buttonConectar.Text = "Conectar";
                buttonRefrescar.Enabled = true;
                serialPort1.Close();
                disableComponents();
            }
        }
        catch (Exception error)
    }
}

```

```
{  
    MessageBox.Show(error.Message);  
}  
  
}  
  
private void buttonRefrescar_Click(object sender, EventArgs e) //Al pulsar  
el botón de refrescar  
{  
    string[] ports = SerialPort.GetPortNames(); // Se actualiza la lista  
de puertos  
    comboBoxPuerto.DataSource = ports;  
}  
  
  
private void buttonIzq_Click(object sender, EventArgs e) // Si se pulsa el  
botón izquierdo  
{  
    try  
    {  
        serialPort1.WriteLine($"$I{numericUpDownIzq.Value}"); // Manda por  
el puerto serie el comando $I seguido del valor de mm a estirar  
    }  
    catch (Exception error)  
    {  
        MessageBox.Show(error.Message);  
    }  
}  
  
private void buttonDer_Click(object sender, EventArgs e) // Si se pulsa el  
botón derecho  
{  
    try  
    {  
        serialPort1.WriteLine($"$D{numericUpDownDer.Value}"); // Manda por  
el puerto serie el comando $D seguido del valor de mm a estirar  
    }  
    catch (Exception error)  
    {  
        MessageBox.Show(error.Message);  
    }  
}  
  
private void numericUpDownIzq_ValueChanged(object sender, EventArgs e) //  
Cada vez que se cambia el valor de la numericBox  
{  
    try  
    {  
        labelvizq.Text = numericUpDownIzq.Value + " mm"; // Se cambia el  
valor mostrado en la etiqueta  
    }  
    catch (Exception error)  
    {  
        MessageBox.Show(error.Message);  
    }  
}  
  
private void numericUpDownDer_ValueChanged(object sender, EventArgs e) //  
Cada vez que se cambia el valor de la numericBox  
{
```

```

try
{
    labelVder.Text = numericUpDownDer.Value + " mm"; // Se cambia el
valor mostrado en la etiqueta
}
catch (Exception error)
{
    MessageBox.Show(error.Message);
}
}

private void groupBoxEstiramiento_Enter(object sender, EventArgs e)
{

}

private void numericUpDownNestiramientos_ValueChanged(object sender,
EventArgs e) // Cada vez que se cambia el valor de la numericBox
{
    try
    {
        labelVnestiramientos.Text = numericUpDownNestiramientos.Value +
""; // Se cambia el valor mostrado en la etiqueta
        serialPort1.WriteLine($"$A{numericUpDownNestiramientos.Value}");
// Manda por el puerto serie el comando $A seguido del valor del numero de
estiramientos
    }
    catch (Exception error)
    {
        MessageBox.Show(error.Message);
    }
}

private void buttonEstirar_Click(object sender, EventArgs e) // Si se pulsa
el botón de estirar
{
    try
    {
        serialPort1.WriteLine("$E"); // Manda por el puerto serie el
comando $E
    }
    catch (Exception error)
    {
        MessageBox.Show(error.Message);
    }
}

private void numericUpDownMmestirados_ValueChanged(object sender,
EventArgs e) // Cada vez que se cambia el valor de la numericBox
{
    try
    {
        labelVmkestirado.Text = numericUpDownMmestirados.Value + " mm"; // Se
cambia el valor mostrado en la etiqueta
        serialPort1.WriteLine($"$B{numericUpDownMmestirados.Value}"); // Manda por el puerto serie el comando $B seguido del valor de mm a estirar
    }
    catch (Exception error)
    {
        MessageBox.Show(error.Message);
    }
}

```

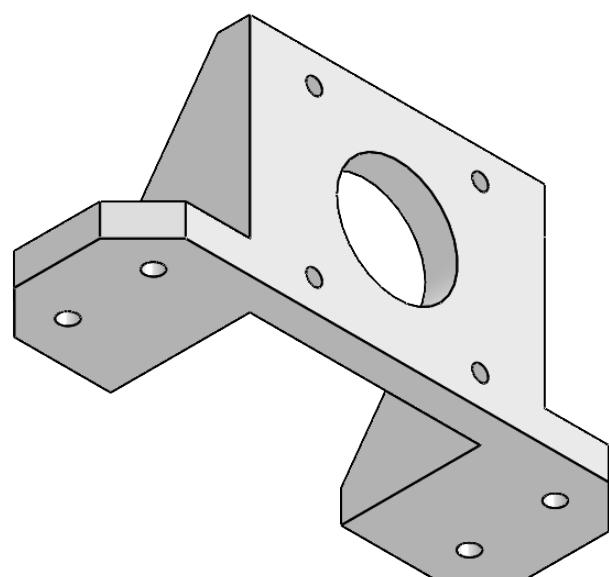
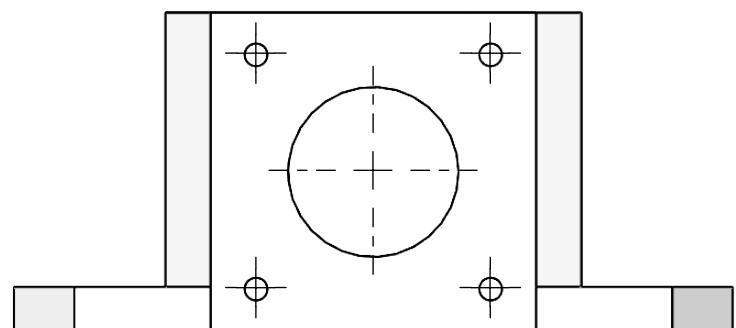
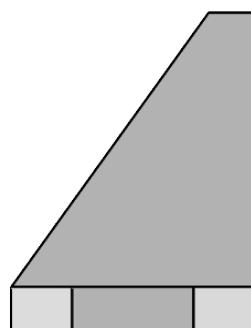
```
        }

    }

    private void numericUpDownVvelocidad_ValueChanged(object sender, EventArgs e) // Cada vez que se cambia el valor de la numericBox
    {
        try
        {
            labelVvelocidad.Text = numericUpDownVvelocidad.Value + ""; // Se
cambia el valor mostrado en la etiqueta
            serialPort1.WriteLine($"$C{numericUpDownVvelocidad.Value}"); // 
Manda por el puerto serie el comando $C seguido del valor vel
        }
        catch (Exception error)
        {
            MessageBox.Show(error.Message);
        }
    }
}
```

9.3 Planos de las piezas.

(En las siguientes páginas)



Dibujado:

Alberto García Cruz

Grupo:

Fecha:

08/06/2022



UNIVERSIDAD
DE GRANADA

Revisado: Alberto García Cruz

Material: PLA

Base del motor

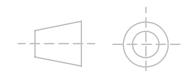
Formato:

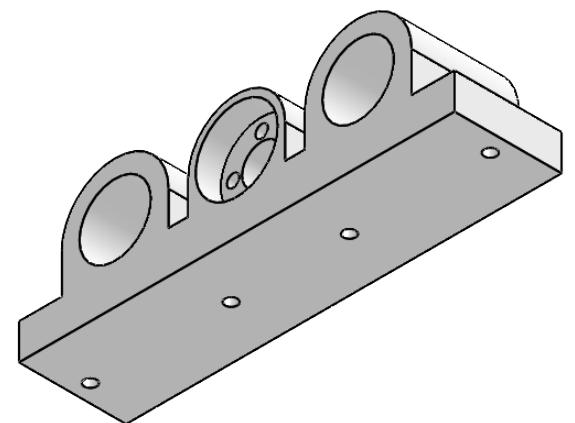
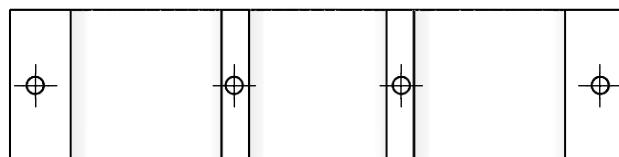
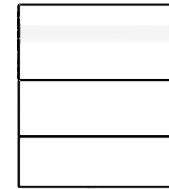
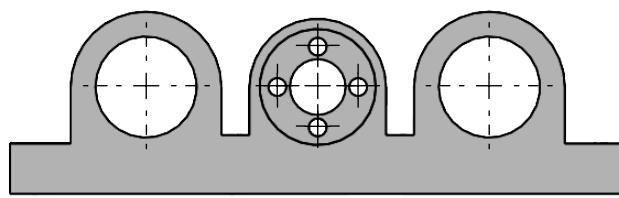
DIN A4

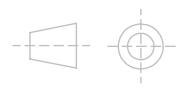
Escala:

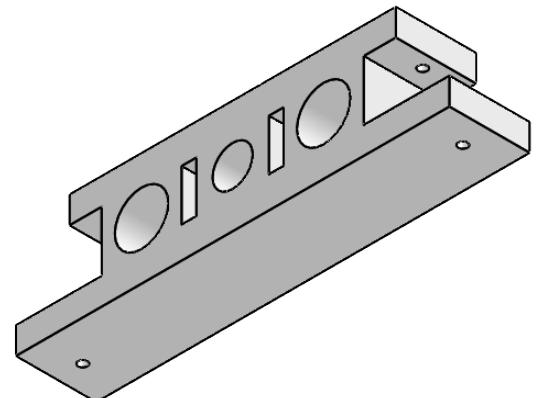
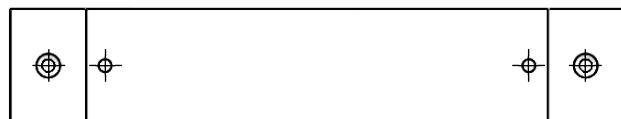
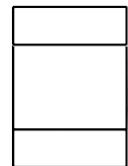
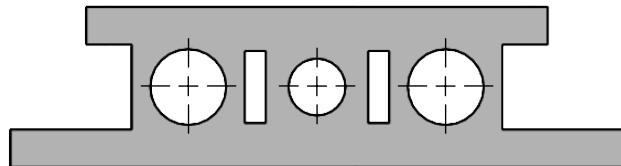
1:1

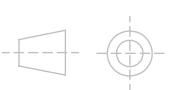
Proyección:

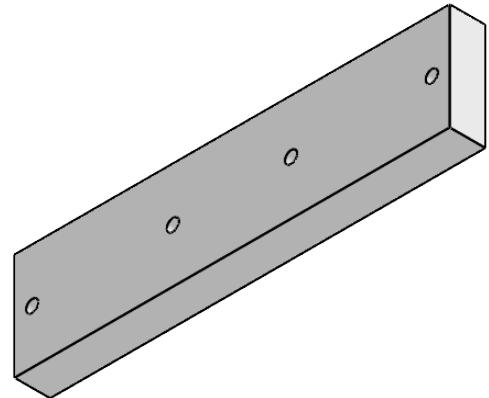
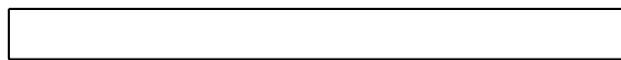
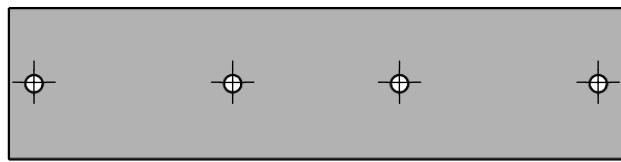




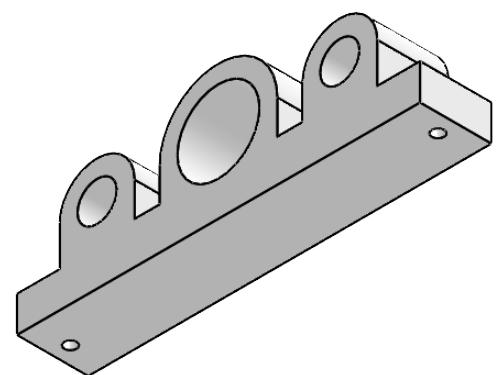
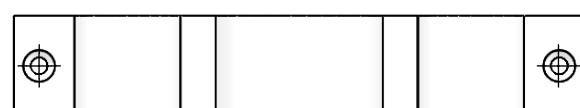
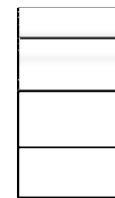
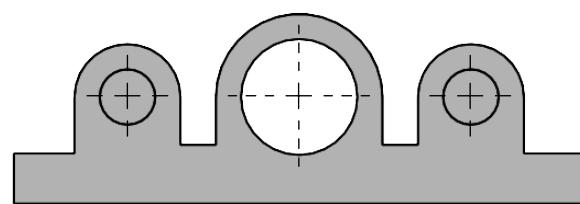
Dibujado: Alberto García Cruz	Grupo:	Fecha: 08/06/2022	 UNIVERSIDAD DE GRANADA
Revisado: Alberto García Cruz	Material: PLA		
Pieza corredera	Formato: DIN A4	Escala: 2:3	Proyección: 

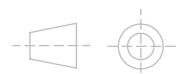


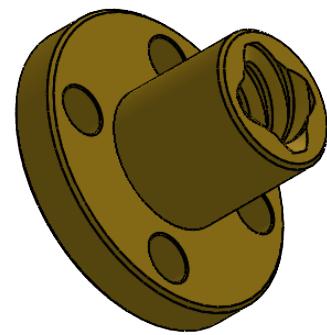
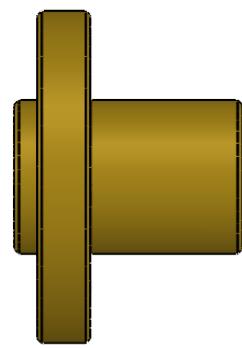
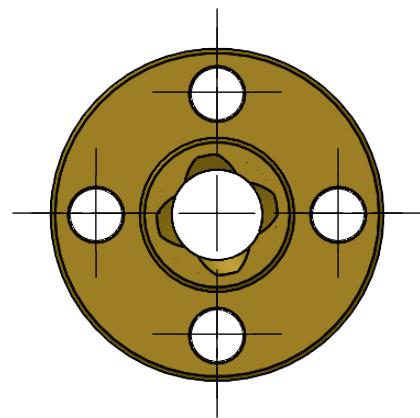
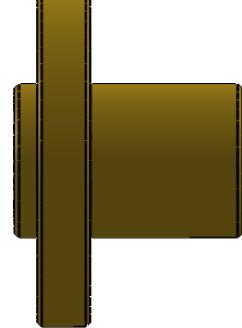
Dibujado:	Grupo:	Fecha:	 UNIVERSIDAD DE GRANADA
Alberto García Cruz		08/06/2022	
Revisado: Alberto García Cruz	Material:	PLA	
Pieza fija	Formato:	Escala:	Proyección:
	DIN A4	1:2	

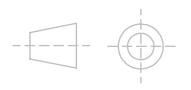


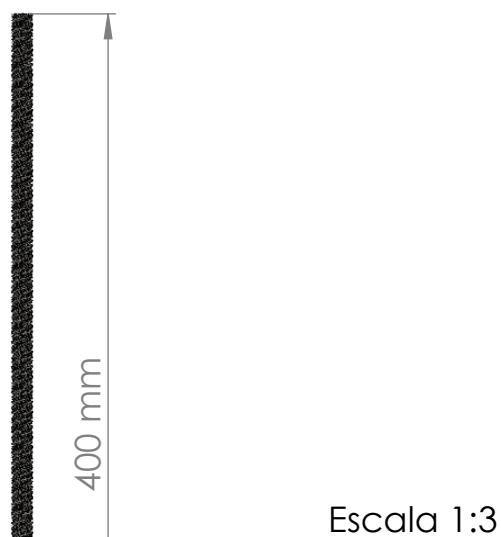
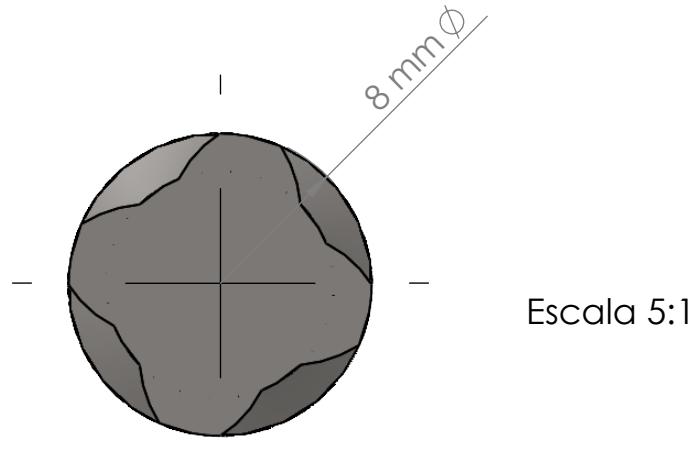
Dibujado:	Grupo:	Fecha:	 UNIVERSIDAD DE GRANADA
Alberto García Cruz		08/06/2022	
Revisado: Alberto García Cruz	Material: PLA		
Pieza pinza	Formato: DIN A4	Escala: 2:3	Proyección:

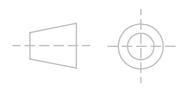


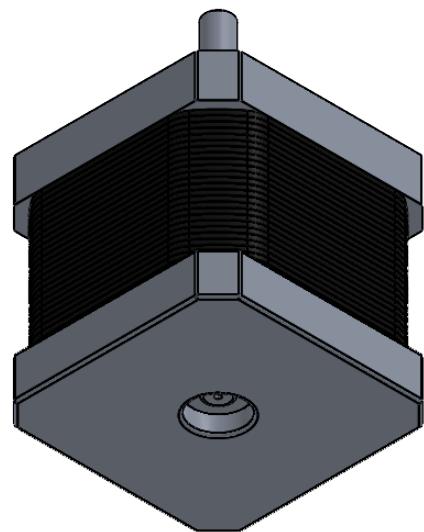
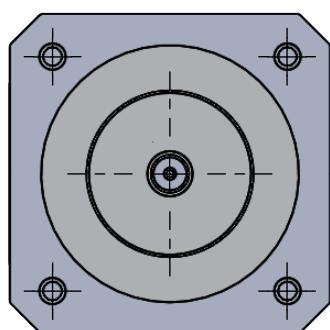
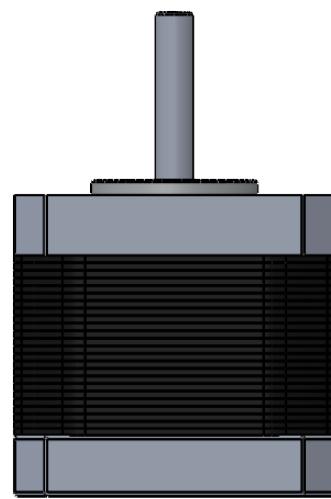
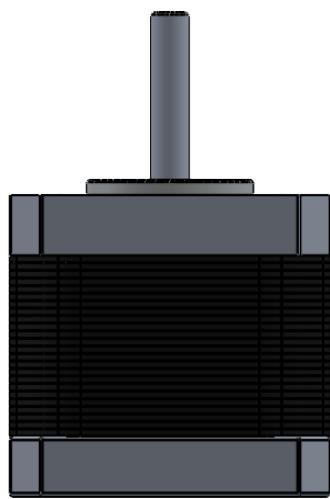
Dibujado: Alberto García Cruz	Grupo:	Fecha: 08/06/2022	 UNIVERSIDAD DE GRANADA
Revisado: Alberto García Cruz	Material: PLA		
Pieza de sujeción	Formato: DIN A4	Escala: 2:3	Proyección: 

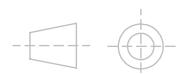


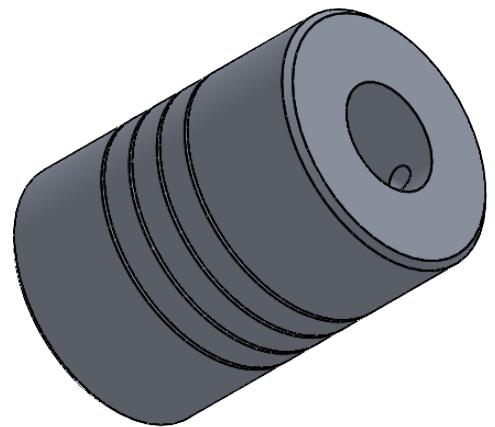
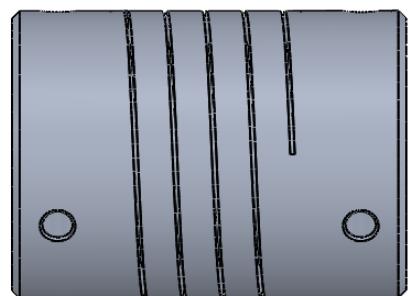
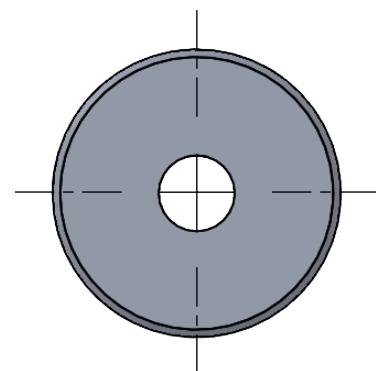
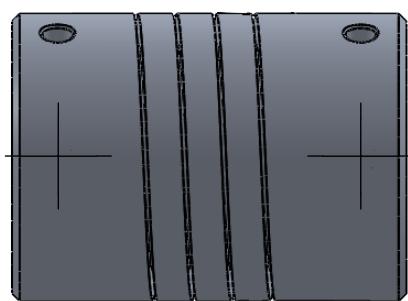
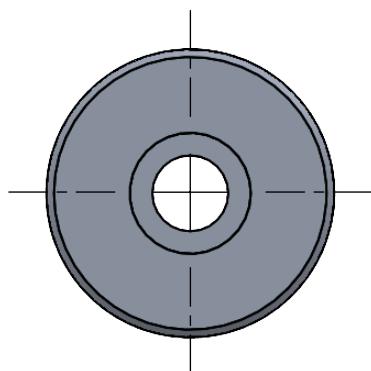
Dibujado: Alberto García Cruz	Grupo:	Fecha: 08/06/2022	 UNIVERSIDAD DE GRANADA
Revisado: Alberto García Cruz	Material: Latón		
Tuerca husillo	Formato: DIN A4	Escala: 2:1	Proyección: 

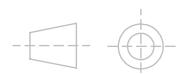


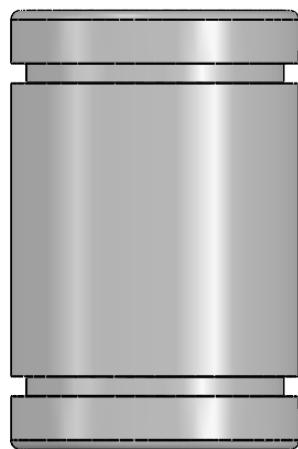
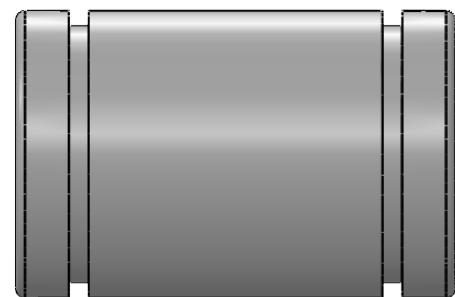
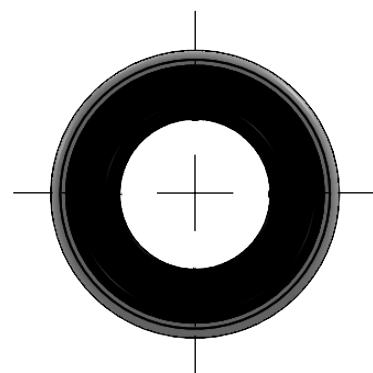
Dibujado: Alberto García Cruz	Grupo:	Fecha: 08/06/2022	 UNIVERSIDAD DE GRANADA
Revisado: Alberto García Cruz	Material: Acero		
Husillo	Formato: DIN A4	Escala: 5:1	Proyección: 

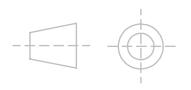


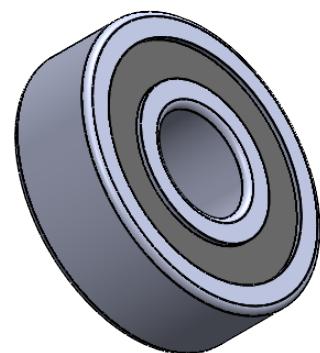
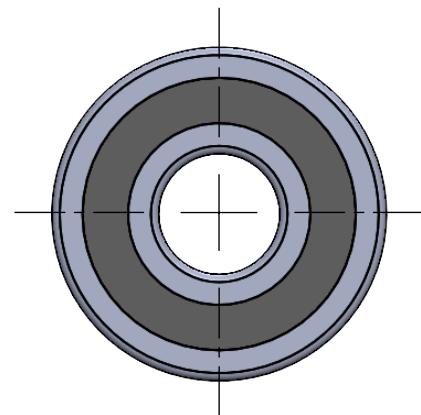
Dibujado: Alberto García Cruz	Grupo:	Fecha: 08/06/2022	 UNIVERSIDAD DE GRANADA
Revisado: Alberto García Cruz	Material: Metal		
Motor NEMA 17	Formato: DIN A4	Escala: 1:1	Proyección: 

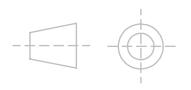


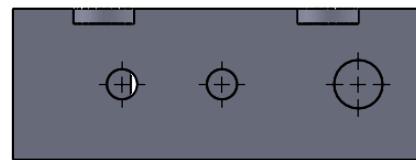
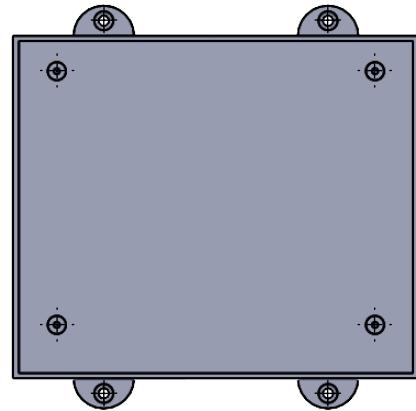
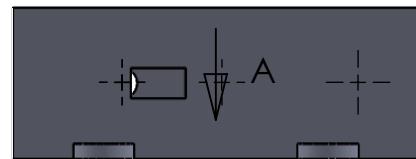
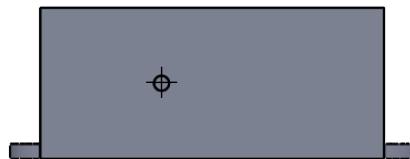
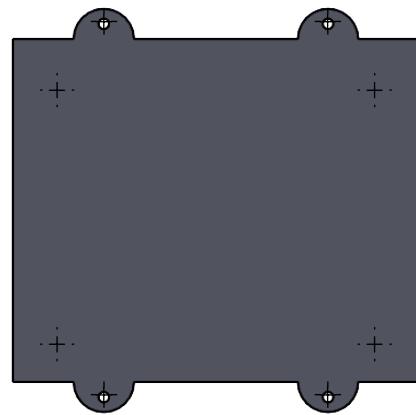
Dibujado: Alberto García Cruz	Grupo:	Fecha: 08/06/2022	 UNIVERSIDAD DE GRANADA
Revisado: Alberto García Cruz	Material: Aluminio		
Acoplamiento	Formato: DIN A4	Escala: 2:1	Proyección: 



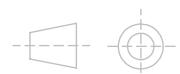
Dibujado: Alberto García Cruz	Grupo:	Fecha: 08/06/2022	 UNIVERSIDAD DE GRANADA
Revisado: Alberto García Cruz	Material: Acero		
Rodamiento lineal	Formato: DIN A4	Escala: 2:1	Proyección: 



Dibujado: Alberto García Cruz	Grupo:	Fecha: 08/06/2022	 UNIVERSIDAD DE GRANADA
Revisado: Alberto García Cruz	Material: Acero		
Rodamiento radial	Formato: DIN A4	Escala: 2:1	Proyección: 



VISTA A
ESCALA 2 : 5

Dibujado: Alberto García Cruz	Grupo:	Fecha: 08/06/2022	 UNIVERSIDAD DE GRANADA
Revisado: Alberto García Cruz	Material: PLA		
Caja circuito	Formato: DIN A4	Escala: 2:5	Proyección: 

Alberto García Cruz
Banco de estiramientos y flexión
TFG Curso 2021-2022
Grado en Ingeniería Electrónica Industrial

Dibujado:	Grupo:	Fecha:	 UNIVERSIDAD DE GRANADA
Alberto García Cruz		08/06/2022	
Revisado: Alberto García Cruz	Material: PLA		
Tapa circuito	Formato: DIN A4	Escala: 1:1	Proyección: 