



Fabricación de filamento de I3D a partir de botellas recicladas

Franco Andrés Pagano

Universidad Nacional de Rosario
Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura
Escuela de Ingeniería Mecánica
Rosario, Argentina
2023

Fabricación de filamento de I3D a partir de botellas recicladas

Franco Andrés Pagano

Proyecto Final de Ingeniería Mecánica presentado como requisito parcial para optar
al título de:

Ingeniero Mecánico

Director:

Dr. Ing. Guillermo Rodriguez

Universidad Nacional de Rosario

Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura

Escuela de Ingeniería Mecánica

Rosario, Argentina

2023

*A mi abuelo. Quien despertó en mí el
interés por el cálculo y la ingeniería
desde pequeño.*

Agradecimientos

Mirando en retrospectiva, la cantidad de personas que me han ayudado a llegar a este punto de mi vida y de mi carrera, es inmensurable. Desde el personal de la facultad, compañeros de estudio, amigos, incluso personas que no conozco personalmente; como quienes fabricaron la computadora con la cual estoy escribiendo estas palabras. Todos ellos han aportado en mayor o menor medida un esfuerzo con el que me ayudaron a llegar donde estoy ahora mismo.

Sin embargo, quisiera resaltar el invaluable apoyo que me ha dado mi familia a lo largo no sólo de los años de mi carrera, sino en toda mi vida. Puntualmente mis padres, mis verdaderos héroes. Sin ellos, definitivamente, hoy no podría estar culminando esta etapa.

Resumen

La impresión 3D es una tecnología de fabricación que ha tenido un auge en la última década. Constantemente se hacen avances tanto en la parte intrínseca de las impresoras, así como en la obtención de los insumos necesarios. Hoy en día, el insumo más costoso de todos es el filamento de impresión: un hilo de plástico que es fundido y extruido para dar forma a la pieza impresa. Existen filamentos de distintos materiales, siendo uno de ellos el PET (polietileno tereftalato). Si bien hoy en día la gran mayoría del filamento es materia prima de primera, existen máquinas que permiten reciclar plásticos para hacer filamento. Muchas de estas son de índole industrial, aunque existen proyectos orientados al uso doméstico. Sin embargo, estas máquinas presentan bastantes falencias y carencias. En este proyecto se diseña una máquina que fabrica filamento de impresión 3D utilizando como materia prima botellas plásticas de PET, mejorando los modelos ya existentes para garantizar una mejor calidad y automatización del proceso. Se muestra todo el procedimiento del desarrollo: desde el concepto hasta la puesta en marcha y calibración de una máquina a pequeña escala.

Palabras clave: Impresión 3D; Reciclado; Filamento; Botellas; Fabricación.

Abstract

3D printing is a manufacturing technology that has experienced a boom in the last decade. Advances are constantly being made both in the intrinsic part of the printers, as well as in obtaining the necessary inputs. Nowadays, the most expensive input of all is the printing filament: a plastic thread that is melted and extruded to shape the printed piece. There are filaments made of different materials, one of which is PET (polyethylene terephthalate). While the vast majority of filament today is first-rate raw material, there are machines that allow for plastic recycling to make filament. Many of these machines are of an industrial nature, although there are projects aimed at domestic use. However, these machines have many shortcomings and deficiencies. This project designs a machine that manufactures 3D printing filament using PET plastic bottles as raw material, improving existing models to ensure better quality and automation of the process. The entire development procedure is shown: from the concept to the startup and calibration of a small-scale machine.

Keywords: 3D printing; Recycling; Filament; Bottle; Fabrication.

Contenido

Agradecimientos.....	4
Resumen.....	5
Abstract.....	6
Contenido.....	7
Capítulo 1 - Introducción.....	9
Estado del arte.....	12
Máquinas existentes.....	12
Falencias de dichas máquinas.....	15
Mejoras propuestas.....	17
Capítulo 2 - Diseño.....	19
Criterios de diseño.....	19
Diseño conceptual.....	25
Cinemática.....	25
Programación.....	26
Capítulo 3 - Desarrollo.....	30
Detalles de diseño mecánico.....	30
Sistema de reducción.....	30
Sistema de acople de carretel.....	34
Sistema de bobinado.....	36
Fabricación de piezas.....	37
Corte láser.....	37
Piezas impresas.....	38
Electrónica.....	39
Elementos normalizados.....	41
Imágenes del conjunto.....	42
Fotografías del proceso de armado.....	43
Programación.....	46
Montaje de electrónica.....	46
Montaje del mecanismo.....	46
Capítulo 4 - Puesta a punto.....	47
Ensayos.....	47
Ensayo de consistencia diametral.....	47
Ensayo de imprimibilidad.....	48
Ensayo mecánico I.....	49
Ensayo mecánico II.....	51
Resultados.....	52
Todos los ensayos aprobados.....	52

Al menos un ensayo desaprobado.....	52
Ningún ensayo aprobado.....	54
Capítulo 5 - Análisis económico.....	55
Materiales.....	55
Horas de trabajo.....	56
Costos totales.....	56
Cálculo de amortización.....	57
Consumo mensual de filamento.....	57
Precio del filamento comercial por kg.....	58
Costo de adquisición de botellas.....	58
Rendimiento de botellas.....	59
Costo de electricidad por kg de filamento producido.....	60
Costo de amortización.....	62
Costo total por kg de filamento.....	64
Conclusiones y recomendaciones.....	65
Conclusión técnica.....	65
Conclusión personal.....	66
Recomendaciones.....	66
Bibliografía.....	67
Anexo I - Código fuente Arduino.....	68
Anexo II - Diagramas electrónicos.....	76
Anexo III - Montaje del mecanismo.....	77
Anexo IV - Planos de conjunto y definición.....	78

Capítulo 1 - Introducción

La impresión 3D es un proceso de fabricación relativamente versátil y económico en comparación con otros procesos que permiten llegar a un mismo resultado geométrico. En esta última década ha tenido un auge como pocas otras tecnologías de su rama, permitiendo que pasara de ser una rareza de la manufactura, a un proceso que puede llegar a considerarse “doméstico”.

La evolución del conocimiento también es de gran ayuda, ya que existe gran variedad de tutoriales sobre cómo llevar a cabo impresiones de forma fácil y sencilla. Además, por más que requiere una inversión inicial, es un proceso de fabricación dentro de todo económico.

Sin embargo, el filamento empleado para imprimir es el insumo más costoso, y su precio se rige normalmente en base a cotizaciones en moneda extranjera. Si bien hay filamentos de producción nacional, la materia prima muchas veces es importada, por lo que encarece el precio final del producto. De todas formas, sigue siendo más barato respecto al precio del filamento, por ejemplo, en Estados Unidos si se lo compara con su precio en dólares.

Actualmente vivimos en un mundo donde los plásticos están presentes en la mayoría de elementos de consumo diario. Uno de esos elementos son las bebidas envasadas en botellas de PET, las cuales son desechadas luego de ser consumido su contenido. Esto genera un gran volumen de botellas descartadas diariamente en todo tipo de establecimientos. Si bien una buena parte es reciclada, la mayoría termina en basurales o en el mar hasta que eventualmente se desintegre (dentro de siglos).

Esto último quiere decir que las botellas de PET son un recurso que abunda y está disponible para poder aprovecharse. Una de las tantas formas de hacerlo, es convirtiendo las botellas en filamento para impresión 3D.

Si bien actualmente existen máquinas que logran fabricar filamento de impresión 3D a partir de botellas recicladas, la mayoría presenta al menos una de las siguientes falencias:

- La temperatura se controla por sistema “On-Off”
- Utilizan PCBs complejas y customizadas, que no se pueden obtener en Argentina sin pagar costos muy elevados
- El filamento fabricado no es guiado en la bobina
- No poseen interfaz de usuario (UI)
- La mayoría de los vínculos dinámicos no están correctamente definidos
- Complicado montaje y desmontaje del material bobinado

Todo esto deja abierta una oportunidad de mejora de la máquina, que se decide aprovechar para el desarrollo de este proyecto. Por eso el objetivo a cumplir es diseñar una máquina con el concepto mencionado, cubriendo las anteriores falencias enumeradas. La misma es de proporciones domésticas, con el fin de poder convertir las botellas plásticas generadas en el uso cotidiano en filamento.

Lo anterior se desarrolla a lo largo de cinco capítulos, comenzando por una introducción basada en el estado del arte, y analizando las alternativas ya existentes. Luego se detalla el diseño en general, haciendo hincapié en los criterios y el primer diseño conceptual. Al concretar eso se pasa a detallar el diseño final, con definiciones de parámetros y selección de elementos normalizados. Así se da lugar al comienzo de la ejecución, y posteriormente a la puesta a punto y calibración de la impresora. Una vez concretada esa etapa, se realiza el análisis económico del proyecto, teniendo en cuenta presupuestos de materiales, mano de obra, y costos de horas de trabajo propio. Finalmente se analiza su amortización y rentabilidad económica, verificando la viabilidad del proyecto.

Al concretar todo lo anterior, se elabora una conclusión en base a los resultados obtenidos, y evaluando posibles mejoras y avances para desarrollar a futuro, ya sea de manera propia o en manos de quien decida continuar con este proyecto.

Propósito

El propósito de la máquina consiste en transformar tiras de PET de aproximadamente 10 mm de ancho y 1 mm de espesor, en un hilo de 1,75 mm de diámetro.

Estas tiras se obtienen cortando la parte media de una botella de forma continua, descartando el apoyo inferior y la parte superior del pico.

Para ello se corta el apoyo de la botella y se monta sobre un dispositivo como el de la Figura 1. El mismo posee una cuchilla y dos guías para garantizar un buen deslizamiento y un ancho de cinta constante. Al girar la botella, esta va bajando a medida que se va cortando hasta llegar a la parte curva del pico, donde se suspende el procedimiento y se descarta el excedente. Una vez obtenida la cinta, es bobinada a mano en un carretel para garantizar un almacenamiento prolijo de la misma.

Luego, dicha cinta bobinada es forzada a pasar a través de un extrusor de 1,75 mm de diámetro que se encuentra a una temperatura cercana a los 200 °C. De esta forma la cinta se funde y se extruye en la forma final del filamento.

Al salir del extrusor, se engancha la punta en un carretel vacío que se encuentra ubicado en frente. Una vez vinculado, el mismo comienza a girar de forma controlada, con el objetivo de garantizar un filamento de diámetro constante.

Al finalizar el proceso de extrusión, se corta el suministro de energía al extrusor, la bobina se detiene, y se procede a retirar el filamento producido. En promedio, de una botella plástica de 2,5 L se pueden obtener unos 12 metros de filamento, aunque hay una gran desviación dependiendo de la marca de la bebida.

Ese filamento ya está listo para usar, con configuraciones de impresión muy similares a las que se utilizarían para imprimir en 3D con PETG (PET modificado con glicol).

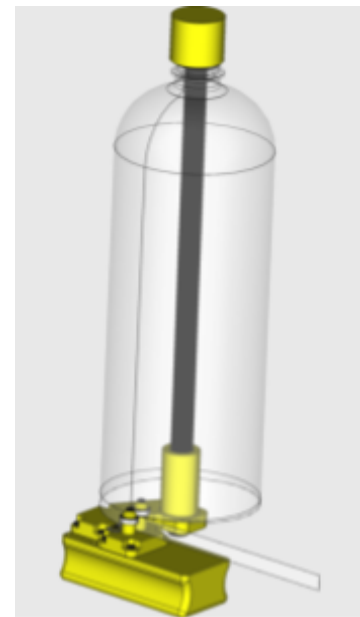


Fig. 1: Cortador de botellas

Estado del arte

Lo primero que se aborda es realizar un estudio en el cuál se analizan las características de las máquinas ya existentes. Esto se hace con el fin de conocer de forma conceptual las mismas, y poder encontrar posibles mejoras y correcciones que podrían llegar a ser necesarias o bien provechosas de aplicar.

Máquinas existentes

Un trabajo de investigación acerca de los dispositivos ya fabricados que cumplieran con esta función arroja los siguientes resultados:

Ejemplo 1:



Fig. 2: Máquina creada por el usuario de Youtube Electronoob

Esta imagen fue extraída de un video de Youtube¹. Si bien cumple su cometido, la máquina tiene las siguientes contras:

- Utiliza PCB customizada
- No tiene guía de filamento
- Utiliza un motor de bajo torque
- Mala definición de vínculos cinemáticos
- No se puede retirar el carretel fácilmente

¹ <https://www.youtube.com/watch?v=ueJXQ7appC0>

Ejemplo 2:

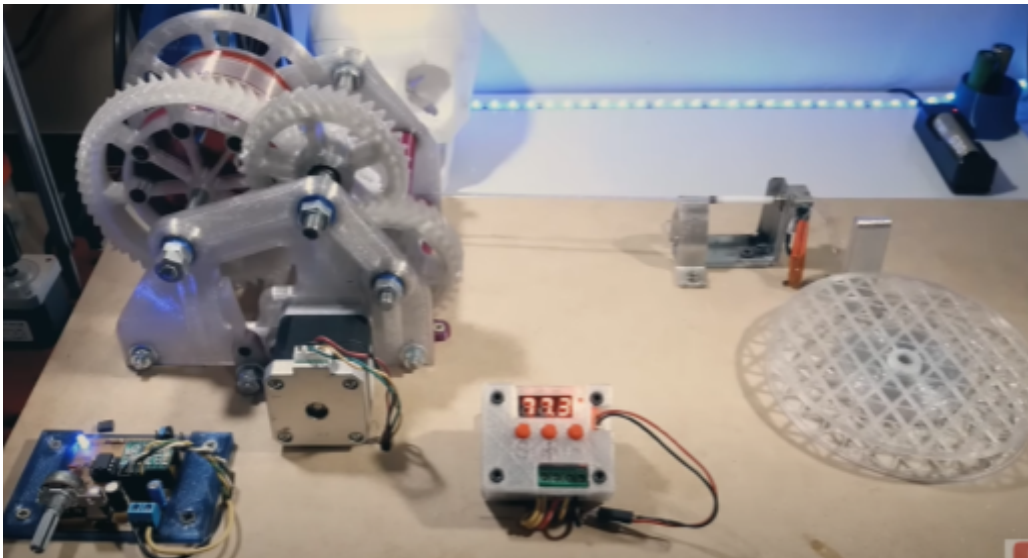


Fig. 3: Máquina creada por el usuario de Youtube XY.3D

Esta imagen también fue extraída de otro video de Youtube². Esta máquina en general tiene mejores prestaciones que la anterior.

Por un lado utiliza electrónica de serie, dejando de lado las PCBs personalizadas. Utiliza motores paso a paso de mayor torque, y mejoró algunos aspectos (no todos) de la definición de los vínculos cinemáticos.

Sin embargo, sigue presentando algunos puntos débiles:

- No tiene guía de filamento
- La temperatura se controla por sistema “On-Off”
- Mala definición de algunos vínculos cinemáticos
- Interfaz de usuario pobre (sólo muestra temperatura actual)
- No se puede retirar el carretel fácilmente

² https://www.youtube.com/watch?v=u7IBrJk_kgg

Ejemplo 3:



Fig. 4: Máquina creada por el usuario de Youtube Tylman Design

Este último modelo fue sacado también de un video de Youtube³. Tiene mejoras en la interfaz de usuario, y aspectos estéticos. Aunque por otra parte es un diseño privado, con precio en moneda extranjera.

En resumen, el modelo presenta los siguientes defectos:

- Utiliza PCB customizada
- No tiene guía de filamento
- Mala definición de algunos vínculos cinemáticos
- Interfaz de usuario pobre (sólo muestra temperatura actual)
- No se puede retirar el carretel fácilmente

³ <https://www.youtube.com/watch?v=WUcZyOWUzcY>

Falencias de dichas máquinas

Las falencias fueron mencionadas anteriormente en la introducción, pero ahora serán detalladas y justificadas.

- Utilización de PCB customizada

Emplear un circuito impreso prefabricado restringe mucho la accesibilidad al producto. Sobre todo si el usuario se encuentra fuera del país de origen donde fue diseñado el mismo.

Si se utiliza electrónica modular y de común acceso, se facilita mucho el proceso de construcción, o de obtención de repuestos frente a una eventualidad.

- La temperatura se controla por sistema "On-Off"

Este sistema es muy simple de programar, pero la calidad del control puede ser muy pobre dependiendo las características del entorno y la naturaleza del parámetro a controlar.

Cuando la histéresis térmica es demasiado grande, este sistema pierde mucha precisión. Si se desea tener un buen control de temperatura se debe plantear otro sistema más sofisticado.

- El filamento fabricado no es guiado en la bobina

Al ser extruido, el filamento simplemente es enrollado en la bobina sin ningún tipo de resguardo en cuanto a su prolijidad y eficiencia de almacenado. Esto hace que no se aproveche el espacio al máximo, y que el filamento sea más propenso a anudarse y atascarse si se desea desbobinar para trasladar a otra bobina y llevar a una impresora.

Sería correcto garantizar un buen guiado del filamento hacia la bobina, con el fin de evitar todo lo anterior mencionado.

- No poseen interfaz de usuario (UI)

Si bien esto no es completamente esencial, es bueno que toda máquina que esté en mayor o menor medida automatizada tenga una UI. Esto facilita la operación para el usuario, y permite informar con mayor facilidad cualquier tipo de fallo o imprevisto que se dé durante el proceso de extrusión y/o bobinado.

- La mayoría de los vínculos dinámicos no están correctamente definidos

Muchas de las máquinas presentan asientos de ejes con contacto plástico-plástico, lo que genera mucho rozamiento, desgaste prematuro de las piezas impresas, y pérdida de energía.

- Complicado montaje y desmontaje del material bobinado

Por lo general, el material es bobinado sobre un carretel impreso en 3D. Este tiene características geométricas que dificultan el proceso de montaje sobre una impresora 3D.

Además, muchas veces se trata de un carretel que está embebido dentro de la máquina, por lo que es imposible desmontarlo siquiera. Esto hace que la única forma de poder recuperar el filamento producido sea debobinándolo a mano y bobinándolo nuevamente en otro carretel que sea montable en una impresora.

Mejoras propuestas

■ Utilización de PCB customizada

Se propone emplear electrónica accesible a nivel global para el control de la máquina.

Es requisito que sea programable en lenguaje C, ya que es uno de los más populares alrededor del mundo, sobre todo a la hora de dar los primeros pasos en programación.

■ La temperatura se controla por sistema "On-Off"

Se propone programar un sistema PID de control de temperatura, similar al utilizado para las impresoras 3D. De esta forma se tendrá un mejor control sobre la misma, reduciendo las oscilaciones.

■ El filamento fabricado no es guiado en la bobina

Se propone desarrollar un sistema de bobinado paralelo, para garantizar un desarrollo parejo de la deposición del filamento sobre el carretel.

De esta forma se puede obtener un material ordenado de forma más prolija, y eficiente. Ya que se aprovecha al máximo la capacidad del carretel.

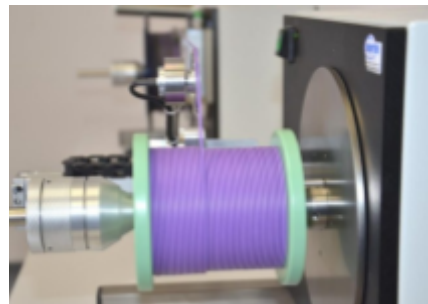


Fig. 5: Sistema de bobinado paralelo

■ No poseen interfaz de usuario (UI)

Se propone diseñar una UI que permita al usuario conocer:

- Estado actual del proceso (qué está haciendo la máquina en ese momento, variables de interés en tiempo real)

- Alertas (si la máquina está esperando alguna tarea de parte del usuario para poder continuar)
- Errores (cualquier eventualidad que pueda haber ocurrido, y que haya interrumpido el proceso por seguridad).

Esta UI sería manifestada en algún tipo de display sencillo que sea compatible con la interfaz de Arduino. Se terminará de definir más adelante.

■ La mayoría de los vínculos dinámicos no están correctamente definidos

Se propone agregar rodamientos donde asientan ejes de plástico en alojamientos del mismo material.

También se propone utilizar tornillos métricos, con arandelas Grower en vez de tornillos enroscados en el mismo plástico. Esto no sólo agrega más profesionalismo al trabajo, sino que reduce la susceptibilidad al aflojamiento por vibraciones.

■ Complicado montaje y desmontaje del material bobinado

Se propone utilizar un carretel que pueda montarse directamente en una impresora 3D, para evitar tener que rebobinar el material generado. De esta forma se ahorra tiempo, y se obtiene un material listo para ser impreso sin necesidad de ningún trabajo extra. Además son muy fáciles de conseguir, ya que cualquier persona que desee fabricar filamento para utilizarlo en su impresora, seguro tiene en su posesión algún carretel vacío que se pueda reutilizar.

Capítulo 2 - Diseño

En este capítulo se ven los distintos pasos necesarios para desarrollar el diseño de la máquina, teniendo en cuenta los criterios tomados para cada decisión técnica. Todo esto se orienta desde el concepto que comparten las máquinas existentes mencionadas en el apartado “Estado del Arte”. A partir de ahí se trabaja con las modificaciones ya mencionadas.

Criterios de diseño

A continuación se enuncian los criterios de diseños que se tomaron para llevar a cabo modificaciones en las máquinas ya existentes, o condiciones nuevas de diseño.

- Escala:

Se decide mantener la escala de la máquina, con el fin de que sea de uso doméstico.

Esto permite mantener el estilo del Proyecto RepRap⁴, generando una máquina que si bien no es auto-replicable, participa del proceso para que una impresora 3D lo sea. Esto quiere decir que debe poder fabricarse de forma casera, con materiales que sean accesibles al público general, y que cuente con un procedimiento preestablecido de ensamblado y puesta a punto.

- Controlador:

Para la parte de automatización y control, se decide utilizar una placa controladora Arduino Mega 2560, y un shield RAMPS 1.4.

Arduino es una placa electrónica de hardware libre que utiliza un microcontrolador programable con una serie de pines que permiten establecer conexiones entre el controlador y distintos elementos (motores, módulos, sensores, etc),, permitiendo llevar a cabo las tareas deseadas.

⁴ <https://reprap.org/wiki/RepRap>

Es una placa relativamente económica, de gran disponibilidad en el mercado, y que se encuentra en constante desarrollo. Se programa mediante lenguaje C, que es uno de los más populares en el mundo de la programación.

El Arduino Mega 2560 tiene además la particularidad de que soporta el acoplamiento de un shield denominado RAMPS.

La RAMPS⁵ (RepRap Arduino Mega Pololu Shield) permite adaptar la electrónica de una máquina RepRap en un paquete de bajo costo. RAMPS interactúa con la placa Arduino Mega y tiene mucho espacio para posibles expansiones (en cuanto a conexiones disponibles). El diseño modular permite conectar los controladores (Drivers) de los motores paso a paso, y la electrónica encargada del control del extrusor. Todo esto será de gran utilidad para el desarrollo del proyecto.

■ Método de fabricación de piezas:

La gran mayoría de las piezas son impresas en 3D mediante modelado por deposición fundida (FDM) y cortadas a láser en MDF.

Al igual que con los puntos anteriores, la idea es continuar con el concepto RepRap. Para cumplir con ello, se decide fabricar la mayor cantidad de piezas posibles por los métodos mencionados anteriormente.

De todas formas, por razones mecánicas algunas piezas se mecanizan en metal.

■ Movilidad del mecanismo:

Se decide utilizar motores paso a paso del tipo NEMA 17. Ya que estos son compatibles con la RAMPS 1.4. Se controlan mediante un driver Pololu, puntualmente un A4988.

El driver, también conocido como controlador de motor paso a paso, es un

⁵ https://reprap.org/wiki/RAMPS_1.4

dispositivo electrónico que se utiliza para controlar y operar un motor paso a paso.

Los motores paso a paso son motores eléctricos que se utilizan para convertir pulsos eléctricos en movimientos discretos y precisos en incrementos angulares, conocidos como pasos. Los controladores de motores paso a paso proporcionan las señales necesarias para controlar la velocidad, dirección y posición del motor paso a paso, lo que permite un control preciso y repetible en aplicaciones que requieren movimientos precisos.

■ Sistema de bobinado

Se decide utilizar un sistema de bobinado paralelo. Este es el sistema que actualmente utiliza la empresa argentina Grilon3, que garantiza una deposición eficiente y controlada del filamento sobre el carretel.

Para ello se utiliza un sistema de guía de filamento, compuesto principalmente por un carro que se desplaza sobre unas guías rectificadas, impulsado por el arrastre de un tornillo auto-reversible.

Un tornillo auto-reversible, también conocido como tornillo de reversión automática o tornillo reciprocante, es un tipo de tornillo mecánico que puede moverse en ambas direcciones (en sentido horario y antihorario) para realizar una función específica. Por lo general, consta de un eje roscado con un diseño especializado que le permite moverse hacia adelante y hacia atrás siendo siempre girado en un mismo sentido.

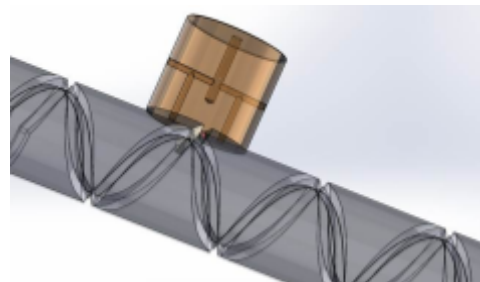


Fig. 6: Tornillo autorreversible

Haciendo coincidir el avance del tornillo con el espesor del filamento, se consigue llenar el carretel de forma compacta. Cuando llega al extremo, la guía dorada de la imagen se acopla por sí sola en la rosca inversa, y se invierte el movimiento. Este ciclo se repite mientras se mantenga el giro del tornillo.

La ventaja de este sistema es que no necesita revertir el movimiento de giro del tornillo, por lo que el mismo puede ser impulsado por la misma fuente de movimiento que hace girar el carretel, reduciendo costos y la cantidad de componentes.

■ UI

Se decide generar una UI utilizando un display LCD de 16x2 caracteres compatible con Arduino. El mismo se vincula a la RAMPS ya que esta está diseñada para soportar dicha compatibilidad.

Este display es de los más económicos dentro de la gama, y permite mostrar mensajes de interés al usuario, como alertas, indicaciones, etc.

■ Definición de vínculos dinámicos

Se utilizan rodamientos en vez de simples asientos de plástico sobre plástico. No se emplean rodamientos de calidad sobresaliente, ya que las velocidades de giro son relativamente bajas, y las cargas mínimas. Por otro lado, el objetivo principal es reducir el rozamiento y los costos de fabricación, haciendo hincapié en el uso doméstico.

Por motivos de practicidad, se utilizan rodamientos a bolas de las mismas dimensiones. Debido a motivos de disponibilidad y precio, se utilizan varillas rectificadas de 10 mm de diámetro. Por lo que se opta por emplear rodamientos rígidos de bolas de medidas 26x10x8. Estos son los más económicos dentro de un rango de medidas similares, dado que eran de origen chino.

■ Montaje y desmontaje de material bobinado

Se decide reutilizar un carretel vacío de PLA marca 3n3 con capacidad para

medio kilogramo de filamento. Tiene medidas que resultan convenientes frente a otros carretes ya que es de diámetro reducido pero de mayor longitud. Esto permite mantener las dimensiones de la máquina más acotadas en cuanto a altura respecto al caso en el que se utilizara un carretel convencional.

El diámetro del vástago es de 47 mm, con un largo de 106 mm y un diámetro máximo de capacidad de 121 mm.

Según un estudio [1], si se bobina de forma compacta gracias al sistema de bobinado paralelo, se podría obtener aproximadamente entre un 78,5% y un 90,7% de coeficiente de llenado.

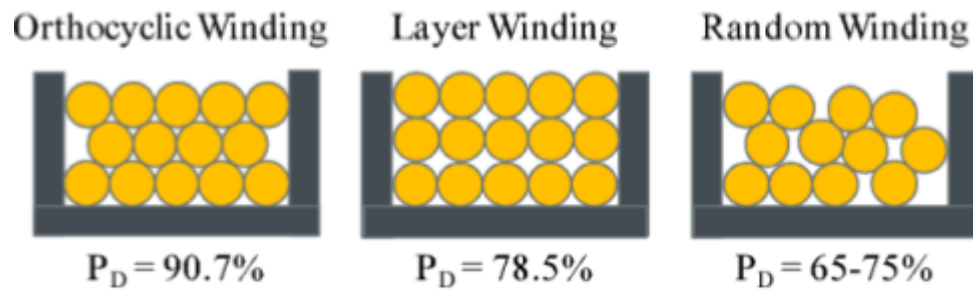


Fig. 7: Distintos coeficientes de llenado

Esto quiere decir que el volumen total sería:

$$V = \frac{\pi(\varnothing e^2 - \varnothing i^2)}{4} \cdot h \cdot P_d$$

El volumen total del cilindro hueco sin tener en cuenta el P_d es de 1035 cm^3 . Teniendo en cuenta los posibles valores de P_d , el mismo podría encontrarse aproximadamente entre 939 cm^3 y 812 cm^3 . Por practicidad, se tomará el valor medio entre ambos: 875 cm^3 .

Siendo la densidad del PET $1,397 \text{ g/cm}^3$ según la fuente citada [2], y el diámetro del filamento de $1,75 \text{ mm}$. Se calcula la longitud y la masa de filamento máxima que se puede bobinar de forma continua:

$$m = \delta \cdot V = 1,397 \frac{g}{cm^3} \cdot 875 \text{ cm}^3 = 1223 \text{ g}$$

Por otro lado, la longitud del filamento es la siguiente:

$$L = \frac{V}{A} = \frac{875 \text{ cm}^3}{\pi \cdot \frac{0,175 \text{ cm}^2}{4}} = 363,8 \text{ m}$$

Diseño conceptual

En esta sección se muestra la síntesis conceptual del funcionamiento de la máquina. Se ve como una idea global, donde restan definir variables y elementos de forma precisa. Sin embargo ya se abordan ciertos cálculos sobre el final.

Cinemática

En base a los modelos existentes, y con las modificaciones planteadas, se propone la siguiente cadena cinemática:

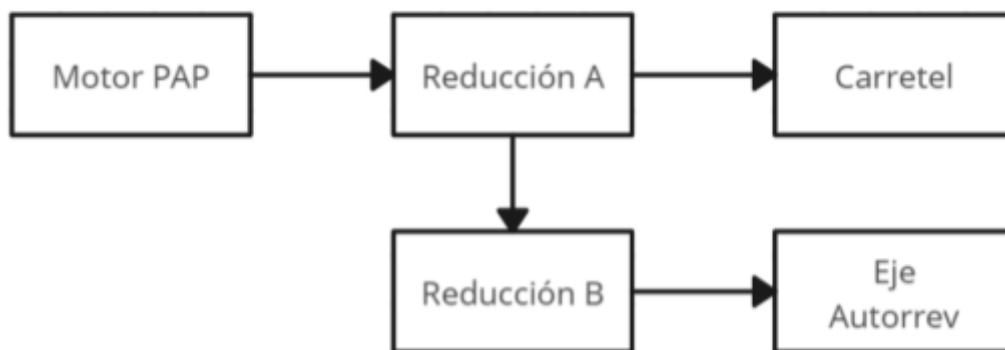


Fig. 8: Concepto de cadena cinemática propuesta

Los motores paso a paso (PAP) del tipo NEMA 17, tienen una velocidad de giro máxima de aproximadamente 3.000 RPM utilizando un driver como el designado para el proyecto. Si bien no poseen una velocidad mínima, existen recomendaciones. Es conveniente que esta sea la suficiente para que el motor realice al menos 200 pasos (steps) por segundo. De esta forma se evitan vibraciones en el sistema mecánico.

Mediante un estudio de las máquinas enunciadas en la etapa del estado del arte, en base a la observación de videos y conociendo la medida de los componentes (ya que en todos esos casos había modelos 3D y/o planos disponibles). Se determina que la velocidad de avance tangencial del filamento durante el proceso de bobinado se encuentra comúnmente entre los 5 y 25 milímetros por segundo.

Programación

Se propone la siguiente lógica para controlar los distintos elementos electrónicos:

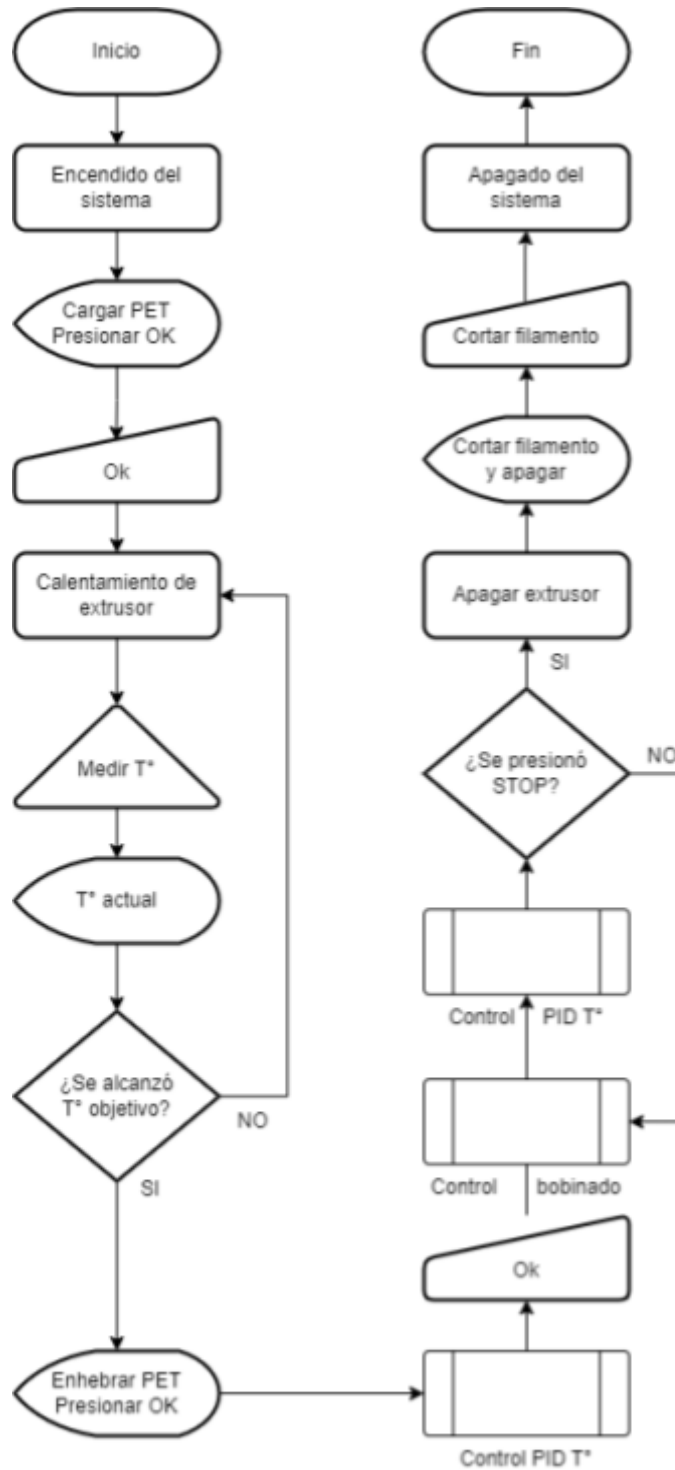


Fig. 9: Diagrama lógico de funcionamiento

El subprograma “Control PID T°” tiene una naturaleza típica de un sistema PID:

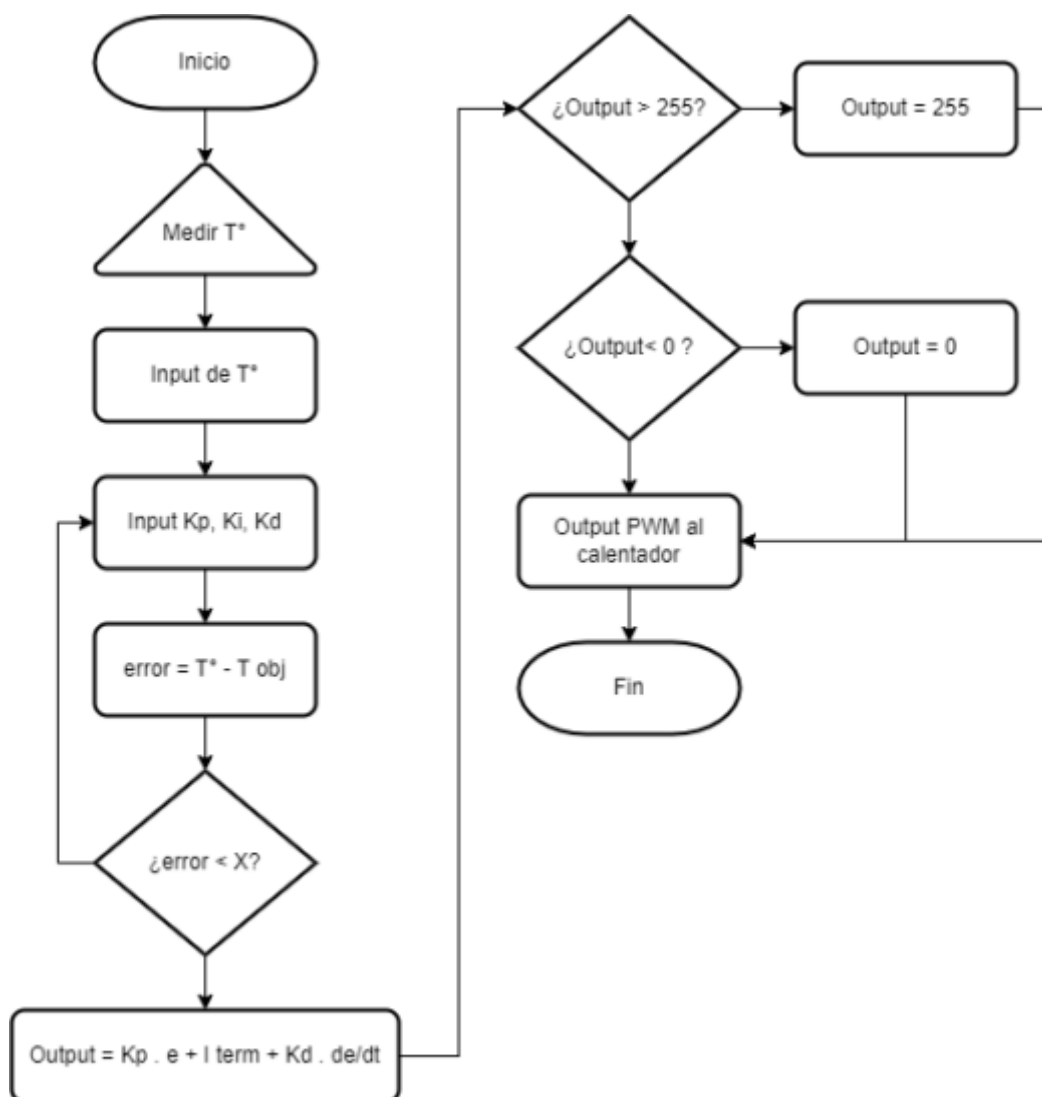


Fig. 10: Lógica del sistema PID de temperatura

Siendo:

- T° : Temperatura actual
- T_{obj} : Temperatura objetivo
- X : Cota del error
- K_p : Constante proporcional del PID
- K_i : Constante integrativa del PID
- K_d : Constante derivativa del PID

El subprograma “Control bobinado” tiene una estructura de la siguiente naturaleza:



Fig. 11: Lógica del sistema de bobinado

El diámetro se calcula en función de la cantidad de vueltas ya bobinadas multiplicado por el diámetro del filamento, sumado al diámetro del carretel vacío:

$$\varnothing_{bob} = \varnothing_{carretel} + 2 N . \varnothing_{filam} = 47 \text{ mm} + 2 n . 1,75 \text{ mm}$$

Los pasos por segundo se calculan teniendo en cuenta una velocidad tangencial constante. Se sabe que la velocidad de avance tangencial del filamento durante el proceso de bobinado es de entre 5 y 25 milímetros por segundo. En base a la velocidad seleccionada por el usuario, conociendo los pasos por revolución del motor paso a paso, y la reducción entre el motor PAP y el carretel:

$$Vt = \frac{2\pi \cdot nc \cdot r}{60} = \frac{2\pi \cdot nc \cdot \varnothing_{bob}}{120} \Rightarrow nc = \frac{Vt \cdot 120}{2\pi \cdot \varnothing_{bob}} \Rightarrow npap = nc \cdot i$$

Siendo Vt la velocidad tangencial del carretel, nc las RPM del carretel, $npap$ las RPM del motor PAP, e i la relación de transmisión entre el motor PAP y el carretel. Finalmente:

$$Stp/s = \frac{npap \cdot Stp/rev}{60}$$

Por último, para poder calcular los pasos totales, a fin de avanzar una distancia Z se realiza el siguiente procedimiento:

$$\varphi = \frac{Z \cdot 2\pi}{\pi \cdot \varnothing_{bob}} = \frac{Z \cdot \pi}{\varnothing_{bob}}$$

Finalmente:

$$Stp = \frac{\varphi \cdot Stp/rev}{2\pi} \cdot i$$

Siendo φ el ángulo en radianes que se debe girar, y Z la distancia lineal que se desplaza el carretel en milímetros.

De esta forma se calculan y parametrizan todas las variables concernientes al bobinado.

Capítulo 3 - Desarrollo

En este capítulo se detallan las distintas etapas de ejecución del proyecto. Se comienza con los criterios de diseño finales, así como las definiciones detalladas de todas las piezas a fabricar.

Detalles de diseño mecánico

En cada sección se enumeran los detalles de diseño de los distintos subsistemas mecánicos de la máquina. Los primeros criterios de la parte electrónica ya fueron discutidos previamente.

Cada uno tiene su particularidad que se aborda desde un criterio de fabricación distinto, acorde a su naturaleza.

Sistema de reducción

El sistema de reducción puede ser resuelto de diversas maneras:

- Sistema de engranajes rectos
- Sistema de engranajes helicoidales
- Sistema de engranajes doble chevron
- Sistema sin fin - corona

Sin embargo cada uno de estos sistemas presenta sus ventajas y desventajas. Por ello se analiza cada caso para encontrar la solución más adecuada:

Sistema de transmisión	Ventajas	Desventajas
Engranajes rectos	Mayor transmisión de potencia Fáciles de mecanizar	Mayor ruido
Engranajes helicoidales	Menor ruido	Generan carga axial
Engranajes doble chevron	Sin carga axial Más silenciosos	Difícil fabricación por mecanizado
Sin fin - Corona	Más compacto	Salida perpendicular a entrada

Tabla 1: Comparación de sistemas de transmisión propuestos

Analizando la tabla comparativa, se considera que la mejor opción es optar por los engranajes doble chevron. Esto se debe a los siguientes criterios de elección:

- Al no generar carga axial, no es necesario contemplar ninguna restricción mecánica extra durante la etapa posterior de diseño.
- Ya que es una máquina pensada para uso doméstico, es preferible que sea lo más silenciosa posible.
- La difícil fabricación es sorteada debido a que los engranajes no se mecanizan, sino que se imprimen en 3D. Por ende, imprimir cualquiera de los sistemas de engranajes mencionados no presenta ninguna dificultad para una impresora 3D convencional.

Una vez definido lo anterior, se procede a calcular la reducción. Para evitar vibraciones, se propone que el motor PAP realice al menos 200 pasos por segundo, como se mencionó anteriormente.

Si se activa el modo microstepping⁶ del motor PAP, se pueden obtener más pasos por segundo a una velocidad de giro menor. Por defecto, un paso equivale a un giro de $1,8^\circ$. Si se activa un microstepping de 2, pasa a ser $0,9^\circ$ por paso, y así sucesivamente. Sin embargo, esto afecta el torque máximo que puede sostener el motor, según la tabla que se encuentra en la fuente utilizada [3]:

Microsteps/full step	% Holding Torque/Microstep
1	100,00%
2	70,71%
4	38,27%
8	19,51%
16	9,80%
32	4,91%
64	2,45%
128	1,23%

Tabla 2: Modificación de torque según microstepping

⁶ Microstepping es una configuración del controlador del motor PAP de manera que le permite dividir estos pasos en pasos adicionales (o micropasos).

En base al rango de velocidad tangencial mencionado anteriormente, a máxima velocidad tangencial y menor diámetro, se obtiene la máxima velocidad angular del carretel. Es decir, para el carretel vacío ($\emptyset = 47\text{mm}$; $V_t = 25\text{ mm/s}$). En ese caso, las RPM del carretel son:

$$n = \frac{V_t}{\pi \cdot \emptyset} \cdot 60 = \frac{25\text{ mm/s}}{\pi \cdot 47\text{ mm}} \cdot 60 = 10,16\text{ RPM}$$

En cambio la menor velocidad angular se obtiene en el máximo diámetro y menor velocidad tangencial ($\emptyset = 121\text{ mm}$; $V_t = 5\text{ mm/s}$). Siendo:

$$n = \frac{V_t}{\pi \cdot \emptyset} \cdot 60 = \frac{5\text{ mm/s}}{\pi \cdot 121\text{ mm}} \cdot 60 = 0,79\text{ RPM}$$

En base a la velocidad mínima, se calcula la relación de transmisión necesaria en base al microstepping seleccionado, para satisfacer el mínimo de 200 pasos por segundo:

VELOCIDAD MÍNIMA		
Microstepping	Decimal	i [1:x]
1/1	1	75,95
1/2	0,5	37,97
1/4	0,25	18,99
1/8	0,125	9,49
1/16	0,0625	4,75
1/32	0,03125	2,37
1/64	0,015625	1,19
1/128	0,0078125	0,59

Tabla 2: Modificación de torque según microstepping

En base a lo anterior, se propone utilizar una relación de transmisión de 1:24. Esto se debe a los siguientes criterios:

- Con un microstepping de 1/4 el sistema queda cubierto con un margen de error extra de aproximadamente un 25%

- Se puede realizar fácilmente con una serie de reducciones 1:2; 1:3 y 1:4. Lo cuál reduce el tamaño del sistema.
- Como se vé en la siguiente tabla, para el microstepping 1/4 con una relación de 1:24 el torque final es de 4,592 N.m. Lo cuál es más que suficiente para las prestaciones que debe cumplir el sistema, que son traccionar un filamento fundido y vencer el rozamiento interno propio del mecanismo.

Microstepping	% Torque	T motor [N.m]	T con i = 1:24 [N.m]
1/1	100,0%	0,500	12,000
1/2	70,7%	0,354	8,485
1/4	38,3%	0,191	4,592
1/8	19,5%	0,098	2,341
1/16	9,8%	0,049	1,176
1/32	4,9%	0,025	0,589
1/64	2,4%	0,012	0,293
1/128	1,2%	0,006	0,148

Tabla 3: Microstepping vs torque del motor seleccionado

Finalmente se calcula la duración de cada paso para cumplir con la velocidad mínima, de 0,004 segundos:

TRANSMISIÓN PAP-BOBINA				
Eje	T = 1/f		i	n [RPM]
Total	76,800	seg/rev	1: 24	0,78
E1	19,200	seg/rev	1: 4	3,13
E2	6,400	seg/rev	1: 3	9,38
PAP	3,200	seg/rev	1: 2	18,75
Step	0,004	seg/step		
Step/rev	800			

Tabla 4: Relación de transmisión y pasos del motor

A continuación se muestra cómo queda el sistema diseñado en CAD, en base a todas las consideraciones de diseño mencionadas anteriormente.

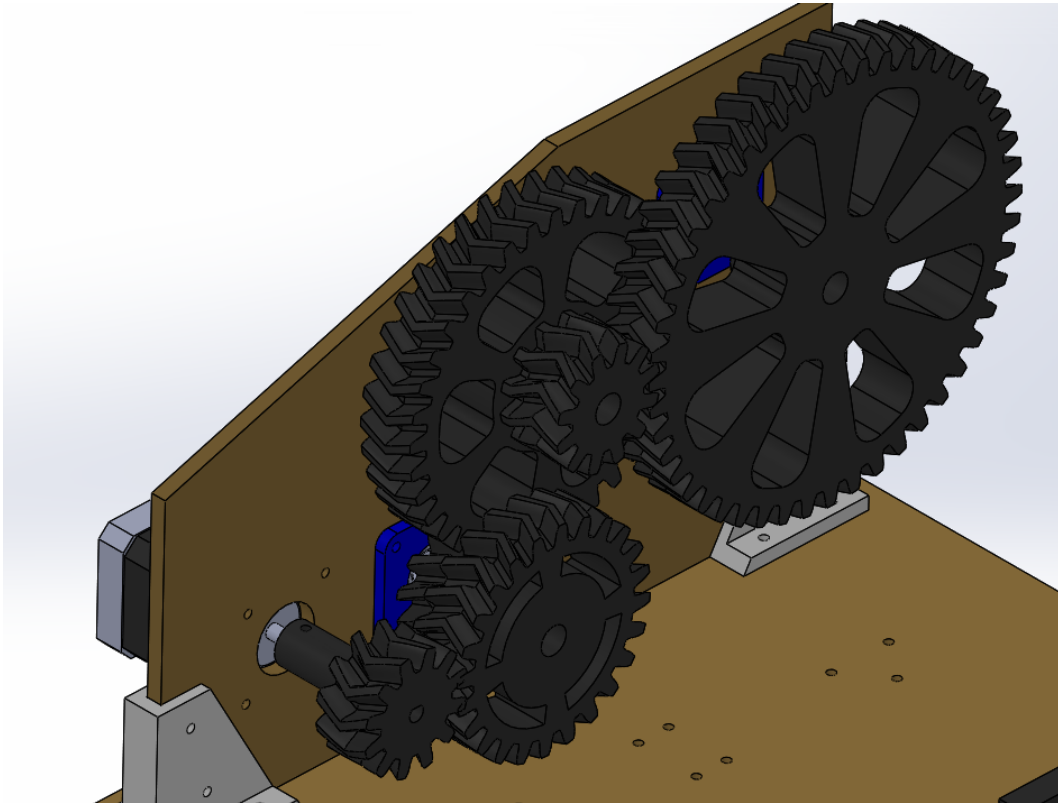


Fig. 12: Imagen isométrica de la cadena cinemática (CAD)

Sistema de acople de carretel

El sistema de acople del carretel puede ser resuelto de diversas maneras:

- Sistema de encastre simple
- Sistema de encastre con fijación a tornillo
- Sistema de rosca izquierda

Sin embargo cada uno de estos sistemas presenta sus ventajas y desventajas. Por ello se decidió analizar cada caso para encontrar la solución más adecuada:

Sistema de acople	Ventajas	Desventajas
Encastre simple	Fácil acople y desacople No requiere herramientas Fácil de fabricar	Puede tender a desplazarse Puede aflojarse por vibraciones
Encastre con fijación por tornillo	Fácil de fabricar Alta estabilidad	Requiere herramienta
A rosca izquierda	No requiere herramienta Alta estabilidad	Difícil fabricación Puede aflojarse por vibraciones

Tabla 5: Comparación de sistemas de acople propuestos

Analizando la tabla comparativa, se considera que la mejor opción es optar por el sistema de encastre con fijación a tornillo. Esto se debe a los siguientes criterios de elección:

- No es propenso a vibraciones, que es un fenómeno que estará presente debido a que el sistema utiliza un motor PAP.
- Es relativamente fácil de diseñar y fabricar
- Si bien requiere una herramienta para montar y desmontar, puede resolverse con una llave Allen.

En base a los criterios ya mencionados, se procede a diseñar el siguiente sistema en CAD:

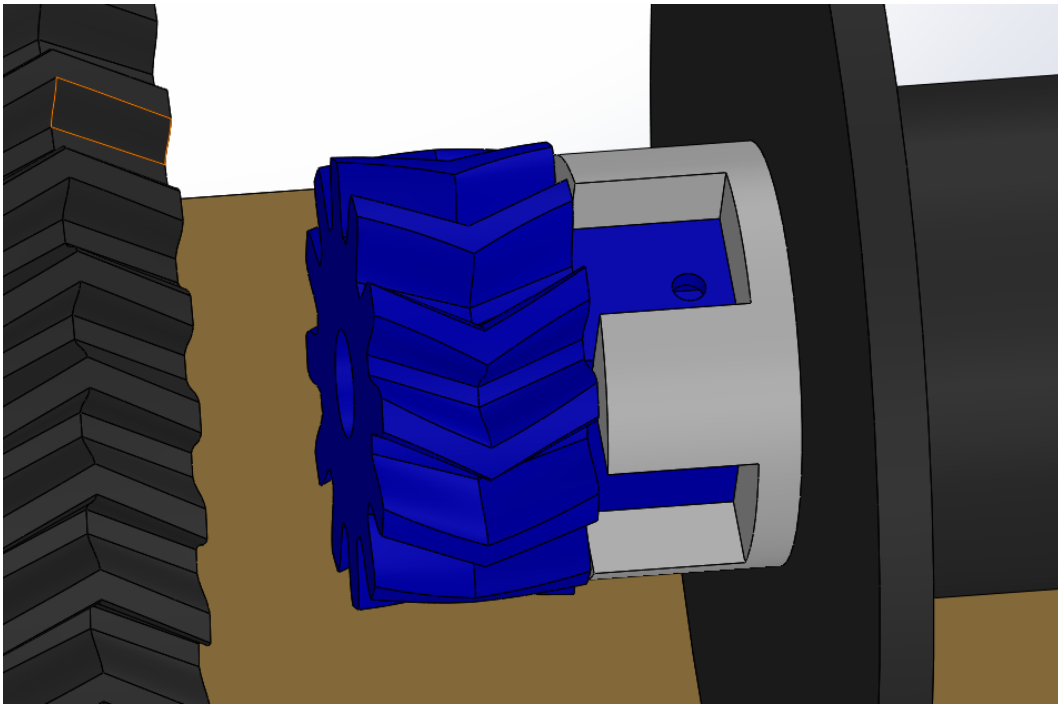


Fig. 13: Imagen del sistema de acople (CAD)

Sistema de bobinado

Como se menciona en la primera parte, para guiar el filamento en el carretel se utiliza un sistema de bobinado paralelo, guiado por un carro montado sobre un tornillo auto reversible. Para ello es necesario calcular de forma correcta la velocidad de avance de dicho carro.

El desplazamiento debe ser equivalente al espesor del filamento por cada vuelta que da el carretel, a modo de garantizar una deposición prolija y constante, a la vez maximizando el empaquetamiento.

A priori, se puede decir que el avance (es decir, el paso del tornillo) debe ser de 1,75 mm. Sin embargo, los tornillos auto reversibles generalmente son de paso mayor, debido a su principio de funcionamiento. Teniendo en cuenta esto, se suma un sistema de reducción para que el tornillo gire a una velocidad menor que el carretel. Se propone una reducción de 1:4, para que el tornillo, con un paso de 8 mm, desplace el carro 2 mm por revolución.

De esta forma, al redondear el avance de 1,75 mm a 2mm se simplifica su diseño y fabricación. Además, la reducción permite agrandar el paso del tornillo.

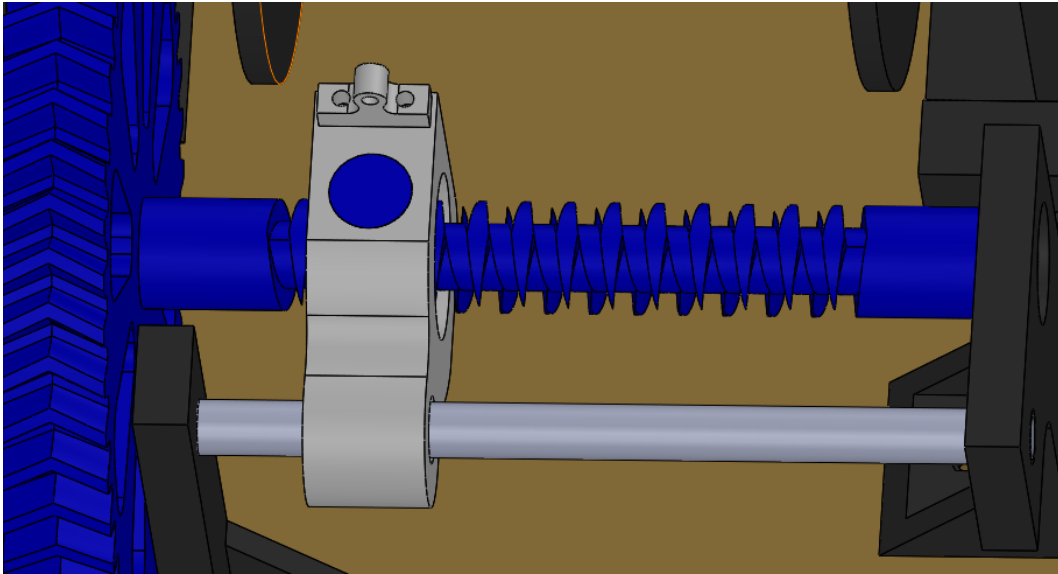


Fig. 13: Imagen del sistema de carro y guía de filamento (CAD)

Fabricación de piezas

En esta sección se detalla todo el proceso de fabricación de las distintas piezas. También se detallan los componentes electrónicos y elementos normalizados.

Corte láser

Se define fabricar por corte láser la base general de la máquina, y la estructura que dará soporte a los rodamientos. El material elegido es MDF, debido a que es relativamente económico y cumple con los requisitos necesarios.

CORTE LASER MDF 5,5MM			
PIEZA	CANT.	COSTO [AR\$ / U\$]	
Soporte rodamientos A	1	\$950	\$2,47
Soporte rodamientos B	1	\$950	\$2,47
TOTAL		\$1.900	\$4,94

Tabla 6: Listado de piezas fabricadas por corte láser

Piezas impresas

A continuación se muestra el detalle de las piezas que fueron impresas en 3D. Se detalla para cada una la cantidad, el color seleccionado, el peso en gramos de material empleado, el tiempo en horas que demora según el Slicer, y el costo en pesos y en dólares norteamericanos teniendo en cuenta precios de mediados de marzo de 2023.

El material empleado es PLA, y la impresora utilizada es un clon RepRap, fabricado de forma particular en el año 2017. Se eligieron los colores blanco, negro y azul en base a gustos personales y disponibilidad al momento de comenzar la etapa constructiva del proyecto.

PIEZA	CANT.	COL.	P [g]	T [h]	COSTO [AR\$ / U\$]	
Piñon nema	1	Negro	18	1,4	\$87	\$0,23
Piñon-Corona 12-24	1	Negro	63	4,1	\$295	\$0,77
Piñon-Corona 12-36	1	Negro	97	6,6	\$458	\$1,19
Corona 48 bobina	1	Negro	128	8,8	\$606	\$1,57
Piñon bobina	1	Azul	19	1,2	\$89	\$0,23
Corona 48 carro	1	Azul	125	8,5	\$591	\$1,53
Acople bobina A	1	Blanco	11	1,1	\$56	\$0,15
Acople bobina B	1	Blanco	13	0,9	\$62	\$0,16
Soporte Rod Interm	1	Negro	31	2,3	\$149	\$0,39
Soporte Rod bobina	1	Negro	29	2,0	\$137	\$0,36
Base sop rod bobina	1	Negro	21	1,5	\$100	\$0,26
Soporte carro A	1	Azul	17	1,4	\$83	\$0,22
Soporte carro B	1	Azul	30	2,3	\$145	\$0,38
Carro	1	Blanco	32	2,1	\$150	\$0,39
Guia carro	1	Azul	2	0,4	\$13	\$0,03
Guia filamento	1	Negro	1	0,3	\$8	\$0,02
Eje autorreversible	1	Azul	26	4,6	\$157	\$0,41
Tapa Rodamiento A	8	Azul	5	0,4	\$24	\$0,06
Tapa Rodamiento B	4	Azul	4	0,4	\$20	\$0,05
Fijación MDF A	2	Blanco	13	1,0	\$63	\$0,16
Fijación MDF B	2	Blanco	20	1,4	\$95	\$0,25
Soporte lateral MDF	2	Blanco	11	1,1	\$56	\$0,15
Base eje PET	1	Blanco	13	1,2	\$65	\$0,17
Freno cinta PET	1	Blanco	8	0,9	\$42	\$0,11
Porta cinta PET	1	Blanco	8	0,9	\$42	\$0,11
Chaveta 3,5x3,5	1	Negro	1	0,3	\$8	\$0,02
TOTAL			836	64,6	\$4.040	\$10,49

Tabla 7: Listado de piezas fabricadas por I3D

Electrónica

Se prioriza utilizar componentes que sean de fácil acceso y relativamente económicos siempre y cuando sea posible. Los componentes más costosos son la fuente de energía, el controlador Arduino, y el motor paso a paso. Sin embargo, estos tres elementos fueron reciclados de un proyecto anterior que se realizó en 2019 para abaratar costos.

ELECTRÓNICA			
PIEZA	CANT.	COSTO [AR\$ / U\$]	
Fuente PC - 12V 250 W	1	\$4.500	\$11,69
Arduino MEGA 2560	1	\$3.000	\$7,79
RAMPS 1.4	1	\$1.190	\$3,09
Driver Pololu A4988	1	\$660	\$1,71
NEMA 17 0,5 N.m - 1,68 A	1	\$5.612	\$14,58
Cable motor NEMA x 1m	1	\$550	\$1,43
LCD I2C 16x2	1	\$2.350	\$6,10
Boton push c/ tapa	1	\$100	\$0,26
Cables dupont x20	1	\$600	\$1,56
Piezo buzzer 5V	1	\$700	\$1,82
Resistencia 10kΩ 1W	1	\$10	\$0,03
Resistencia 470Ω 1W	2	\$10	\$0,03
Led rojo 5mm	1	\$42	\$0,11
Led verde 5mm	1	\$42	\$0,11
Bloque aluminio hotend	1	\$660	\$1,71
Cobertor silicona para bloque	1	\$500	\$1,30
Resistencia 12V 40W	1	\$600	\$1,56
Termistor 100kΩ NTC	1	\$500	\$1,30
Pico 1,2 mm (adaptado a 1,75)	1	\$420	\$1,09
Final de carrera con PCB	2	\$325	\$0,84
TOTAL		\$22.706	\$58,98

Tabla 8: Listado de componentes de electrónica

Elementos normalizados

Se enumeran los elementos de tornillería, barras rectificadas y rodamientos:

TORNILLERÍA				
PIEZA	CANT.	COSTO [AR\$ / U\$]		APLICACIÓN
Allen M3x10	10	\$3.250	\$8,44	Piñones, guía filamento
Allen M3x15	20			Soportes rodamientos
Allen M3x20	55			Tapas rodam, soportes MDF, sosten bloque
Tuercas M3	85			Tornillos M3
Arandela grower M3	85			
SUBTOTAL		\$3.250	\$8,44	
VARILLAS RECTIFICADAS				
PIEZA	CANT.	COSTO [AR\$ / U\$]		APLICACIÓN
Ø10mm x 100mm	2	\$1.300	\$3,38	Trenes de engranajes
Ø10mm x 170mm	1	\$2.210	\$5,74	Guía carro
Ø10mm x 280mm	1	\$3.640	\$9,45	Eje carretel
SUBTOTAL		\$8.450	\$21,95	
BUJES / RODAMIENTOS				
PIEZA	CANT.	COSTO [AR\$ / U\$]		APLICACIÓN
Rodamiento a bolas 26x10x8	10	\$350	\$0,91	Varillas rectificadas
Buje teflonado 10x20	1	\$550	\$1,43	Varillas rectificadas
SUBTOTAL		\$4.050	\$10,52	
TOTAL		\$15.750	\$40,91	

Tabla 9: Listado de elementos normalizados

Imágenes del conjunto

Se muestra una imagen isométrica, y una vista superior indicando las medidas generales. Los planos de conjunto y de las piezas individuales se encuentran en el anexo correspondiente al final del documento.

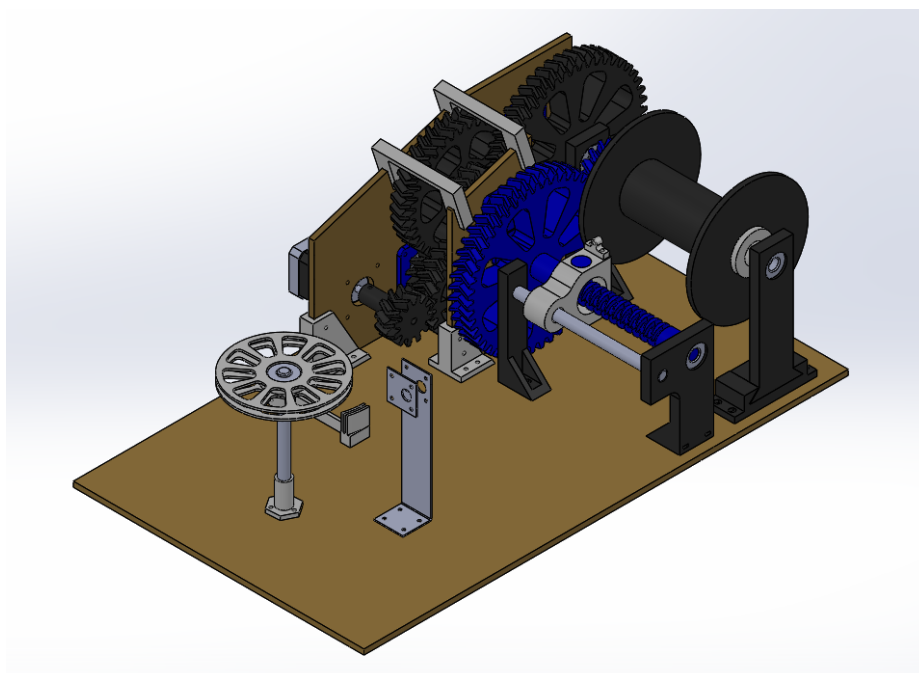


Fig. 14: Vista isométrica del conjunto completo (CAD)

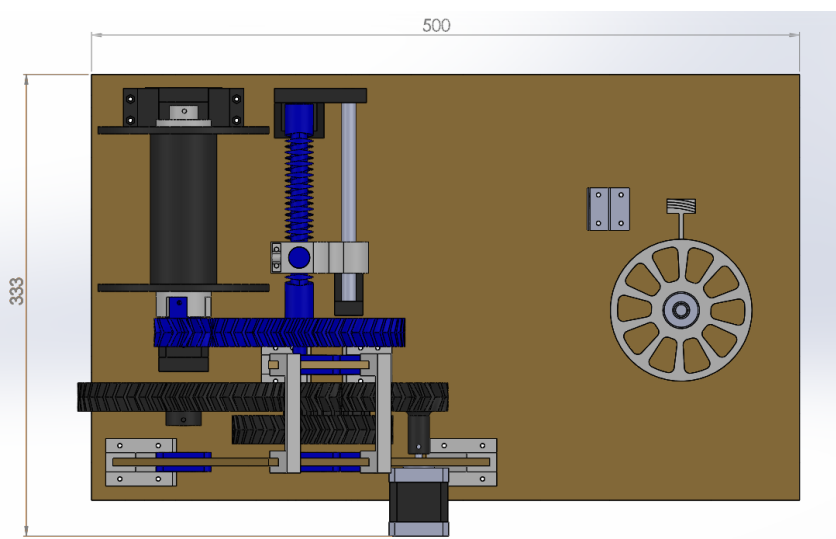


Fig. 15: Vista superior del conjunto completo (CAD)

Fotografías del proceso de armado

Se muestran fotografías del proceso de armado de la máquina:

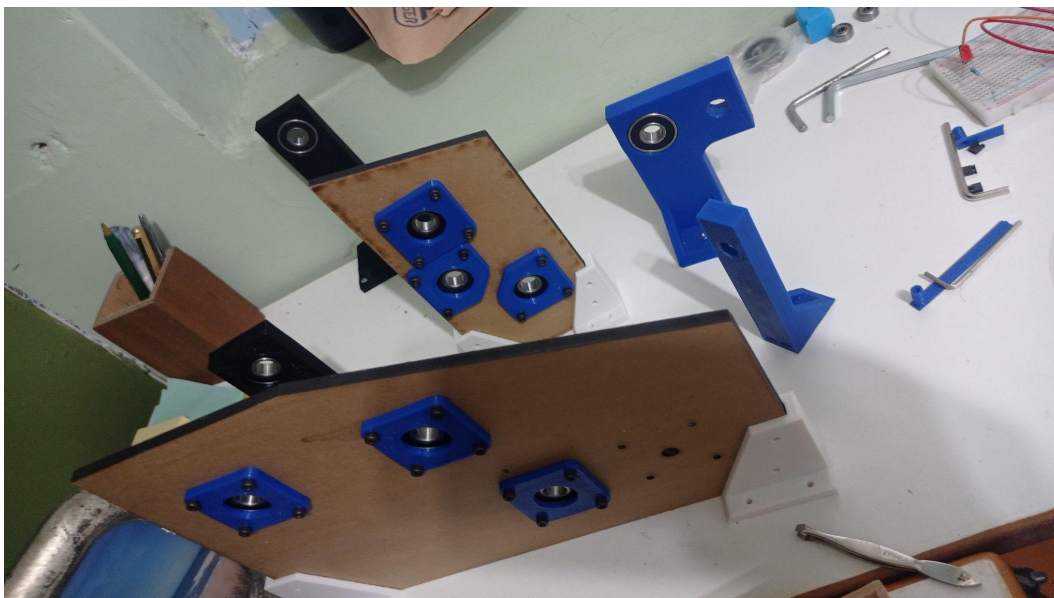


Fig. 16: Comienzo del proceso de ensamblaje



Fig. 17: Piezas impresas en PLA



Fig. 18: Instalación de rodamientos y tuercas con aire caliente

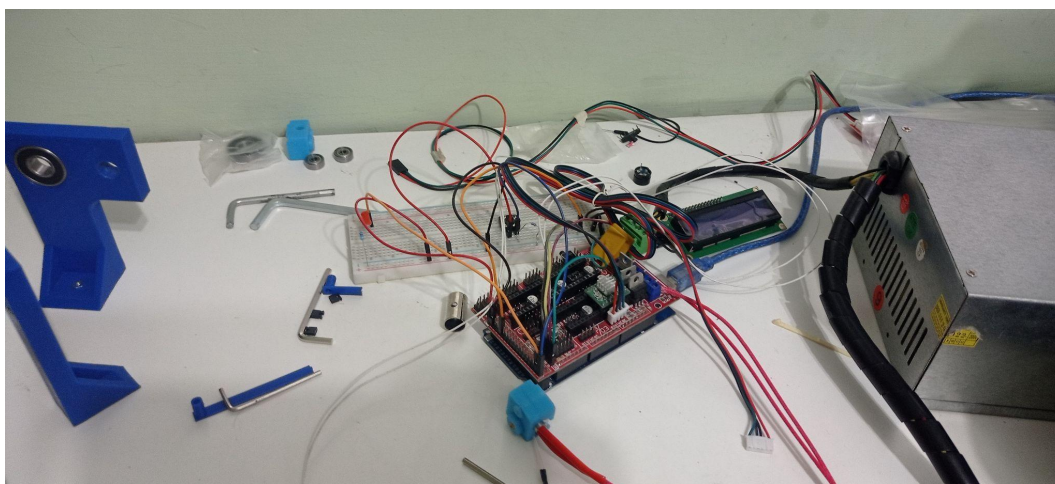


Fig. 19: Armado del sistema electrónico de control en protoboard

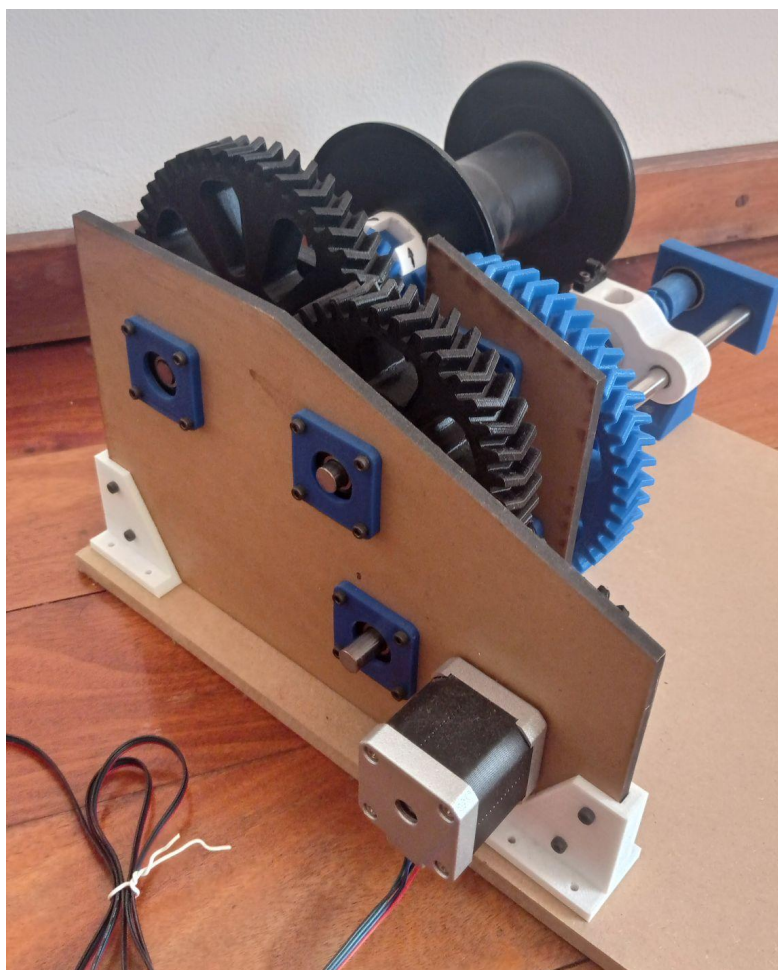


Fig. 20: Sistema motriz montado sobre base (Vista A)

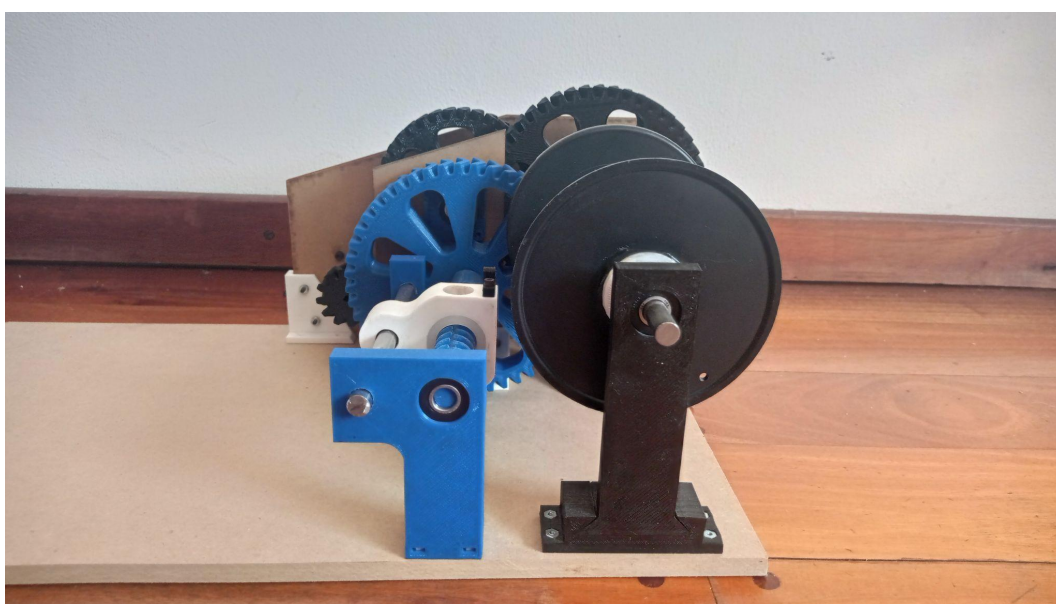


Fig. 21: Sistema motriz montado sobre base (Vista B)

Programación

La programación del controlador se realiza en el programa Arduino IDE, en lenguaje C. Se sigue la lógica presente en el diagrama de flujo visto anteriormente para cada parte del programa. El código fuente se puede encontrar en el anexo correspondiente al final del documento.

Montaje de electrónica

El diagrama de conexiones eléctricas se puede encontrar en el anexo correspondiente al final del documento.

Montaje del mecanismo

La tabla que indica el orden de ensamblado de la máquina recomendado se puede encontrar en el anexo correspondiente al final del documento.

Esto es principalmente una guía para evitar complicaciones (como desalineaciones, pasos innecesarios, etc). No implica que es la única forma posible de montar las distintas partes ni la forma más efectiva o eficiente de hacerlo.

Capítulo 4 - Puesta a punto

En este capítulo se desarrolla todo el procedimiento de puesta a punto de la máquina, es decir, tras concluir el proceso de armado. La puesta a punto abarca todo lo concerniente a calibraciones mecánicas y electrónicas principalmente.

Ensayos

Se realizan varios tipos de ensayos a fin de validar los resultados obtenidos, y diagnosticar si el proceso se desarrolla de forma adecuada. Para ello primero es necesario establecer qué es lo que se busca realmente, y qué es lo que se espera del producto obtenido:

- Obtener un filamento de diámetro constante, con desviaciones acotadas
- Obtener un filamento con una ovalización acotada
- Que dicho filamento sea imprimible. Quiere decir, que pueda fundirse, extruirse, y que puedan adherirse las sucesivas capas entre sí.
- Que las piezas impresas tengan propiedades mecánicas similares a piezas impresas en PET producido industrialmente

Ensayo de consistencia diametral

Se establece el siguiente procedimiento para realizar el ensayo:

Tomar un metro de filamento obtenido, y medir su diámetro en dos ejes perpendiculares, de cinco puntos distintos, separados no menos de 150 milímetros entre sí. Para ello se utiliza un elemento de medición con una apreciación de al menos 0,01 mm, correctamente calibrado. Se recomienda emplear un tornillo de palmer (micrómetro).

Luego se calcula la relación entre los diámetros de cada punto, y la diferencia y desviación estándar entre los puntos.

- La diferencia media respecto al diámetro nominal de 1,75 mm en ninguno de los puntos debe superar los 0,025 mm
- La relación entre diámetros, vinculada a la ovalización, debe ser mayor a 0,98 en todos los puntos

- El promedio de las cinco diferencias medias debe ser menor o igual a 0,02 mm
- La desviación estándar de los diez diámetros debe ser menor o igual a 0,02 mm

A continuación se muestra un ejemplo de lo que sería un control de calidad de un filamento producido:

ENSAYO DIAMETRAL N° xxxx				
Punto	Ø A [mm]	Ø B [mm]	Dif. media [mm]	Relación
A	1,74	1,75	0,005	0,994
B	1,77	1,77	0,020	1,000
C	1,75	1,76	0,005	0,994
D	1,73	1,73	0,020	1,000
E	1,74	1,76	0,000	0,989
Promedio	1,746	1,754	0,010	0,995
Desvío Estándar	0,0141			

Tabla 10: Ejemplo de datos de ensayo diametral

Según lo mencionado anteriormente, el ensayo diametral en este caso estaría aprobado.

Ensayo de imprimibilidad

Se establece el siguiente procedimiento para realizar el ensayo:

Realizar una impresión de prueba del típico barco “benchy” [4] con el material producido. Este modelo es una prueba de impresión muy común en el ámbito del RepRap, y se utiliza para hacer una rápida evaluación de la calidad de impresión que se puede conseguir.



Fig. 22: Barco Benchy

Al imprimir la pieza se evalúa que la misma pueda desarrollarse de principio a fin sin fallas en la extrusión del material. Para eso se deben hacer tres impresiones

dentro del rango de temperaturas a las cuales se suele imprimir el PET, aunque siempre manteniendo la temperatura de la cama a 60 °C:

- T1: 260 °C
- T2: 280 °C
- T3: 300 °C

Las tres impresiones tienen que poder llevarse a cabo de principio a fin, evaluando la calidad final de la impresión. Esta evaluación es cualitativa y no cuantitativa, por lo que dependerá de la pericia y experiencia que tenga la persona que esté evaluando el material

Ensayo mecánico I

Se establece el siguiente procedimiento para realizar el ensayo:

Se diseña una probeta para evaluar la resistencia mecánica de las piezas impresas tanto en PET de producción industrial, como en PET producido por el proceso de reciclado. La misma tiene las siguientes características:

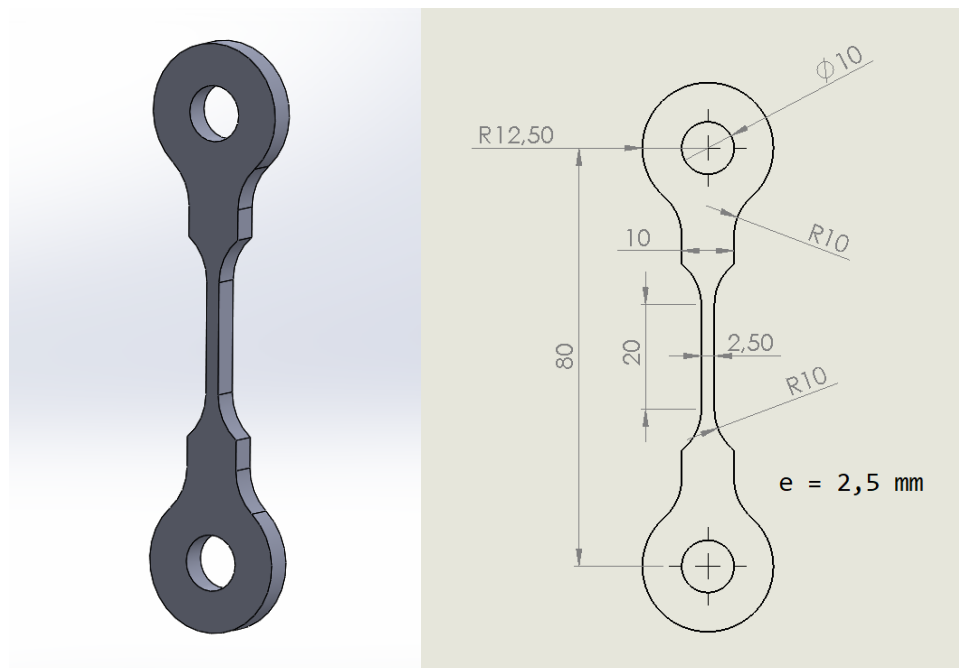


Fig. 23: Probeta de ensayo mecánico I (CAD)

La probeta está diseñada para ser ensayada a la tracción, utilizando un dinamómetro. El objetivo es ver cuál es la carga máxima que resiste antes de la ruptura.

Se imprimen seis en total: tres con PET industrial, y tres con PET reciclado. Se debe seguir para todas ellas un proceso de impresión que cumpla con los siguientes parámetros:

- Pico: 0,4 mm
- Altura de capa: 0,2 mm
- Relleno: Grid
- Porcentaje de relleno: 20%
- Capas sólidas (sup. e inf.): 4
- Perímetros: 2
- Tº de extrusión: 270 °C

El resto de los parámetros queda a discreción del usuario, pero deben ser iguales en las seis piezas impresas para garantizar la mayor integridad posible del ensayo.

El PET tiene una resistencia a la tracción de 11.500 PSI. Es decir, 8,09 kg/mm² aproximadamente según la siguiente fuente [5].

En el mejor de los casos, cuando el material es virgen y la pieza está perfectamente conformada, se pueden esperar valores cercanos al teórico. Quiere decir que la carga máxima que puede soportar la probeta antes de descomponerse sería:

$$A = 2,5 \text{ mm} \cdot 2,5 \text{ mm} = 6,25 \text{ mm}^2$$

$$\sigma = \frac{F}{A} \Rightarrow F = \sigma \cdot A = 8,09 \text{ kg/mm}^2 \cdot 6,25 \text{ mm}^2 = 50,6 \text{ kg}$$

Sin embargo, la misma probablemente sea mucho menor, ya que toda pieza fabricada por I3D tiene propiedades mecánicas muy inferiores a una pieza fabricada por inyección. Esto se debe principalmente a la anisotropía que genera el mismo proceso de fabricación.

Para realizar el ensayo, se traccionan las seis probetas hasta la ruptura, tomando nota del valor de carga última en kg. Se deben anotar dichos valores para cada una de las probetas. Si la diferencia entre el promedio de cargas últimas de las probetas recicladas y las industriales es escaso, se podría decir que las piezas impresas con el material reciclado tienen propiedades mecánicas similares a las piezas impresas con el material comercial.

Se muestra un ejemplo de una tabla de ensayo:

ENSAYO MECÁNICO I		
Probeta	Carga última [kg]	Promedio [kg]
Probeta 1A	35,5	35,5
Probeta 2A	35,3	
Probeta 3A	35,8	
Probeta 1B	30,1	30,3
Probeta 2B	30,5	
Probeta 3B	30,2	
Diferencia [kg]	5,3	
Relación	85,2%	

Tabla 11: Ejemplo de datos de ensayo mecánico I

Ensayo mecánico II

Se establece el siguiente procedimiento para realizar el ensayo:

Se cortan tres tramos de filamento industrial y tres tramos de filamento reciclado de 100 milímetros de longitud. Luego se deben traccionar procedimiento:

Luego se traccionan las seis probetas de filamento hasta la ruptura, tomando nota del valor de carga última en kg. Se deben anotar dichos valores para cada una de las probetas. Si la diferencia entre el promedio de cargas últimas de las probetas recicladas y las industriales es escaso, se podría decir que el filamento reciclado tiene propiedades mecánicas similares al material comercial.

Un ejemplo de la tabla de ensayo sería la siguiente:

ENSAYO MECÁNICO II		
Probeta	Carga última [kg]	Promedio [kg]
Probeta 1C	19,4	19,4
Probeta 2C	19,4	
Probeta 3C	19,5	
Probeta 1D	17,2	17,1
Probeta 2D	17,1	
Probeta 3D	17,1	
Diferencia [kg]	2,3	
Relación	88,2%	

Tabla 12: Ejemplo de datos de ensayo mecánico II

Resultados

En base a los resultados obtenidos en cada tipo de ensayo, se pueden obtener distintas conclusiones. A continuación se detalla un proceso a modo de recomendación para lograr identificar fallas y errores en caso de que uno o más de los ensayos haya resultado desfavorable, a fin de poder localizar el origen del problema.

Todos los ensayos aprobados

Si todas las etapas de ensayos obtuvieron resultados positivos, es decir, que cumplieron con todos los requisitos establecidos, se puede considerar que el filamento posee un nivel relativamente adecuado de calidad, por lo que se considera competente respecto al filamento de producción industrial.

Al menos un ensayo desaprobado

Si dos de las cuatro etapas de ensayos se consideran aprobadas, se puede decir que se obtuvo un filamento de buena calidad, pero no del nivel industrial.

Si sólo un ensayo se encuentra aprobado, el resultado ya no es tan favorable, ya que indica que el filamento obtenido es de baja calidad.

Si falla el ensayo diametral, se deben evaluar los siguientes puntos:

- Verificar consistencia de temperatura de extrusión. Si la misma oscila durante el proceso de producción, puede haber un impacto en el diámetro del filamento.
- Verificar consistencia de calidad de la materia prima. Si la materia prima es irregular en cuanto a espesor, forma, etc; puede generar inconsistencias a la hora de garantizar un flujo constante de material.
- Verificar que el diámetro de boquilla sea el correcto. El uso a largo plazo puede generar un desgaste en la boquilla, aumentando su diámetro y por ende el del material extruido.
- Verificar si los movimientos del motor son suaves y no erráticos. Una sobrecarga mecánica debido a excesivos rozamientos, o atascos, puede generar pérdida de pasos en el motor PAP, lo que resultaría en un giro irregular del carretel.
- Verificar que todos los componentes estén correctamente ajustados. Las vibraciones podrían aflojarlos y producir desalineaciones en algunos componentes.

Si falla el ensayo de imprimibilidad, se deben evaluar los siguientes puntos:

- Verificar si se presentan mejoras al ampliar el rango de temperaturas de impresión en ± 5 °C de las temperaturas T1 y T3 respectivamente.
- Verificar si el material se extruye correctamente, o si presenta dificultades para fluir. Una boquilla tapada puede traer subextrusión, lo cuál genera una pobre calidad de impresión.
- Verificar la presencia de burbujas en el filamento. Esto se puede deber a la presencia de humedad retenida en el plástico, ya que es un material higroscópico. Esto puede generar una pobre terminación superficial en la pieza impresa.

Si falla el ensayo mecánico I, se deben evaluar los siguientes puntos:

- Verificar si se presenta una pobre adhesión de las capas. De ser así probablemente se deba a escasez de temperatura de extrusión.
- Verificar la presencia de burbujas en el filamento. Esto se puede deber a la presencia de humedad retenida en el plástico, ya que es un material higroscópico. Esto puede generar una disminución de las propiedades mecánicas.

Si falló el ensayo mecánico II, se deberán evaluar los siguientes puntos:

- Verificar la calidad de la materia prima. Si el plástico reciclado no es de calidad, puede verse afectado el producto final.
- Verificar inconsistencias en el diámetro del filamento
- Verificar inconsistencias en el aspecto visual del filamento

Ningún ensayo aprobado

Si ningún ensayo es aprobado, corresponde hacer una revisión general de la máquina, mediante un diagnóstico en profundidad para poder establecer las causas que llevaron a tal resultado desfavorable.

Incluso puede plantearse el rediseño conceptual de una o más partes de la máquina, para poder abordar el problema desde otra perspectiva.

Capítulo 5 - Análisis económico

En este capítulo se analiza el aspecto económico del proyecto, sumando subtotales de los elementos vistos anteriormente y considerando las horas de trabajo necesarias.

Finalmente se calcula un tiempo estimado de amortización de la máquina. Esto se realiza en base a la capacidad de producción, y el precio estimado al que se puede comercializar el material producido. También se plantea el rendimiento desde el punto de vista del uso propio, considerando un gasto promedio mensual de filamento y el dinero que se ahorra utilizando el filamento reciclado.

Todo gasto se muestra tanto en pesos argentinos (AR\$) como en dólares estadounidenses (U\$). Esto se debe a la cambiante situación económica del país, y para evitar que se pierda noción de los gastos realizados entre el comienzo y el fin del proyecto. Para referencia, se toma la cotización del dólar MEP, debido a que es el dólar legal de libre acceso disponible sin restricciones. Se propone una tasa de cambio de AR\$ 385 por cada U\$. La cotización es del día lunes 21/03/2023, semana donde se realiza la compra de la gran mayoría de los materiales.

Materiales

A continuación se muestra la suma de los subtotales de cada rubro de materiales, creando un nuevo subtotal.

COSTOS TOTALES		
ÁREA	COSTO [AR\$ / U\$]	
Impresión 3D	\$4.040	\$10,49
Corte láser	\$1.900	\$4,94
Tornillería	\$15.750	\$40,91
Electrónica	\$22.706	\$58,98
SUBTOTAL	\$44.396	\$115,31

Tabla 13: Análisis de costos de materiales

Horas de trabajo

A continuación se suman las horas de trabajo, considerando un precio estimado para cada área. Se considera como los honorarios correspondientes al desarrollo del proyecto, en caso de ser hecho a pedido. Se toma a modo de guía, para tener una noción de un hipotético costo real de desarrollo para un tercero:

HORAS TOTALES			
TAREA	HORAS	COSTO / h [AR\$ / U\$]	
Horas ingeniería	5	\$3.000	\$7,79
Horas gestión	4	\$1.000	\$2,60
Horas CAD	16	\$2.000	\$5,19
Horas programación	5	\$2.000	\$5,19
Horas generación GCODE	1	\$2.000	\$5,19
Horas I3D	65	\$400	\$1,04
Horas mecanizado	5	\$3.000	\$7,79
Horas lijado y pintado	2	\$1.000	\$2,60
Horas armado	4	\$2.000	\$5,19
Horas calibración		\$2.000	\$5,19
HORAS TOTALES	106,95	\$113.850	\$295,71

Tabla 14: Análisis de horas de trabajo

Costos totales

La suma total de los subtotales de materiales y horas de mano de obra, determinan el costo total de la máquina, o bien, un posible precio de venta:

COSTOS TOTALES		
ÁREA	COSTO [AR\$ / U\$]	
Impresión 3D	\$4.040	\$10,49
Corte láser	\$1.900	\$4,94
Tornillería	\$15.750	\$40,91
Electrónica	\$22.706	\$58,98
Mano de obra	\$113.850	\$295,71
PRECIO FINAL	\$158.246	\$411,03

Tabla 15: Costos totales, considerando materiales y mano de obra

Cálculo de amortización

Para calcular la amortización, primero se definen los siguientes puntos:

- Consumo de plástico mensual en Kg
- Precio del filamento por Kg
- Costo de adquisición de botellas
- Botellas necesarias por Kg de filamento
- Costos de electricidad por Kg de filamento producido
- Vida útil de la máquina en horas

Consumo mensual de filamento

El consumo en función del tiempo depende mucho de cada entorno hogareño o de trabajo. Sin embargo se puede plantear la situación de un emprendimiento dedicado al diseño e impresión 3D. Es común que en estos ámbitos se encuentren al menos dos impresoras, trabajando turnos de 8 horas por día.

En promedio, una impresora 3D utiliza entre 5,5 y 7 gramos de filamento por hora de impresión según la fuente consultada [6].

Eso significa que con la situación planteada anteriormente, con 2 impresoras funcionando 8 horas por día, se consumen entre 88 y 112 gramos de filamento diario, lo que da un promedio de 100 gramos por día. Esto implica, que en promedio se consume 1 kg de filamento cada 10 días.

Precio del filamento comercial por kg

A fines de marzo de 2023, 1 kg de PETG (filamento similar al PET) cuesta AR\$ 5.610 (U\$ 14,57) según el producto más vendido de Mercado Libre [7].

Se puede calcular entonces el costo de impresión 3D si se utiliza PETG comercial:

	CONSUMO [g]	GASTO [AR\$]	PRECIO / KG [AR\$ / U\$]	
DIARIO	100	\$561	\$5.610	\$14,57
MENSUAL	2200	\$12.342		

Tabla 16: Estimación de consumo de filamento

Costo de adquisición de botellas

El objetivo es reciclar botellas, comúnmente de bebidas. Se puede colocar un puesto de reciclado por un costo prácticamente nulo, y buscarlas de forma periódica. Esta es una práctica muy común y nada novedosa que se puede aplicar sin problemas.

De manera simbólica, se considera como único costo el traslado para poder retirar las botellas del puesto de recolección, y trasladarlas al puesto de reciclado donde se procesan. Dicho costo contemplado es el de dos pasajes de colectivo para poder transportar la cantidad de botellas necesarias para fabricar 1 kg de filamento. Es decir, a fines de marzo de 2023, AR\$200 o bien U\$0,52.

Rendimiento de botellas

Esto hace referencia a dos puntos:

- Qué porcentaje de la botella es aprovechable
- Cuántas botellas se necesitan para producir cierta cantidad de filamento (por ejemplo, 1 kg)

Respecto al primer punto, se determina pesando botellas plásticas de las marcas más comunes que se encuentran en el ámbito local, y se calcula un promedio. El tamaño de botella que se estudia es de 2,25 L, ya que es un volumen que manejan casi todas las marcas, y es bastante común en el ámbito doméstico. Se hace hincapié en utilizar botellas del mayor tamaño posible para poder aprovechar más el proceso de corte y regeneración de materia prima.

Se pesan botellas de 5 marcas diferentes, sin etiquetas, sin tapa, y completamente vacías. El pesaje se realiza con una balanza con una apreciación de 0,1 g.

Para verificar su correcto funcionamiento, primero se pesa un peso patrón de 25 g proveniente de un juego de pesas de una balanza analítica.

Tras finalizar las pesadas, se obtiene que en promedio una botella de 2,25L pesa aproximadamente 78 g.

A su vez, se calcula el rendimiento de cada botella, teniendo en cuenta que no todo su largo es aprovechable. La parte inferior y superior poseen geometrías muy irregulares y no pueden ser cortadas de forma correcta durante el proceso de generación de materia prima, por lo que dichas partes son descartadas.

Para calcular el rendimiento, se pesa cada botella plástica, y luego se cortan las partes que no son potencialmente utilizables. Luego se pesa la parte restante, y se realiza un cociente.

En la siguiente tabla se muestra un detalle de todos los cálculos anteriores:

BOTELLA	PESO [g]	RENDIMIENTO
A	76,5	0,73
B	80,1	0,78
C	80,5	0,69
D	77,6	0,75
E	75,8	0,76
F	77,0	0,71
PROMEDIO	77,9	0,74

Tabla 17: Peso de distintas botellas plásticas de 2,25L en gramos

Esto resume que en promedio, una botella de PET de 2,25 L vacía, sin etiquetas, y sin tapa pesa 77,9 g. De los cuales se puede aprovechar para hacer filamento el 74%. Es decir, unos 57,6 g.

Con este valor, se avanza a la segunda etapa, que es determinar cuántas botellas hacen falta para generar un kg de filamento. Esto se realiza con un simple cociente:

$$Bot/kg = \frac{1000\text{ g}}{P \cdot \eta} = \frac{1000\text{ g}}{77,9\text{ g} \cdot 0,74} = 17,35\text{ Bot/kg}$$

Redondeando, se estima que se necesitan unas 18 botellas para poder generar un kg de filamento reciclado.

Por otro lado, para poder satisfacer el consumo mensual estimado anteriormente, hacen falta en promedio unas 40 botellas plásticas.

Costo de electricidad por kg de filamento producido

Para calcular esto es necesario contemplar:

- El consumo de la máquina en pleno funcionamiento, en Watts
- El tiempo necesario para procesar 1 kg de filamento
- El precio del kWh según el proveedor de energía eléctrica local

Para el primer punto, se debe medir la corriente solicitada por la fuente, en pleno funcionamiento. Es decir, con el motor PAP girando, y el extrusor caliente. Al realizar la medición, se obtiene una corriente de 0,24 A. Haciendo el siguiente cálculo se puede determinar el consumo:

$$P = \frac{K}{\cos \varphi} = \frac{V \cdot A}{0,7} = \frac{220V \cdot 0,24A}{0,7} = 75,4 W$$

El factor de potencia utilizado (0,7), es un valor típico para fuentes de PC.

Para abordar el segundo punto, es necesario contabilizar el tiempo necesario para generar una cantidad determinada de filamento. Por cuestiones de practicidad, en vez de bobinar un kilogramo completo, se bobina una cantidad arbitraria, durante un lapso de 5 minutos. Al finalizar, se obtienen 11,4 g de filamento. Por ende, se procesa 1 kg de filamento en aproximadamente 7,3 horas.

Para el último punto, se necesita conocer las tarifas actuales del proveedor de energía eléctrica local. En este caso, la EPE (Empresa Provincial de Energía).

A fines de marzo de 2023, el kWh tiene un costo de AR\$ 20,47 según la página de la empresa [8].

Finalmente, se puede determinar que el costo de electricidad final para producir 1 kg de filamento, es de:

$$CF = AR\$20,47 \cdot 7,3 = AR\$ 149,43 \simeq AR\$ 150$$

Costo de amortización

La máquina está compuesta por diferentes elementos, que tienen distintos períodos de vida útil. Los más relevantes son los siguientes:

ELEMENTO	VIDA ÚTIL [h]
Piezas impresas	1.000
Rodamientos	8.300
Motor PAP	10.000
Calentador	10.000
Fuente	90.000
Arduino	180.000

Tabla 18: Vida útil de distintos elementos, en horas

Para los rodamientos, se establece que para bajas cargas, una vida útil típica es de 5.000.000 revoluciones. En base a las velocidades de giro del sistema, se estima en 8.300 h.

El motor PAP, según el fabricante, tiene una vida útil media de entre 10.000 y 20.000 horas. Se propuso el peor escenario.

El calentador tiene una vida útil media de 10.000 horas. Sin embargo, pueden darse fallas prematuras dado que es susceptible a golpes y vibraciones, que cortan la delgada resistencia.

La fuente tiene una vida útil media de 90.000 horas (10 años) según los fabricantes, aunque lo más común es que fallen aleatoriamente debido a golpes de tensión en la red.

El arduino, según el fabricante, tiene una vida útil de 180.000 horas (20 años) ya que se estima que dura entre 20 y 30 años. Sin embargo, al igual que la fuente, lo más común es que fallen prematuramente debido a golpes de tensión en la red.

En cuanto a las piezas impresas, de momento se desconoce la vida útil, ya que no es un elemento normalizado que haya sido sometido a estudios de ese tipo. De todas formas, por sentido común, se puede pensar que va a ser mucho menor que la de los rodamientos, que están fabricados en acero.

En base a la experiencia personal de tener una impresora 3D con un extrusor cuyos engranajes estaban impresos en el mismo material, con parámetros de impresión muy similares, se realiza un estimativo. Dicho extrusor fue utilizado desde la fabricación de la impresora (abril de 2017) hasta la reforma general que se le hizo en junio de 2019. Al momento de reemplazar el extrusor, el mismo presentaba leves signos de desgaste, aunque de momento no afectaba su funcionamiento. Se estima que al momento de la reforma la impresora tenía unas 800 horas de impresión. Considerando que en promedio se hacía una hora de impresión por día (en general, eran dos trabajos de 3 - 4 horas a la semana).

En base a todo lo anterior mencionado, se establece una vida útil de 1.000 horas para los elementos impresos de la cadena cinemática de la máquina.

Luego, se calcula una amortización por hora en base a las ponderaciones de cada vida útil mencionada en el apartado anterior.

Para esto se estima el costo de reemplazo de cada grupo de elementos, y en 10.000 horas de trabajo, cuántas veces tiene que ser reemplazado cada uno.

ELEMENTO	V. ÚTIL [h]	COSTO [AR\$ / U\$]		CADA 10k h [AR\$ / U\$]	
Piezas I3D (móviles)	1.000	\$2.564	\$6,66	\$25.640	\$66,60
Rodamientos	8.300	\$15.750	\$40,91	\$18.976	\$49,29
Motor PAP	10.000	\$5.612	\$14,58	\$5.612	\$14,58
Calentador	10.000	\$600	\$1,56	\$600	\$1,56
Fuente	90.000	\$4.500	\$11,69	\$500	\$1,30
Arduino	180.000	\$3.000	\$7,79	\$167	\$0,43

Tabla 19: Costos de amortización por elemento

La suma total, da un monto de AR\$51.495 o bien U\$134. Es decir, cada 10.000 horas es necesario invertir una cantidad de dinero a modo de reparaciones y mantenimiento cercana a la suma indicada.

Si se hace la relación respecto al tiempo que se demora en producir 1 kg de filamento (7,3 horas), el costo de amortización sería de AR\$38 o bien U\$0,10 aproximadamente.

Costo total por kg de filamento

Finalmente, se calcula el costo total de producir 1 kg de filamento en base a todas las consideraciones anteriores:

COSTO	MONTO/KG [AR\$/U\$]	
Botellas	\$200	\$0,52
Electricidad	\$150	\$0,39
Amortización	\$38	\$0,10
TOTAL	\$388	\$1,01

Tabla 20: Costo final por kg de filamento producido

Al efectuar la comparación, se considera que 1 kg de PETG cuesta en el mercado cuesta AR\$5.610, como se mencionó anteriormente.

La relación de costos determina que producir 1 kg de filamento reciclado cuesta aproximadamente un 7% del precio de 1 kg de filamento comercial de un polímero similar.

Conclusiones y recomendaciones

Conclusión técnica

Se podría concluir que a lo largo del desarrollo del proyecto se ha logrado cumplir de manera satisfactoria con los objetivos propuestos. Se logra abordar las falencias de las máquinas existentes a la vez que se proponen mejoras significativas y efectivas que permiten solventar los problemas identificados. Finalmente, dichas mejoras se logran desarrollar con éxito. Mediante el uso de enfoques innovadores y soluciones creativas, se ha logrado superar los obstáculos y limitaciones previamente observados.

Las mejoras planteadas no solo se centran en la corrección de defectos, sino también en optimizar el rendimiento y la eficiencia de la máquina. Dichas soluciones no sólo resuelven los puntos débiles, sino que también elevan el estándar de calidad y funcionalidad de las mismas.

Desde un punto de vista económico, se consiguen mantener los criterios propuestos previos al desarrollo, garantizando la viabilidad del proyecto para un entorno doméstico. Se considera económicamente viable siempre y cuando el desarrollo sea personal, y no contratado por terceros. Esto se concluye debido a que el costo de mano de obra abarcando horas de diseño, fabricación, calibración, etc; es mucho mayor que el costo de materiales. Ese gran costo puede ser sorteado en el caso de que el proyecto sea desarrollado personalmente por quien quiera tener a disposición la máquina, afrontando solamente el costo de los materiales.

Finalmente, abordando la amortización, se considera un resultado positivo, teniendo en cuenta el bajo costo de producción, y el alto costo del insumo a nivel comercial.

Conclusión personal

Personalmente, considero que, fue una experiencia enriquecedora desde el punto de vista académico, logrando darle un cierre a una extensa carrera en la que crecí tanto como persona como profesional.

Este proyecto de ingeniería ha sido una experiencia emocionante y gratificante, desde el comienzo hasta el cierre. Crea satisfacción ver el fruto del arduo trabajo, dedicación y pasión, desarrollando un tópico que en lo personal es de sumo interés.

Como bien dijo uno de los docentes de la cátedra, “este es mi último trabajo, y a la vez el primero”, refiriéndose a la transición estudiante-ingeniero.

Recomendaciones

Quedan pendientes por realizar algunos avances y modificaciones a la máquina para mejorar aún más su eficiencia, desempeño, y reducir costos. Algunos de esos aspectos a trabajar son: mejorar la calidad de algunos sistemas de montaje, como la base del soporte del carretel; refabricar el tornillo auto reversible para obtener una mejor calidad (por ejemplo, fabricarlo en metal mediante torneado CNC), mejorar cableado, y otros aspectos minoritarios que pueden considerarse como detalles estéticos.

También queda a futuro realizar las calibraciones y pruebas, aunque se deja asentado el método para realizarlas según los estándares propuestos. Esto último puede quedar como una puerta abierta a otro estudiante y/o profesional que en un futuro quiera seguir. En base a esto último, y como cierre final, es necesario recordar que este es un proyecto tiene una orientación al RepRap. Por ende tanto el software como el hardware están abiertos a la comunidad. Esto implica que su orientación facilita actualizaciones y mejoras sin tener que pagar derechos ni pedir permisos especiales.

Bibliografía

[1] P. Stenzel, P. Dollinger, J. Richnow, J. Franke. "Innovative needle winding method using curved wire guide in order to significantly increase the copper fill factor" .

Disponible en:

<https://www.semanticscholar.org/paper/Innovative-needle-winding-method-using-curved-wire-Stenzel-Dollinger/bbfbe00440a98ff29eca8f29166c3d4b37edb2ad>

[2] Record of Polyethylene Terephthalate. GESTIS Substance Database of the Institute for Occupational Safety and Health, accessed on 7 November 2007.

Disponible en: <https://gestis.dguv.de/data?name=530566&lang=en>

[3] Dr. Faulhaber, F. STEPPER MOTOR TECHNICAL NOTE: MICROSTEPPING MYTHS AND REALITIES. Disponible en:

<https://www.faulhaber.com/en/know-how/tutorials/stepper-motor-tutorial-microstepping-myths-and-realities/>

[4] Modelo 3D Benchy. Disponible en: <https://www.thingiverse.com/thing:763622>

[5] R. Fast. Know Your Materials: Polyethylene Terephthalate (PET). Disponible en:

<https://www.fastradius.com/resources/know-your-materials-pet/>

[6] E. Valentin. How Much Filament a 3D Printer Uses on Average - Disponible en:

<https://craftknights.com/how-much-filament-a-3d-printer-uses-on-average>

[7] Publicación de venta Filamento PETG - Grilon3. Disponible en:

<https://articulo.mercadolibre.com.ar/MLA-789170361-filamento-para-impresoras-3d-petg-x-1kg-printalot>

[8] Grilla de tarifas de servicio eléctrico de Rosario, Santa Fe. Disponible en:

https://www.epe.santafe.gov.ar/fileadmin/archivos/Comercial/Clientes/Cuadro_Tarifario_Abril_2023.PDF

Anexo I - Código fuente Arduino

A continuación y hasta el fin del anexo, se muestra el código fuente en C que debe ser cargado en el Arduino Mega.

Se recomienda utilizar el software Arduino IDE para cargar y/o modificar el código.

```
//Reciclador de botellas PET para filamento 3D - 07/03/2023
#include <LiquidCrystal_I2C.h>
#include <Wire.h>
#include <PIDController.h>
//----- BOTONES Y BUZZER -----
#define b1 16    //OK
#define buzzer 45 //Piezo buzzer
//----- CONTROL TEMPERATURA -----
#define heater 10 //Calentador
#define led1 17 //LED calentador
#define T0 A13 //termistor T0 - 100k ohms
PIDController pid;
#define Kp 21.21 // Constante Proporcional
#define Ki 2.31 // Constante Integral
#define Kd 48.64 // Constante Derivativa
float T_obj = 50; //°C
float spread = 1; //margen de temperatura para el bang-bang
int Vo, Tprint;
float R1 = 4700; //Resistencia en serie de la RAMPS
float logR2, R2, T;
float c1 = 2.114990448e-03, c2 = 0.3832381228e-04, c3 = 5.228061052e-07;
//----- MOTOR BOBINADOR [E0]-----
#define E0EN 24
```

```
#define E0ST 26

#define E0DR 28

int delay_0 = 2500; //microsegundos. Considerar microstepping = 2

float step_ciclo = 100; //cuantos pasos avanza por ciclo de movimiento

float i = 0.0416667; //relacion de giro PAP/Bobina 1:X

//----- ENDSTOPs ENCAUSADOR-----

#define endstop_1 14 //Y-MIN

#define endstop_2 15 //Y-MAX

bool dir = 0; //0: avanza; 1: retrocede

bool flag_pausa = 1;

bool flag_endstop_1 = 0;

bool flag_endstop_2 = 0;

float vueltas = 0;

float diam_fil = 1.75; //diametro filamento [mm]

float diam_bob = 51.25; //diametro carretel vacio [mm]

float circunf = 0; //circunferencia actual de bobinado [mm]

float metros = 0; //metros de filamento bobinados hasta el momento

LiquidCrystal_I2C lcd(0x27,16,2);

void setup() {

  lcd.init();

  lcd.backlight();

  lcd.clear();

  //Intro

  lcd.setCursor(1,0);

  lcd.print("Reciclador PET");

  lcd.setCursor(1,1);

  lcd.print("Filamento I3D");

  delay(3000);

  lcd.clear();

  pinMode(b1, INPUT);
```

```
pinMode(buzzer, OUTPUT);
pinMode(E0EN, OUTPUT);
pinMode(E0ST, OUTPUT);
pinMode(E0DR, OUTPUT);
pinMode(heater, OUTPUT);
pinMode(led1, OUTPUT);
digitalWrite(E0DR, HIGH); //Giro bobina sentido horario
digitalWrite(E0EN, LOW);
digitalWrite(heater, LOW);
digitalWrite(led1, LOW);
tone(buzzer, 1000);
digitalWrite(led1, HIGH);
delay(100);
noTone(buzzer);
digitalWrite(led1, LOW);
menu();
}

void menu(){
  bool flag = 0;
  bool pres1 = 0;
  bool pres2 = 0;
  lcd.setCursor(0,0);
  lcd.print("Cargar PET");
  lcd.setCursor(0,1);
  lcd.print("Pres. para cont.");
  while (1)
  {
    if(digitalRead(b1) == HIGH)
      break;
  }
}
```

```
delay(1000);
//Home sistema alineacion bobinado paralelo
digitalWrite(E0DR, LOW); //Giro bobina sentido antihorario
while (1) //retrocede hasta pisar el final de carrera
{
    for(int x0 = 0; x0 < step_ciclo; x0++) //retrocede X pasos
    {
        //Giro bobina
        digitalWrite(E0ST, HIGH);
        delayMicroseconds(delay_0);
        digitalWrite(E0ST, LOW);
        delayMicroseconds(delay_0);
    }
    if(digitalRead(endstop_1) == HIGH)
        break;
}
digitalWrite(E0DR, HIGH); //Giro bobina sentido horario
while (1) //Gira hasta que deja de pisar el final de carrera
{
    for(int x0 = 0; x0 < step_ciclo; x0++) //avanza X pasos
    {
        //Giro bobina
        digitalWrite(E0ST, HIGH);
        delayMicroseconds(delay_0);
        digitalWrite(E0ST, LOW);
        delayMicroseconds(delay_0);
    }
    if(digitalRead(endstop_1) == LOW)
        break;
}
```

```
//calentamiento inicial
lcd.clear();
lcd.setCursor(0,0);
lcd.print("Calentando...");
lcd.setCursor(0,1);
lcd.print("T:");
pid.begin();
pid.setpoint(100); // Limite que el PID desea alcanzar
pid.tune(Kp,Ki,Kd); // Tuneo del PID con argumentos: kP, kI, kD
pid.limit(0, 255);
while (T < T_obj)
{
Vo = analogRead(T0);
R2 = R1 / (1023.0 / (float)Vo - 1.0);
logR2 = log(R2);
T = (1.0 / (c1 + c2*logR2 + c3*logR2*logR2*logR2));
T = T - 273.15; //°C

int output = pid.compute(T); // Computar valor de T actual mediante PID
analogWrite(heater, output);
pid.setpoint(T_obj);
if(T < 100)
lcd.setCursor(3,1);
else
lcd.setCursor(2,1);
lcd.print(T);
lcd.setCursor(5,1);
lcd.print(char(223));
lcd.print(" ");
delay(500);
```

```
}  
  
//Presionar boton para comenzar a bobinar  
  
lcd.clear();  
lcd.setCursor(0,0);  
lcd.print("Fijar filamento");  
lcd.setCursor(0,1);  
lcd.print("Pres. para cont.");  
while (1)  
{  
    if(digitalRead(b1) == HIGH)  
        break;  
    temp_control();  
}  
flag_pausa = 0;  
delay(1000);  
lcd.clear();  
lcd.setCursor(0,0);  
lcd.print("Bobinando...");  
lcd.setCursor(0,1);  
lcd.print("T: ");  
bobinado();  
}  
  
void temp_control(){  
    //Leer temperatura  
    Vo = analogRead(T0);  
    R2 = R1 / (1023.0 / (float)Vo - 1.0);  
    logR2 = log(R2);  
    T = (1.0 / (c1 + c2*logR2 + c3*logR2*logR2*logR2));  
    T = T - 273.15; //°C  
  
    int output = pid.compute(T); // Computar valor de T actual mediante PID
```

```
analogWrite(heater, output);
pid.setpoint(T_obj);

if(flag_pausa == 0)
{
  if(T < 100)
    lcd.setCursor(3,1);
  else
    lcd.setCursor(2,1);
  lcd.print(T);
  lcd.setCursor(5,1);
  lcd.print(char(223));
  lcd.print(" ");
  bobinado();
}
}

void bobinado(){
  //Calculo delay_0
  circunf = 3.1415 * (diam_bob + 2* vueltas * diam_fil);
  for(int x0 = 0; x0 < step_ciclo; x0++) //avanza X pasos
  {
    //Giro bobina
    digitalWrite(E0ST, HIGH);
    delayMicroseconds(delay_0);
    digitalWrite(E0ST, LOW);
    delayMicroseconds(delay_0);
  }

  metros = metros + ((step_ciclo / 200)*circunf)*i; //0.1 vueltas del pap en los 20
  pasos que avanza. i = 1:24

  lcd.setCursor(8,1);
```

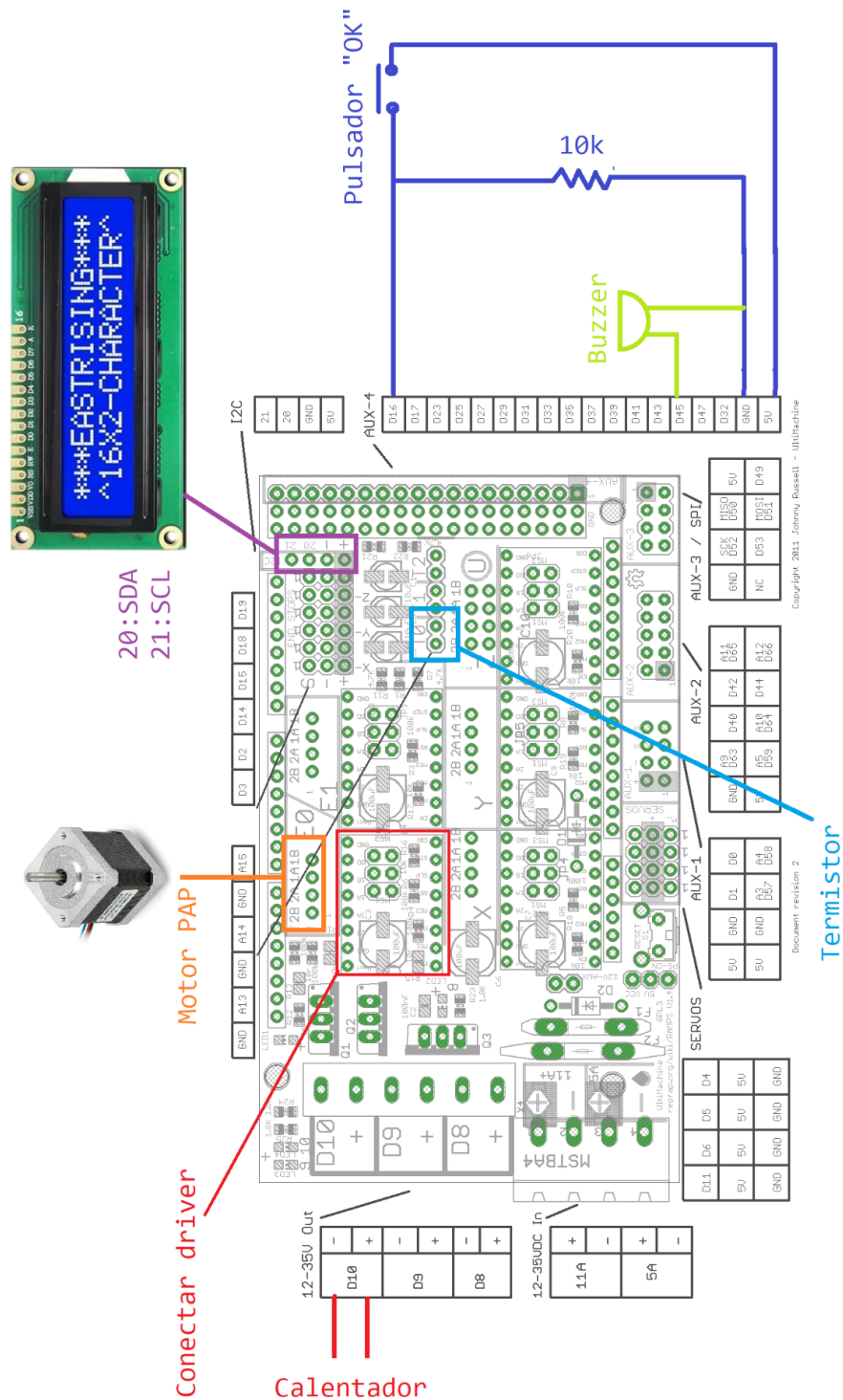
```
lcd.print(metros);
lcd.print(" m");
//deteccion flanco negativo endstop --> se completó una vuelta
if(digitalRead(endstop_1) == HIGH)
    flag_endstop_1 = 1;
if(digitalRead(endstop_2) == HIGH)
    flag_endstop_2 = 1;
if(flag_endstop_1 == 1 && digitalRead (endstop_1) == LOW)
{
    vueltas ++;
    flag_endstop_1 = 0;
}
if(flag_endstop_2 == 1 && digitalRead (endstop_2) == LOW)
{
    vueltas ++;
    flag_endstop_2 = 0;
}
temp_control();
}
void loop()
{}

//Fin del programa
```

Anexo II - Diagramas electrónicos

A continuación se muestra un esquema de conexiones entre la RAMPS y los distintos elementos del circuito.

RAMPS 1.4 (RepRap Arduino MEGA Pololu Shield) GPL v3
reprap.org/wiki/RAMPS1.4



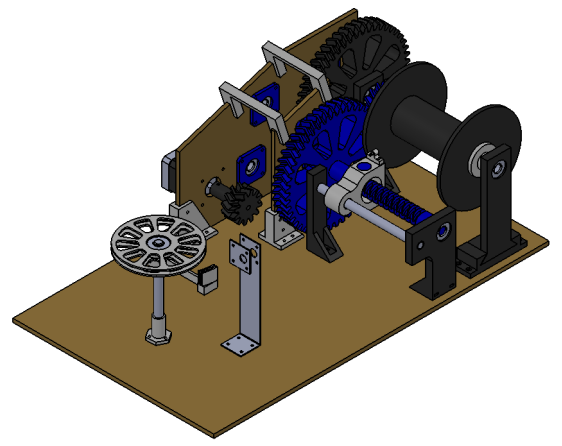
Anexo III - Montaje del mecanismo

A continuación se muestra una tabla enunciando un orden de ensamblado recomendado. No es la única forma posible de montar el conjunto, pero es una recomendación comprobada.

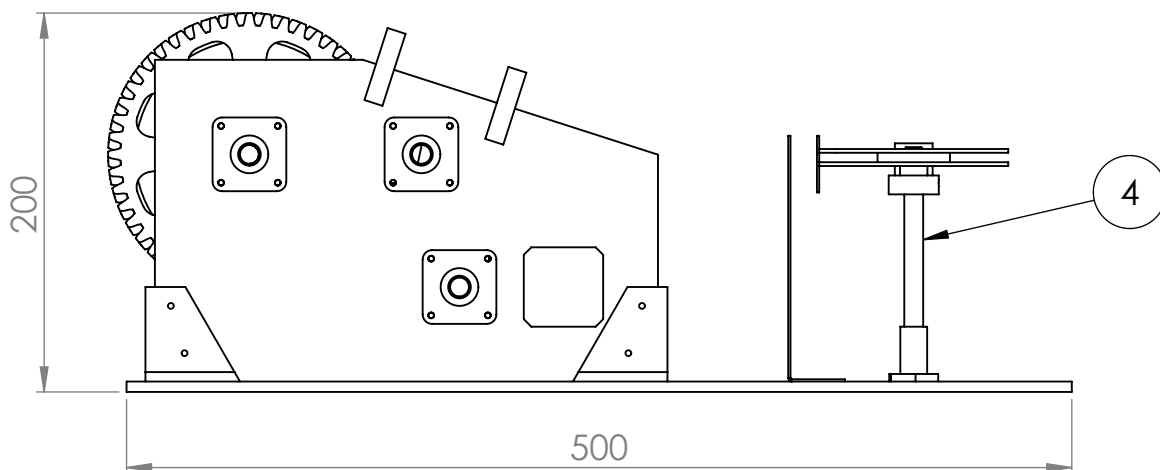
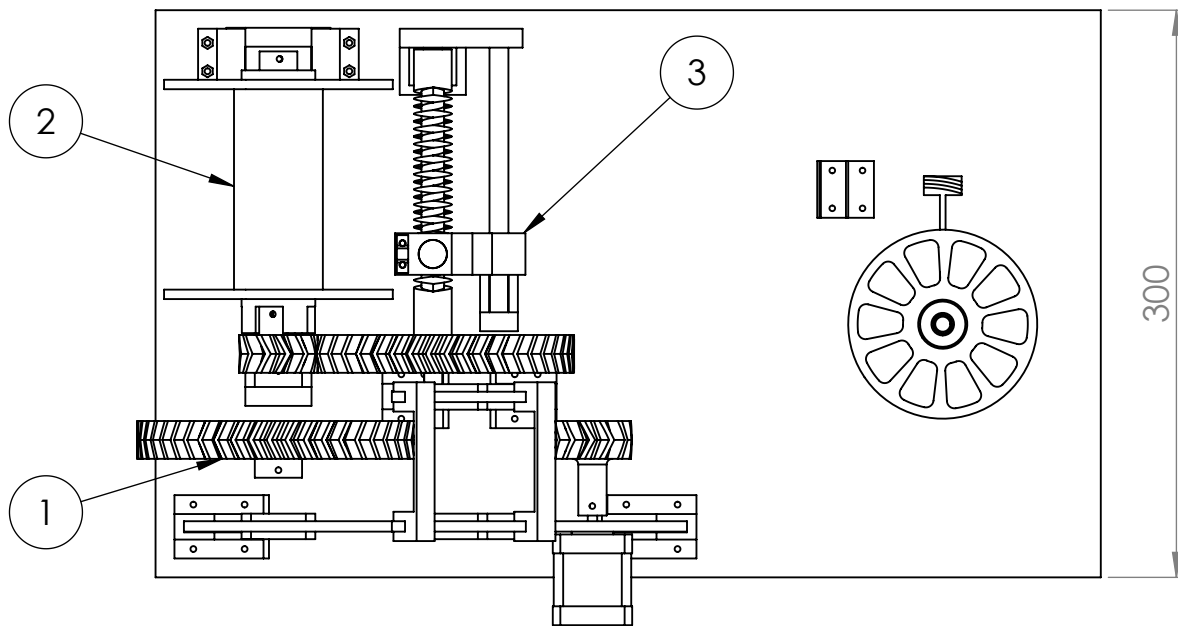
ORDEN DE ENSAMBLADO	
#	OPERACIÓN
1	Clavar tuercas en piezas impresas con uso de pistola de aire caliente
2	Clavar buje teflonado en carro con uso de pistola de aire caliente
3	Clavar rodamientos en piezas impresas con uso de pistola de aire caliente
4	Montar "Fijación MDF A" en "Soporte rodamientos A"
5	Montar "Fijación MDF B" en "Soporte rodamientos B"
6	Montar rodamientos en alojamientos de "Soporte rodamientos A", colocando las "Tapas de rodamiento A".
7	Montar rodamientos en alojamientos de "Soporte rodamientos B", colocando las "Tapas de rodamiento B".
8	Montar "Soporte rodamientos A" en "Base"
9	Montar motor PAP en "Soporte rodamientos A"
10	Pasar ejes rectificados de transmisión con sus engranajes correspondientes montados por los alojamientos de los rodamientos
11	Montar "Soporte rodamientos B" en "Base"
12	Pasar carretel con sistema de fijación por el alojamiento correspondiente
13	Colocar "Soporte de rodamiento de bobina" en "Base"
14	Montar "Soporte Carro A" en "Base"
15	Montar el carro en el eje rectificado correspondiente
16	Montar el carro en el tornillo autorreversible
17	Pasar el eje rectificado y el tornillo autorreversible por los alojamientos correspondientes
18	Montar "Soporte Carro B" en "Base"
19	Montar sistema de extrusor en "Base"
20	Montar sistema de alimentación de plástico en "Base"
21	Montar caja con electrónica en "Base"
22	Realizar las conexiones eléctricas

Anexo IV - Planos de conjunto y definición

A partir de la siguiente página y hasta el fin del anexo, se muestran los planos de conjunto de la máquina, así como de los subconjuntos principales.



VISTA ISOMÉTRICA - ESCALA 1:8



4	SUBCONJ. ALIMENTACIÓN
3	SUBCONJ. CARRO
2	SUBCONJ. CARRETEL
1	SUBCONJ. MOTRIZ

DIBUJÓ: PAGANO, FRANCO A.
PROYECTO FINAL DE INGENIERÍA MECÁNICA

BOBINADORA

00

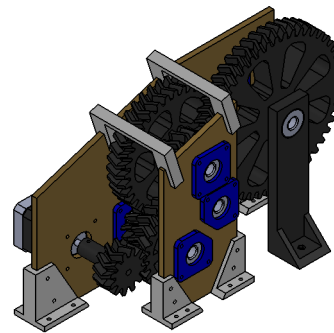
MATERIAL: VARIOS

MEDIDAS EN mm

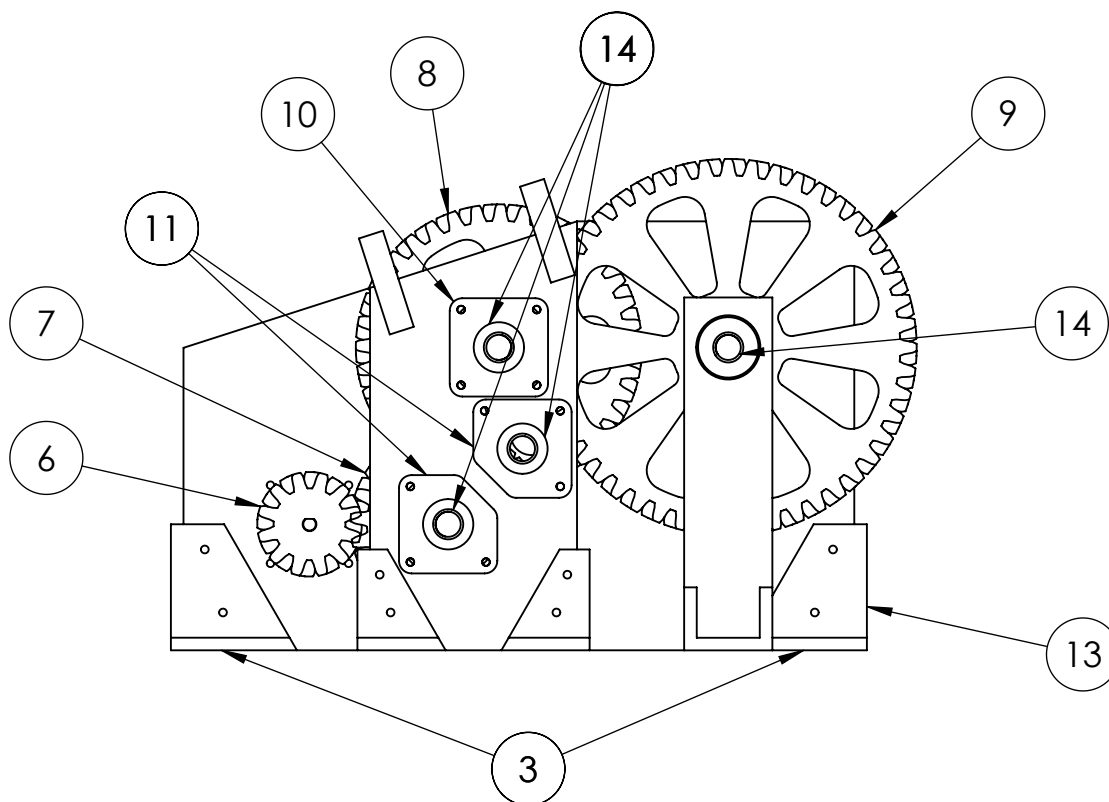
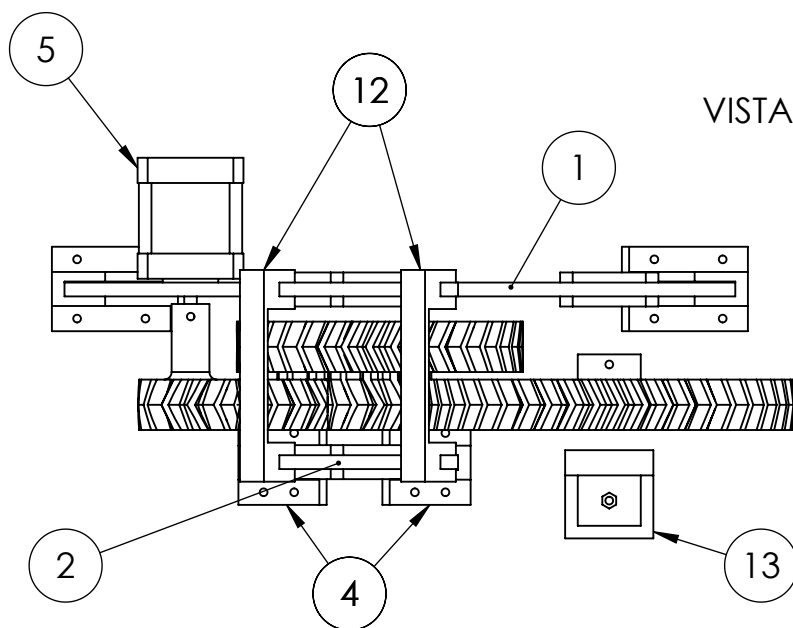
EIM - FCEIA - UNR

ESCALA 1:4

FECHA: 15/06/2023



VISTA ISOMÉTRICA - ESCALA 1:6



6	PIÑÓN MOTOR PAP (Z=12)	12	SOPORTE LATERAL MDF		
5	MOTOR PAP NEMA 17	11	TAPA RODAMIENTOS B		
4	FIJACION MDF B	10	TAPA RODAMIENTOS A		
3	FIJACIÓN MDF A	9	CORONA BOBINA (Z=48)		
2	SOPORTE RODAM. B	8	PIÑÓN-CORONA (12-36)	14	RODAM. A BOLAS 26x10x8
1	SOPORTE RODAM. A	7	PIÑÓN-CORONA (12-24)	13	SOPORTE INTERMEDIO BOB.

DIBUJÓ: PAGANO, FRANCO A.

PROYECTO FINAL DE INGENIERÍA MECÁNICA

SUBCONJ. MOTRIZ

01

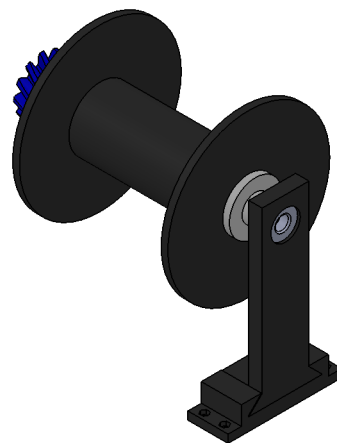
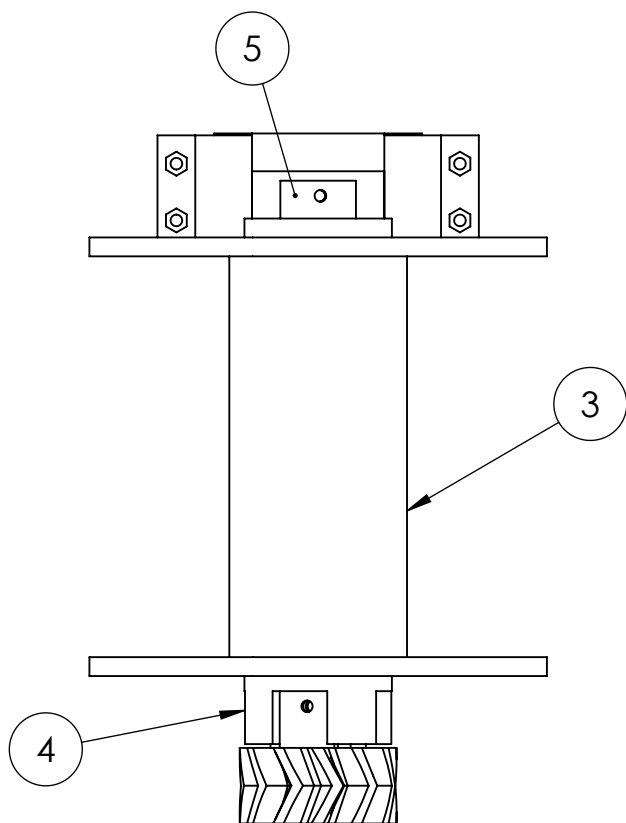
MATERIAL: VARIOS

MEDIDAS EN mm

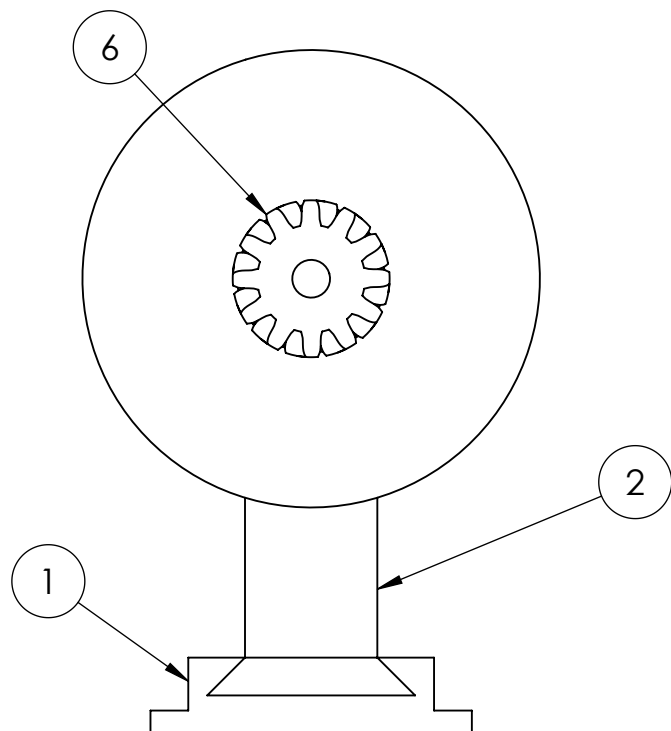
EIM - FCEIA - UNR

ESCALA 1:4

FECHA: 15/06/2023



VISTA ISOMÉTRICA - ESCALA 1:4



3	CARRETEL	6	PIÑÓN BOBINA (Z=12)
2	SOPORTE ROD. BOBINA	5	ACOPLE BOBINA B
1	BASE SOP. ROD. BOBINA	4	ACOPLE BOBINA A

DIBUJÓ: PAGANO, FRANCO A.
PROYECTO FINAL DE INGENIERÍA MECÁNICA

SUBCONJ. CARRETEL

02

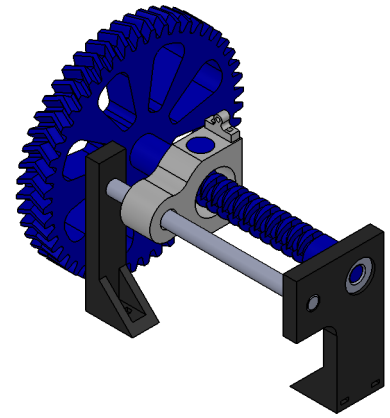
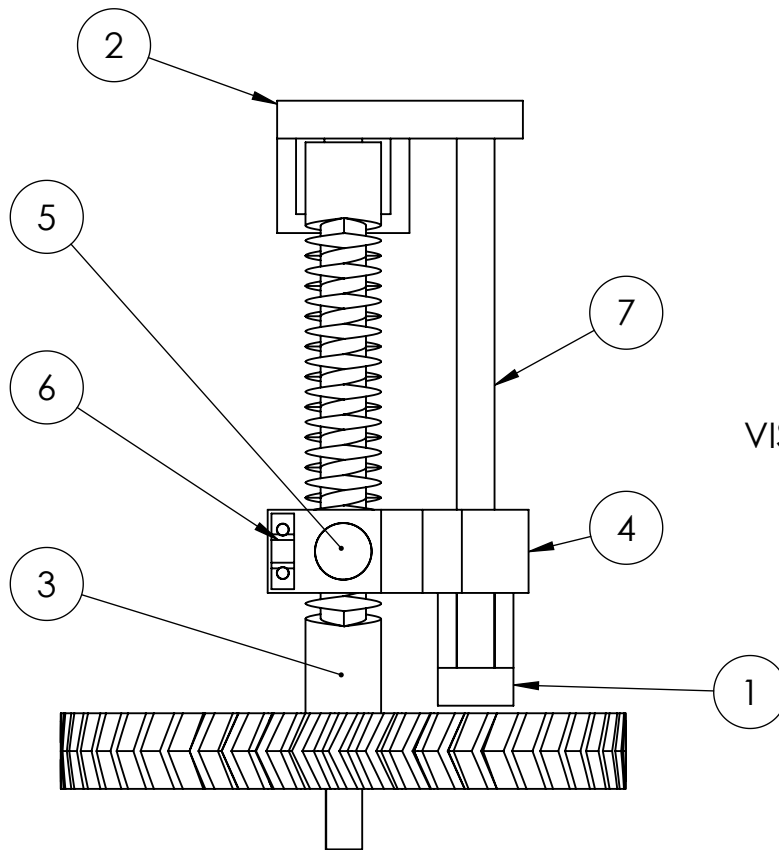
MATERIAL: VARIOS

MEDIDAS EN mm

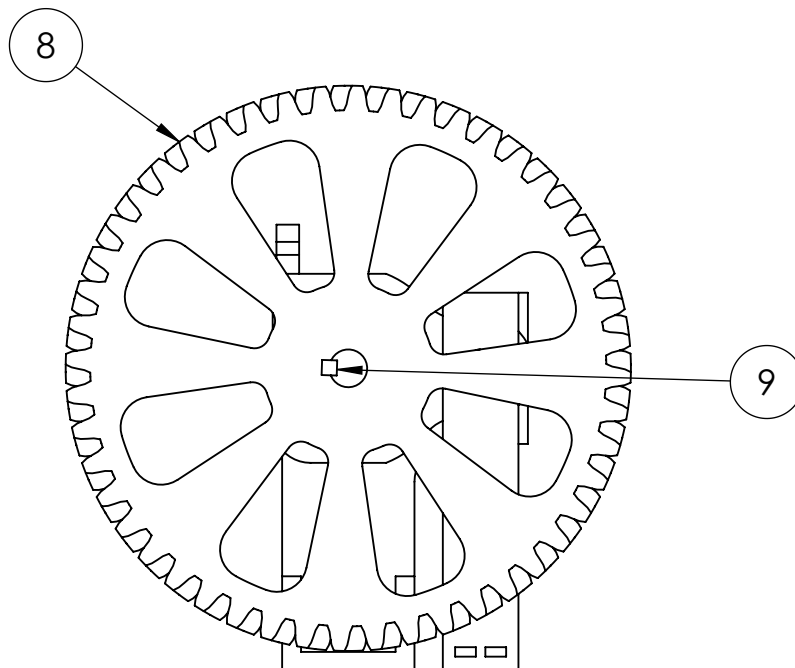
EIM - FCEIA - UNR

ESCALA 1:2

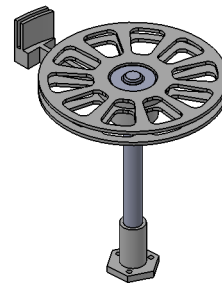
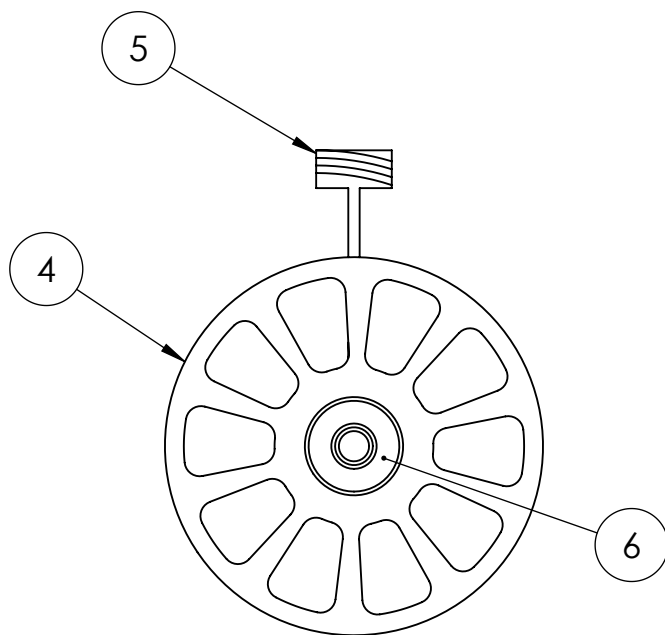
FECHA: 15/06/2023



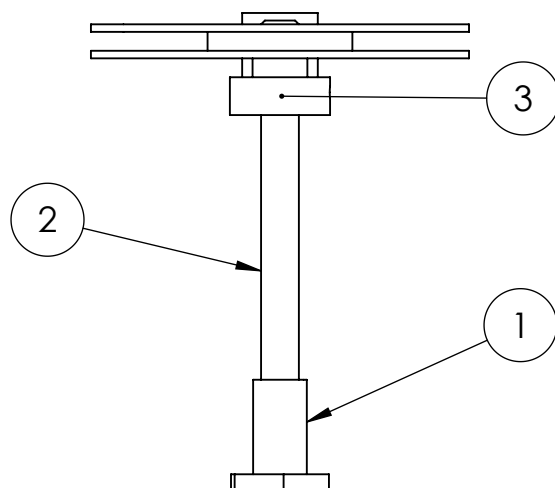
VISTA ISOMÉTRICA - ESCALA 1:5



3	TORNILLO AUTORREVERSIBLE	6	GUÍA FILAMENTO	9	CHAVETA 3,5x3,5x15	
2	SOPORTE CARRO B	5	GUÍA TORNILLO	8	CORONA CARRO (Z=48)	
1	SOPORTE CARRO A	4	CARRO	7	EJE CARRO	
DIBUJÓ: PAGANO, FRANCO A.			SUBCONJ. CARRO		03	
PROYECTO FINAL DE INGENERÍA MECÁNICA						
MATERIAL: VARIOS		MEDIDAS EN mm		EIM - FCEIA - UNR	ESCALA 1:2	FECHA: 15/06/2023



VISTA ISOMÉTRICA - ESCALA 1:4



3	FRENO PORTA-CINTA	6	ROD. A BOLAS 26x10x8
2	EJE ALIMENTADOR	5	GUÍA DE ALIMENTACIÓN
1	BASE	4	PORTA-CINTA

DIBUJÓ: PAGANO, FRANCO A.
PROYECTO FINAL DE INGENIERÍA MECÁNICA

SUBCONJ. ALIMENTACIÓN

04

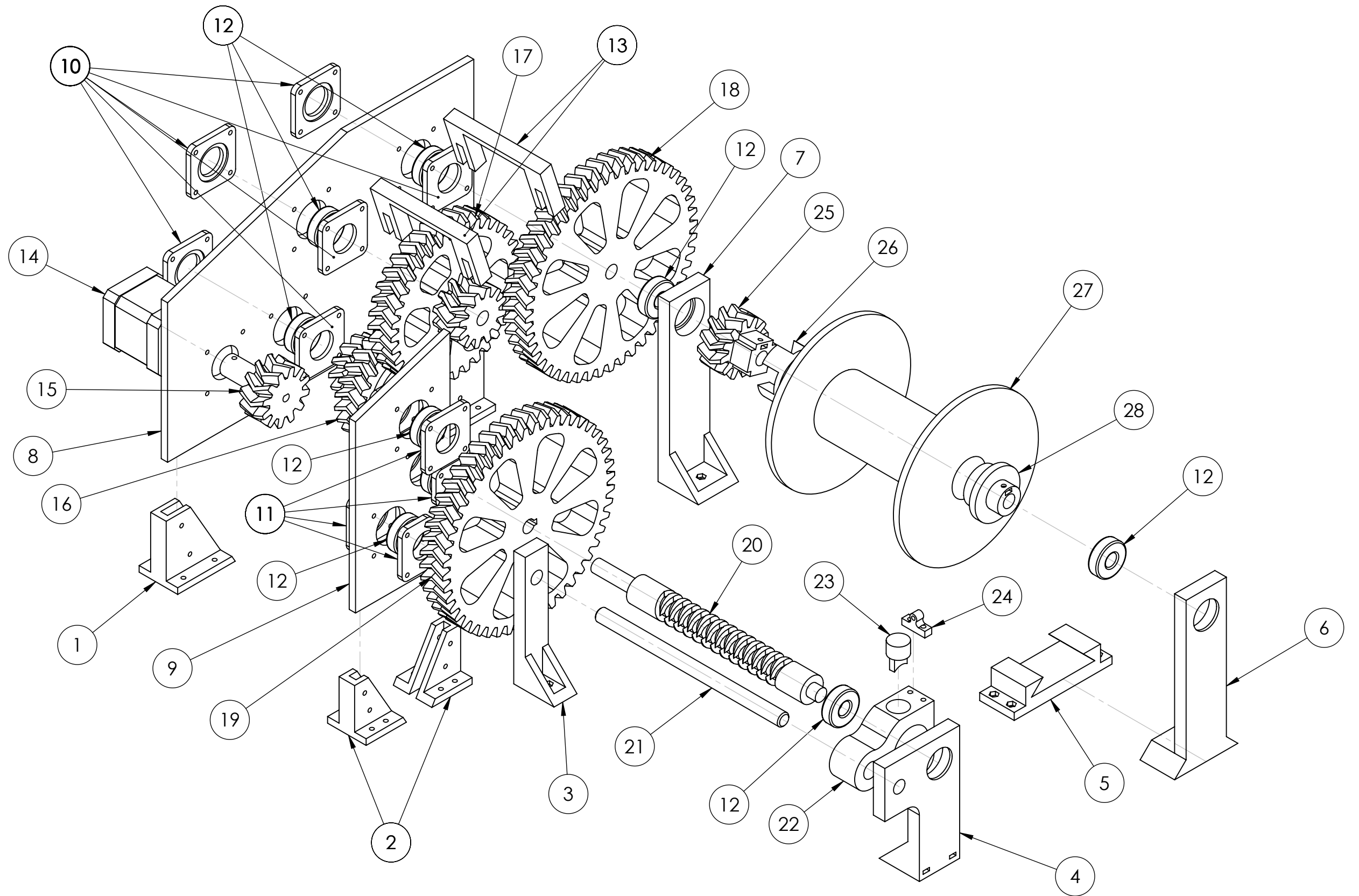
MATERIAL: VARIOS

MEDIDAS EN mm

EIM - FCEIA - UNR

ESCALA 1:2

FECHA: 15/06/2023



10	TAPA RODAMIENTOS A	20	TORNILLO AUTORREVERSIBLE		
9	SOPORTE RODAM. B	19	CORONA CARRO (Z=48)		
8	SOPORTE RODAM. A	18	CORONA BOBINA (Z=48)	28	ACOPLE BOBINA B
7	SOPORTE INTERMEDIO BOB.	17	PIÑÓN-CORONA (12-36)	27	CARRETEL
6	SOPORTE ROD. BOBINA	16	PIÑÓN-CORONA (12-24)	26	ACOPLE BOBINA A
5	BASE SOP. ROD. BOBINA	15	PIÑÓN MOTOR PAP (Z=12)	25	PIÑÓN BOBINA (Z=12)
4	SOPORTE CARRO B	14	MOTOR PAP NEMA 17	24	GUÍA FILAMENTO
3	SOPORTE CARRO A	13	SOPORTE LATERAL MDF	23	GUÍA TORNILLO
2	FIJACIÓN MDF B	12	RODAM. A BOLAS 26x10x8	22	CARRO
1	FIJACIÓN MDF A	11	SUBCONJ. MOTRIZ	21	EJE CARRO

DIBUJÓ: PAGANO, FRANCO A.

PROYECTO FINAL DE INGENIERÍA MECÁNICA

MATERIAL: VARIOS

MEDIDAS EN mm

VISTA EXP. SIST. MOTRIZ

05

EIM - FCEIA - UNR

ESCALA 1:4

FECHA: 15/06/2023