



Escuela Superior de Ciencias Experimentales y Tecnología

**GRADO EN INGENIERÍA
DE TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES**

Trabajo de Fin de Grado

**DISEÑO DE UN SISTEMA DE BOBINADO
AUTOMÁTICO BASADO EN HARDWARE LIBRE**

Martín Bravo, Marta

Director: Machado Sánchez, Felipe

Curso Académico 2019/20



Universidad
Rey Juan Carlos

Grado en Ingeniería de Tecnologías Industriales

Trabajo de Fin de Grado

El presente trabajo, titulado ***DISEÑO DE UN SISTEMA DE BOBINADO AUTOMÁTICO BASADO EN HARDWARE LIBRE***, constituye la memoria correspondiente a la asignatura Trabajo de Fin de Grado que presenta **D^a. Marta Martín Bravo** como parte de su formación para aspirar al Título de Graduado/a en Ingeniería de Tecnologías Industriales. Este trabajo ha sido realizado en ***Escuela Superior de Ciencias Experimentales y Tecnología*** en el ***Departamento de Matemática Aplicada, Ciencia e Ingeniería de los Materiales y Tecnología Electrónica*** bajo la dirección de ***Felipe Machado Sánchez***.

Móstoles, 21 de febrero de 2020

AGRADECIMIENTOS

Estoy muy orgullosa de haber completado este proyecto, ya que representa el cierre de una de las etapas más importantes de mi vida y de mi carrera profesional.

En primer lugar, quería agradecer a mi tutor, Felipe Machado, su apoyo incondicional, sus consejos y su disponibilidad para atender mis preguntas durante el desarrollo de este proyecto. También a Pablo Aguado por su soporte en el laboratorio y la resolución de dudas. Trabajar con ellos ha hecho que las cosas fuesen mucho más fáciles y su gran profesionalidad me ha motivado para seguir esforzándome y aprendiendo para mejorar todo lo posible.

También quería agradecer a mis padres y a mis hermanas, por animarme en los momentos más difíciles y apoyarme en todo lo que hago. Siempre han conseguido que el trabajo fuese más llevadero y que lo malo fuese más agradable.

Finalmente, no podría olvidarme de mis compañeros de clase, por los años que hemos pasado juntos esforzándonos por un mismo fin y por el apoyo mutuo en las etapas más duras de la carrera.

RESUMEN

En el Área de Tecnología Electrónica, el elevado coste de una bobinadora automática comercial obligaba a devanar manualmente las bobinas que necesitaban para sus proyectos de investigación. Este tedioso trabajo puede durar horas y no garantiza la precisión que las características de la bobina requieren.

Por esta razón y sumado al hecho de que sólo harían uso de ella de forma ocasional, no compensaría hacer tal desembolso de dinero. Por lo tanto, surgió la necesidad de diseñar un sistema de bobinado automático de bajo coste.

Este proyecto consiste en el diseño una bobinadora automática, la cual funciona mediante un sistema de movimiento de traslación y rotación. Los movimientos de la bobina han sido programados en un microcontrolador Arduino que determina los giros de dos motores paso a paso.

Cabe destacar que el diseño del soporte es modular e intercambiable, y permite una gran adaptabilidad del dispositivo a distintos diámetros y longitudes de bobina, en función de las características requeridas por el usuario.

Para el desarrollo del proyecto, se ha hecho uso de software y hardware libre. Por ello, cualquier persona podría replicar la bobinadora, ya que todas las herramientas utilizadas son de libre acceso y los dispositivos electromecánicos son comerciales, económicos y la documentación de estos dispositivos está disponible de forma abierta.

Este TFG constituye un prototipo de sistema de devanado automático para bobinas accesible, autónomo y de fácil uso para distintas aplicaciones. Todos los diseños, tanto de códigos como de piezas para impresión 3D, han sido compartidos en GitHub [7].

Por último, cabe destacar que durante el desarrollo del TFG la autora ha profundizado en sus conocimientos de programación de microcontroladores, diseño CAD, electrónica y mecánica, además de su formación en nuevos ámbitos como la impresión 3D y la mecatrónica.

ABREVIATURAS

ATX	Advanced Technology Extended – Tecnología avanzada extendida
BOM	Bill of materials – Lista de materiales
CA	Corriente alterna
CC	Corriente continua
CNC	Computer Numerical Control – Control Numérico por Computador
DIY	Do it yourself – Hazlo tú mismo
f.e.m	Fuerza electromotriz
GND	Ground – Tierra
I2C	Inter-Integrated Circuit – Circuito inter-integrado, bus serie de datos
IDE	Integrated Development Environment – Entorno de desarrollo integrado
LCD	Liquid Crystal Display – Pantalla de cristal líquido
LED	Light Emitting Diode - Diodo emisor de luz
NC	Normalmente Cerrado
NA	Normalmente Abierto
PLA	Ácido poliláctico
RAM	Random Access Memory - Memoria de acceso aleatorio
rpm	Revoluciones por minuto
SDA	Serial Data – Línea de datos del bus I2C
SCL	Serial Clock – Línea de reloj del bus I2C
TFG	Trabajo de fin de grado
USB	Universal Serial Bus - Bus Serie Universal
V	Voltios

TABLA DE ILUSTRACIONES

<i>Ilustración 1. Disciplinas de la mecatrónica [23]</i>	11
<i>Ilustración 2. Esquema general de un sistema mecatrónico [27]</i>	11
<i>Ilustración 3. Bobinadora comercial BM-A-1</i>	14
<i>Ilustración 4. Bobinadora con estructura impresa en 3D</i>	15
<i>Ilustración 5. Diseño de bobinadora automática con estructura metálica</i>	16
<i>Ilustración 6. Sistema de bobinado automático</i>	20
<i>Ilustración 7. Esquema de funcionamiento</i>	21
<i>Ilustración 8. Componentes del sistema de bobinado</i>	22
<i>Ilustración 9. Diseño CAD del prototipo</i>	22
<i>Ilustración 10. Montaje de los rodamientos con el carro y los ejes</i>	26
<i>Ilustración 11. Interfaz de Repetier Host</i>	28
<i>Ilustración 12. Piezas impresas en 3D fallidas</i>	29
<i>Ilustración 13. Carro</i>	30
<i>Ilustración 14. Carcasas del carro</i>	31
<i>Ilustración 15. Conjunto del carro y las carcasas</i>	31
<i>Ilustración 16. Soporte de los motores</i>	32
<i>Ilustración 17. Módulo alzador</i>	32
<i>Ilustración 18. Conjunto del soporte principal con carcasas, soporte motor y módulos alzadores</i>	33
<i>Ilustración 19. Soporte del eje</i>	33
<i>Ilustración 20. Tensionador de la correa</i>	34
<i>Ilustración 21. Soporte del final de carrera</i>	34
<i>Ilustración 22. Tensionador del hilo</i>	35
<i>Ilustración 23. Colocación del hilo en zigzag</i>	36
<i>Ilustración 24. Soporte del carrete</i>	36
<i>Ilustración 25. Montaje del soporte del carrete</i>	37
<i>Ilustración 26. Soporte de la bobina proveedora</i>	37
<i>Ilustración 27. Subcomponentes soporte bobina</i>	37
<i>Ilustración 28. Carrete de la bobina objetivo</i>	38
<i>Ilustración 29. Esquema placa Arduino UNO</i>	40
<i>Ilustración 30. Proyectos de ejemplo</i>	41
<i>Ilustración 31. Seleccionar modelo de placa</i>	42
<i>Ilustración 32. Esquema IDE</i>	42
<i>Ilustración 33. Funciones botones</i>	43
<i>Ilustración 34. Esquema de funcionamiento del final de carrera (NC)</i>	44
<i>Ilustración 35. Esquema del sistema de control</i>	45
<i>Ilustración 36. Pantalla LCD con botones</i>	46

<i>Ilustración 37. Secuencia de pantallas</i>	<i>47</i>
<i>Ilustración 38. Arquitectura de tipo master-slave</i>	<i>48</i>
<i>Ilustración 39. Conexiones para comunicación I2C</i>	<i>49</i>
<i>Ilustración 40. Conexión entre placas Arduino UNO.....</i>	<i>50</i>
<i>Ilustración 41. Avance de la primera capa</i>	<i>52</i>
<i>Ilustración 42. Avance de la segunda capa</i>	<i>52</i>
<i>Ilustración 43. Motor paso a paso Nema 17</i>	<i>54</i>
<i>Ilustración 44. Cables de salida del motor paso a paso</i>	<i>55</i>
<i>Ilustración 50. Pololu A4988.....</i>	<i>56</i>
<i>Ilustración 51. Esquema de conexiones del Pololu A4988</i>	<i>56</i>
<i>Ilustración 46. CNC Shield.....</i>	<i>58</i>
<i>Ilustración 47. Esquema de conexiones en la placa CNC Shield</i>	<i>58</i>
<i>Ilustración 48. Esquema de conexión de los motores en la placa CNC Shield</i>	<i>59</i>
<i>Ilustración 49. Pines de conexión de la placa Arduino UNO</i>	<i>59</i>
<i>Ilustración 52. Fuente de alimentación ATX.....</i>	<i>60</i>
<i>Ilustración 53. Jack conectado a la fuente ATX</i>	<i>61</i>
<i>Ilustración 54. Conector Jack.....</i>	<i>61</i>
<i>Ilustración 55. Alimentación del sistema</i>	<i>61</i>
<i>Ilustración 56. Características de la bobina</i>	<i>75</i>
<i>Ilustración 57. Especificaciones motor Nema 17.....</i>	<i>76</i>

ÍNDICE

1.	INTRODUCCIÓN	10
1.1	Mecatrónica.....	10
1.2	Filosofía del hardware libre.....	12
1.2.	Estado del arte.....	14
1.2.1	Bobinadoras comerciales	14
1.2.2	Bobinadoras DIY	15
1.3.	Esquema de la memoria.....	17
2	OBJETIVOS	18
3	SOLUCIÓN TÉCNICA	19
3.1	Descripción general del prototipo	20
3.2	Movimientos del sistema	22
3.2.1	Movimiento de traslación	23
3.2.2	Movimiento de rotación	23
3.2.3	Relación entre movimientos	23
3.3	Sistema mecánico	24
3.3.1	Estructura	24
3.3.2	Transmisión del movimiento.....	25
3.3.3	Impresión 3D	26
3.3.4	Componentes impresos	29
3.3.5	Carrete de la bobina objetivo.....	38
3.4	Sistema electrónico de control.....	39
3.4.1	Arduino UNO	39
3.4.2	Interruptor de final de carrera	44
3.4.3	Descripción del sistema	45
3.5	Sistema electrónico de potencia	54
3.5.1	Motores paso a paso.....	54
3.5.2	Pololu A4988	55
3.5.3	Placa CNC Shield V3.51	58
3.6	Alimentación del sistema	60
3.7	Especificaciones del diseño	62
3.8	Estudio económico.....	63
3.9	Líneas futuras	65

4	CONCLUSIONES.....	66
5	BIBLIOGRAFÍA	67
6	APÉNDICES.....	71
6.1.	Metodología	71
6.1.1	Definición de especificaciones	71
6.1.2	Estudio de alternativas	71
6.1.3	Adquisición de materiales.....	71
6.1.4	Documentación de los avances	71
6.1.5	Aprendizaje del software	71
6.1.6	Diseño mecánico e impresión de las piezas.....	71
6.1.7	Montaje del sistema	72
6.1.8	Programación del control de los motores paso a paso	72
6.1.9	Calibración del sistema	72
6.1.10	Elaboración de la memoria	72
6.2.	Presupuesto de una bobinadora profesional.....	73
6.3.	Carrete de la bobina objetivo.....	75
6.4.	Especificaciones del motor Nema 17.....	76

1 INTRODUCCIÓN

La finalidad de este TFG es el diseño y la construcción de una bobinadora automática. Este proyecto se desarrolla en el ámbito de la **mecatrónica** y sigue la **filosofía del hardware libre**.

Este dispositivo de bobinado no tendrá una precisión equiparable a una comercial, pero será suficiente para las bobinas con las que se va a trabajar en el Área de Tecnología Electrónica de la Universidad Rey Juan Carlos.

El objetivo de esta bobinadora es devanar bobinas de hilo de cobre, pero puede tener usos alternativos como enrollar hilo de costura o hilo de pescar.

El funcionamiento general de las bobinadoras consiste en los movimientos giratorio y traslacional simultáneos de un cilindro. El movimiento traslacional puede realizarlo el cilindro que se quiere devanar o bien la bobina suministradora de hilo.

La relación entre estos dos movimientos dependerá de las características que el usuario defina inicialmente para su bobina, la longitud de la bobina o el número de capas.

Puesto que las bobinas son componentes imprescindibles de los circuitos electromagnéticos, la realización de este proyecto supondrá una gran ayuda al Área de Tecnología Electrónica para devanar las bobinas de sus proyectos, con las características que requieran, en un tiempo muy reducido y a un coste reducido.

1.1 MECATRÓNICA

La mecatrónica es área multidisciplinar en el que se combina la electrónica, mecánica y el control. Este término fue inventado por un ingeniero japonés en 1969, como combinación de 'meca' de mecanismos y 'trónica' de 'electrónica' [27].

La mecatrónica no es un concepto nuevo, sino que representa la integración e interacción entre las distintas ramas de la ingeniería para crear sistemas complejos que faciliten las actividades del ser humano a través de procesos electrónicos [24].

La integración de la ingeniería mecánica, eléctrica, electrónica y de control debe suceder en los primeros pasos del proceso de diseño, para desarrollar sistemas más económicos, confiables y flexibles.

La mecatrónica debe implicar un enfoque concurrente entre estas disciplinas para sustituir el enfoque secuencial tradicional del desarrollo, es decir, un sistema mecánico, luego el diseño de la parte eléctrica y la parte del microprocesador [27].

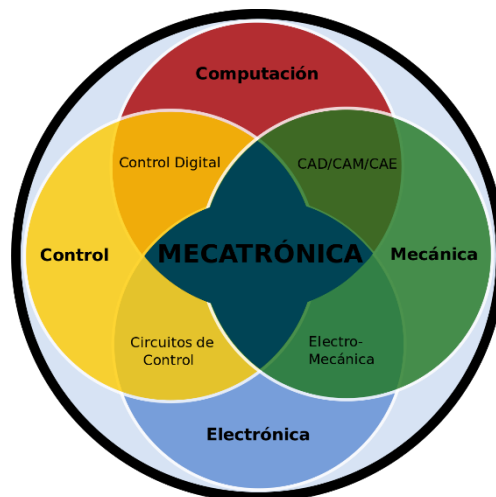


Ilustración 1. Disciplinas de la mecatrónica [23]

El funcionamiento general de los sistemas mecatrónicos consiste en recoger señales a través de sensores acoplados al sistema mecánico, que procesan la información mediante la electrónica de control que envía ordenes al sistema mecánico.

Finalmente, para que el usuario pueda comunicarse con el sistema se integra una interfaz.

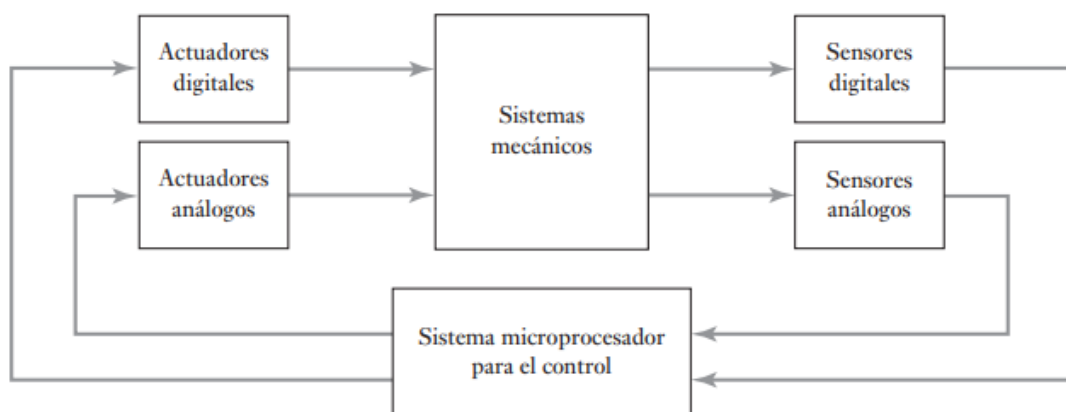


Ilustración 2. Esquema general de un sistema mecatrónico [27]

A continuación, se resumen algunas de las principales aplicaciones de la mecatrónica:

- Impresoras 3D
- Vehículos autónomos
- Medicina: procesamiento de imágenes y señales
- Biomecatrónica: Prótesis, teleoperación quirúrgica, sillas de ruedas...
- Robótica
- Automatización en la industria: brazos robóticos en líneas de ensamblaje

Este proyecto está enmarcado en el ámbito de la mecatrónica, en él se combinan las siguientes áreas:

- ✓ **Electrónica de control:** Microcontroladores, como las placas Arduino
- ✓ **Electrónica de Potencia:** Drivers para motores paso a paso
- ✓ **Sensores:** Interruptores de final de carrera
- ✓ **Sistema mecánico:** Componentes estructurales y transmisores del movimiento
- ✓ **CAD:** Diseño de componentes para su impresión en 3D

1.2 FILOSOFÍA DEL HARDWARE LIBRE

“Hardware libre es aquel cuyo diseño se pone a disposición del público para que cualquiera pueda estudiar, modificar, distribuir, hacer y vender el diseño o hardware basado en ese diseño [29].”

Idealmente, el hardware libre utiliza componentes y materiales de fácil obtención, procesos estándar, infraestructura abierta, contenido sin restricciones y herramientas de diseño de código abierto para maximizar la capacidad de las personas para fabricar y usar hardware [29].

Algunos de los proyectos que trabajan en torno a este concepto son los siguientes:

- **RepRap Project.** Proyecto iniciado para que una impresora 3D pueda replicarse a sí misma imprimiendo la mayoría de sus componentes [30].

- **Arduino.** Fabricante de placas con un microcontrolador integrado con un entorno de desarrollo que permite desarrollar distintos proyectos que engloban desde robots a sistemas de riego automático.

El movimiento *Maker* ha hecho resurgir la filosofía del hardware libre, ya que promueve la cultura DIY (Do it yourself o hazlo tú mismo), la cual manifiesta la necesidad del ser humano de hacer las cosas por sí mismo [26]. Los dos pilares de este movimiento son los siguientes:

1. Herramientas digitales para el diseño y la fabricación. Estas herramientas incluyen la impresora 3D, el escáner 3D y el software CAD.
2. Medios digitales colaborativos. Hoy en día los diseños se pueden compartir fácilmente en la web, además se puede recaudar dinero si el proyecto es impulsado por el crowdfunding.

Este proyecto se ha basado en esta filosofía y se han utilizado herramientas de hardware y software libre como FreeCAD para el diseño de las piezas, placas Arduino para la electrónica de control o GitHub para que toda la documentación y los recursos utilizados en el proyecto estén a disposición de cualquier persona que quiera replicar el proyecto [7].

1.2. ESTADO DEL ARTE

1.2.1 Bobinadoras comerciales

Existe una gran variedad de bobinadoras en el mercado con gran precisión. El precio de una bobinadora comercial ronda los 20.000 euros, un precio muy elevado que no compensa al Área de Tecnología Electrónica para el uso que se le va a dar.

Para poder comparar las especificaciones entre la bobinadora de este proyecto y una bobinadora comercial se solicitó un presupuesto para el modelo de bobinadora *BM-A-1 Automatic layer coil winding machine*, fabricada por *Whitelegg Machines Ltd*. Se puede consultar el presupuesto en el apéndice 6.2.



Ilustración 3. Bobinadora comercial BM-A-1

Las especificaciones de este modelo son las siguientes:

- Rango de diámetros del hilo: 0,02 -2,00 mm
- Diámetro máximo de la bobina: 180 mm
- Longitud máxima de la bobina: 300 mm
- Diámetro del husillo de bobinado: 10 mm
- 2 rangos de velocidades: 0 - 1000 rpm y 0 - 4500 rpm
- Tolerancia de paso entre espiras: 0,01 mm
- Tolerancia de rotación: 2 grados

Puesto que para las aplicaciones que va a tener este dispositivo no necesitamos tanta precisión, queda justificado el desarrollo de este proyecto.

1.2.2 Bobinadoras DIY

En la etapa de diseño de la bobinadora, se estudiaron distintas alternativas de bobinadoras DIY (Do it yourself o hazlo tú mismo) para tomar ideas y tener referencias. Algunos de los modelos de bobinadoras se exponen en los siguientes apartados.

- **Modelo 1: Componentes impresos en 3D**

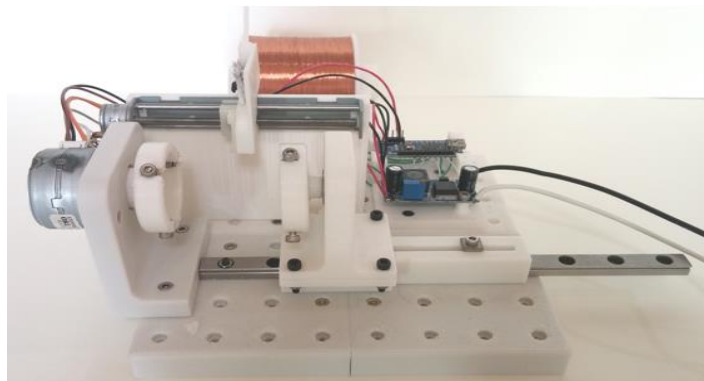


Ilustración 4. Bobinadora con estructura impresa en 3D

La característica principal de este modelo de bobinadora es que tiene una estructura compuesta completamente por piezas fabricadas mediante impresión 3D.

Este diseño modular permite devanar bobinas de distintas longitudes y, cambiando el soporte, distintos diámetros. La fabricación de la mayoría de las piezas por impresión 3D reduciría el coste del dispositivo.

Sin embargo, este proceso hubiese incrementado el tiempo de fabricación, pues son muchas piezas y las tolerancias entre ellas para garantizar el ajuste son muy delicadas y requieren mucha precisión por parte de la impresora 3D.

Este diseño utiliza un microcontrolador (placa Arduino nano) para el control de los motores paso a paso. Todos los diseños de piezas y códigos utilizados se encuentran disponibles en GitHub [17].

- **Modelo 2: Estructura metálica**



Ilustración 5. Diseño de bobinadora automática con estructura metálica

Esta bobinadora está pensada para devanar bobinas de longitudes pequeñas, de unos 2 – 3 cm, pero modificando algunas de sus piezas podrían devanarse bobinas de longitudes mayores.

Su estructura está compuesta por guías, perfiles de aluminio, que hacen de este modelo una alternativa sencilla, de precio moderado y fácil de obtener. Esta opción reduce el tiempo de fabricación y de montaje respecto a la bobinadora anterior.

Se valoró diseñar una bobinadora con unas características similares, en cuanto al diseño estructural y al movimiento.

Al estudiar en detalle cada uno de sus componentes, una gran parte de ellos se habrían tenido que comprar, como el sistema de guías, el husillo del bobinado, el soporte de la bobina suministradora, etc., lo que hubiese producido un aumento considerable en el coste final de la bobinadora. Además, este diseño no garantiza la modularidad o intercambiabilidad de las piezas ya que tenemos muy restringidas las medidas de cada pieza y esto también limita el rango de diámetros de bobinas que se pueden devanar.

En cuanto al control de los motores paso a paso, esta bobinadora también utiliza un microcontrolador, en concreto una placa Arduino MEGA, y funciona con el software Marlin, usualmente utilizado en las impresoras 3D, basado en G-Code.

El funcionamiento de este sistema y los componentes utilizados se explican en este vídeo [18].

1.3. ESQUEMA DE LA MEMORIA

La memoria se compone de nueve capítulos y algunos apéndices:

- *Introducción:* Se explican los conceptos de mecatrónica y de filosofía de hardware libre y se justifica el desarrollo del proyecto debido al alto coste de las bobinadoras comerciales.
- *Objetivos:* En este apartado se definen los objetivos principales y secundarios del TFG.
- *Solución técnica:* Se exponen los pasos que se han seguido para alcanzar los objetivos del proyecto. También se enumeran los problemas que han surgido durante su desarrollo y cómo se han solucionado.
- *Conclusiones:* En este capítulo se discuten los resultados obtenidos en el proyecto y se evalúa el cumplimiento de los objetivos.
- *Bibliografía.*
- *Apéndices:* Está compuesto por varios subcapítulos entre los que se incluye la metodología seguida, el presupuesto de una bobinadora comercial y la lista de materiales empleados.

2 OBJETIVOS

El objetivo principal de este proyecto es el diseño y la fabricación de una bobinadora automática para devanar bobinas con dimensiones variables definidas por el usuario (longitud y número de capas).

Para cumplir este objetivo principal, se establecen otros objetivos secundarios:

- i. El dispositivo debe ser **económico** y sencillo, utilizando tecnologías de bajo coste y fácil adquisición, como hardware y software libre e impresión 3D.
- ii. El dispositivo debe ser **totalmente autónomo**, no depender de un ordenador ni de otros dispositivos externos, para facilitar su utilización.
- iii. El dispositivo debe tener la capacidad de **adaptarse a distintos tipos de bobinas** mediante el uso de componentes modulares intercambiables para las bobinas de mayores dimensiones.
- iv. El **devanado** de la bobina debe ser lo suficientemente **preciso y resistente**.
- v. Este proyecto **contribuirá al desarrollo de la corriente de hardware libre**, siendo accesible toda la documentación y recursos utilizados desde GitHub.

Adicionalmente, con este proyecto se pretende que la autora profundice sus conocimientos en el área de la mecatrónica, en el diseño digital con microcontroladores, la electrónica de potencia y en el diseño y fabricación de componentes mecánicos mediante impresión 3D.

3 SOLUCIÓN TÉCNICA

En este capítulo se describe el prototipo de bobinadora que se ha diseñado para este proyecto.

En primer lugar, se describen de forma general las características principales del prototipo y los distintos subsistemas que lo componen.

A continuación, se explica en cada apartado en detalle el funcionamiento de cada uno de los subsistemas que integran la bobinadora, las diversas alternativas que se plantearon en cuanto a materiales y componentes y, finalmente, las soluciones adoptadas.

Las elecciones que se han tomado se han hecho en base a construir un sistema de bobinado automático de una forma eficiente: con un diseño que permita el devanado de bobinas con distintos tamaños, a un coste y un tiempo de desarrollo no muy elevados.

3.1 DESCRIPCIÓN GENERAL DEL PROTOTIPO

De forma general, el sistema de bobinado es un **sistema mecatrónico completo** que consta de las siguientes partes:

- Un **sistema electrónico de control**, el “cerebro” del sistema de bobinado
- Un **sistema electrónico de potencia** que transforma las señales digitales del sistema de control en órdenes
- Un **sistema mecánico** que proporciona el movimiento
- La **alimentación** del sistema de control y de la electrónica de potencia

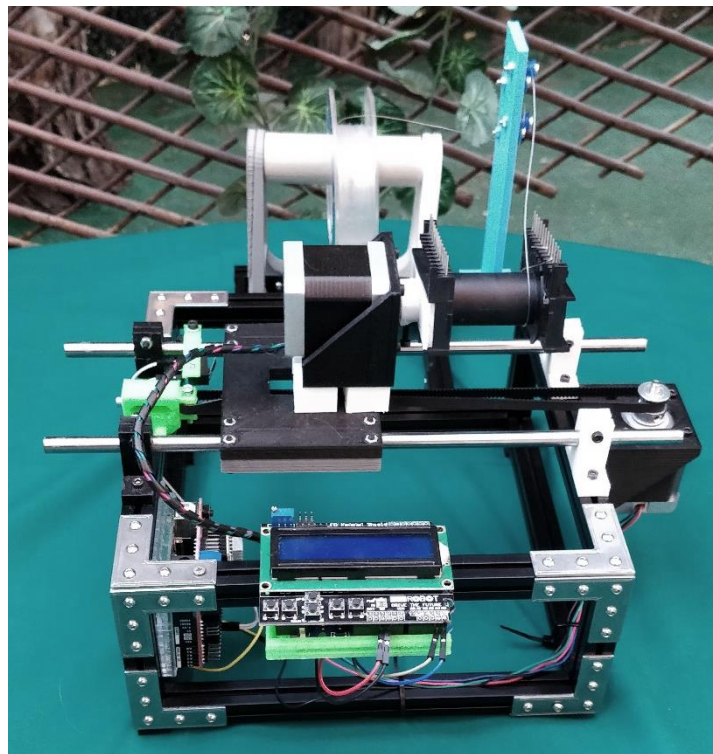


Ilustración 6. Sistema de bobinado automático

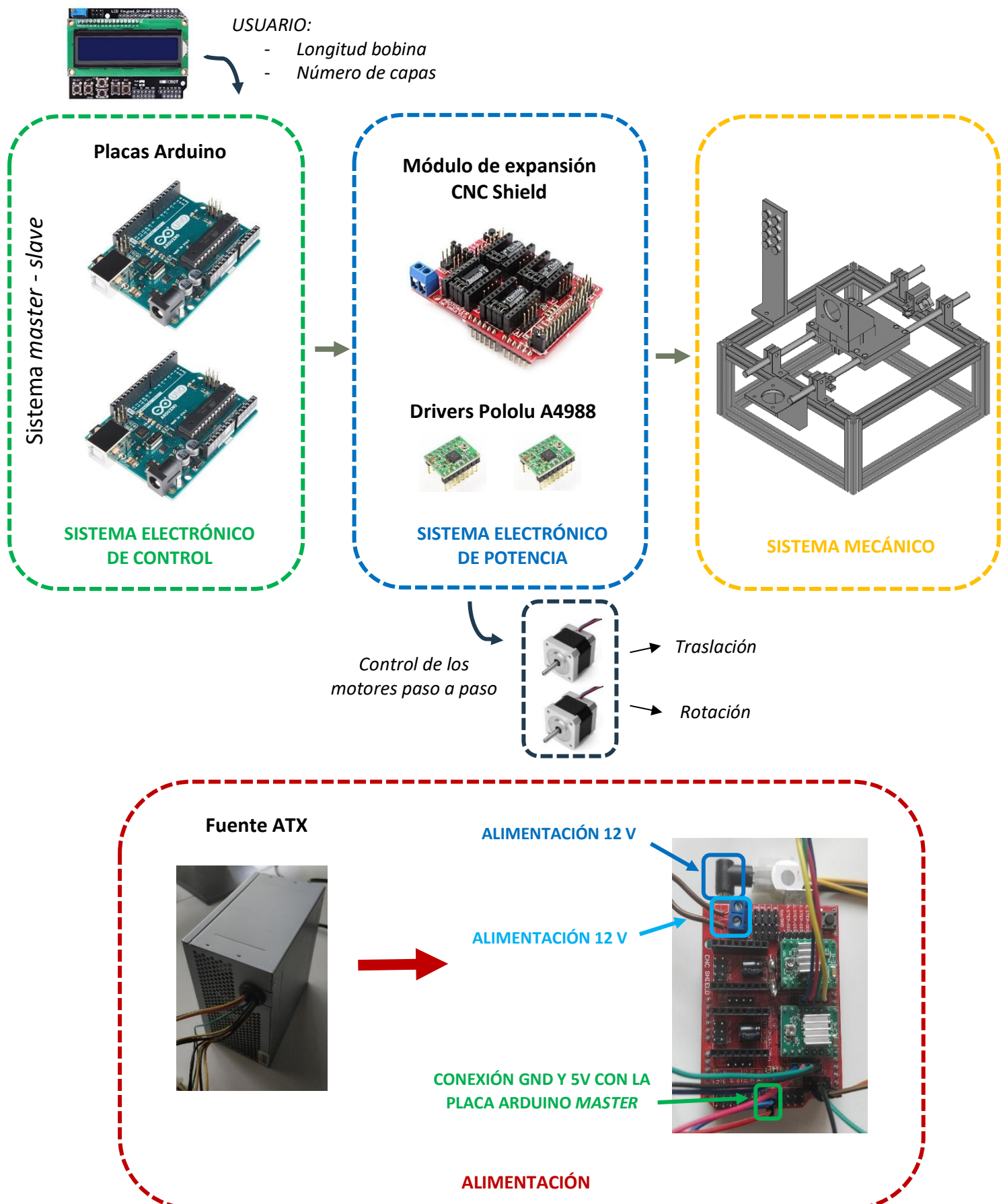


Ilustración 7. Esquema de funcionamiento

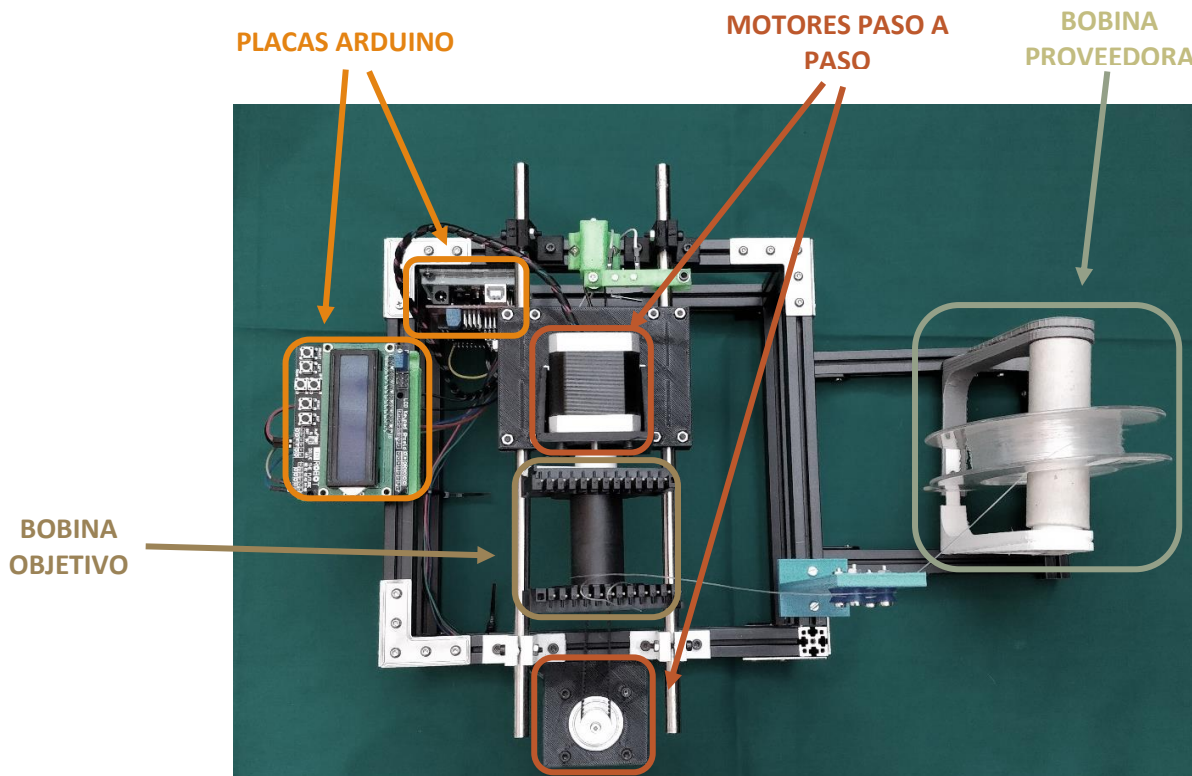


Ilustración 8. Componentes del sistema de bobinado

3.2 MOVIMIENTOS DEL SISTEMA

Los movimientos realizados por este sistema de bobinado automático (*Ilustración 9*) son dos: de traslación y de rotación, y se realizan de forma simultánea.

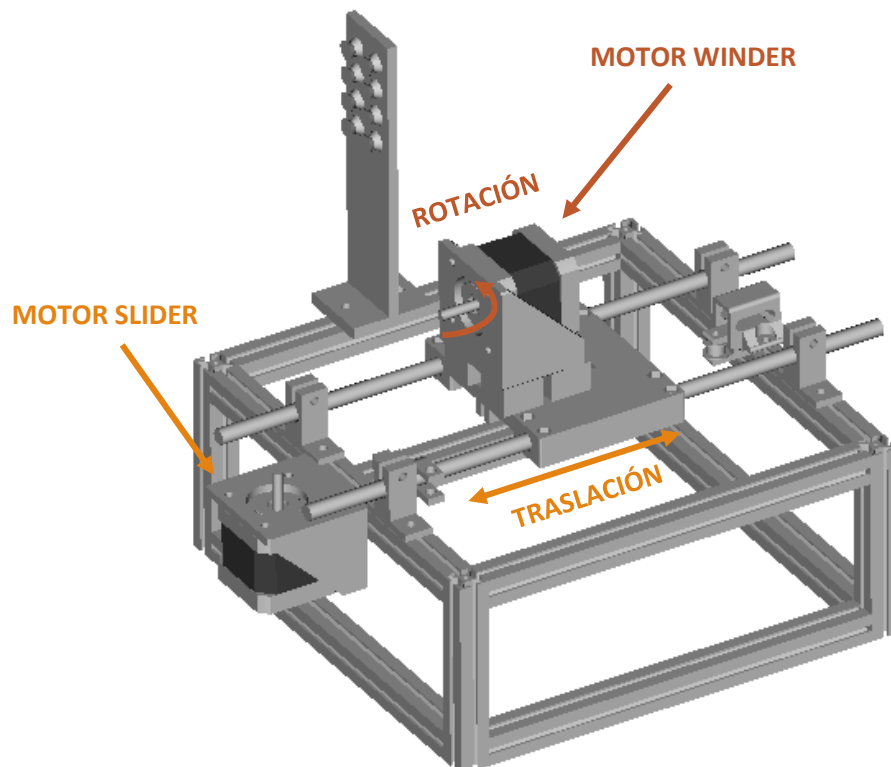


Ilustración 9. Diseño CAD del prototipo

3.2.1 Movimiento de traslación

El movimiento de traslación viene proporcionado por un motor, denominado **Slider**, sujeto en la estructura.

Este motor transmite su movimiento al carro al que está sujeta la bobina a través de una correa.

3.2.2 Movimiento de rotación

El movimiento de rotación viene determinado por un motor móvil colocado en el carro, denominado **Winder**.

La bobina va ensamblada al motor, el cual le transmite su movimiento. Como consecuencia, la bobina a devanar tira del hilo de la bobina proveedora, transmitiéndole a su vez el movimiento de rotación.

3.2.3 Relación entre movimientos

Puesto que los dos movimientos mencionados anteriormente se dan de forma simultánea, se ha de establecer una relación entre los movimientos de rotación y traslación para asegurar que el devanado de la bobina se realiza correctamente.

Las siguientes dimensiones serán seleccionadas por parte del usuario antes de iniciar el bobinado:

A. Dimensiones de la bobina:

D – Diámetro de la bobina

L – Longitud de la bobina

Cada vez que el motor **Winder** complete tres vueltas, el motor **Slider** girará de forma que la bobina avance 0,80 mm longitudinalmente, para evitar la superposición de hilos. Este ajuste podría cambiar si se devanan hilos con un diámetro superior a 0,8 mm.

El cálculo sobre la resolución de la correa se encuentra en el apartado 3.3.2 y el de la resolución de los motores paso a paso en el apartado 3.5.1.

El giro del motor **Slider** cambia de sentido cada vez que se completa una capa.

3.3 SISTEMA MECÁNICO

En este apartado se expone el procedimiento que se ha seguido para el montaje de la estructura y de todos los componentes mecánicos necesarios para el sistema de bobinado.

- Estructura
- Transmisión del movimiento
- Componentes impresos en 3D
- Componentes adquiridos

3.3.1 Estructura

Para la construcción de la estructura se contemplaron distintas alternativas. Inicialmente se estudió la posibilidad de montar una estructura hecha con distintas piezas fabricadas por impresión 3D. Esta alternativa era muy atractiva en cuanto a coste, pero el tiempo que conllevaba el diseño de cada una de las piezas, sumado al tiempo de impresión hacían que la duración del proyecto se prolongase demasiado.

Finalmente, se decidió montar una estructura formada por perfiles de aluminio. El montaje sería mucho más rápido y permitiría hacer modificaciones en cuanto a las dimensiones empleando poco tiempo. Se utilizaron perfiles de aluminio con una sección de 15x15 mm, con las siguientes longitudes:

- 8 perfiles de 200 mm
- 4 perfiles de 100 mm

Para el ensamblaje se utilizaron 12 escuadras, tornillos DIN 912, M3 y tuercas DIN 934, M3. Toda la información relativa al material utilizado se encuentra en el apartado 3.8.

3.3.2 Transmisión del movimiento

- **Movimiento traslacional:**

La traslación de la bobina se produce de forma simultánea a la rotación para evitar la superposición entre espiras contiguas.

Para guiar el movimiento de traslación de la bobina se montaron dos ejes de 8 mm de diámetro, de acero inoxidable 304, calidad H9.

Para convertir el movimiento rotacional en traslacional del motor **Slider**, se ha utilizado una correa dentada GT2 con 2 mm de espaciado entre dientes, un avance de 20 dientes por vuelta y una anchura de 6 mm.

Los motores paso a paso utilizados tienen una resolución de 1,8°/paso, por lo tanto, tienen que dar 200 pasos para completar una vuelta.

La resolución de avance de la correa para este tipo de motor paso a paso se calcula de la siguiente forma:

$$\frac{2 \text{ mm}}{\text{diente}} \times \frac{20 \text{ dientes}}{\text{vuelta}} = \frac{40 \text{ mm}}{\text{vuelta}} \text{ de avance en la correa}$$

$$\boxed{\frac{40 \text{ mm}}{\text{vuelta}} \times \frac{1 \text{ vuelta}}{200 \text{ pasos}} = \frac{0,2 \text{ mm}}{\text{paso}}}$$

Para garantizar la estabilidad del giro y evitar vibraciones se ha utilizado una resolución de 1/16 de paso en los motores, para completar una vuelta tendría que dar 3200 micropasos:

$$\frac{40 \text{ mm}}{\text{vuelta}} \times \frac{1 \text{ vuelta}}{3200 \text{ micropasos}} = \frac{0,0125 \text{ mm}}{\text{micropaso}}$$

Sin embargo, esta resolución no es real ya que el motor no es capaz de pararse cada 1/16 de paso. Por lo tanto, se avanza cada 16 pasos de 1/16, es decir, cada paso completo del motor para que sea estable.

Para facilitar el movimiento del carro sobre los ejes se utilizan cuatro rodamientos lineales tipo Lm8uu.

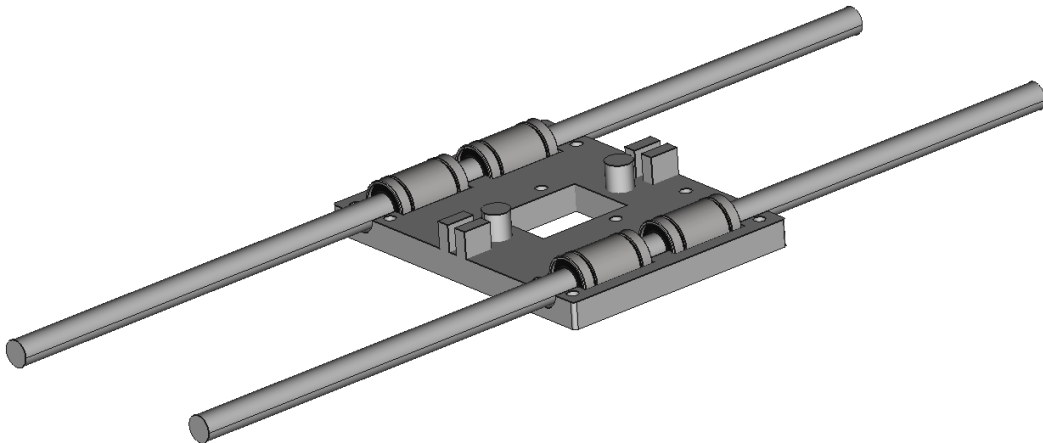


Ilustración 10. Montaje de los rodamientos con el carro y los ejes

- **Movimiento rotacional:**

El movimiento de rotación para el devanado lo proporciona el motor **Winder**. La resolución del motor paso a paso es de **1,8°/paso**.

En este movimiento también se ha utilizado una resolución de 1/16 de paso en el motor:

$$\frac{360^{\circ}}{3200 \text{ micropasos}} = \frac{0,11^{\circ}}{\text{micropaso}}$$

Como ya se ha explicado en el apartado anterior, esta resolución no es real y, por lo tanto, el ángulo mínimo de giro que se puede conseguir es de 1,8° cada 3200 micropasos.

3.3.3 Impresión 3D

Algunos de los componentes se han diseñado en el software FreeCAD.

Una vez diseñadas las piezas, se fabricaron en una impresora 3D utilizando el software Repetier Host.

3.3.3.1 FreeCAD

FreeCAD es un software de código abierto de diseño CAD paramétrico en tres dimensiones. Esta aplicación permite diseñar objetos 2D a partir de bocetos o “sketches”, así como transformar un diseño 2D en una geometría 3D por extrusión, revolución y otras funcionalidades incluidas.

Una ventaja de este software es que permite el diseño paramétrico de los elementos, es decir, cada elemento diseñado es tratado como un objeto el cual no es definido únicamente por sus coordenadas espaciales (x, y, z), sino también por sus parámetros.

Gracias a esta característica se han podido que se han adaptar piezas disponibles de otros proyectos de hardware libre elementos ya parametrizados, tan solo ajustando sus dimensiones a las necesidades de la estructura del sistema de bobinado.

Todas las piezas impresas en 3D utilizadas en este proyecto han sido diseñadas en FreeCAD.

3.3.3.2 Repetier Host

Es un software de impresión 3D que permite la transformación de los archivos en formato *.stl* a *.gcode* para que la impresora pueda interpretarlos.

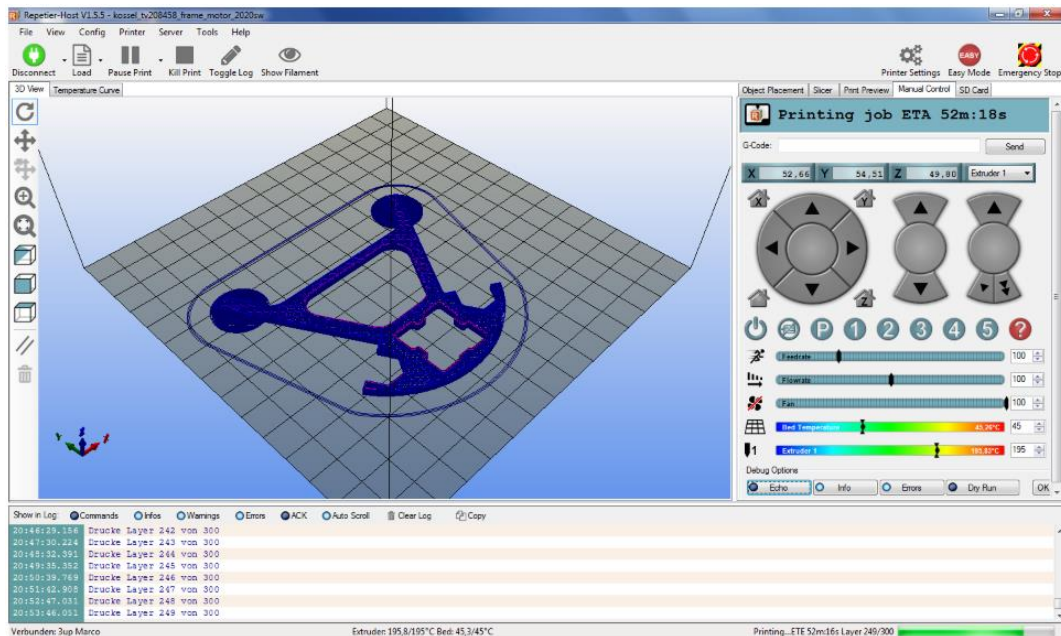


Ilustración 11. Interfaz de Repetier Host [31]

Repetier Host es compatible con los firmwares de la mayoría de las impresoras 3D, nos permite controlar variables como la temperatura de la cama, velocidad de impresión y la cantidad de relleno. Además, esta herramienta gratuita está disponible en sistemas operativos Windows, Linux y Mac [9].

Para llevar a cabo la impresión de una pieza se han seguido los siguientes pasos:

1. **Posicionamiento del objeto:** Se importa uno o varios objetos en 3D en formato *.stl* y se coloca en la posición que más favorezca la impresión. Por ejemplo, para garantizar una buena impresión colocaremos la zona más plana como base y la zona que tenga más huecos de forma que queden paralelos al suelo. Aparte de rotarlos, escalarlos y girarlos, también es posible duplicarlos e imprimirlos simultáneamente. En el caso de los huecos, Repetier genera una estructura interna provisional para evitar que se deformen y posteriormente podremos retirarla.

2. **Slice:** Se secciona la pieza en “rebanadas” en función del relleno seleccionado. En las piezas que no soporten demasiadas tensiones podremos reducir el relleno para aumentar la velocidad de impresión
3. **Vista previa:** Se comprueban si los parámetros seleccionados para la impresión son los correctos (temperatura de la cama, temperatura del extrusor, relleno, etc.)
4. **Impresión:** Es el paso final, una vez comprobado todo se procede a imprimir la pieza objetivo.

3.3.4 Componentes impresos

El hecho de diseñar algunos de los componentes en vez de comprarlos facilitó la adaptabilidad de las piezas a las características de la estructura y del prototipo.

Sin embargo, algunas piezas conllevaron un tiempo de desarrollo superior al esperado debido a problemas de impresión, mala elección de las tolerancias entre piezas ensambladas, y optimizaciones de diseño.

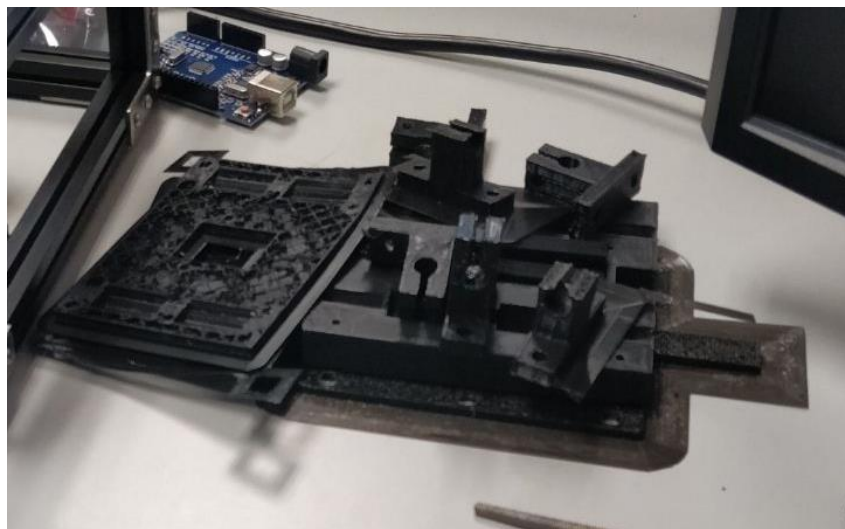


Ilustración 12. Piezas impresas en 3D fallidas

Todas las piezas están disponibles en el repositorio de GitHub [7], en el directorio *coil-winder/freecad-components*.

A. Carro y carcasas

Esta pieza es la piedra angular del sistema de bobinado, actúa como deslizadera durante en el movimiento horizontal. Se dedicó un tiempo de diseño acorde con su importancia en el sistema de bobinado, pero tuvo que modificarse según se fueron imprimiendo distintas versiones del diseño por las razones que se explican a continuación:

1. En un primer momento se pensó en el carro como **dos piezas idénticas y simétricas** las cuales se moverían a lo largo de los ejes con el movimiento de la correa.
2. Se tuvieron que reducir sus dimensiones para optimizar el material utilizado y reducir el tiempo de impresión. Para ello, se reestructuró el componente simplificándolo lo máximo posible **a un carro y dos carcasas** con cuatro rodamientos lineales que contendrían los ejes e irían situados en la parte inferior.
3. Una vez fabricada, cuando se intentó ensamblar con otros componentes de la estructura se encontraron **problemas con las tolerancias utilizadas** y las piezas no terminaban de encajar.
4. Además, debido a la larga duración de la impresión de la pieza tuvo que repetirse en numerosas ocasiones, ya que **quedaba incompleta por diversos problemas con la impresora** utilizada.

Tras cinco impresiones la pieza se fabricó satisfactoriamente y el diseño final es el que se muestra en la *Ilustración 13*, visto desde la parte inferior (imagen de la izquierda), y desde la parte superior (imagen de la derecha, posición real en que va montada en la estructura).

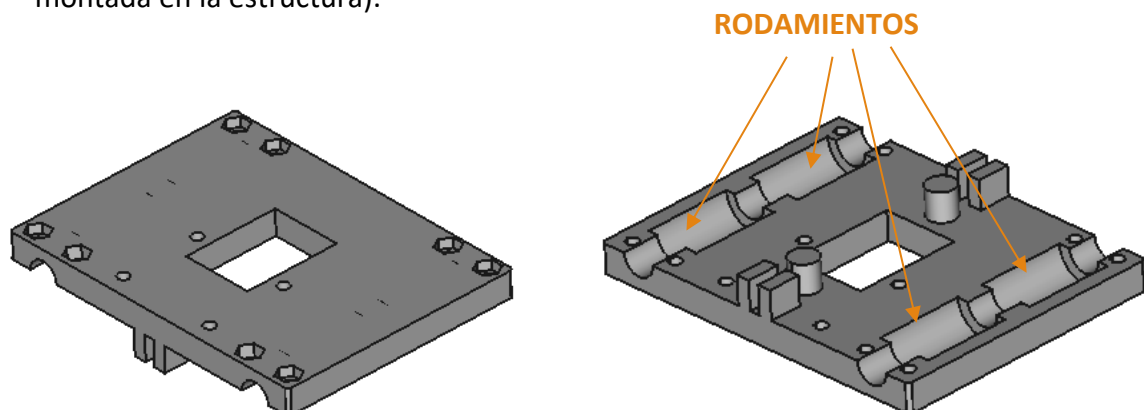


Ilustración 13. Carro

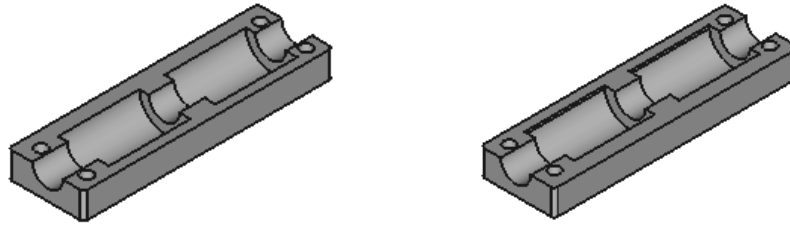


Ilustración 14. Carcasas del carro

Como se puede apreciar en la imagen, en los extremos del soporte se encajan cuatro rodamientos que permiten el deslizamiento del soporte a lo largo de los ejes horizontales. En la parte central se puede observar un cilindro y dos prismas rectangulares que actúan como mordazas de la correa.

AJUSTE DE LA CORREA

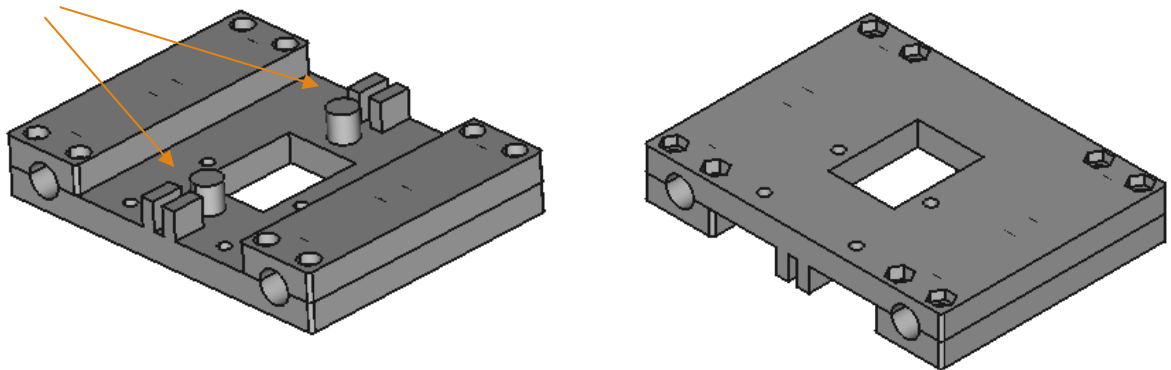


Ilustración 15. Conjunto del carro y las carcasas

B. Soportes de los motores

Los motores **Winder** y **Slider** van sujetos a la estructura y al carro gracias a la pieza mostrada en la *Ilustración 16*, un soporte para motores, adaptable a las dimensiones del sistema gracias a su diseño paramétrico, obtenidos en [8].

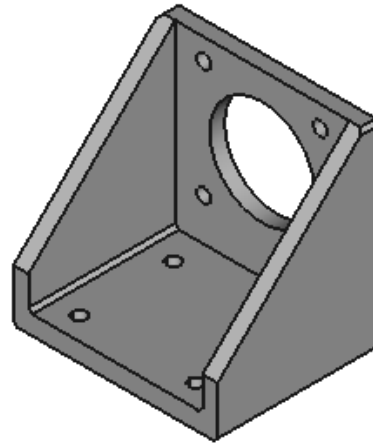


Ilustración 16. Soporte de los motores

El motor **Slider** va anclado a la estructura en posición vertical, y el motor **Winder** va sujeto al carro sobre cuatro módulos alzadores en posición horizontal.

C. Módulos alzadores

Se diseñaron cuatro módulos alzadores cuya función es evitar que la bobina roce con la correa o con el carro y que sea posible el devanado de bobinas de mayores diámetros.

El hecho de ensamblar estos módulos a la estructura puede producir un problema de vibraciones durante el movimiento, por eso es muy importante que los tornillos que los sujetan estén bien ajustados.

Si en un futuro se quisiesen devanar bobinas de mayores dimensiones tan solo habría que aumentar la altura de esta pieza para levantar el motor **Winder**.



Ilustración 17. Módulo alzador

El ensamblaje de todos los componentes que van sobre el soporte principal (**A**, **B**, **C**) se muestra en la *Ilustración 18*:

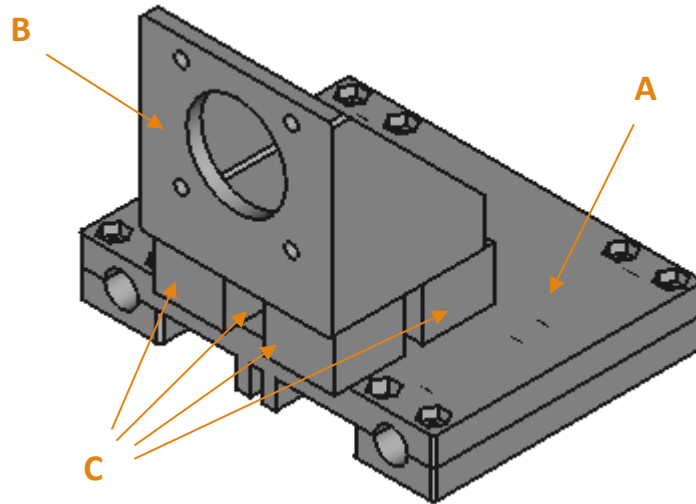


Ilustración 18. Conjunto del soporte principal con carcasas, soporte motor y módulos alzadores

D. Soportes de los ejes

Para la sujeción de los ejes a la estructura, se han utilizado cuatro soportes idénticos al que se muestra en la *Ilustración 19*:

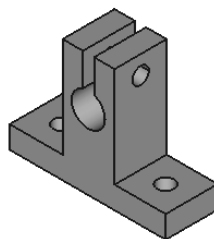


Ilustración 19. Soporte del eje

E. Tensionador de la correa

Para asegurar el tensionado de la correa, se imprimió la pieza que se muestra en la *Ilustración 20*. Se compone de una estructura externa que va anclada a los perfiles de aluminio, y en su interior se encaja una pieza cuya posición se puede modificar apretando un tornillo y una polea loca alrededor de la cual se coloca la correa. Gracias a este componente podemos variar la tensión de la correa simplemente apretando o aflojando un tornillo. Esta pieza se puede obtuvo de [8], es adaptable a las dimensiones del sistema gracias a su diseño paramétrico.

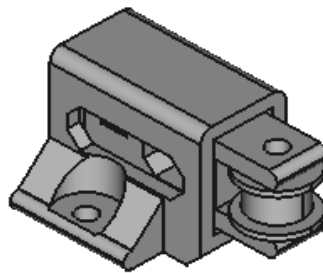


Ilustración 20. Tensionador de la correa

F. Soporte del final de carrera

Para la sujeción del final de carrera a uno de los ejes se ha diseñado la pieza que se muestra en la *Ilustración 21*.

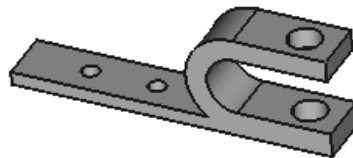


Ilustración 21. Soporte del final de carrera

G. Tensionador del hilo

La funcionalidad principal de esta pieza es mantener el hilo tenso durante el bobinado.

Adicionalmente, esta pieza proporciona estabilidad durante el devanado, ya que al llevar directamente el hilo desde la bobina proveedora, esta se movía y hacía que el hilo no se posicionase correctamente.

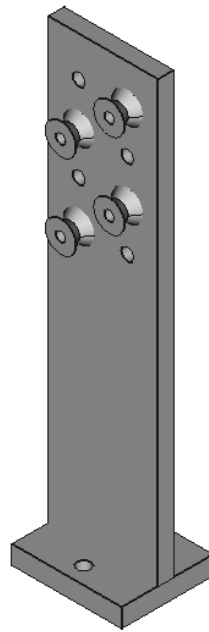


Ilustración 22. Tensionador del hilo

La pieza está formada por un pilar principal con orificios y unos semiconos en los que se enrolla el hilo. Se puede cambiar la posición de los semiconos a otros orificios, ya que los semiconos se van sujetos a la estructura con tornillos.

El hilo, que viene de la bobina proveedora, se enrolla en zigzag alrededor de los semiconos y de ahí va a la bobina objetivo.

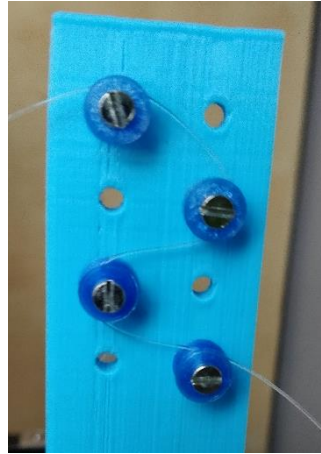


Ilustración 23. Colocación del hilo en zigzag

La adición de esta pieza al prototipo supuso una mejora en la calidad del bobinado, garantizando una buena colocación del hilo.

H. Soporte del carrete

Esta pieza ensambla el carrete de la bobina con el cilindro del motor. Está diseñado para el carrete de una bobina tipo **ETD59/31/22** (apéndice 6.3), esta pieza tendría que ser modificada en función del carrete utilizado.

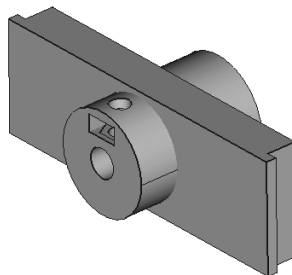


Ilustración 24. Soporte del carrete

Como se puede observar en la *Ilustración 25* esta pieza se ajusta al motor introduciendo un tornillo por el orificio superior y una tuerca en la apertura cuadrada de la parte frontal.

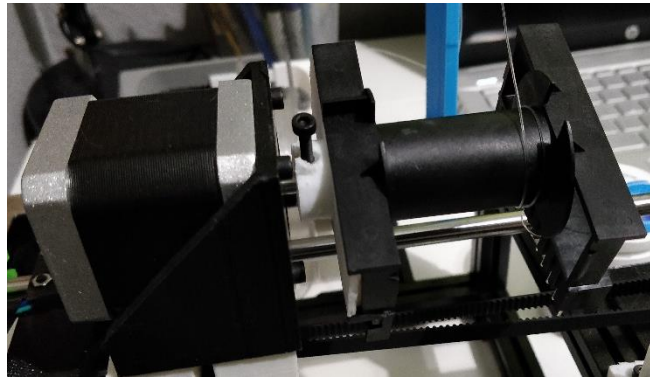


Ilustración 25. Montaje del soporte del carrete

I. Soporte de la bobina proveedora

Esta pieza soporta la bobina proveedora, la que proporciona el hilo. Este diseño es reutilizable para distintos diámetros de bobina, ya que no tiene que ir encajada en la pieza, simplemente gira libremente alrededor del cilindro central cuando tira del hilo.



Ilustración 26. Soporte de la bobina proveedora

El soporte se compone de dos piezas laterales y un cilindro central que las une:

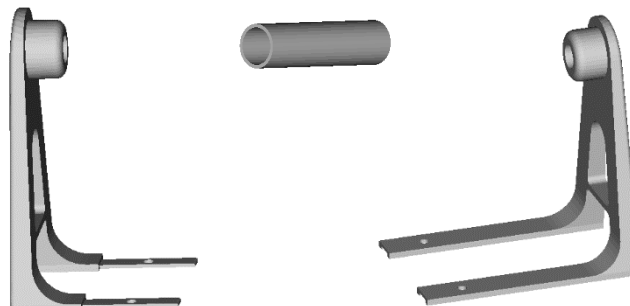


Ilustración 27. Subcomponentes soporte bobina

3.3.5 Carrete de la bobina objetivo

El carrete que se va a utilizar en este proyecto es el de una bobina tipo **ETD59/31/22** que será utilizada en un transformador en uno de los proyectos del Área de Tecnología Electrónica. Las especificaciones completas sobre este modelo de carrete se encuentran disponibles en [19].



Ilustración 28. Carrete de la bobina objetivo

Si se quisiese bobinar otro tipo de bobina tan solo sería necesario modificar la pieza del soporte del carrete (H) que va ensamblada al motor **Winder**.

3.4 SISTEMA ELECTRÓNICO DE CONTROL

El sistema de control está formado por dos microcontroladores que se comunican por el protocolo I2C [22] y actúan como *master – slave*. En uno de ellos está programada la interfaz de usuario donde se introducen los parámetros iniciales de la bobina (*master*) y en el otro están programados los movimientos para el devanado de la bobina (*slave*). En este caso los microcontroladores seleccionados han sido **dos placas Arduino UNO**.

En los siguientes apartados se explica en detalle la metodología que se ha seguido para desarrollar este sistema y cada uno de los actores que forman parte de él.

3.4.1 Arduino UNO

Durante el establecimiento de las especificaciones, se estudiaron distintas alternativas teniendo en cuenta características como la capacidad procesamiento, la cantidad de periféricos necesarios, facilidad de programación, los módulos de expansión compatibles y el coste. La solución seleccionada teniendo en cuenta estos requisitos fue un microcontrolador, en concreto, una placa Arduino.

Una vez tomada esta decisión, se decidió qué placa Arduino utilizar entre la variedad de placas que ofrece este fabricante. Valorando todas las alternativas en cuanto a número de pines de entrada y salida y compatibilidad con otros componentes hardware, **la elección final fue una placa Arduino UNO**.

En la parte final del proyecto, para que la bobinadora fuese completamente autónoma, se decidió añadir una pantalla LCD con botones compatible con Arduino UNO para que el usuario pudiese introducir los parámetros iniciales de la bobina. Por la falta de pines en la primera placa Arduino y la facilidad de conexión en una nueva placa, **se decidió añadir otra placa Arduino UNO**.

Arduino UNO es una placa de código abierto basada en el microcontrolador ATmega328P de Microchip. Hay una gran comunidad trabajando con esta plataforma, lo que permite un fácil acceso a una gran variedad de documentación en caso de necesidad.

Su entorno de programación es multiplataforma, se puede ejecutar en sistemas operativos Windows, Mac OS y Linux. Su programación está basada en C++, que permite escribir el código con un gran nivel de abstracción, además dispone de librerías que facilitan el desarrollo de funcionalidades como el bus I2C o una pantalla LCD.

Una ventaja de esta placa con respecto a la de otros fabricantes es que se han diseñado una gran cantidad de componentes hardware compatibles con ella, como la placa de expansión CNC Shield para el control de los motores paso a paso y sus drivers, lo que facilitará la programación y la compatibilidad entre dispositivos.

Sus principales características son [11]:

- Microchip ATmega328P
- Puede ser alimentado por el cable USB (a través del ordenador, por ejemplo) o por una batería externa entre 7 y 20 voltios a través del puerto Jack.
- Tiene disponibles 14 pines de entradas/salidas digitales, 6 de los cuales pueden ser utilizados como salida PWM.
- Tiene 6 pines de entradas analógicas

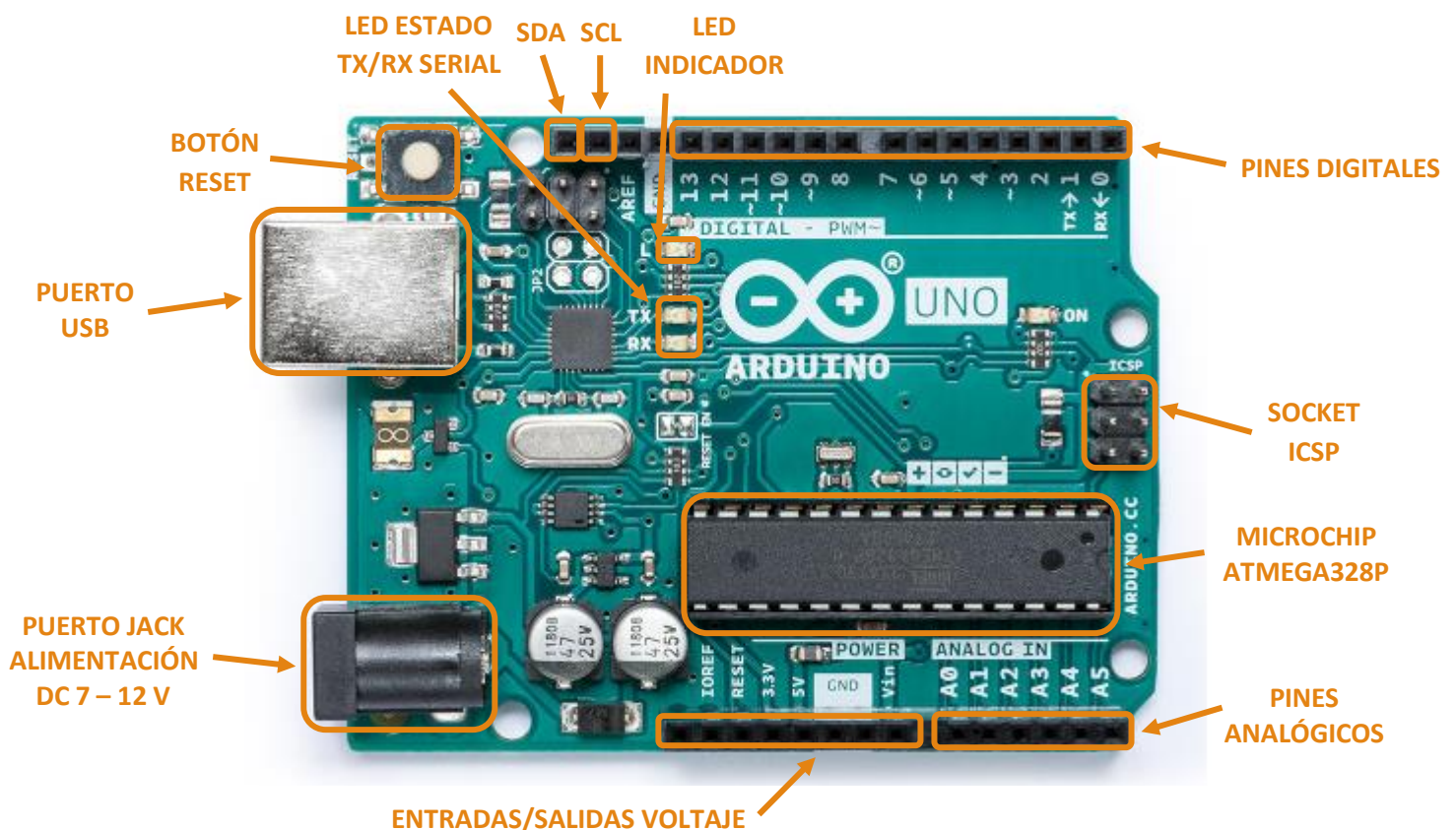


Ilustración 29. Esquema placa Arduino UNO

3.4.1.1 Software Arduino IDE

Arduino IDE (Integrated Development Enviroment) es el software utilizado para la escribir y cargar el código la placa Arduino UNO.

Este software multiplataforma está escrito en Java y puede ser utilizado con cualquier placa Arduino. El IDE proporciona una gran variedad de bibliotecas, que facilitan la implementación de funciones, y algunos proyectos de ejemplo (*Ilustración 30*).

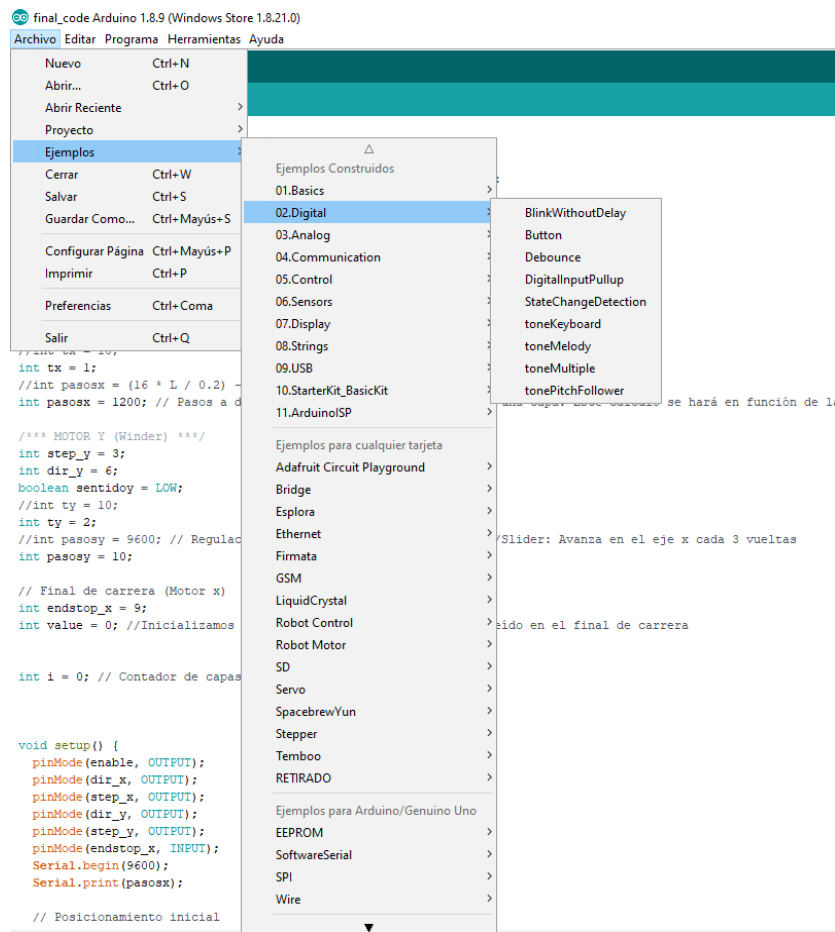


Ilustración 30. Proyectos de ejemplo

Para poder cargar el código en la placa es necesario seleccionar en *Herramientas* el tipo de placa que se va a utilizar y el puerto USB del ordenador al que está conectado (*Ilustración 31*).

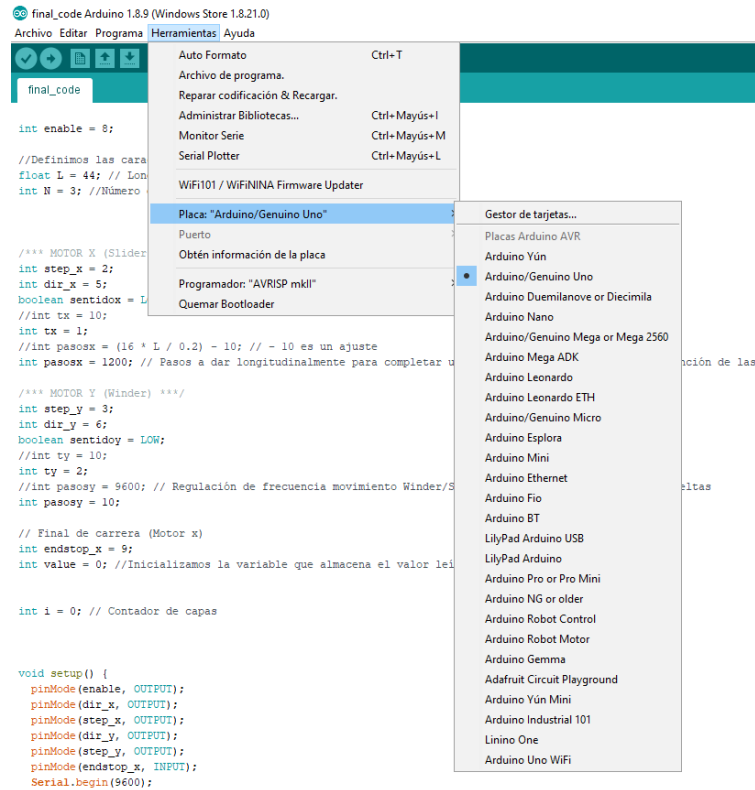


Ilustración 31. Seleccionar modelo de placa

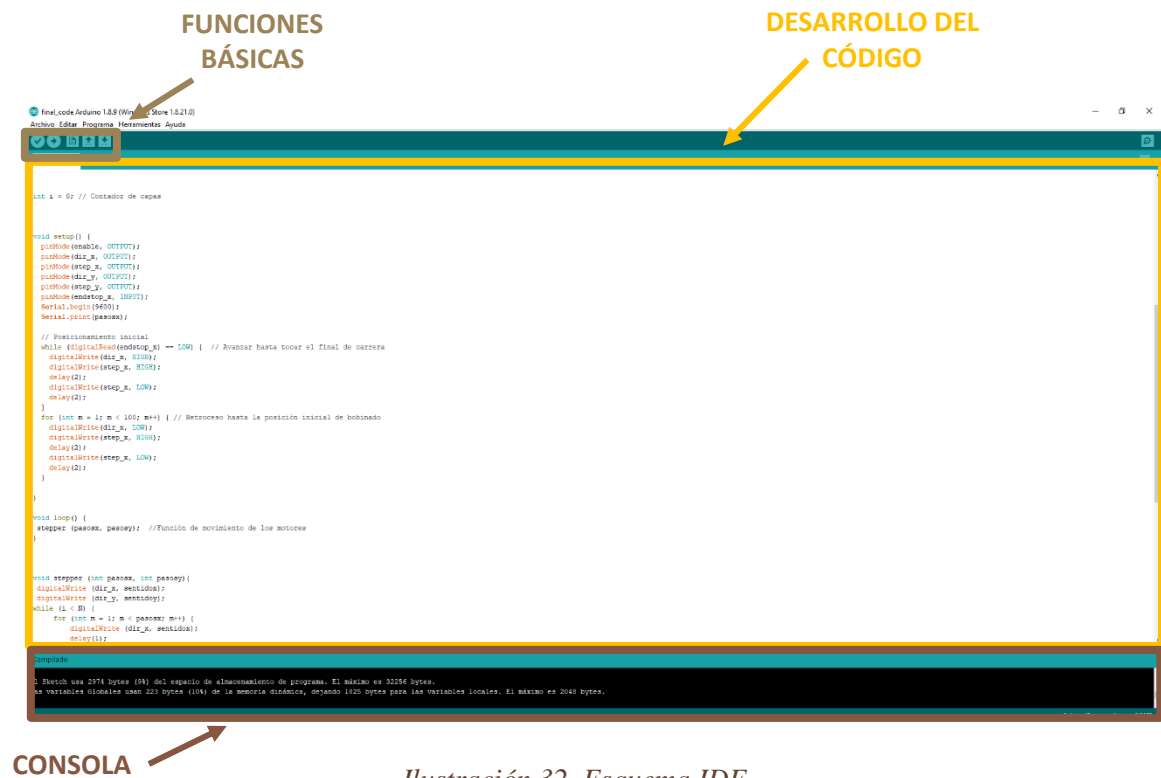


Ilustración 32. Esquema IDE

Como se puede apreciar en la *Ilustración 32*, el IDE cuenta con una ventana principal donde se escribe el código, una consola en la parte inferior y una barra superior con botones con las siguientes funciones básicas:

- *Verificar*: Comprobar que no hay errores de sintaxis en el código
- *Cargar*: Transferir el programa a la placa Arduino
- *Nuevo*: Crear un sketch nuevo
- *Abrir*: Abrir un sketch existente
- *Guardar*: Guardar el sketch con el nombre deseado



Ilustración 33. Funciones botones

La estructura general del código de Arduino se divide en dos partes:

- *void setup*: Función en la que se escribe la configuración inicial. Esta función se ejecuta una sola vez en el inicio del programa.
- *void loop*: Bucle principal del código, en esta sección se escriben o se llama a las funciones que se van a ejecutar de forma infinita en el programa.
- Se pueden escribir funciones adicionales a las que llamar desde el bucle *void loop*.

3.4.2 Interruptor de final de carrera

Los interruptores de final de carrera son componentes electrónicos que se sitúan al final de un recorrido para enviar señales que puedan modificar el estado de un circuito.

En el caso del sistema de bobinado, se utiliza un interruptor de final de carrera para detectar que la bobina que se está devanando ha llegado a la posición límite en su movimiento horizontal y cambiar el sentido en el motor *Slider*.

En este sistema también se utiliza el interruptor de final de carrera como referencia para colocar la bobina en la posición inicial, el proceso es el siguiente:

1. En primer lugar, la bobina avanza hasta detectar el final de carrera.
2. Cuando lo detecta retrocede una distancia igual a la longitud de la bobina para iniciar el devanado en la dirección opuesta.
3. Durante el bobinado, cuando llega a la posición límite vuelve a cambiar la dirección de devanado para continuar con la siguiente capa.

Estos interruptores pueden conectarse como normalmente abiertos (NA) o normalmente cerrados (NC), en función de la operación que vayan a realizar al ser accionados.

En este sistema el interruptor se ha conectado como normalmente cerrado (NC), ya que en el caso de que el interruptor esté mal conectado, no funcionaría porque el sistema detectaría que el carro se encuentra en la posición inicial.

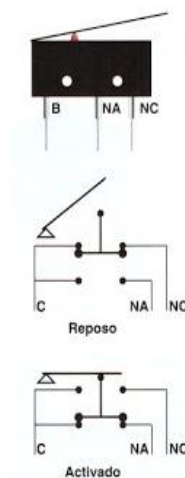


Ilustración 34. Esquema de funcionamiento del final de carrera (NC)

3.4.3 Descripción del sistema

Este apartado incluye el esquema del sistema de control programado en la placa Arduino incluyendo la interfaz gráfica con el usuario.

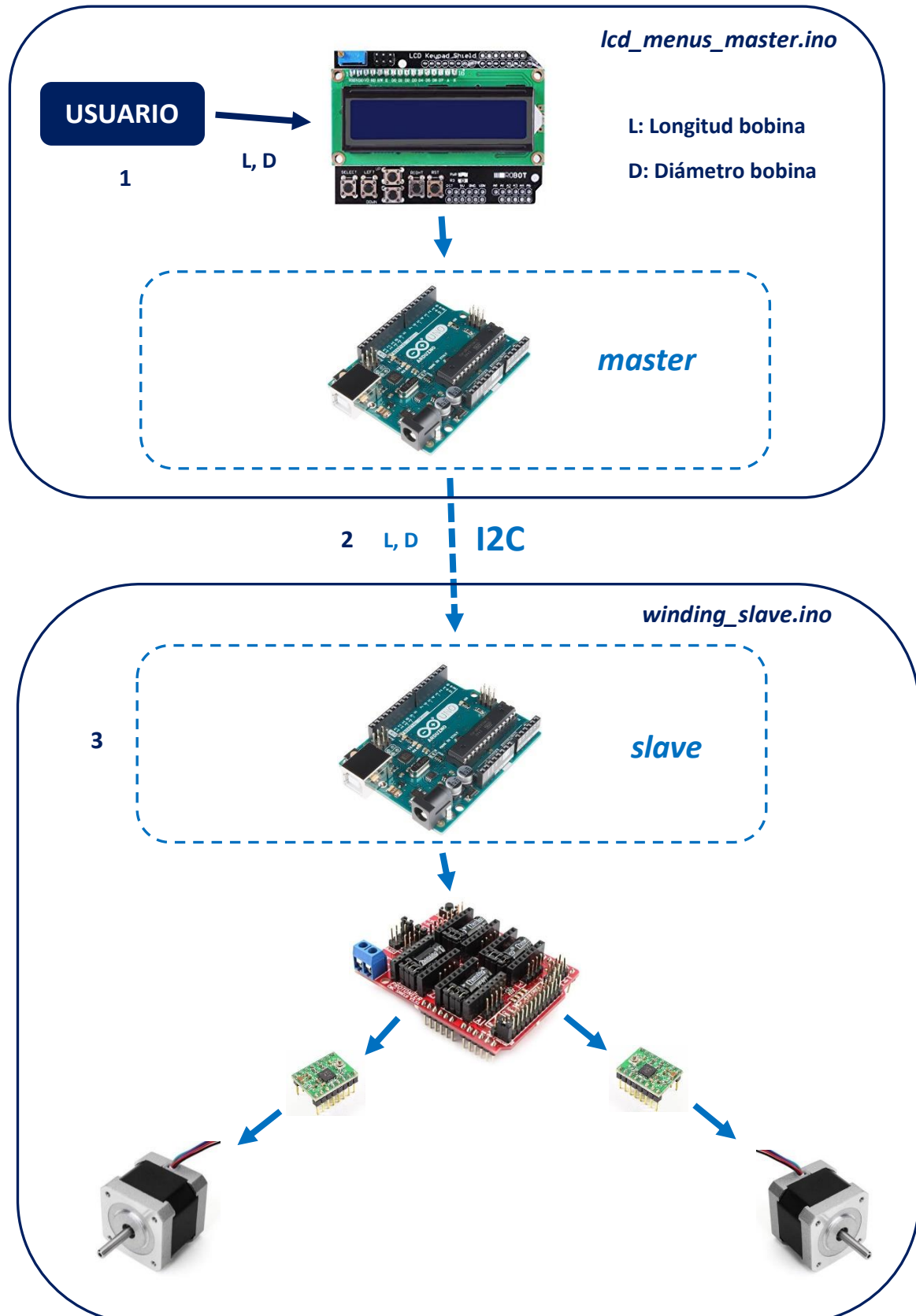


Ilustración 35. Esquema del sistema de control

A continuación, se describe la secuencia de acciones que lleva a cabo el sistema de control:

1. El usuario introduce los datos de longitud y diámetro de la bobina que se va a devanar. Esta información es procesada por la placa Arduino que actúa como *master*. El código utilizado en este proceso es *lcd_menus_master.ino*.
2. La placa *master* se comunica con la placa *slave* por el protocolo de comunicación I2C para mandarle los parámetros introducidos por el usuario.
3. La placa *slave* recibe la información y calcula los pasos a dar por los motores **Winder** y **Slider** en función de esos datos. El código utilizado en este proceso es *winding_slave.ino*.

Todos los códigos desarrollados para este proyecto se encuentran disponibles en el repositorio de GitHub [7], en *coil-winder/arduino-code*.

3.4.3.1. LCD Keypad Shield

Se ha utilizado una pantalla LCD de 2x16 con botones integrados para la introducción de parámetros de la bobina por parte del usuario e iniciar el bobinado.

Se ha seleccionado este tipo de display por su facilidad de uso, es un módulo de expansión que se coloca encima de la placa Arduino UNO, dejando libres los pines digitales del 0 al 7, y las puertas analógicas del A1 al A5, más el ICSP.

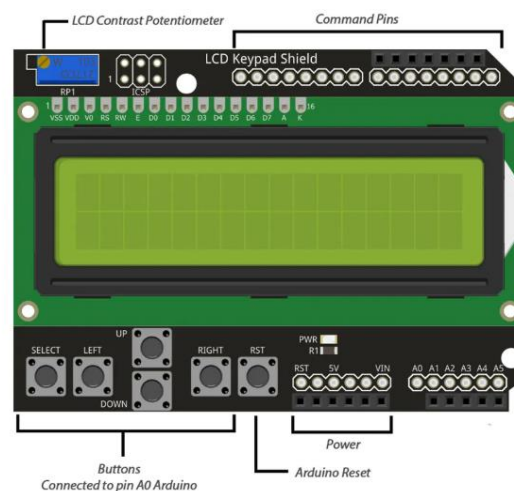


Ilustración 36. Pantalla LCD con botones

Además, se puede utilizar la librería en Arduino IDE de *LiquidCrystal* para una mayor facilidad de control de la pantalla.

La secuencia de pantallas que se mostrará al usuario será la siguiente:

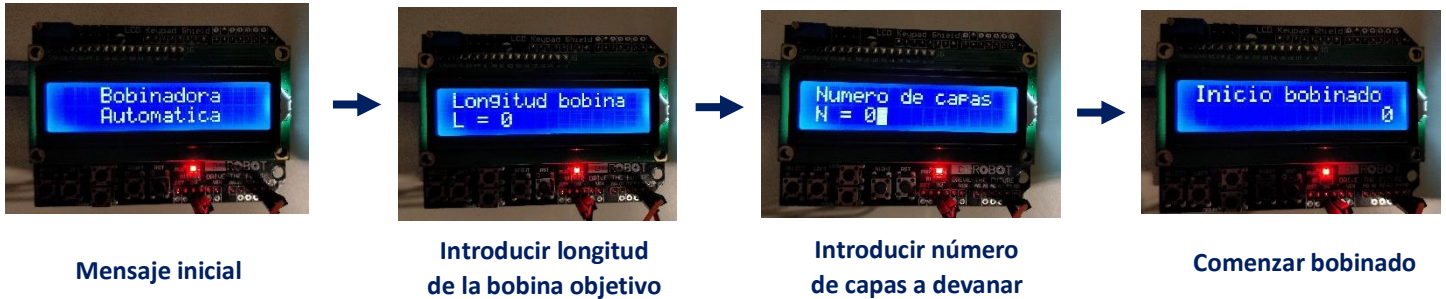


Ilustración 37. Secuencia de pantallas

En cuanto a los controles de los botones, las funcionalidades son las siguientes:

- ✓ El usuario podrá modificar la longitud de la bobina y de número de capas pulsando los botones de arriba y abajo.
- ✓ Para cambiar de menú podrá avanzar y retroceder pulsando los botones de izquierda y derecha.
- ✓ El bobinado comenzará al pulsar el botón de la derecha en el último menú

Este modelo de utiliza 6 pines digitales para el control de la pantalla LCD:

Tabla 1. Pines de conexión de la pantalla LCD con botones

Pin	Función
Analógico 0	Control de los botones (Selección, arriba, abajo, derecha, izquierda y reset)
Digital 4	DB4
Digital 5	DB5
Digital 6	DB6
Digital 7	DB7
Digital 8	RS
Digital 9	Enable
Digital 10	Control de la luz de fondo

Para la comunicación por el protocolo I2C se han utilizado los pines A4 (SDA), A5 (SCL), GND y 5 V, como se explica en el siguiente apartado.

3.4.3.2. Bus I2C

El estándar de comunicación I2C (Inter-Integrated Circuit), también escrito como I^2C [22], se utiliza en la comunicación interna de dispositivos electrónicos como acelerómetros, brújulas, displays, etc.

El bus I2C sólo requiere de dos cables para su funcionamiento, uno para la señal de reloj (SCL), para mantener sincronizados a todos los dispositivos del bus, y otro para el envío de datos (SDA) [16].

Este estándar de comunicación tiene una arquitectura de tipo master-slave. El dispositivo maestro o master inicia la comunicación con los esclavos, y puede mandar o recibir datos de los esclavos. Los esclavos no pueden iniciar la comunicación, ni hablar entre ellos directamente.

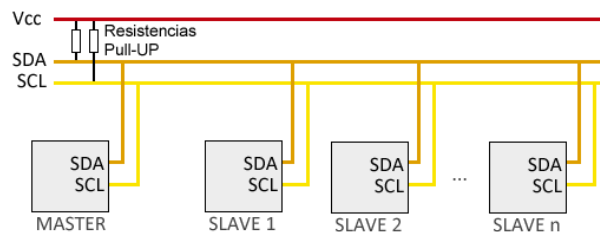


Ilustración 38. Arquitectura de tipo master-slave

Las placas Arduino disponen de soporte I2C por hardware, vinculado a ciertos pines. Los pines a los que van asociados varían dependiendo del modelo.

En la siguiente tabla se muestran los pines de conexión SCL y SDA en función del modelo de Arduino:

Tabla 2. Pines de conexión en función de la placa

Modelo	SDA	SCL
Arduino UNO	A4	A5
Arduino Nano	A4	A5
Mini Pro	A4	A5
Mega	20	21

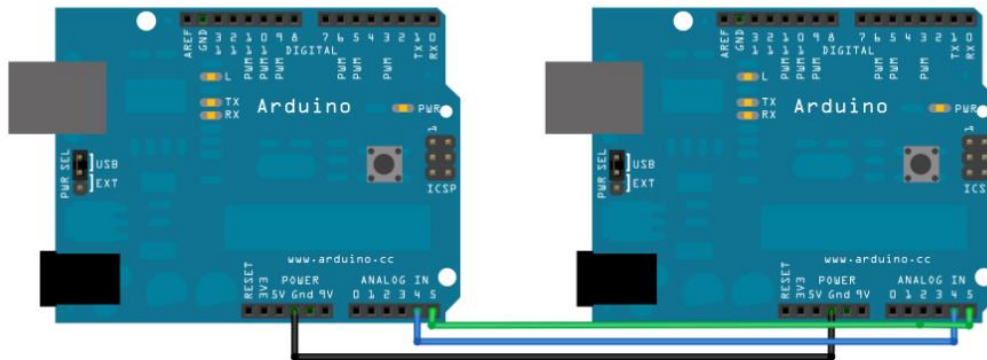


Ilustración 39. Conexiones para comunicación I2C

Adicionalmente, los últimos modelos de Arduino UNO disponen de dos pines independientes para utilizar SDA y SCK.

Para comunicar dos placas Arduino por el bus I2C se ha utilizado la librería *Wire*.

Algunas de las funciones básicas que nos ofrece esta librería son las siguientes:

- `Wire.begin()` → Inicializa el hardware del bus
- `Wire.beginTransmission(address)` → Comienza la transmisión
- `Wire.endTransmission()` → Finaliza la transmisión
- `Wire.requestFrom(address, nBytes)` → Solicita un numero de bytes al esclavo en la dirección *address*
- `Wire.available()` → Detecta si hay datos pendientes por ser leídos
- `Wire.write()` → Envía un byte
- `Wire.read()` → Recibe un byte
- `Wire.onReceive(handler)` → Ejecuta la función de callback al recibir un dato
- `Wire.onRequest(handler)` → Ejecuta la función de callback al solicitar un dato

En el sistema de bobinado se utiliza el estándar I2C para la comunicación de las dos placas Arduino.

- **Arduino master:**

Es la placa que se encarga de controlar la pantalla LCD con botones para controlar la bobinadora. Recibe los datos del usuario de longitud de la bobina y número de capas a bobinar y se los envía a la *Arduino slave*.

▪ **Arduino slave:**

Recibe una señal para iniciar el bobinado de la *Arduino master*, además de los parámetros introducidos por el usuario para calcular el número de pasos que tiene que dar cada motor.

En la siguiente imagen se muestra la conexión realizada entre las placas master y slave:

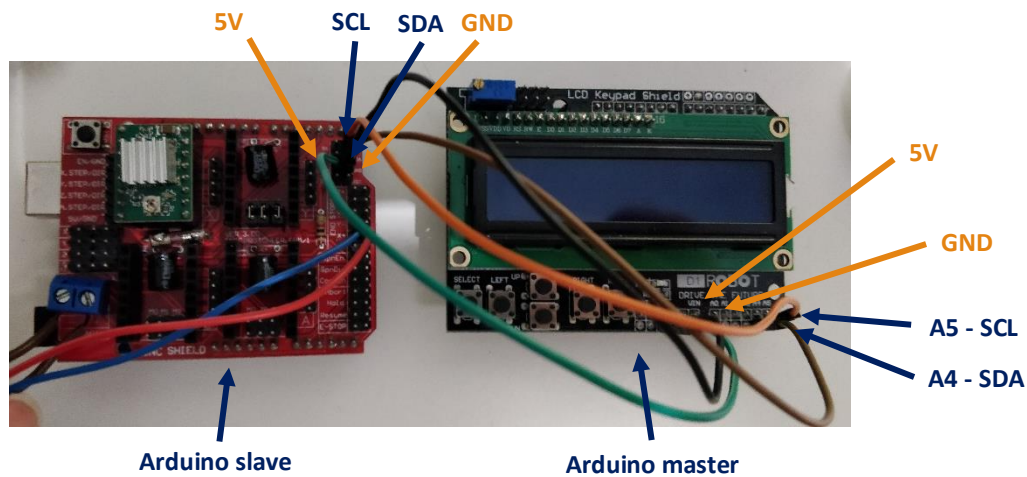


Ilustración 40. Conexión entre placas Arduino UNO

Tabla 3. Conexión entre las placas master - slave

Arduino slave	Arduino master
SCL	A5 (SCL)
SDA	A4 (SDA)
5V	5V
GND	GND

La razón por la que en la placa slave se han utilizado los pines SCL y SDA directamente y en la placa master los pines equivalentes A4 y A5 es porque la

accesibilidad de los pines analógicos al colocar el módulo LCD Keypad shield es mayor que la de los pines SCL y SDA.

3.4.3.3. Control del movimiento

Como se ha explicado en el apartado anterior, la placa Arduino slave es la encargada del control del bobinado. En el código `winding_slave.ino`, disponible en el repositorio de GitHub del proyecto [7], se han programado los movimientos de los motores *Winder* y *Slider* para el bobinado.

La secuencia de movimientos para completar el bobinado es la siguiente:

1. Posicionamiento inicial

La bobina avanza hacia el final de carrera para tener una referencia en el espacio de la posición de la bobina. A partir de ahí retrocede hasta colocar el extremo más alejado en paralelo al tensionador del hilo.

El cálculo de los $\frac{1}{16}$ de paso que tiene que dar lo hace en función del parámetro de longitud (L) introducido por el usuario inicialmente:

El avance de la correa es de 0,2 mm en un paso, en la resolución de $\frac{1}{16}$ de paso serán 16.

Para avanzar una distancia de L mm tendrá que dar los siguientes $\frac{1}{16}$ de paso:

$$Pasos\ Slider = \frac{16 \times L}{0,2}$$

2. Bobinado

El sentido de avance del bobinado de la primera capa siempre se hace en sentido opuesto al final de carrera.

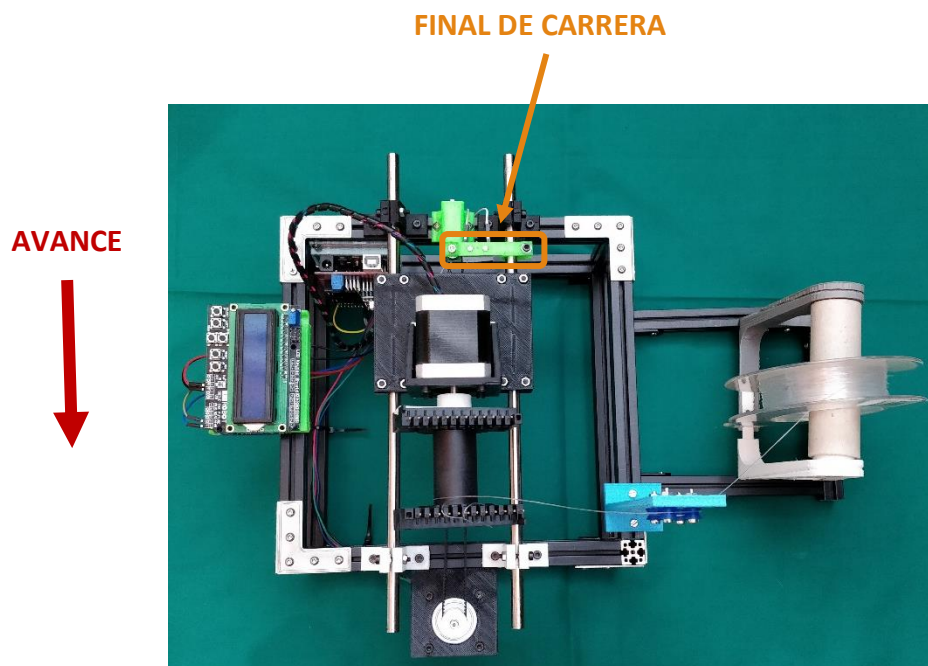


Ilustración 41. Avance de la primera capa

Cuando el motor Slider ha avanzado una cantidad de pasos equivalente a la longitud de la bobina, comienza a bobinar en el sentido opuesto para iniciar la siguiente capa.

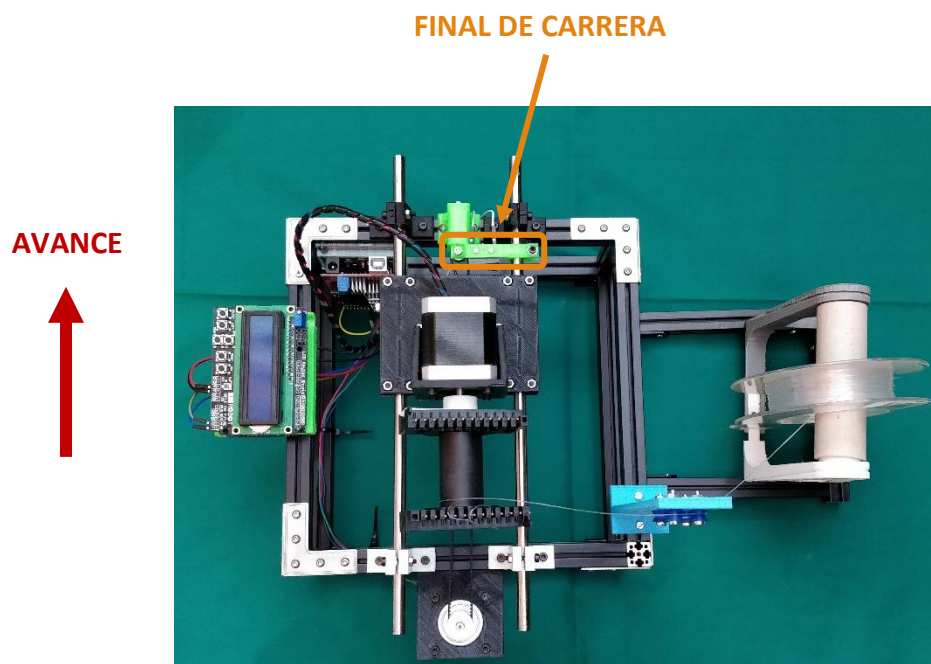


Ilustración 42. Avance de la segunda capa

Al terminar la capa llega a tocar el final de carrera y avanza en sentido opuesto al final de carrera.

Y así sucesivamente hasta completar las N capas.

Para ajustar el avance horizontal en función del giro, el motor Slider avanza el grosor del hilo cuando el motor Winder ha completado tres vueltas. De esta forma se evita que se superpongan los hilos en una misma capa.

3.5 SISTEMA ELECTRÓNICO DE POTENCIA

En este apartado se exponen los elementos utilizados en el sistema electrónico de potencia, como el uso de motores paso a paso, drivers de los motores y la placa de expansión CNC Shield.

Los movimientos en el sistema de bobinado vienen proporcionados por dos motores paso a paso. Para facilitar la programación de los movimientos de los motores se ha utilizado una placa de expansión CNC Shield V3.51 y unos drivers, Pololu A4988, que suministran la corriente necesaria a los motores.

La alimentación del sistema es suministrada por una fuente ATX de 12V convencional.

3.5.1 Motores paso a paso

Los motores paso a paso son dispositivos electromecánicos que convierten una serie de impulsos eléctricos en desplazamientos angulares discretos o “pasos”.

La ventaja de este tipo de motores es que son precisos en el posicionamiento, son comúnmente utilizados en robots, drones, impresoras 3D, etc.

En este proyecto vamos a utilizar dos motores paso a paso bipolares Nema 17 Wantai (*Ilustración 43*), es decir, contienen dos bobinas.

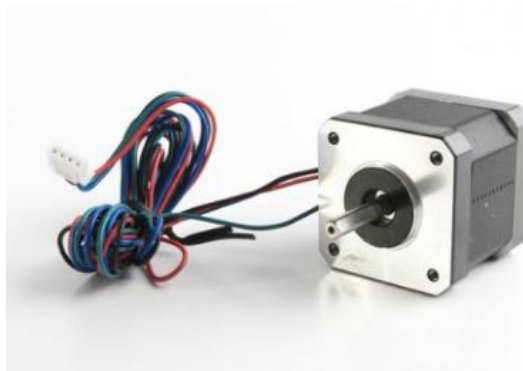


Ilustración 43. Motor paso a paso Nema 17

De cada extremo de las bobinas sale un cable, en este caso: negro, verde, rojo y azul (*Ilustración 44*).

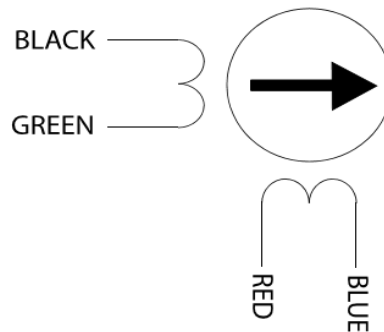


Ilustración 44. Cables de salida del motor paso a paso

El modelo de motor paso a paso seleccionado tiene una resolución de 1,8 grados por paso y, por lo tanto, tiene que dar 200 pasos para completar una vuelta.

Tabla 4. Tabla de especificaciones del motor Nema 17

Modelo	Giro por paso	Voltaje nominal	Corriente nominal	Resistencia por fase	Inductancia por fase	Peso
42BYGHW811	1,8º	3,1 V	2,5 A	1,25 ohm	1,8 mH	0,34 kg

Las especificaciones detalladas del modelo de motor paso a paso Nema 17 del fabricante Wantai se encuentran en el apéndice 6.4.

3.5.2 Pololu A4988

El Pololu A4988 es una placa que permite controlar motores paso a paso bipolares y facilita una limitación de corriente ajustable, protección contra sobrecorriente y sobretensión, y cinco resoluciones de micro paso diferentes.

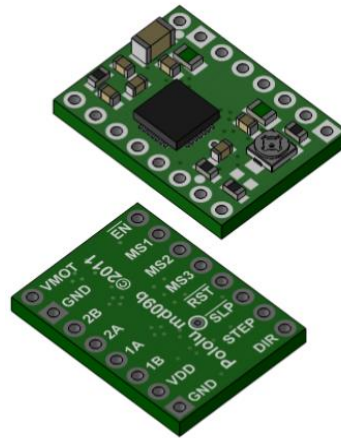


Ilustración 45. Pololu A4988

Para la alimentación de este controlador es necesario que se conecte un voltaje de suministro lógico (3 - 5,5 V) a través de los pines VDD y GND y un voltaje de suministro del motor (8 - 35 V) a través de VMOT y GND (*Ilustración 51*).

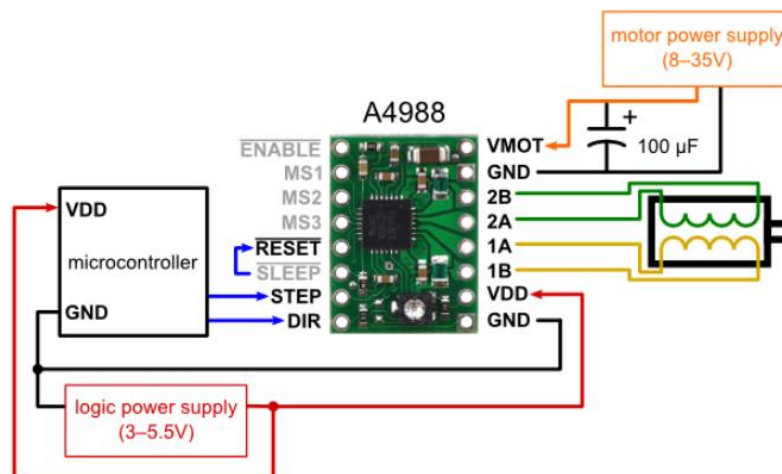


Ilustración 46. Esquema de conexiones del Pololu A4988

Para modificar la resolución de micropaso de los motores se colocarán jumpers en la CNC Shield en las posiciones MS1, MS2 y MS3. En la siguiente tabla se resumen las posiciones de los jumpers en función de la resolución deseada para el motor paso a paso:

Tabla 5 Resolución de los pasos en función de la posición de los jumpers

MS1	MS2	MS3	Resolución de micropaso
Bajo	Bajo	Bajo	1 paso
Alto	Bajo	Bajo	$\frac{1}{2}$ paso
Bajo	Alto	Bajo	$\frac{1}{4}$ paso
Alto	Alto	Bajo	$\frac{1}{8}$ paso
Alto	Alto	Alto	$\frac{1}{16}$ paso

En el sistema de bobinado **se ha seleccionado una resolución de $\frac{1}{16}$ de paso en ambos motores** para garantizar la estabilidad del bobinado y reducir las vibraciones.

Esta placa permite controlar un motor paso a paso bipolar con una corriente de salida de hasta 2 A por bobina si se le añade un disipador de calor a la placa Pololu (sin disipador sólo proporciona hasta 1A por bobina).

Antes de conectar los motores es preciso hacer un ajuste de corriente regulando el potenciómetro que lleva incorporado el Pololu a la corriente máxima por fase del motor Nema 17 (*Tabla 4*).

En la página web del fabricante se especifican los pasos a seguir para llevar a cabo la regulación de la corriente en función del modelo de motor paso a paso bipolar utilizado [14].

3.5.3 Placa CNC Shield V3.51

La placa CNC Shield V3.51 [10] es un módulo de expansión adicional a la placa Arduino UNO, que facilita el uso de los drivers de los motores paso a paso, en este caso son Pololu A4988.

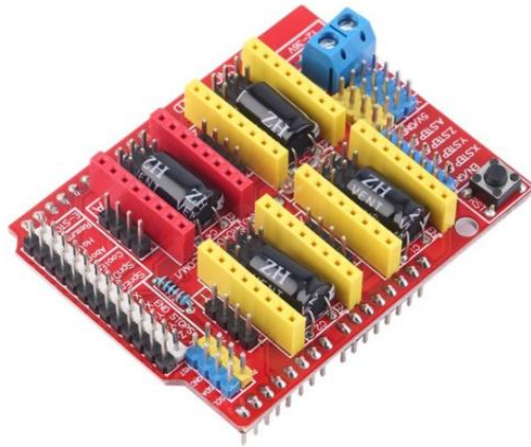


Ilustración 47. CNC Shield

La placa de expansión CNC Shield ofrece la posibilidad de controlar simultáneamente cuatro motores paso a paso. En este proyecto sólo utilizaremos dos, colocados en las posiciones X, el motor **Slider**, e Y, el motor **Winder** (*Ilustración 47*).

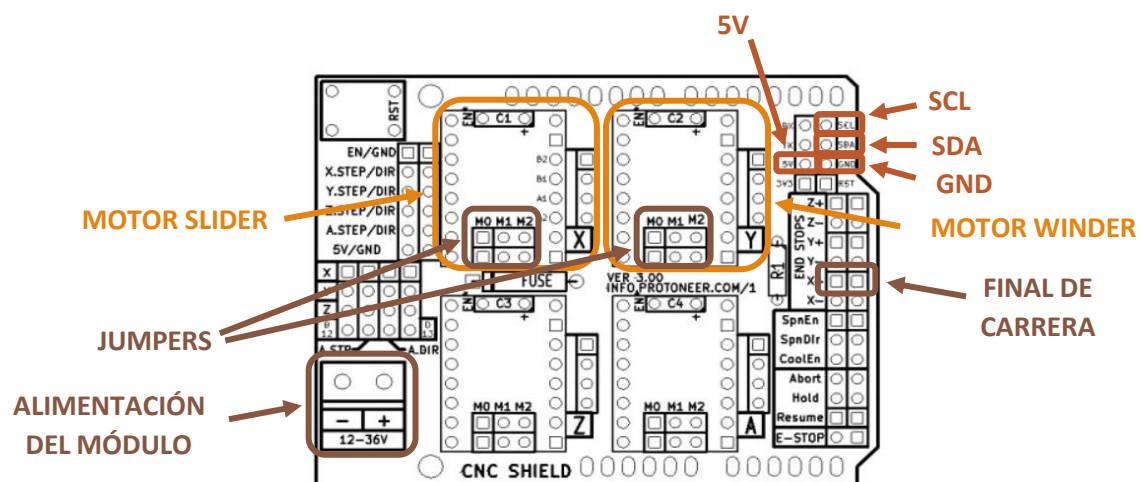


Ilustración 48. Esquema de conexiones en la placa CNC Shield

En la *Ilustración 48* se indican los pines de conexión de los motores en la placa CNC Shield.

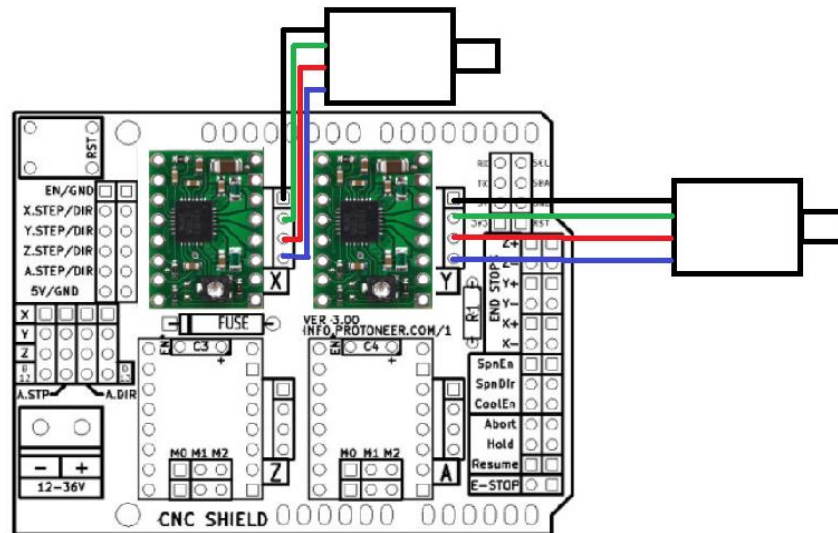


Ilustración 49. Esquema de conexión de los motores en la placa CNC Shield

La placa de expansión CNC Shield irá conectada sobre la placa Arduino UNO, los pines de la placa Arduino que controlarán las funciones del motor se muestran en la siguiente imagen:

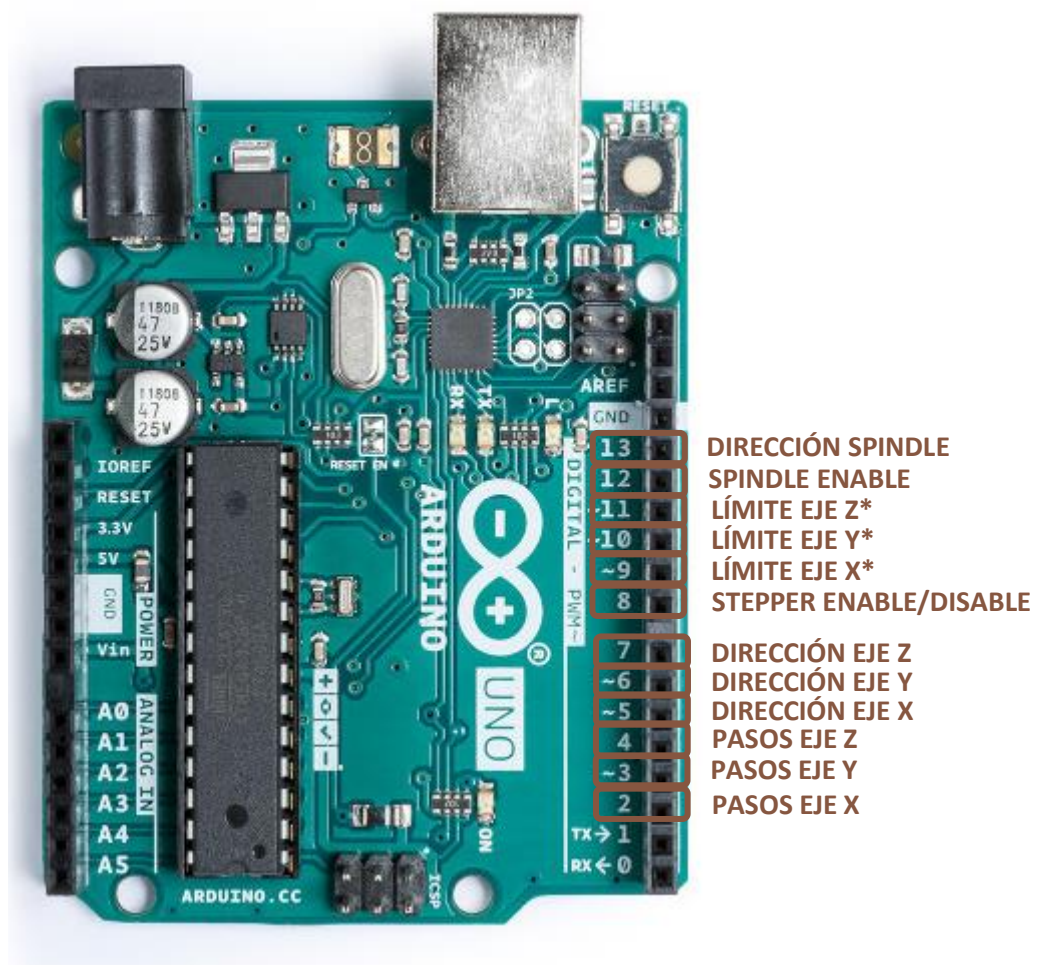


Ilustración 50. Pines de conexión de la placa Arduino UNO

3.6 ALIMENTACIÓN DEL SISTEMA

Para alimentar el sistema, se utiliza una fuente de alimentación 500W ATX convencional.



Ilustración 51. Fuente de alimentación ATX

Este tipo de fuente de alimentación es fácil de obtener, pues se puede reutilizar de algún ordenador antiguo y tiene salidas a 3,3V, 5V, 12V.

El código de colores normalizado de las fuentes tipo ATX es el siguiente:

Tabla 6. Código de colores fuente ATX

COLOR	Voltaje
Negro	GND
Naranja	3,3 V
Rojo	5 V
Amarillo	12 V

Conectamos la fuente ATX tanto a la placa Arduino slave como la placa CNC Shield al que está ensamblado:

- I. Alimentación de 12V a la placa Arduino *slave* a través de un conector Jack
El pin positivo del conector Jack se ha conectado al cable amarillo (12 V) y el negativo al cable negro (tierra).



Ilustración 53. Conector Jack



Ilustración 52. Jack conectado a la fuente ATX

II. Alimentación de 12V al módulo de expansión CNC Shield.

Desde la fuente ATX se han sacado dos cables, uno de 12V (amarillo) y otro de tierra (negro) y se han conectado al módulo CNC Shield como se muestra en la *Ilustración 55*.

La placa Arduino *master* es alimentada a través de la Arduino *slave*, al conectar los pines de 5V y GND, como se explica en el apartado 3.4.3.2.

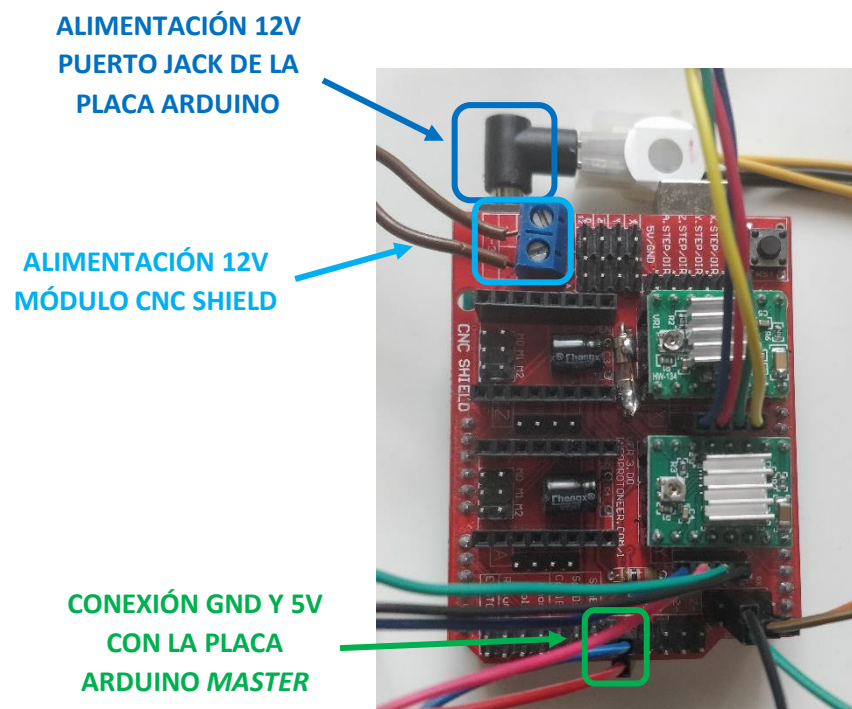


Ilustración 54. Alimentación del sistema

3.7 ESPECIFICACIONES DEL DISEÑO

En este apartado se describen las especificaciones del sistema de bobinado automático.

Tabla 7. Especificaciones del sistema de bobinado

Rango de longitudes de la bobina	10 – 60 mm
Rango de diámetros de la bobina	15 – 40 mm
Velocidad de bobinado	7,5 rpm
Diámetro máximo del hilo	0,8 mm

El rango de diámetros de la bobina depende del carrete utilizado, la longitud máxima de la dimensión más larga del carrete medida desde el centro de la bobina no puede superar los 45 mm porque durante el giro podría interferir con la correa.

Al cambiar el modelo de carrete sería necesario rediseñar la pieza del soporte del carrete.

3.8 ESTUDIO ECONÓMICO

Se ha evaluado el coste del desarrollo de este proyecto, para ello se han tenido en cuenta los siguientes hechos:

- El software utilizado es open-source y no ha generado un gasto adicional.
- Se ha utilizado equipamiento del laboratorio que no ha sido necesario adquirir, como la impresora 3D.

En la siguiente tabla se resumen todos los componentes adquiridos en este proyecto:

Tabla 8. Lista de materiales

Componente	Proveedor	Cantidad	Precio unitario	Precio total
Correa dentada GT2 - 6mm - 1m	HTA3D	1	1,37 €	1,37 €
Polea GT2 - 20 dientes	HTA3D	2	1,10 €	2,20 €
Motor paso a paso Nema 17	HTA3D	2	12,85 €	25,70 €
Ejes - diámetro 8	HTA3D	2	2,65 €	5,30 €
Rodamiento lineal Lm8uu	HTA3D	4	0,58 €	2,32 €
Placa Arduino UNO	FARNELL	2	19,49 €	38,98 €
Arduino CNC Shield V3.51	3DSMART	1	8,29 €	8,29 €
POLOLU A4988	ELECTRONICA EMBAJADORES	2	7,11 €	14,22 €
Carcasa Arduino UNO	AMAZON	2	4,30 €	8,60 €
LCD Keypad Shield	AMAZON	1	9,99 €	9,99 €
Fuente de alimentación 500W ATX	AMAZON	1	10,70 €	10,70 €
Interruptor final de carrera	CETRONIC	1	5,37 €	5,37 €
4 barras de 200mm	MAKERBEAM	1	9,25 €	9,25 €
4 barras de 100mm	MAKERBEAM	1	5,00 €	5,00 €
3 barras de 150 mm	MAKERBEAM	1	7,00 €	7,00 €
100 tornillos, M3, 6mm	MAKERBEAM	1	6,50 €	6,50 €
250 tuercas, M3	MAKERBEAM	1	4,50 €	4,50 €
12 escuadras	MAKERBEAM	2	6,95 €	13,90 €
Filamento PLA	HTA3D	0,7	13,50 €	9,45 €
Total				188,64 €

Por lo tanto, en el estudio económico el gasto generado es la suma del coste de las horas de investigación dedicadas y del precio de los componentes adquiridos.

- Para la realización de este proyecto se estima que se han dedicado 120 horas de investigación, a un coste de unos 20€/h.
- El listado completo de materiales adquiridos.

Tabla 9. Coste total del proyecto

COSTE	
Horas de investigación	2400 €
Componentes	188,64 €
TOTAL	2588,64 €

Cabe destacar que si se quisiese replicar este proyecto sólo sería necesario adquirir los componentes y el gasto se reduciría a 196,26 €.

Este coste es **notablemente inferior** al de una bobinadora comercial con especificaciones similares, que era de **20355€**. El detalle del presupuesto se encuentra en el apéndice 6.2.

Adicionalmente, en el repositorio de GitHub [7], en coil-winder/documentation/components hay un archivo con los enlaces de las páginas web de los proveedores donde se han adquirido los componentes.

3.9 LÍNEAS FUTURAS

En este apartado se resumen las mejoras que se podrían hacer en el sistema de bobinado.

- Para devanar **bobinas de diámetros superiores** se podría modificar la altura de los módulos alzadores para evitar la interferencia de la bobina con la correa.
- En el caso de devanar **bobinas con longitudes superiores** sería necesario montar una estructura de mayores dimensiones. Las barras paralelas a los ejes se podrían sustituir por unas de una longitud superior.
- Si se quiere devanar otro modelo de bobina en el que se **modifique el carrete**, es necesario **rediseñar el soporte del carrete** (véase el componente H).
- Se podría **optimizar el código** para incluir el parámetro de diámetro del hilo entre los que introduce el usuario antes de iniciar el bobinado. La inclusión de este parámetro mejoraría la precisión del bobinado para diámetros de hilo superiores a 0,8 mm.
- Incluir más posiciones en la pieza tensionadora del hilo para **modificar el ángulo de provisión del hilo** en el caso de que este parámetro estuviese afectando al devanado.
- Si se quisiesen **añadir nuevos periféricos** se podría reemplazar una de las Arduino UNO por una placa Arduino MEGA, para disponer de más pines.

4 CONCLUSIONES

En este apartado se evalúa el cumplimiento de los objetivos inicialmente establecidos y descritos en el apartado 2.

- i. Se ha diseñado y construido un sistema de bobinado a un precio económico mediante una estructura de aluminio, componentes electromecánicos y piezas impresas en 3D.
- ii. El sistema de bobinado es completamente autónomo, ya que dispone de una pantalla LCD y botones para que el usuario pueda introducir los parámetros necesarios e iniciar el bobinado.

El hecho de que sea autónoma hace que el sistema de bobinado sea portable y no es necesario tener conocimientos en microcontroladores ni descargar software adicional para su utilización.

- iii. El sistema de bobinado es capaz de devanar bobinas de distintas dimensiones intercambiando los módulos alzadores y el soporte del carrete.
- iv. El devanado es preciso y resistente, con una calidad suficiente para devanar bobinas de transformadores y para otras aplicaciones.

Se puede concluir que se han cumplido todos los objetivos que se habían establecido en este proyecto.

Además, durante la realización de este proyecto se han completado competencias en mecatrónica, electrónica de control y de potencia y se han adquirido nuevas competencias como la impresión 3D, el control de motores paso a paso y el protocolo de comunicación I2C.

Por último, cabe destacar que se ha seguido la filosofía de hardware y software libre, todos los códigos y documentación están subidos en el repositorio de GitHub [7] y cualquier persona podría replicar este sistema de bobinado.

5 BIBLIOGRAFÍA

- [1]. **FRAILE MORA, JESÚS.** *Máquinas Eléctricas. 5ª Edición.* (Madrid). McGraw-Hill/Interamericana España, 2003. ISBN 84-481-3913-5
- [2]. **PURCELL, EDUARD M. y MORIN, DAVID J.** *Electricity and Magnetism.* Third Edition. (Massachusetts). Cambridge University Press, 2013. ISBN 987-1-107-01402
- [3]. **POPOVIC, ZOYA y POPOVIC, BRANCO D.** *Introductory Electromagnetics.* Prentice Hall, 2007.
- [4]. **Bricogeek** [En línea] [Consulta: 15 febrero 2018]. Disponible en: <https://tienda.bricogeek.com/shields-arduino/837-arduino-cnc-shield-v3.html>
- [5]. **Arduino.** [En línea] [Consulta: 20 febrero 2018]. Disponible en: <http://arduino.cl/que-es-arduino/>
- [6]. **Whitelegg.** [En línea] [consulta: 24 septiembre 2018]. Disponible en: <http://134.213.30.184/products/coil-winding/coil-winding-machines/bm-a-automatic-layer-winding-machine-for-small-coils>
- [7]. **MARTÍN BRAVO, Marta.** coil-winder. *GitHub*. [En línea] Disponible en: <https://github.com/mmartinbr>
- [8]. **MACHADO SÁNCHEZ, Felipe.** fcad-comps. *GitHub*. [En línea] Disponible en: <https://github.com/felipe-m>
- [9]. **REPETIER.** Repetier Host Documentation. [En línea] [Consulta: 15 de febrero de 2018] Disponible en: <https://www.repetier.com>
- [10]. **CNC Shield.** [En línea] [Consulta: 14 de febrero de 2018] Disponible en: <https://blog.protoneer.co.nz/arduino-cnc-shield/>
- [11]. **Arduino UNO.** [En línea] [Consulta: 20 de marzo de 2018] Disponible en: <https://www.arduino.cc/en/Guide/ArduinoUno>

[12]. **RepRap**. Repetier Host [En línea] [Consulta: 15 de abril de 2018] Disponible en: <https://reprap.org/wiki/Repetier-Host>

[13]. **RepRap**. *NEMA 17 Stepper motor* [En línea] [Consulta: 14 de febrero de 2018] Disponible en: [https://reprap.org/wiki/NEMA 17 Stepper motor](https://reprap.org/wiki/NEMA_17_Stepper_motor)

[14]. **Pololu**. *A4988 Stepper Motor Driver Carrier* [En línea] [Consulta: 18 de febrero de 2018] Disponible en: <https://www.pololu.com/product/1182>

[15]. **Concurso CNICE mec**. *Tornillos sin fin* [En línea] [Consulta: 25 de febrero de 2018] Disponible en: http://concurso.cnice.mec.es/cnice2006/material107/operadores/ope_tornillo.htm

[16]. **Luis Llamas**. *El bus I2C en Arduino* [En línea] [Consulta: 02 de enero de 2020] Disponible en: <https://www.luisllamas.es/arduino-i2c/>

[17]. **OpenActuator**. OpenCoilWinder. *GitHub*. [En línea] [Consulta: 30 de octubre de 2017] Disponible en: <https://github.com/OpenActuator/OpenCoilWinder>

[18]. **EpicenterBryan**. *DIY Coil Winder - with Arduino Mega and Marlin 3D printer firmware*. *Youtube*. [En línea] [Consulta: 30 de octubre de 2017] Disponible en: <https://www.youtube.com/watch?v=H4sOnQJavTI>

[19]. **ETD59_31_22**. *Ferroxcube*. [En línea] [Consulta: 25 de marzo de 2018] Disponible en: https://www.ferroxcube.com/upload/media/product/file/Products/ETD59_31_22.pdf

[20]. **AJPDsoft**. *Conectar una pantalla LCD a Arduino*. [En línea] [Consulta: 3 de febrero de 2020] Disponible en: <https://www.ajpdsoft.com/modules.php?name=News&file=article&sid=627>

[21]. **Obijuan Academy**. *Tutoriales de FreeCAD y GitHub*. [En línea] [Consulta: 25 de septiembre de 2017] Disponible en:

http://www.learobotics.com/wiki/index.php?title=Obijuan_Academy

[22]. **NXP Semiconductors**. *UM10204, i2c bus specification and user manual, Rev. 6- 4 April 2014* [En línea] [Consulta: 30 de enero de 2020] Disponible en:

<https://www.nxp.com/docs/en/user-guide/UM10204.pdf>

[23]. **NAJERA, S. Meca** [Imagen digital en línea] [Consulta: 16 de febrero 2020].

Disponible en: <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=7999623>

[24]. **ALAR**. *¿Qué hace un ingeniero en mecatrónica?* [En línea] [Consulta: 16 de febrero 2020]. Disponible en:

<https://www.blog.universidades-rusia.com/2018/07/06/que-hace-un-ingeniero-en-mecatronica/>

[25]. **EcuRed**. *Hardware libre* [En línea] [Consulta: 16 de febrero 2020]. Disponible en: https://www.ecured.cu/Hardware_libre

[26]. **Hacedores**. *Movimiento Maker* [En línea] [Consulta: 17 de febrero 2020].

Disponible en: <https://hacedores.com/movimientomaker/>

[27]. **BOLTON, W.** *Mecatrónica. Sistemas de control electrónico en la ingeniería mecánica y eléctrica*. 4ª edición. Barcelona: Marcombo, S.A., 2010. ISBN 978-84-267-1632-3

[28]. **ALCIATORE, D.G. y HISTAND, M.B.** *Introduction to Mechatronics and Measurement Systems*. 4ª edición. Nueva York: McGraw Hill, 2012. ISBN 978-0-07-338023-0.

[29]. **Open Source Hardware Definition. Oshwa**. [En línea] [Consulta: 18 de febrero 2020]. Disponible en: <https://www.oshwa.org/definition/>

[30]. **Jones R, Haufe P, Sells E, Iravani P, Olliver V, Palmer C, et al.** *RepRap—the replicating rapid prototyper. Robotica*. [En línea] [Consulta: 18 de febrero 2020].

Disponible en: <https://doi.org/10.1017/S026357471000069X>

[31]. **RepRap**. *Repetier Host* [En línea] [Consulta: 10 de enero 2020]. Disponible en:

<https://reprap.org/wiki/File:RepetierHostStartpage.png>

6 APÉNDICES

6.1. METODOLOGÍA

6.1.1 Definición de especificaciones

En primer lugar, se establecieron los objetivos del proyecto, definiendo las características generales del sistema de bobinado y los requisitos que debía satisfacer.

6.1.2 Estudio de alternativas

Una vez definidas las especificaciones, se contemplaron distintas alternativas para la construcción de la bobinadora. Finalmente, se eligieron las características que cumplieran con los objetivos establecidos, reducían el tiempo y coste de fabricación y la complejidad del diseño.

6.1.3 Adquisición de materiales

En esta fase se adquirieron todas las piezas, componentes tanto electrónicos como mecánicos, y herramientas software necesarias para el desarrollo del proyecto.

6.1.4 Documentación de los avances

Con el avance del proyecto, se iban documentando los procedimientos utilizados, explicando cada problema que surgía y la solución adoptada. Esta etapa abarca prácticamente toda la realización del proyecto.

6.1.5 Aprendizaje del software

Para lograr los objetivos definidos inicialmente fue necesario el aprendizaje de distintos programas y plataformas como FreeCAD, GitHub, Arduino y Repetier Host. También fue necesaria la familiarización con componentes electromecánicos con los que no se había trabajado anteriormente.

6.1.6 Diseño mecánico e impresión de las piezas

En esta fase se lleva a cabo el diseño de la parte mecánica con todos los componentes y las piezas imprimibles, optimizándolas en cantidad de material y espacio utilizado. Posteriormente se imprimen en la impresora 3D.

6.1.7 Montaje del sistema

Una vez impresas todas las piezas y adquiridos el resto de los materiales, se comienza a montar la estructura. Posteriormente, cuando se programa el código de los motores, se montan los soportes con los elementos electrónicos.

6.1.8 Programación del control de los motores paso a paso

El control de los motores se programa en la placa Arduino UNO, junto con el módulo de expansión CNC Shield y los drivers para el control de corriente que llega a los motores.

6.1.9 Calibración del sistema

Tras el montaje del sistema, se realiza una calibración para garantizar el tensionado del hilo y el ajuste correcto de los tornillos para evitar vibraciones. También se modifica la relación de movimientos entre motores para ajustar la separación entre espiras durante el bobinado.

6.1.10 Elaboración de la memoria

Finalmente, para garantizar el entendimiento, se estructuró y se redactó toda la información documentada anteriormente en la memoria y los pasos que se siguieron, añadiendo las conclusiones obtenidas de este proyecto.

6.2. PRESUPUESTO DE UNA BOBINADORA PROFESIONAL



Whitelegg Machines Ltd
4 The Boulevard
Altira Park, Herne Bay
Kent, CT6 6GZ, UK

Phone: +44 (0) 1293 526230
Fax: +44 (0) 1293 538910
Email: sales@whitelegg.com
Web: www.whitelegg.com

Quotation

Customer Rey Juan Carlos University (Madrid)
Contact name Marta Martín
Date Monday, September 24, 2018

Dear Marta,

Thank you for your enquiry. Please find below our quotation for the requested products.

Description	Price
BM-A-1 Automatic layer coil winding machine http://134.213.30.184/products/coil-winding/coil-winding-machines/bm-a-automatic-layer-winding-machine-for-small-coils For winding a variety of small coils, transformers etc Wire range: 0.02 - 2.00mm (0.508") Maximum coil diameter: 180mm (7.086") Maximum winding length: 300mm (12") Distance between centres: 180-300mm adjustable (7-12") Winding spindle diameter: 10mm (0.39) (larger on request) 2 speed ranges: 0-1000 rpm and 0-4500 rpm Wire pitch tolerance: 0.01mm (0.00039"). Rotation tolerance: 2 degrees The machine is supplied complete with: One off wire guide for the wire range, 5-inch colour touch screen controller with a memory for unlimited programs, AC servo motor with brake for the winding spindle and AC motor for the wire guide, one table with drawer and front and side safety guarding to CE regulations to CE regulations. Ready for connection to a single phase 230V 50/60Hz supply Dimensions: 1100mm(l) x 920mm (w) x 1630 (h) Weight: 150kg	€20,355
Additional wire guide for winding another wire simultaneously	€201



TCR Wire tensioner and dereeler.





Supplied mounted onto a column and base with 200mm diameter DIN container for the wire spool. For a wire range of 0.15-1.00mm with fine tension control. These are mounted onto an additional frame linked to the rear of the machine

€940

TI Wire tensioner and de-reeler

Supplied mounted onto a column and base. For use with wire drums or containers. For a wire range 0.3-2.0mm

€770

Prices	In EUROS ex works UK.
Despatch time	12-16 weeks
Payment terms	30% with order, balance on readiness prior to despatch
Validity	90 days
Warranty	18 months from date of despatch

We trust that you will find this quotation of interest and remain at your disposal for any additional information.

Yours sincerely,



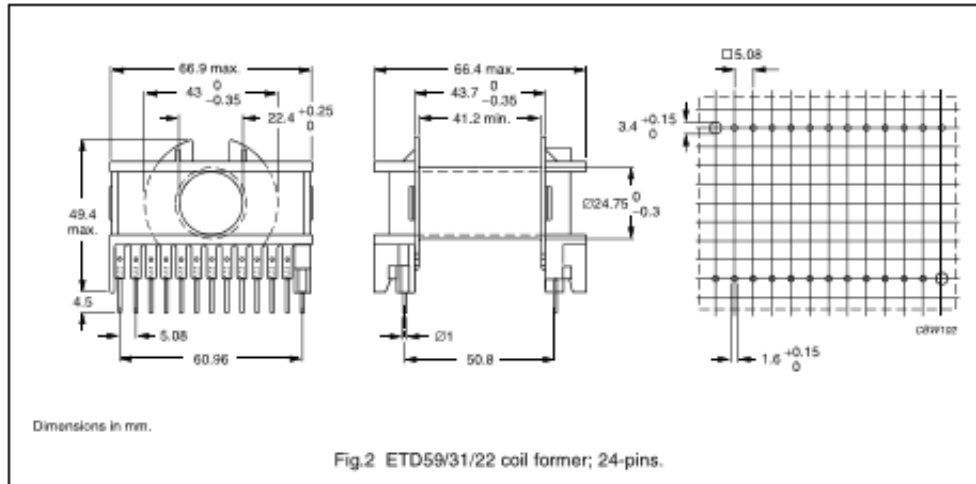
Glyn Dawson
WHITELEGG MACHINES LTD

6.3. CARRETE DE LA BOBINA OBJETIVO

COIL FORMER

General data 24-pins ETD59/31/22 coil former

PARAMETER	SPECIFICATION
Coil former material	polybutyleneterephthalate (PBT), glass-reinforced, flame retardant in accordance with "UL 94V-0", UL file number E45329(M)
Pin material	copper-tin alloy (CuSn), tin (Sn) plated
Maximum operating temperature	155 °C, "IEC 60085", class F
Resistance to soldering heat	"IEC 60068-2-20", Part 2, Test Tb, method 1B, 350 °C, 3.5 s
Solderability	"IEC 60068-2-20", Part 2, Test Ta, method 1



Winding data and area product for 24-pins ETD59/31/22 coil former

NUMBER OF SECTIONS	WINDING AREA (mm ²)	MINIMUM WINDING WIDTH (mm)	AVERAGE LENGTH OF TURN (mm)	AREA PRODUCT Ae x Aw (mm ⁴)	TYPE NUMBER
1	366	41.2	106	135000	CPH-ETD59-1S-24P

Ilustración 55. Características de la bobina

6.4. ESPECIFICACIONES DEL MOTOR NEMA 17

Wantai Mini Stepper Product Specifications

42BYGHW811

General Specifications	
Item	Specification
Step Accuracy	5%
Temperature Rise	80°C Max
Ambient Temperature	-20°C~+50°C
Insulation Resistance	100MΩ Min., 500VDC
Dielectric Strength	500 VAC for one minute



Electrical Specifications											
Model No.	Step Angle	Motor Length	Rated Voltage	Rated Current	Phase Resistance	Phase Inductance	Holding Torque	# of Leads	Rotor Inertia	Detent Torque	Weight
	°	mm	V	A	Ω	mH	g-cm		g-cm ²	g-cm	kg
42BYGHW811	1.8	48	3.1	2.5	1.25	1.8	4800	4	68	280	0.34

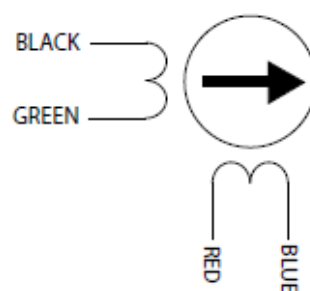
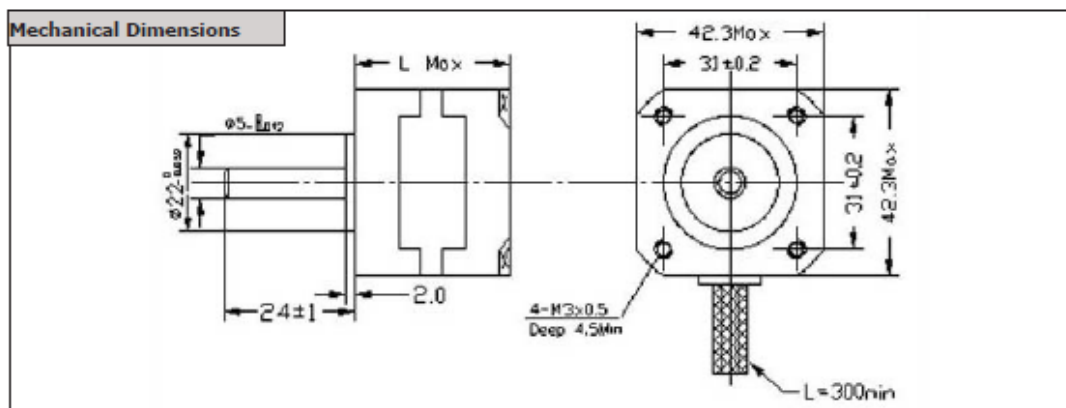


Ilustración 56. Especificaciones motor Nema 17