

Trabajo Fin de Grado

Diseño de extrusor multimaterial para
impresora 3D
Multi-material extruder design for 3D printer

Autor

David Prades Monreal

Director

Daniel Mercado Barraqueta

Grado en Ingeniería Mecánica
Escuela de Ingeniería y Arquitectura, Universidad de Zaragoza
Diciembre 2021



Diseño de extrusor multimaterial para impresora 3D

Resumen

En este proyecto se plantea el diseño de un sistema directo de extrusión multimaterial para impresora 3D, que permita accionar por independiente dos hilos de material plástico y así producir su extrusión a través de las boquillas.

En primer lugar, se realiza un análisis de mercado, para así conocer el tipo de tecnologías de impresión que se pueden encontrar y cuál utilizan más habitualmente las impresoras domésticas (tecnología FDM, *Fused Deposition Modelin*) y saber que sistemas de extrusión se pueden encontrar en las impresoras que utilizan el modelado por deposición de material fundido.

Una vez conocido qué se puede encontrar en el mercado y sabiendo cuál es el objetivo que se busca con este proyecto, se plantean cuáles van a ser los principales problemas a los que se va a tener que hacer frente para satisfacer los objetivos propuestos y se ofrece una posible solución. Esta solución busca usar un único motor, con el fin de reducir el peso, que accione dos sistemas de extrusión directo, permitiendo usar dos materiales distintos, y que estos dos sistemas sean independientes y tengan la capacidad de ajustar la altura de las boquillas.

A continuación, se seleccionan los componentes comerciales que se utilizarán y cuáles serán diseñados íntegramente. Teniendo en cuenta en ese diseño, que el extrusor ha de ser capaz de poder trabajar con filamentos flexibles al tratarse de un sistema directo, que la disposición del extrusor debe facilitar el correcto engrane y desengrane del piñón y rueda dentada de cada uno de los extrusores, cumpliendo así con el accionamiento independiente de cada hilo y que las boquillas de extrusión deben poder ser regulables en altura, para lo que se plantea un mecanismo que permita conmutar entre una u otra.

Finalmente, se simula el mecanismo que realiza el cambio entre una u otra boquilla con el software de diseño CREO Parametric, con el objetivo de conocer si la solución que se ha planteado sería posible, obteniendo para ello la cinemática y la dinámica del mecanismo.



Tabla de contenidos

Resumen	1
1. Introducción	4
1.1. Objetivo.....	4
1.2. Alcance	4
2. Análisis de mercado.....	6
2.1. Modelado por deposición de material fundido (FDM).....	6
2.2. Sistemas de extrusión	9
2.2.1. Definición y componentes de un sistema de extrusión	9
2.2.2. Extrusores directos e indirectos o Bowden	11
2.3. Sistemas motrices	13
2.4. Sistemas multimaterial	14
2.5. Conclusiones del apartado.....	16
3. Planteamiento de problemas y posibles soluciones	17
3.1. Problemática de la altura de las boquillas.....	17
3.2. Problemática de tamaños	18
3.3. Problemática del peso	19
3.4. Problemática para generar los cuatro movimientos	20
4. Desarrollo de la solución	22
4.1. Justificación del uso de elementos comerciales.....	22
4.1.1. Rodamientos del eje de tracción	22
4.1.2. Rodamientos de presión.....	23
4.1.3. Motor	23
4.1.4. Servo	24
4.1.5. Hotend	24
4.1.6. Muelle	25
4.1.7. Piñón	25
4.1.8. Rueda dentada y rueda de tracción	26
4.1.9. Ventiladores de refrigeración.....	26
4.1.10. Ruedas del soporte	27
4.2. Elementos diseñados	27
4.2.1. Soporte del conjunto	27
4.2.2. Base y tapa del extrusor	28
4.2.3. Barra del mecanismo	30
4.2.4. Adaptador para el hotend	30
4.2.5. Taco del rodamiento de presión	31
4.2.6. Soporte de los ventiladores.....	31
4.2.7. Placa de fijación a la guía.....	32
4.2.8. Separadores de nylon	32
4.2.9. Pilaretes del servo	33
4.3. Sistema de un extrusor	33
4.4. Engrane de los extrusores.....	34
4.5. Sistema de translación de las boquillas	37
4.5.1. Análisis de fuerzas que intervienen.....	41



4.6.	Resultados obtenidos	42
4.6.1.	Tamaño conseguido	42
4.6.2.	Peso conseguido	44
4.6.3.	Altura de las boquillas y generación de los cuatro movimientos conseguido.....	45
5.	Simulación con CREO Parametric	46
6.	Conclusiones y desarrollos futuros.....	56
7.	Bibliografía.....	59
Anexos	62
Anexo 1.	Cálculo a flexión de los engranajes	62
Anexo 2.	Análisis de las fuerzas que intervienen en el mecanismo	68
A2.1.	Determinación del coeficiente de rozamiento	68
A2.2.	Determinación de la fuerza de rozamiento	68
A2.3.	Cálculo del momento motor en la posición más desfavorable.....	70
A2.4.	Cálculo del momento motor en la posición vertical del brazo del servo.....	73
Anexo 3.	Programa para el cálculo de la cinemática y dinámica	77
Índice de figuras	98
Índice de tablas.....		101



1. Introducción

La motivación de este proyecto se debe a la continua evolución en el mundo de la impresión 3D que ha tenido lugar en estos últimos años, sobre todo desde la aparición de modelos de impresoras 3D para usuarios aficionados, que utilizan el modelado por deposición de material fundido (FDM, *Fused Deposition Modelin*), y que permiten con un bajo coste, con una gran variedad de materiales disponibles y en relativamente poco tiempo obtener cualquier tipo de pieza (con una buena calidad) para infinidad de aplicaciones en el ámbito de la ingeniería (prototipos, piezas a medida, repuestos, etc.) o en muchos otros ámbitos, como es el caso de la medicina (diseño de prótesis), la educación o incluso en el mundo de la alimentación. El hecho de que estas impresoras sean asequibles para casi cualquier usuario, permite que la tecnología de las mismas se desarrolle más rápido, ya que cada uno puede aportar mejoras o modificaciones a un modelo de impresora, como es el caso de este proyecto.

1.1. Objetivo

El objetivo de este proyecto es plantear el diseño de un sistema de extrusión multimaterial directo para poder ser acoplado a una impresora 3D. Este sistema ha de ser capaz de accionar de manera controlada y por independiente dos hilos de material plástico de 1,75 mm de diámetro en ambas direcciones, para producir su extrusión a través de las boquillas o su retracción. Al tratarse de un elemento que se encuentra en constante movimiento deberá presentar el menor peso posible, por lo que se utilizará un único motor, teniendo en cuenta que ha de realizar la fuerza necesaria para extruir el material. Además, tendrá que tener la capacidad de ajustar la altura de las boquillas, por lo que se usa un elemento (servo) que permita conmutar entre una u otra.

1.2. Alcance

Este trabajo parte de un análisis de mercado que permita conocer qué tipos de extrusores hay actualmente y así establecer las especificaciones previas del sistema, así como conocer los elementos de los que se compone un extrusor en una impresora 3D.

A partir de los resultados obtenidos, se procede al diseño de un sistema mecánico nuevo, que cumpla con los requisitos necesarios:

- Producir el movimiento de los dos hilos usando un único motor.
- Actuar la regulación de las boquillas por medio de un servo.
- Minimizar las dimensiones del conjunto y el peso.



Para llevar a cabo el diseño de este sistema se ha utilizado el software de diseño 3D CREO Parametric, con el cuál se han modelado algunos de los componentes de este sistema de extrusión, mientras que otros componentes serán comerciales (tales como: motor, hotend, servo, rodamientos, piñón, muelles, rueda dentada, etc.) por simplicidad, ya que funcionan en otros extrusores de las mismas características, y por coste, ya que es más barato y rápido adquirir repuestos que fabricarlos. Posteriormente, se realizará un ensamblaje de todo el conjunto, para tener así una idea de las dimensiones y de la disposición de los elementos que lo forman, generando así un primer prototipo. Por último, se realiza también una simulación del movimiento del mecanismo.

En los siguientes apartados, se realiza en primer lugar un análisis de mercado para familiarizarse con los componentes y términos utilizados, para conocer que tecnologías de impresión 3D podemos encontrar hoy en día, centrándonos en la que usa el modelado por deposición de material fundido (FDM) y para conocer los materiales empleados y los tipos de extrusión que existen. Posteriormente, se plantearán los principales problemas a abordar en este proyecto y sus posibles soluciones, para terminar con el desarrollo de esas soluciones planteadas. Finalmente, se simula el mecanismo y se exponen las conclusiones a las que se han llegado y los posibles desarrollos futuros.



2. Análisis de mercado

Existen muchos tipos de tecnologías de impresión 3D, cada una de ellas con sus ventajas, con sus limitaciones, con sus posibilidades en cuanto a materiales a emplear y con distintos procesos utilizados para construir las capas que formarán el objeto que se construye [1]. La que es objeto de estudio en este proyecto es la que usa el modelado por deposición fundida (FDM).

Algunas de estas tecnologías, entre muchas otras, son las siguientes:

- Estereolitografía (SLA)
- Sinterizado selectiva láser (SLS)
- Fotopolimerización por luz ultravioleta (SGC)
- Sinterizado directo de metal por láser (DMLS)
- Laminado de capas (LOM)

2.1. Modelado por deposición de material fundido (FDM)

El proceso FDM consiste en la deposición de filamentos formando capas de un material que se funde y es extruido a través de una boquilla que se encuentra a una temperatura superior que la temperatura de fusión del filamento, solidificando cuando sale al exterior. Esta boquilla se desplaza en los tres ejes por medio de motores paso a paso. Las principales características de las impresoras que utilizan este proceso son las siguientes [2]:

- Son las impresoras más baratas y con múltiples opciones de ser modificadas por los usuarios.
- Los materiales utilizados son económicos, reciclables y existe una gran variedad de ellos.
- El enfriamiento del material durante el proceso es rápido.
- Gran variedad de impresoras en el mercado.
- El objeto resultante tiene una textura superficial laminada.
- Dependiendo de la geometría del modelo se pueden necesitar soportes cuya misión es servir de sustento al material principal durante la fabricación.
- Los tiempos de fabricación son altos.
- Si se utilizan materiales muy blandos es fácil sufrir atascos.

Dentro de las impresoras que utilizan este proceso se pueden distinguir dos tipos, según el movimiento que realice el cabezal [3]:

- Cartesianas: son las más difundidas en el mercado y las que son de interés en este proyecto. Utilizan tres ejes ortogonales (X, Y y Z), para determinar cuál debe ser la posición del cabezal. Dispone de un motor por cada una de las direcciones en las que se mueve.

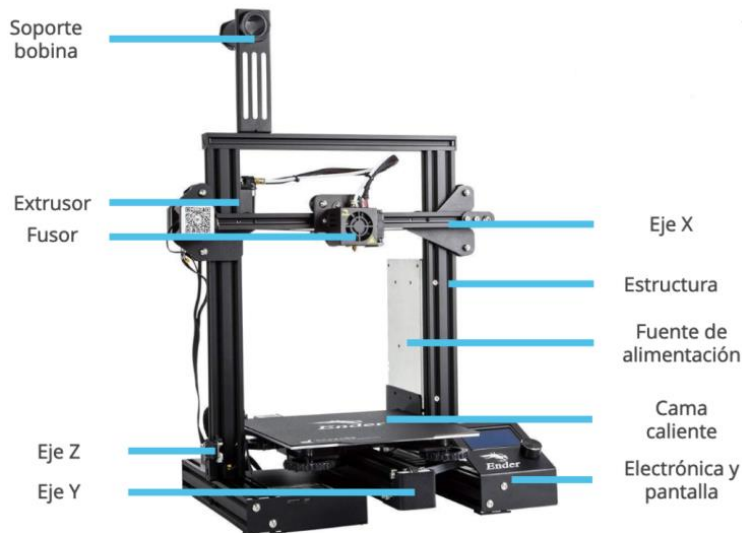


Figura 1. Impresora 3D cartesiana

Fuente: <https://bitfab.io/es/blog/partes-impresora-3d/>

- Delta: está compuesta por tres brazos unidos por un lado a tres guías verticales y por el otro lado al cabezal de impresión, los cuales pueden moverse hacia arriba y hacia abajo y variar el ángulo entre el brazo y la guía vertical, permitiendo así que el cabezal se mueva en tres dimensiones. En estas impresoras el peso del cabezal es crítico, para evitar inercias, ya que son impresoras más rápidas que las anteriores.



Figura 2. Impresora 3D delta

Fuente: <https://impresoras3d.org.es/como-elegir-entre-impresoras-cartesianas-y-delta-3d/>

Según la tecnología de impresión 3D que se utilice se pueden usar distintos materiales compatibles con ella, cada uno con unas características y propiedades. Para el caso de la impresión 3D por deposición de material fundido los más utilizados son los siguientes:

- Ácido poliáctico (PLA) [4], es un polímero termoplástico cuyos materiales se obtienen a partir de almidón de maíz, de yuca o de caña de azúcar. Puede ser biodegradable bajo ciertas condiciones de temperatura (60°C).



Es uno de los materiales de impresión 3D más utilizados, ya que es fácil imprimir con él debido a su alta dureza (83 Shore D) [5] y baja flexibilidad.

- Acrilonitrilo butadieno estireno (ABS), es el siguiente material más usado después del PLA. Es un poco más difícil de extruir que el PLA, pero tiene mejores características, tiene una alta dureza (76 Shore D) y una flexibilidad media [6]. Es más resistente a altas temperaturas.
- Tereftalato de polietileno (PET) [7], es el plástico usado en envases de bebidas y textiles y, por tanto, uno de los plásticos más utilizados del mundo, además es reciclable. El PETG (tereftalato de polietileno glicol) es un derivado muy utilizado en impresión 3D. Este material se encuentra a medio camino entre los dos anteriores, posee las ventajas del ABS (resistente a la temperatura, dureza, flexibilidad) y la facilidad de uso del PLA. Tiene una dureza de 76 Shore D [8].
- Elastómero termoplástico (TPE), poliuretano termoplástico (TPU) y copoliéster termoplástico (TPC). Son materiales plásticos que destacan por su elasticidad y flexibilidad, ideal para objetos que se tienen que doblar y deformar. El más utilizado es la variante TPU ya que es más rígido y, por tanto, más fácil de imprimir, con una dureza Shore que va de 70 a 85/95 Shore A [9].
- Poliestireno de alto impacto (HIPS) [10], este material suele usarse como soporte para piezas de geometrías complejas, ya que es soluble en limoneno. Suele usarse en combinación con el ABS, ya que este no se daña al sumergirlo en limoneno, y además poseen similar dureza (60-75 Shore D) [11] y temperatura de fusión.
- Acrilonitrilo estireno acrilato (ASA), es un termoplástico similar al ABS. Destaca por su resistencia a la intemperie. Con una dureza de 75 a 80 Shore D [12].
- Poliamida sintética (Nylon) [13], es un polímero ampliamente utilizado en la industria, destaca por su durabilidad, por su alta relación resistencia/peso, por su flexibilidad y su baja fricción. Con una dureza de 74 Shore D. Requiere unas temperaturas más altas de procesado, por lo que es usado en impresoras profesionales.
- Alcohol polivinílico (PVA) [14], es un material soluble en agua, por lo que en la impresión 3D se usa como soporte. Tiene la ventaja sobre el HIPS que se puede combinar con otros materiales a parte del ABS, como el PLA y el Nylon.

La dureza Shore (en escala A o D) permite clasificar la elasticidad y flexibilidad, la cual es importante a la hora de extruir un material. La escala tiene un rango de 0 a 100, siendo 0 el mínimo de dureza y 100 el máximo, dependiendo de la escala. Para los materiales más duros (PLA, ABS, Nylon, PET...) se utiliza la escala Shore D, mientras que para los elastómeros (más blandos), se utiliza la escala Shore A [15]. Valores bajos de Shore A (del orden de 60), se traducirán en que la impresión será mucho más dificultosa, pudiéndose producir atascos, de ahí que para estos materiales flexibles sea mejor el uso de extrusores directos. Para valores de Shore A por encima de 90, la extrusión resultará más sencilla. En la figura 3 se puede observar la relación que hay entre ambas escalas.

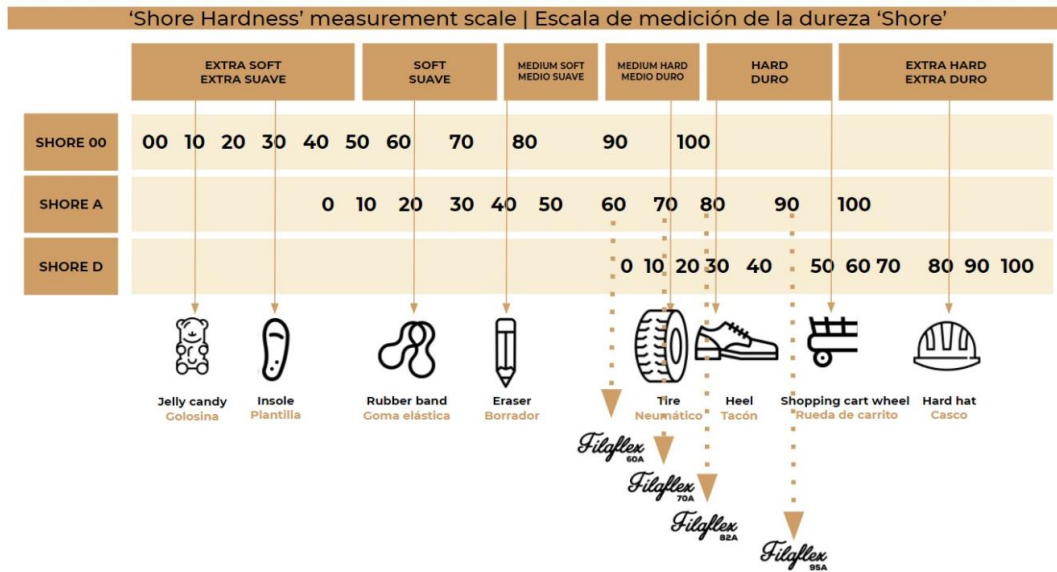


Figura 3. Relación entre las escalas Shore

Fuente: <https://recreus.com/es/noticias/aprende-con-recreus/que-es-la-dureza-shore->

A parte de los aquí expuestos se pueden encontrar muchos más materiales (policarbonato (PC), polipropileno (PP), etc.) y debido a la constante evolución en este sector cada vez aparecen nuevos materiales o variantes de los ya existentes. Hoy en día podemos encontrar filamentos con propiedades especiales, como filamentos para producir objetos fosforescentes, filamentos magnéticos, filamentos con propiedades ignífugas, filamentos a base de fibra de madera, filamentos conductores, de arcilla/cerámica, con fibra de carbono, etc.

2.2. Sistemas de extrusión

El objetivo de este apartado es dar unas nociones básicas sobre los componentes que forman un sistema de extrusión y que tipos de extrusores podemos encontrar en el mercado.

2.2.1. Definición y componentes de un sistema de extrusión

El extrusor es una de las partes más importantes en una impresora 3D de modelado por deposición fundida, este es el encargado del desplazamiento del filamento a través de una rueda dentada, accionada directamente por un motor o indirectamente tras una etapa de reducción, para luego ser calentado hasta su fusión y a continuación ser extruido a través de una boquilla.

Los principales componentes de un sistema de extrusión son los siguientes:

- **Motor:** Es el encargado de ejercer el par con el que se impulsará al filamento, ya sea directamente o indirectamente (reducción). Los motores utilizados son motores paso a paso. Con cada paso el motor gira una cantidad de grados fija, dependiendo de su resolución (°/paso).

Por tanto, la mayor ventaja de estos motores es la precisión que ofrecen en cuanto al posicionamiento. El motor más típico es el Nema 17, ya que ofrece una buena relación entre el par y el tamaño/peso.

- Engranaje o rueda de tracción: su función es impulsar al filamento para introducirlo en el fusor o hotend, o tirar de él para retraer el material, gracias a su dentado. Puede ser directo o con una etapa de reducción, como se verá más adelante.
- Rodamiento de presión: se encarga de presionar el filamento sobre la rueda de tracción para que esta pueda impulsarlo o retraerlo de forma continua. Normalmente este rodamiento va montado sobre otro elemento, el cual es empujado por un muelle, y a este a su vez se le da mayor o menor tensión mediante un tornillo (dependiendo de la dureza del material empleado).

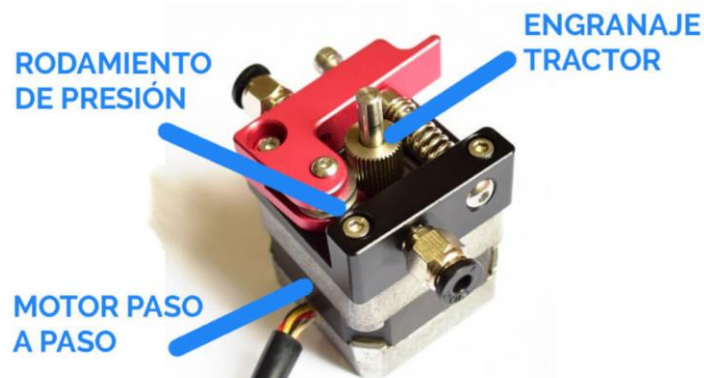


Figura 4. Conjunto de extrusor

Fuente: <https://of3lia.com/guia-extrusor-y-hotend-impresora-3d/>

- Fusor o hotend: funde el material y lo expulsa por la boquilla, para depositarlo sobre la superficie de impresión. Este a su vez se compone de [16]:
 - Disipador con aletas. Su misión es mantener frío el filamento hasta que llegue al bloque caliente.
 - Bloque calentador. Se aloja en él una resistencia calefactora que calienta el bloque y funde el material.
 - Barrel o garganta. Une el bloque y el disipador y a su vez sirve de barrera térmica para que el calor no se disipe y funde el filamento antes de tiempo. En su interior puede ser totalmente metálico (materiales con alta temperatura de fusión) o puede tener un tubo de teflón (menos propensas a atascos).
 - Boquilla o nozzle. Va roscada al bloque y da la dimensión final al filamento depositado. Los diámetros de la boquilla varían, siendo los más habituales los que van de 0,4 a 0,8 mm.

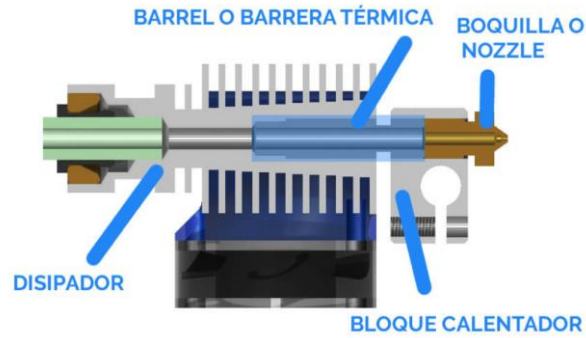


Figura 5. Componentes del fusor o hotend

Fuente: <https://soloelectronicos.com/2020/04/06/como-arreglar-atascos-en-su-impresora-3d/>

2.2.2. Extrusores directos e indirectos o Bowden

Los extrusores directos [17] son aquellos en los que hay muy poca distancia entre el sistema que impulsa al hilo (motor, engranaje de tracción y rodamiento de presión) y el extremo caliente. En otras palabras, la distancia entre el punto de tracción y la boquilla es mínima.

En este tipo de extrusores, todos los componentes del sistema de extrusión van montados sobre un mismo soporte o carro, que se desplaza a lo largo del eje X de la impresora.

Como se ha dicho, el que la distancia entre el punto de tracción y la boquilla sea mínima hace que en estos extrusores haya menos fallos al mover el hilo (atascos), por lo cual estos extrusores nos permiten trabajar con materiales más blandos y flexibles, siempre que el filamento este bien guiado desde el punto de tracción, como se puede observar en la figura 6. Al ser mínima esa distancia, la fricción del filamento con las paredes del elemento de guiado es menor y, por tanto, el hilo se encuentra poco comprimido. Esto es una ventaja, ya que como el hilo no se comprime mucho, el par que tiene que hacer el motor al extruir es menor (permitiendo el uso de motores más pequeños y ligeros) y las retracciones son también más efectivas, ya que solo tiene que retraer el hilo la distancia necesaria para liberar la presión en la boquilla.

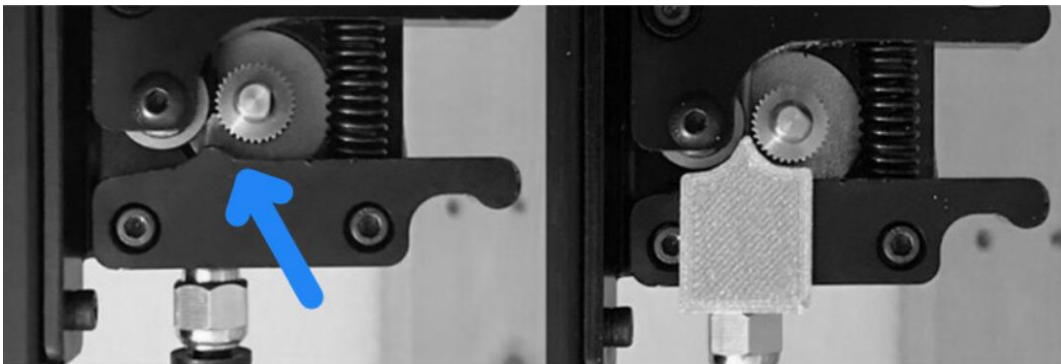


Figura 6. Ejemplo de extrusor con adaptación para filamento flexible (derecha)

Fuente: <https://of3lia.com/consejos-impresora-filamento-flexible/>

La principal desventaja de estos extrusores es que al ir todos los componentes montados sobre un mismo soporte incrementa mucho su peso, y como todo este conjunto se encuentra en movimiento se incrementan las inercias y vibraciones. Esto tiene que ser compensado con unas velocidades de impresión más lentas, para así evitar imperfecciones en la pieza.

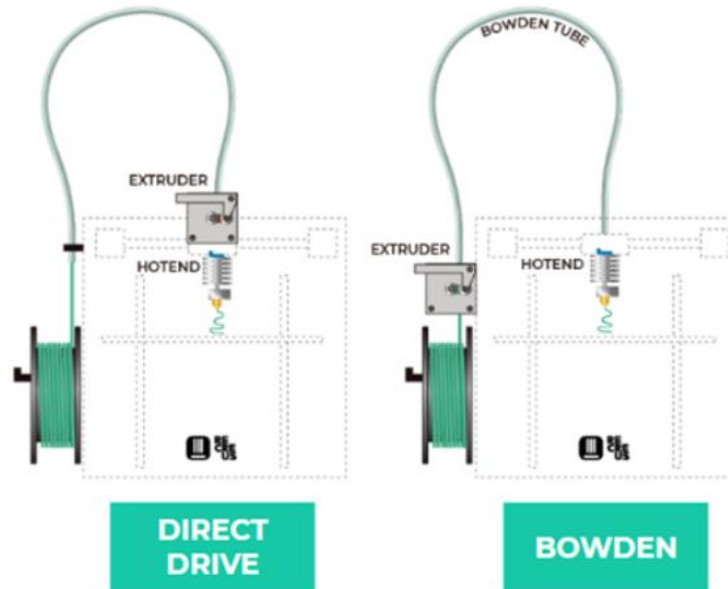


Figura 7. Extrusión directa (izquierda) y extrusión indirecta o Bowden (derecha)

Fuente: <https://recreus.com/es/noticias/aprende-con-recreus/extrusion-directa-vs-tipo-bowden>

Los extrusores indirectos o también llamados Bowden, son aquellos en los que el motor, la rueda de tracción y el rodamiento de presión, se encuentran fijos a la estructura de la impresora, mientras que solamente el hotend se desplaza a lo largo del eje X, como puede verse en la figura 7. El extrusor y el hotend están unidos por un tubo de teflón llamado tubo Bowden. En estos extrusores, por tanto, la distancia entre el punto de tracción y la boquilla es mucho mayor que en el caso anterior. Esto significa que se requiere un motor con mayor par para extruir, ya que aumenta la fricción entre el filamento y el tubo de teflón y por ello, el filamento se encuentra más comprimido que en el caso de los extrusores directos. Esto hace que las retracciones con estos extrusores sean peores, ya que se tendrá que retraer una mayor longitud de filamento, al tener liberar la presión de la boquilla y además descomprimir el hilo.

Las impresoras con estos extrusores tienen velocidades de impresión más altas y con mejor calidad de impresión que en el caso de los directos, ya que tienen menos peso en movimiento (solo el hotend).

Son extrusores que funcionan bien con materiales rígidos. Su principal problemática es a la hora de trabajar con filamentos flexibles (TPU, TPE), ya que la diferencia de diámetros entre el tubo Bowden y el diámetro del hilo junto con la flexibilidad de estos materiales, hace que el material tienda a aplastarse con las paredes del Bowden, desviando las fuerzas de extrusión y provocando que la presión no sea constante en la boquilla. Además, si no se encuentra bien guiado desde el inicio, si el

filamento es flexible tenderá a salirse ya que la fuerza que debe hacer el extrusor para impulsar al hilo es mayor en este tipo de extrusores, originando atascos.

Por tanto, a modo de resumen se puede decir que, si se busca trabajar con filamentos rígidos, las extrusoras Bowden son una buena opción (mayor velocidad, menos inercias), mientras que si se busca trabajar con flexibles es mejor un extrusor directo, si bien hay que minimizar la distancia entre el punto de tracción y la entrada al hotend para evitar atascos.

2.3. Sistemas motrices

Otra clasificación que se podría hacer es atendiendo a si el accionamiento del motor es directo sobre el filamento o si es indirecto, tras una reducción.

Los sistemas motrices directos son aquellos en los que la rueda de tracción gira solidaria al eje del motor y el rodamiento de presión empuja al filamento directamente sobre esta rueda, consiguiendo impulsar al filamento.

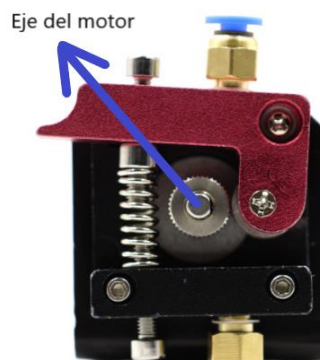


Figura 8. Extrusor con accionamiento directo

Fuente: <https://candy-ho.com/producto/kit-extrusor-mk8-directo-aluminio-para-impresora-3d-1-75mm-derecho-copy/>

Los sistemas motrices indirectos o con reductora, son aquellos en los que el piñón que gira solidario al eje del motor, engrana con una rueda dentada de mayor tamaño y número de dientes, logrando así una multiplicación del par motor en el eje de la rueda de tracción.

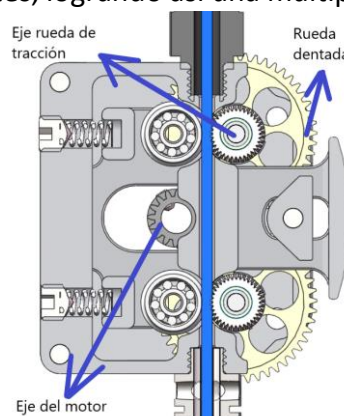


Figura 9. Ejemplo de extrusor con reductora

Fuente: aliexpress.com

El usar un sistema u otro permite usar un motor distinto. Si se opta por el sistema directo, se necesitará un motor con mayores prestaciones (mayor par) y, por tanto, esto lleva a que tenga un mayor tamaño y peso, lo que es un inconveniente si la extrusión es directa. En cambio, si se usa una etapa de reducción (normalmente es de 3 a 1) se puede utilizar un motor con menores prestaciones (menor par) y por tanto más pequeño y ligero, ya que con la reducción se consigue aumentar el par. Esto es una ventaja en la extrusión directa, ya que el motor aporta mucho peso, consiguiendo así aligerar el conjunto. Estos motores más reducidos son conocidos como motores “pancake”, se diferencian a la vista de los normales en que su longitud es menor.

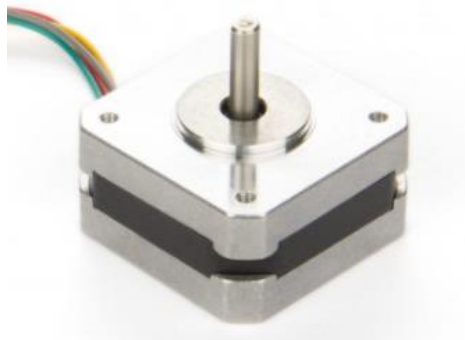


Figura 10. Motor Nema 17 tipo pancake

Fuente: <https://tienda.bricogeek.com/descatalogado/1418-motor-paso-a-paso-pancake-nema-17-22mm.html>

2.4. Sistemas multimaterial

En los sistemas multimaterial o sistemas de extrusión múltiple se usan dos o más filamentos y puede ser a su vez también directa o indirecta y dentro de esta se podría distinguir entre monopunto o multipunto, en función de si dispone de una o varias boquillas.

En este apartado se verán cuáles son las soluciones existentes en el mercado que usan este sistema. En el caso de este proyecto se incluiría dentro de este tipo, ya que se trata del diseño de un sistema de extrusión multimaterial, con extrusión directa y multipunto.

Hay varias configuraciones de sistemas multimaterial [18]:

- Varios extrusores Bowden y un hotend con varias entradas (extrusión múltiple Bowden monopunto).
- Varios extrusores directos o indirectos y un hotend por cada uno (extrusión múltiple directa o indirecta multipunto).
- Extrusor Bowden con selector de filamento y un hotend con una sola entrada (extrusión múltiple bowden monopunto).

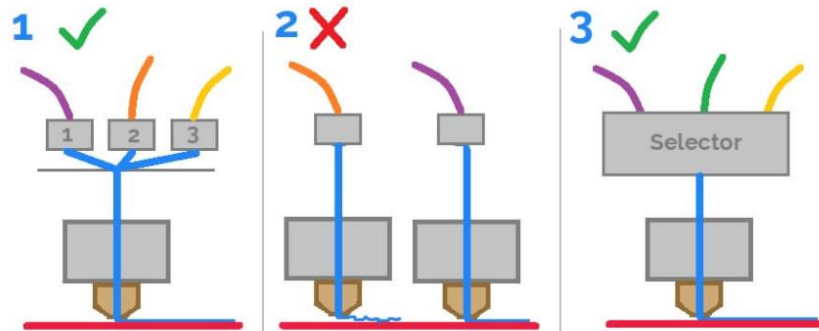


Figura 11. Configuraciones de sistemas multimaterial

Fuente: <https://of3lia.com/guia-extrusor-y-hotend-impresora-3d/>

El primer sistema es el más común de los tres y el más barato, se pueden tener varias entradas de filamento en el mismo hotend y una sola boquilla. Tiene el inconveniente de que este hotend es más pesado y que al cambiar de filamento se pierde tiempo con las retracciones, y si además se usan distintos materiales se requiere limpiar el hotend en una torre auxiliar, para evitar que se mezclen los materiales.



Figura 12. Hotend Diamond con 3 entradas de filamento

Fuente: <https://of3lia.com/guia-extrusor-y-hotend-impresora-3d/>

El segundo sistema, presenta el problema de tener dos boquillas fijas que tienen que estar correctamente niveladas con respecto a una misma referencia. Esto no ocurriría en el caso de que fueran independientes (caso de este proyecto). Además, el hecho de tener dos boquillas significa una reducción de la superficie de impresión. Su principal ventaja es que se ahorra tiempo de impresión.



Figura 13. Hotend Chimera de doble boquilla

Fuente: <https://of3lia.com/guia-extrusor-y-hotend-impresora-3d/>

El tercer sistema solo ha sido implementado por Prusa. Usa un solo hotend y un extrusor Bowden que va cambiando de filamento. Permite el uso de hasta cinco filamentos. Tiene el inconveniente de usar un solo hotend, por lo que también necesita una torre auxiliar para la limpieza, además de que usa un mecanismo más grande, pesado y complejo, con hasta cuatro motores.

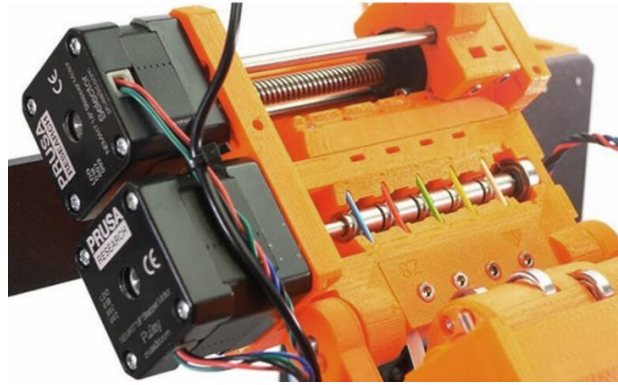


Figura 14. Mecanismo de extrusión Prusa

Fuente: <https://of3lia.com/guia-extrusor-y-hotend-impresora-3d/>

2.5. Conclusiones del apartado

Las especificaciones previas que deberá tener el extrusor que se va a diseñar, tras el análisis de las soluciones que hay en el mercado, son las siguientes:

- Se busca diseñar un extrusor para ser acoplado a una impresora 3D cartesiana.
- Como el objetivo es trabajar con múltiples materiales, incluidos flexibles, la mejor opción es un extrusor directo, en el que la distancia entre el punto de tracción y el guiado para introducirlo en el hotend sea mínima, para garantizar que se pueda trabajar con filamentos flexibles.
- Al tratarse de una extrusión directa el peso del conjunto se incrementa, por lo que se opta por usar un motor con reductora, así se puede usar un motor más pequeño.
- La problemática de que sea multipunto está en que las boquillas tienen que estar bien niveladas, por eso se va a buscar usar dos boquillas y que estas sean independientes, así se evita el problema de que tengan que estar ambas al mismo nivel, con los problemas que eso conlleva. Este sistema tiene la ventaja de que a la hora de imprimir con dos materiales distintos se ahorra mucho tiempo.

3. Planteamiento de problemas y posibles soluciones

Como ya se ha descrito anteriormente, el objetivo de este proyecto es el diseño de un extrusor multimaterial para impresora 3D, capaz de accionar de manera controlada y por independiente dos filamentos de material plástico en ambas direcciones. Además, este extrusor deberá presentar el menor peso y dimensiones posibles y deberá tener la capacidad de ajustar la altura de las boquillas.

En este apartado se exponen los problemas que han surgido en el desarrollo del diseño del extrusor y cuál es la posible solución que se ha planteado.

3.1. Problemática de la altura de las boquillas

Como se ha dicho en el último punto del apartado 2.5., el problema de los sistemas multipunto es que las boquillas están fijas entre sí y tienen que estar bien niveladas. Si alguna de ellas se encuentra por debajo de la que está trabajando podría destrozar el trabajo, además, se puede dar el caso de que la boquilla inactiva siga goteando material, estropeando también el resultado de la pieza.

Para solucionar este problema se plantea que las boquillas sean independientes la una de la otra, esto se consigue, como se verá más adelante, con un mecanismo accionado por un servo. Las boquillas se moverán en vertical por una guía a lo largo del eje Z. La boquilla que tenga que extruir estará en la posición de trabajo y la otra estará a una altura por encima en la posición de reposo.

Así no se requiere la precisión en altura que deben tener las boquillas que son solidarias, ya que bastaría con tomar la altura de la boquilla en el eje Z con el software de la impresora. En la figura 15 se muestra el boceto de la solución a este problema.

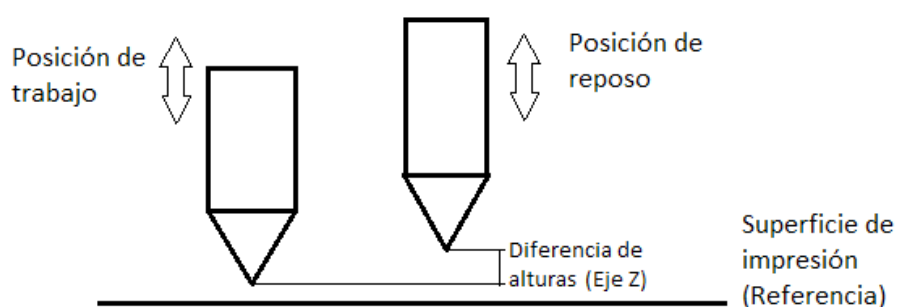


Figura 15. Boceto de la solución para las boquillas

3.2. Problemática de tamaños

Este extrusor se diseña con el objetivo de ser montado sobre una impresora 3D comercial, en este caso sobre una Ender 3.

Uno de los primeros problemas que aparecen es la limitación en cuanto a las dimensiones del extrusor, ya que este debe poder anclarse en la impresora y restarle el mínimo espacio posible en anchura, para disminuir lo mínimo posible la superficie de impresión. La anchura del cuadro de la Ender 3 es de 250 mm, como se puede ver en la figura 16 [19]. Y la anchura del cabezal de la Ender 3 es de 76 mm, como se puede ver en la figura 17.

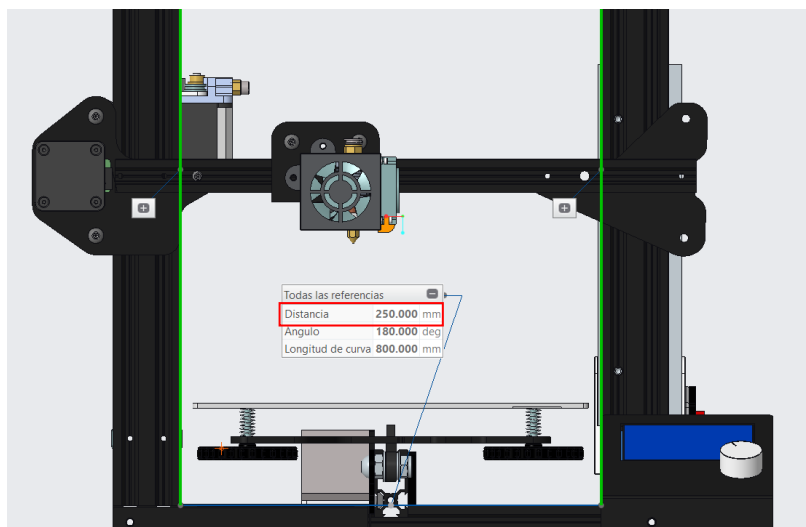


Figura 16. Anchura del marco de Ender 3

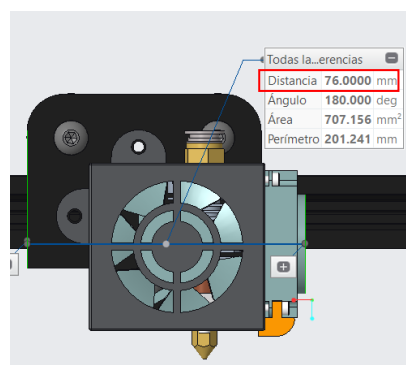


Figura 17. Cabezal del extrusor de Ender3

En el diseño del extrusor se ha tenido en cuenta esto y se ha buscado que esta anchura sea la mínima posible, si bien, siempre ocupará más espacio que el original, ya que se trata de doble extrusión directa. Para solucionar este problema se ha buscado una disposición de los extrusores tal que minimice la distancia entre boquillas, se consigue así reducir el conjunto en anchura y a la vez que no se reduzca mucho la superficie de impresión.

Otra problemática que aparece en cuanto al tamaño es la necesidad de alargar la altura, aunque no es tanto problema como la anchura. Esto se debe a la disposición que se busca, ya que se plantea colocar por encima del perfil del eje X de la impresora el motor y debajo de él, el elemento que permita cambiar de boquilla (servo), así, se aumenta la altura total del conjunto, pero está más empaquetado todo. Este aumento de la altura, lleva a tener que diseñar también un adaptador para el hotend para conseguir que la boquilla quede por debajo de la rueda inferior del soporte. En la figura 18, se muestra un boceto aproximado de la distribución que se busca.

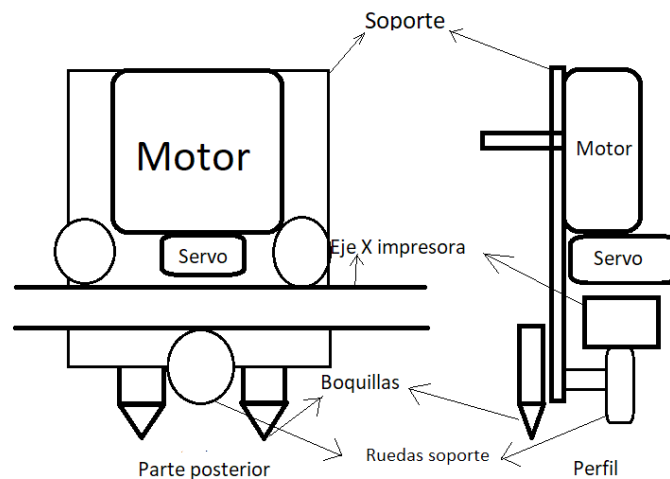


Figura 18. Distribución planteada

La solución para que el conjunto no quede demasiado alto es intentar aprovechar al máximo los espacios, minimizando las distancias entre componentes.

3.3. Problemática del peso

El extrusor se encuentra en constante movimiento y por ello el peso es un factor importante a tener en cuenta. Un mayor peso se traduce en más inercias y estas a su vez en vibraciones, que afectan al resultado final de la pieza.

El elemento más pesado del sistema de extrusión es con diferencia el motor. El objetivo es entonces buscar disminuir el peso con este componente. Los extrusores directos con dos boquillas usan dos motores, uno por cada boquilla, lo que hace que el peso del conjunto se incremente mucho. La solución que se plantea para esto en este proyecto es usar un solo motor para dos boquillas, logrando reducir mucho el peso.

Pero este peso se puede reducir un poco más si, como se ha visto en el apartado de sistemas motrices (2.3.), se opta por usar un sistema motriz con reductora, se puede así tener par suficiente para impulsar al hilo y a la vez tener un motor más ligero (tipo pancake).

En la figura 19 podemos ver a modo orientativo, como conforme aumenta la longitud del motor aumenta el peso. Estos son motores Nema 17 que se utilizan en impresión 3D.

Model No.	Step Angle (°)	Motor Length (L)mm	Current /Phase A	Resistance /Phase Ω	Inductance /Phase mH	Holding Torque kg.cm	# of Leads No.	Shaft Dia mm	Rotor Inertia g.cm ²	Weight Kg
JK42HS34-1334	1.8	34	1.33	2.1	2.5	2.2	4	5	34	0.22
JK42HS34-0404	1.8	34	0.4	30	35	2.8	4	5	34	0.22
JK42HS34-0844YA-08	1.8	34	0.84	5.75	9.3	2.8	4P	5	34	0.22
JK42HS40-1004A-02F	1.8	40	1	3.9	8.9	4.2	4P	5D	54	0.28
JK42HS40-1704	1.8	40	1.7	1.5	2.3	4.2	4	5	54	0.28
JK42HS40-1704-13A	1.8	40	1.7	1.5	2.3	4.2	4P	5D	54	0.28
Jk42HS48-1684-01	1.8	48	1.68	1.65	2.3	5	4	5	68	0.35
Jk42HS48-1684-08AF	1.8	48	1.68	1.65	2.3	5	4P	5D	68	0.35

Figura 19. Motores Nema 17

Fuente: aliexpress.com

La solución que se plantea es usar un motor Nema 17 tipo pancake y con reducción.

3.4. Problemática para generar los cuatro movimientos

Cada extrusor tiene dos movimientos posibles (uno para extruir y otro para retraer el material). Como se dispone de dos extrusores, son un total de cuatro movimientos que generar, dos por cada uno de ellos. Cada uno de los extrusores debe poder hacer esos dos movimientos por independiente.

El problema es, por tanto, que el motor no puede estar engranado con ambas ruedas dentadas de los dos extrusores a la vez, ya que al extruir uno retraería el otro y viceversa. De ahí la necesidad de un elemento (servo), que permita cambiar de un extrusor a otro, permitiendo al extrusor realizar los dos movimientos independientemente del otro extrusor.

La solución que se propone es el uso del mismo servo que se plantea en el apartado 3.1. para solucionar el problema de la altura de las boquillas, y que este a su vez actúe sobre un mecanismo que se encargue de que se produzca el engrane y desengrane del piñón y de las ruedas dentadas. Así se aprovecha la diferencia de alturas entre las boquillas, para que también a la vez se produzca el desengrane. Cuando una de las boquillas tenga que extruir, el servo junto con el mecanismo la llevarán a la posición de trabajo y se producirá el engrane, mientras tanto la otra será llevada a la vez a la posición de reposo, donde estará desengranada. Al terminar de extruir, se retrae el

material y si es necesario extruir con la otra boquilla se conmuta a esta otra. Se logra así que la extrusión y la retracción de ambas boquillas sea independiente, consiguiendo esos cuatro movimientos.

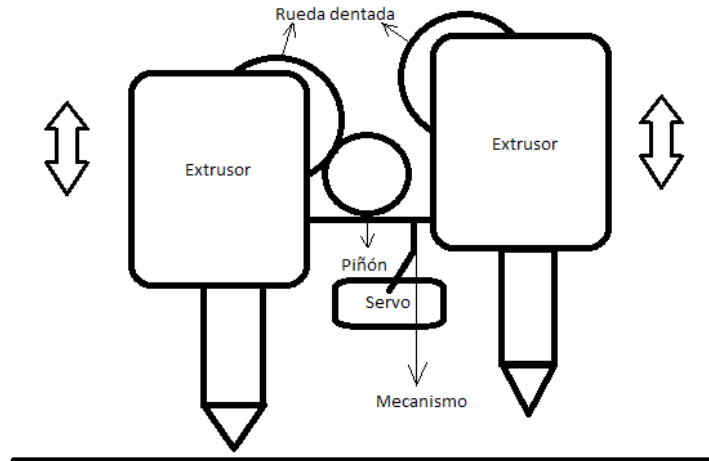


Figura 20. Boceto de la solución para los cuatro movimientos

En la figura 20 se puede ver aproximadamente como será el movimiento que el mecanismo transmitirá a los extrusores, permitiendo con el engrane-desengrane realizar todos los movimientos que se requieren.

4. Desarrollo de la solución

Partiendo de las soluciones que se han planteado a los problemas anteriores se procede al diseño de este nuevo extrusor, para posteriormente exponer los resultados obtenidos.

4.1. Justificación del uso de elementos comerciales

El uso de estos elementos comerciales se debe a la rapidez de su disponibilidad, a lo económicos que resultan y a que ya están calculados y probado su funcionamiento en otros extrusores de las mismas características que tendrá este, por tanto, también funcionarán en este. Muchos de estos elementos van a ser reaprovechados de dos extrusores proporcionados por el tutor. Estos son los siguientes: OMG V2-S y Kingroon.



Figura 21. Extrusor Kingroon

Fuente: aliexpress.com



Figura 22. Extrusor OMG V2-S

Fuente: aliexpress.com

Se efectúa el desmontaje de los dos extrusores para tomar medidas de estos elementos comerciales y seleccionar que se aprovechará de cada uno. Se calcula la relación de transmisión de ambos, que resulta ser de 3:1 en los dos, por lo que se usará esa misma relación de transmisión.

4.1.1. Rodamientos del eje de tracción

Se tomarán los cuatro que se necesitan del extrusor OMG V2-S. Como el eje de tracción, rueda dentada y el piñón también se aprovecharán del mismo, la reducción será la misma y también por ello los esfuerzos a los que se vean sometidos. Una vez tomadas las medidas los dibujos son importados a CREO Parametric desde la biblioteca de SolidWorks.

Características:

- Diámetro interior: 4 mm
- Diámetro exterior: 7 mm
- Espesor: 2,5 mm

- Peso: 1 gr

4.1.2. Rodamientos de presión

Se toman los dos necesarios del extrusor OMG V2-S, por los mismos motivos que los anteriores. Se toman las medidas y son importados también a CREO como los anteriores.

Características:

- Diámetro interior: 3 mm
- Diámetro exterior: 10 mm
- Espesor: 4 mm
- Peso: 1 gr

4.1.3. Motor

Se aprovecha del extrusor directo Kingroon, ya que realizará la misma función y tendrá las mismas solicitaciones. El motor es un Nema 17, son motores muy utilizados en la impresión 3D. La marca del motor es Usongshine, concretamente el modelo 17HS4023. Es un motor ligero (158 gr), con una longitud de 23 mm y un par de 0,42 Nm. Las características técnicas de este motor son las mostradas en la figura 23 [20].

Type	Torque	current	Voltage	line order	Axle diameter	Shaft length	high
17HS0423	0.42N.m	1.5A	12V	ABCD	5mm	23mm	23mm
technical parameter							
Characteristic	Specifications		Characteristic	Specifications			
Phase number	2		Step pitch	1.8°±0.09°			
Rated voltage	DC 9.6V		Rated current	DC 0.3A/phase			
Phase resistance(20°C)	32× (1±10%) Ω/phase		Phase inductance	38×(1±20%)mH/phase			
Holding torque	≥200mN.m		Positioning torque	20 mH.m REF.			
Steering (axle extension)	A-AB-B-clockwise		maximum no-load startup frequency	≥1200PPS			
maximum no-load operating frequency	≥1400PPS		insulation resistance	≥100MΩ (dc 500V)			
Electrical strength	AC600V/1mA/1S		Insulation grade	Level B			
Rotational inertia	31.6g.cm ²		Quality	158g REF.			

Figura 23. Características técnicas del motor

Se toman las medidas necesarias para poder realizar su dibujo en CREO Parametric (Figura 24).

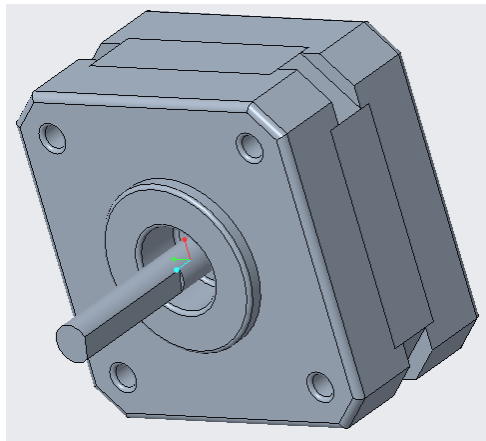


Figura 24. Dibujo del motor

4.1.4. Servo

El servo seleccionado es el Micro Servo SG90, es un servo de reducidas dimensiones y muy económico, muy usado en aplicaciones de robótica y en el mundo de la electrónica. Ofrece un elevado par para el tamaño que tiene, es ligero y puede rotar un ángulo máximo de 180°, aunque en esta aplicación su rango de movimiento será corto.

Su dibujo se obtiene de la página web GrabCAD [21].

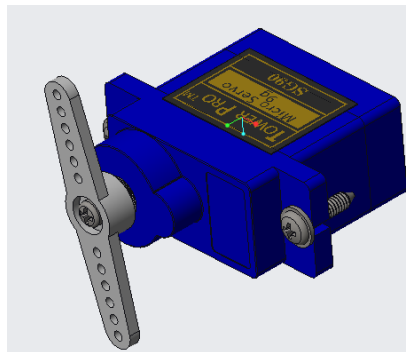


Figura 25. Dibujo del servo

Las características principales de este servo son las siguientes [22]:

- Par (a 4,8 V): 1,6 kg·cm
- Par (a 6 V): 1,8 kg·cm
- Velocidad de giro (a 4,8 V): 0,12s/60°
- Velocidad de giro (a 6 V): 0,10s/60°
- Ángulo máximo: 180°
- Peso: 9 gr
- Tamaño: 23 x 12,2 x 29 mm

4.1.5. Hotend

El hotend seleccionado es el que usa la impresora Ender 3, el CR10 MK8 con boquilla de 0,4 mm, para filamentos de 1,75 mm y con el interior de la garganta cubierto de silicona. El motivo por el cual se ha seleccionado este, es que es más reducido y ligero, en comparación con al E3D V6 que se planteó también colocar.



Figura 26. Hotend CR10 MK8

Fuente: aliexpress.com



Figura 27. Hotend E3D V6

Fuente: <https://hprint3d.com/products/copia-de-e3d-v6-metal-only-hotend?variant=37037146865831>

Para este proyecto se necesitan dos hotend de este tipo. El peso de cada uno es de 45 gr.

Su dibujo se obtiene de la página GrabCAD [23].

4.1.6. Muelle

Se toman los dos muelles necesarios del extrusor OMG V2-S, ya que ya se dispone de ellos y realizarán la misma función de empujar al taco que sujeta el rodamiento de presión.

Se toman las medidas del muelle:

- Longitud: 10 mm
- Diámetro interior: 3,3 mm
- Diámetro exterior: 4,5 mm
- Diámetros alambre: 0,7 mm
- Peso: 0,2 gr

Se realiza su dibujo en CREO Parametric.

4.1.7. Piñón

Se utiliza el piñón del extrusor OMG V2-S. El motivo es que es más económico usar este, que la fabricación de uno nuevo. Se toman las medidas y se realiza el dibujo en CREO Parametric.

Las características son las siguientes:

- Módulo: 0,5
- Número de dientes (Z_1): 16 dientes
- Diámetro primitivo (D_{p1}): 8 mm
- Diámetro exterior (D_{e1}): 9 mm
- Diámetro interior (D_{i1}): 5 mm
- Longitud del diente (b_1): 4 mm
- Peso: 2,4 gr

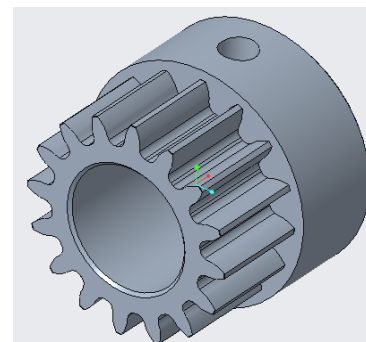


Figura 28. Piñón

4.1.8. Rueda dentada y rueda de tracción

Son ambas solidarias al eje. Al igual que el piñón se aprovechan las dos que se necesitan del extrusor OMG V2-S, ya que estarán sometidos a los mismos esfuerzos. Se toman también las medidas y se realiza el dibujo en CREO Parametric.

Características de la rueda dentada:

- Módulo: 0,5
- Número de dientes (Z_2): 48 dientes
- Diámetro primitivo (D_{p2}): 24 mm
- Diámetro exterior (D_{e2}): 25 mm
- Diámetro interior (D_{eje}) (D_{i1}): 4 mm
- Longitud del diente (b_2): 2 mm
- Peso: 3,4 gr

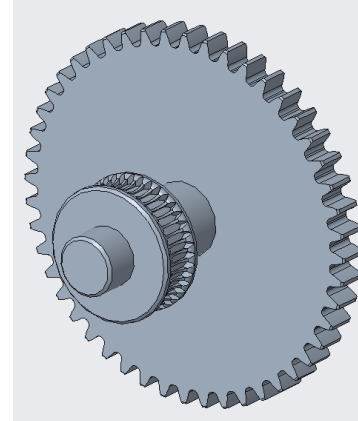


Figura 29. Rueda dentada y
rueda de tracción

En cuanto a la rueda de tracción es simplemente una rueda con una acanaladura y un moleteado.

4.1.9. Ventiladores de refrigeración

Se plantea añadir cuatro ventiladores, dos para la refrigeración del disipador del hotend y otros dos para la refrigeración de la capa. Los ventiladores de capa seleccionados son los que usa la impresora Ender 3, con unas dimensiones de 40 x 40 x 10 mm, mientras que para el hotend se han seleccionado unos más pequeños, de 30 x 30 x 10 mm. Se han elegido estos por sus dimensiones.

Características:

- Peso ventilador de capa: 15 gr
- Peso ventilador hotend: 8 gr

Se obtienen sus dibujos de GrabCAD [24] y Thingiverse [25].

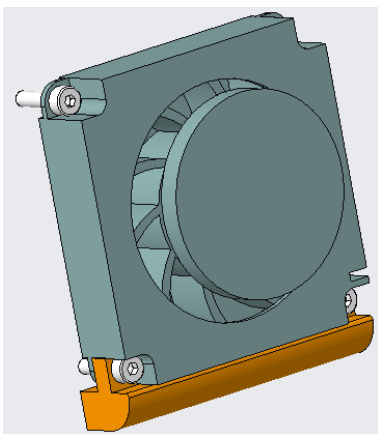


Figura 30. Ventilador de capa

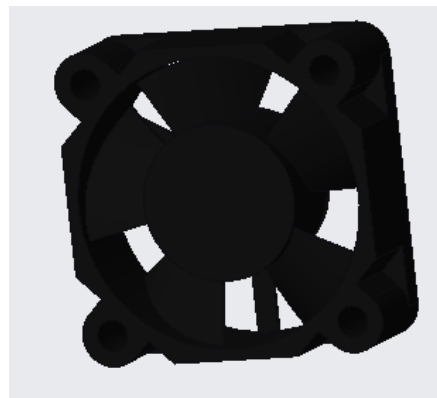


Figura 31. Ventilador hotend

4.1.10. Ruedas del soporte

Se pretende usar las mismas ruedas, separadores y tornillos de sujeción que utiliza la Ender 3, ya que el objetivo sería montar este extrusor sobre ella. Sus dibujos se obtienen de Thingiverse [25].

Características:

- Peso rueda: 3,3 gr
- Peso tornillo: 5,5 gr
- Peso tuerca: 1,2 gr
- Peso separador: 0,3 gr
- Peso separador hexagonal: 4,6 gr
- Diámetro exterior rueda: 24,1 mm



Figura 32. Rueda del soporte

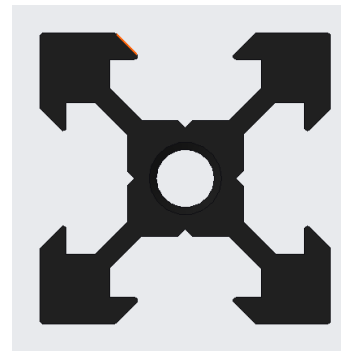


Figura 33. Perfil del eje X de la impresora sobre el que se mueve el soporte

4.2. Elementos diseñados

El resto de componentes se han diseñado íntegramente con CREO Parametric para cumplir con las soluciones que se han planteado en apartados anteriores.

4.2.1. Soporte del conjunto

Se diseña un soporte sobre el que montar todos los elementos y que a su vez sirva para poder anclarlo al eje X de la impresora Ender 3. Este soporte será de aluminio, para reducir el peso. En las figuras 34 y 35 se pueden ver los distintos alojamientos que se disponen para los componentes, las guías para los extrusores, la guía de la barra del mecanismo y demás agujeros para la sujeción. Su peso es de 44,8 gr, según las propiedades de masa de CREO.

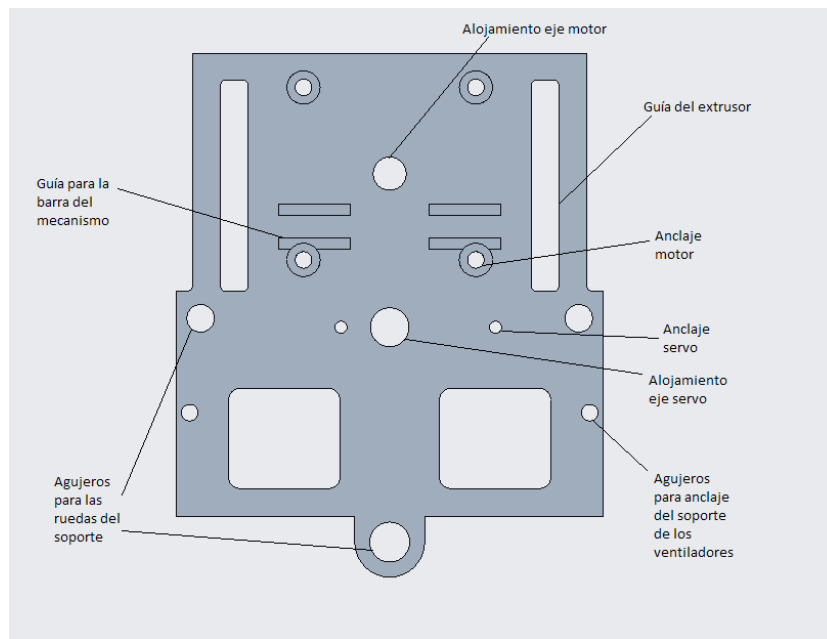


Figura 34. Vista frontal del soporte

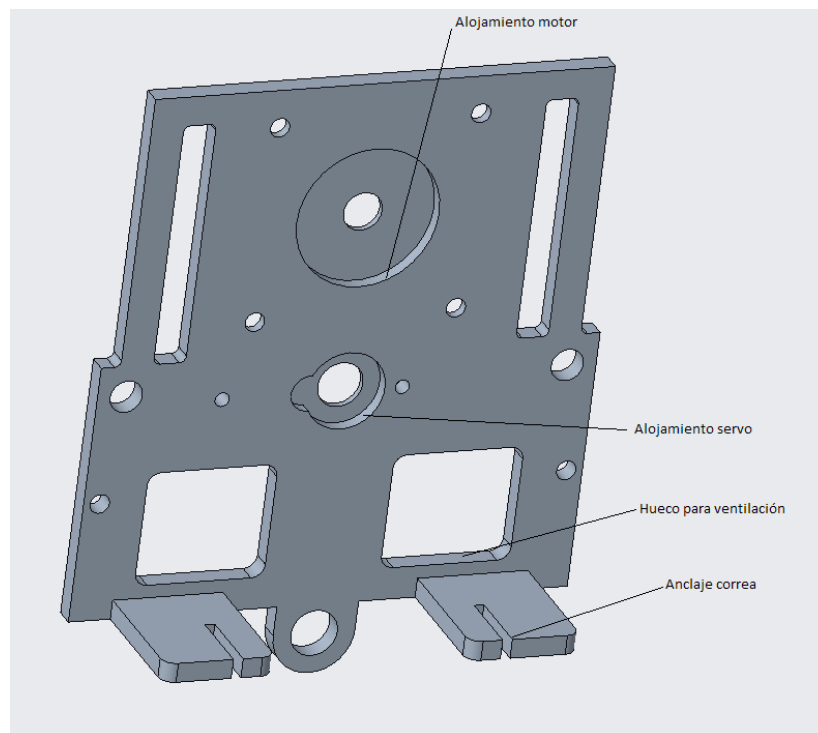


Figura 35. Vista posterior del soporte

4.2.2. Base y tapa del extrusor

Sobre la base y la tapa van montados los rodamientos del eje de tracción. La base sirve a su vez de alojamiento para el taco que sujeta al rodamiento de presión y para el adaptador del hotend. La guía para el filamento permite imprimir con material flexible. La tapa sirve para bloquear el movimiento del taco y del adaptador en la dirección

perpendicular a ella. Se diseñan dos bases y dos tapas, que son simétricas axialmente. Ambas serán también de aluminio.

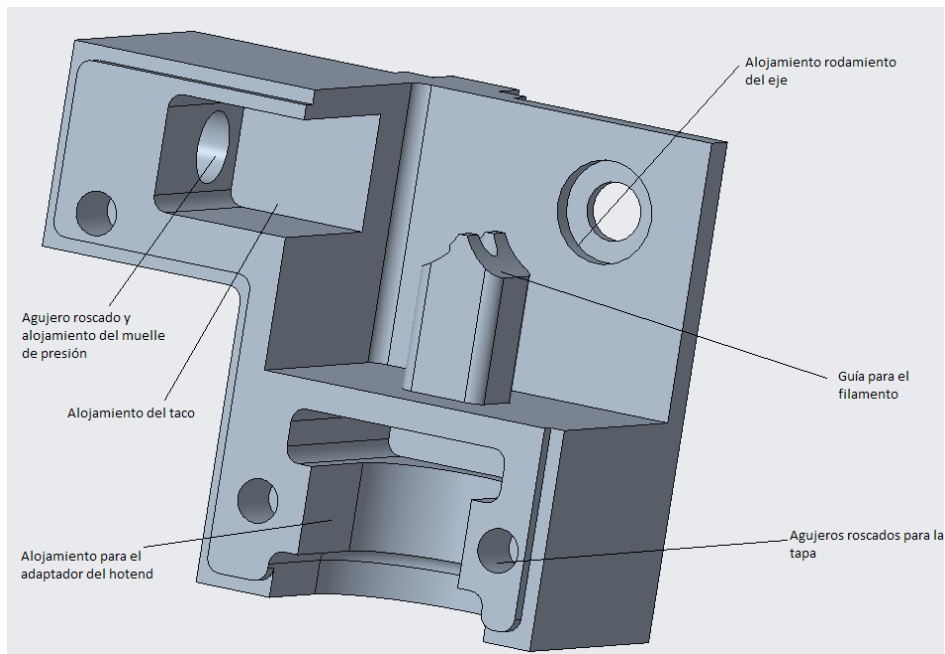


Figura 36. Base izquierda vista por delante

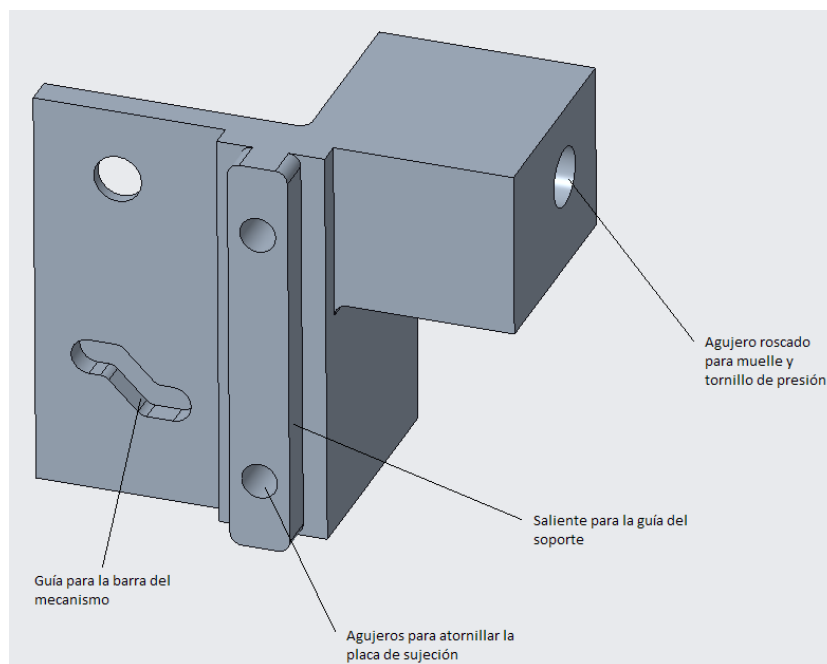


Figura 37. Base izquierda vista por detrás

En la parte trasera de la base lleva el saliente que se introduce dentro de la guía del soporte y dos agujeros para roscar una placa de sujeción y evitar que se salga. Además, lleva una ranura donde se introduce una de las puntas de la barra del mecanismo que se encarga de subir y bajar las boquillas.

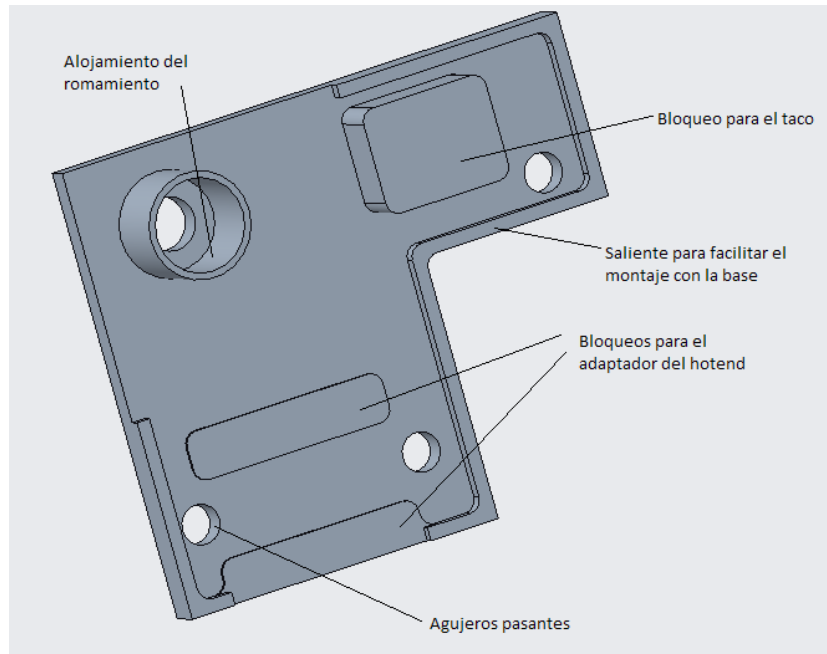


Figura 38. Tapa izquierda

- Peso base extrusor: 31 gr
- Peso tapa extrusor: 7,2 gr

4.2.3. Barra del mecanismo

Esta barra es accionada por el servo y permite conmutar entre las dos boquillas. Se desplaza en horizontal en la guía del soporte y sus dos salientes cilíndricos de las puntas se desplazan por la guía de la base del extrusor, haciendo que suban y bajen los extrusores. Su material es aluminio, con un peso de 0,98 gr.

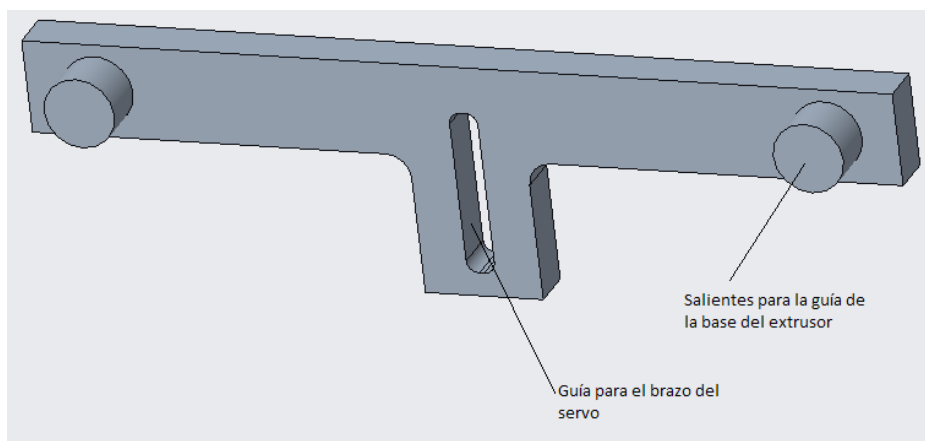


Figura 39. Barra del mecanismo

4.2.4. Adaptador para el hotend

En su parte inferior se rosca el hotend. El objetivo de esta pieza, aparte de bloquear el movimiento del hotend en vertical, es superar la mayor altura del conjunto debida a la disposición de los componentes, comentada en el apartado 3.2., permitiendo

que las boquillas queden debajo de la rueda inferior del soporte. Su material es aluminio y su peso es de 9,5 gr.

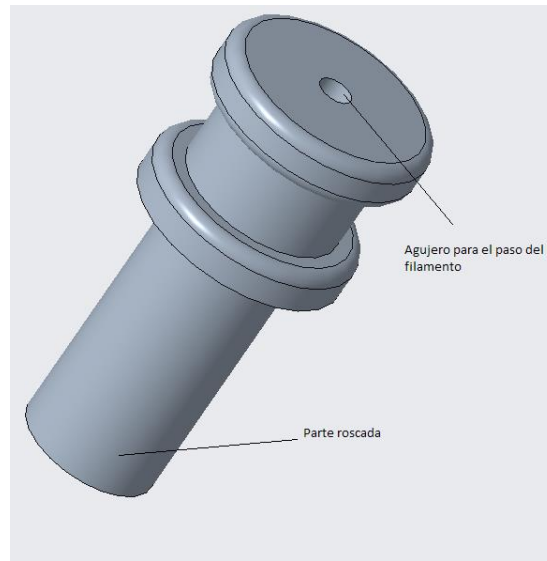


Figura 40. Adaptador para el hotend

4.2.5. Taco del rodamiento de presión

Sobre él va atornillado el rodamiento de presión y se desplaza por el alojamiento de la base, empujado por el muelle. Su material es aluminio también. Su peso es de 1,66 gr.

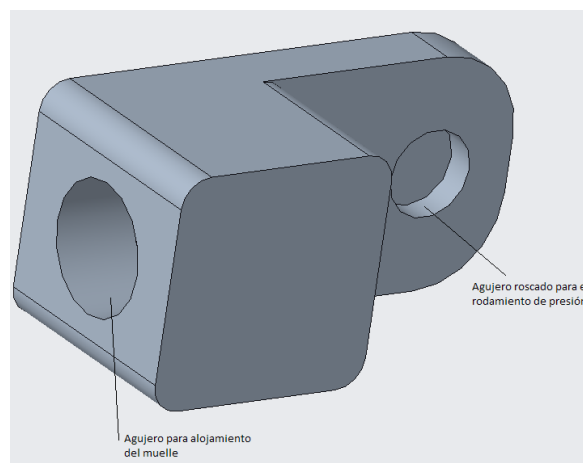


Figura 41. Taco del rodamiento de presión

4.2.6. Soporte de los ventiladores

Su misión es servir para anclar sobre él los cuatro ventiladores de refrigeración, y este a su vez va sujeto al soporte del conjunto. Su material es aluminio, con un peso de 16 gr.

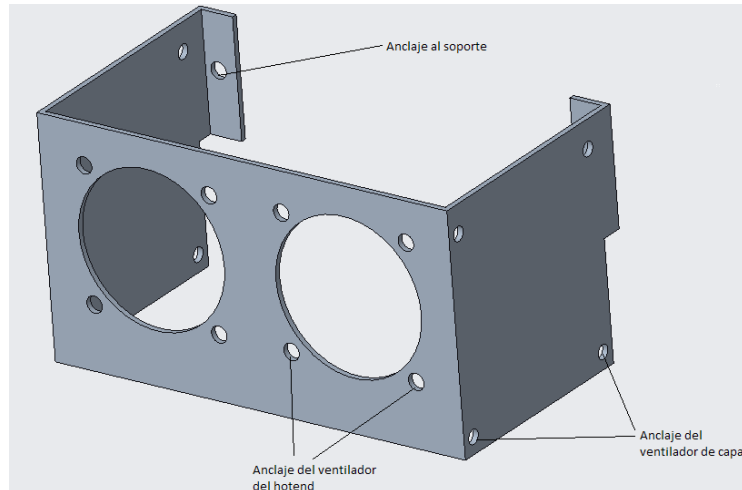


Figura 42. Soporte de los ventiladores

4.2.7. Placa de fijación a la guía

Son dos placas cuya función es impedir que el extrusor se salga de la guía. Van atornilladas al saliente de la parte trasera de las bases como se ve en la figura 43. El material es también aluminio y su peso es de 1,63 gr.

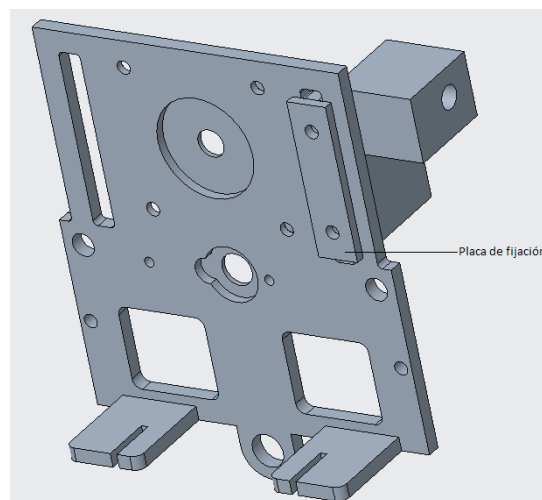


Figura 43. Colocación de la placa de fijación

4.2.8. Separadores de nylon

Son simplemente unos cilindros de nylon con un agujero pasante roscado longitudinalmente. Se montan dos por cada hotend, atornillados y sirven para evitar que el hotend se gire. Tocaban los dos con el soporte, impidiendo los dos sentidos de giro respecto al eje vertical. En la figura 44 se puede ver cómo van dispuestos. Su peso, 0,12 gr.

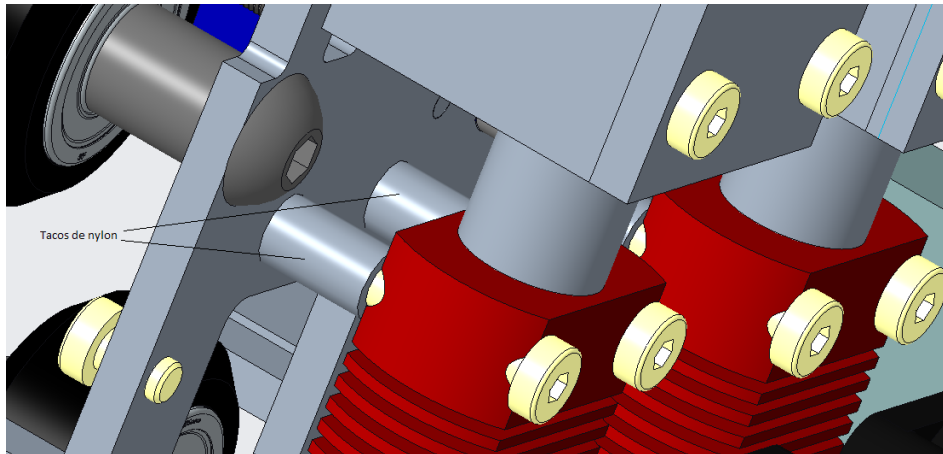


Figura 44. Disposición de los separadores de nylon

4.2.9. Pilares del servo

Sirven para poder montar el servo en la disposición que se ha buscado. Tienen un extremo que se rosca al soporte y en el otro extremo un agujero roscado donde atornillar el servo. Son de aluminio. Su peso es de 0,23 gr.

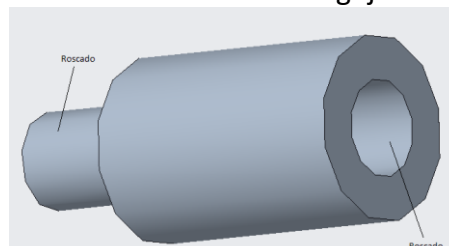


Figura 45. Pilares del servo

4.3. Sistema de un extrusor

El sistema de un extrusor consta de: el piñón, la rueda dentada, el eje de tracción con la rueda de tracción, el rodamiento de presión junto con el taco y el muelle y tornillo de empuje.

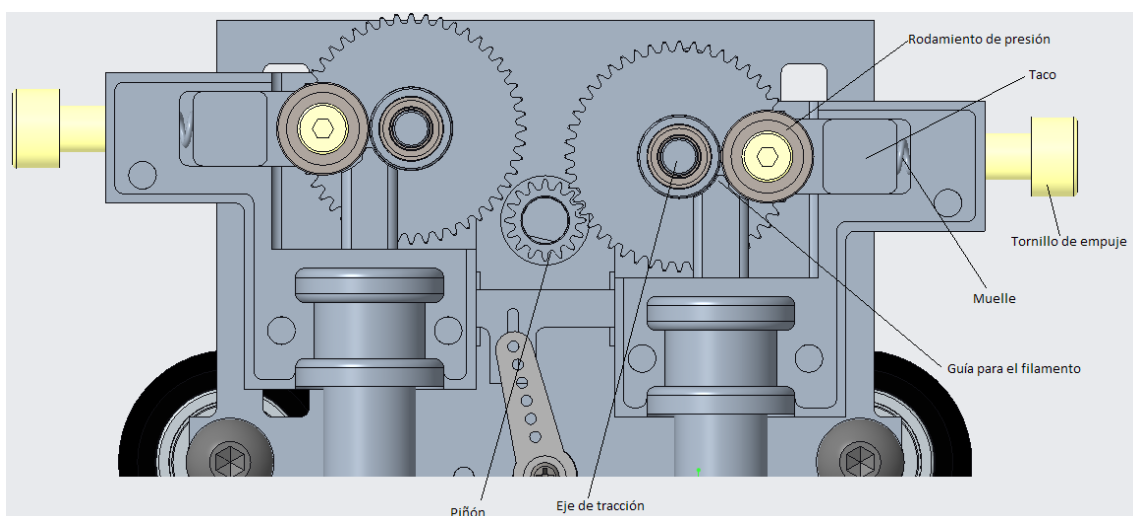


Figura 46. Sistema de extrusión



Se trata de un extrusor directo, accionado por un sistema motriz con reductora. En el eje de tracción se encuentran la rueda dentada y la rueda de tracción, esta se encarga de impulsar o de tirar del filamento, el cual es empujado sobre esta por el conjunto formado por el rodamiento de presión y el taco sobre el que se fija. Este taco a su vez es empujado por un muelle, el cual aplicará más o menos fuerza sobre él, dependiendo de la posición del tornillo de empuje.

En el diseño se ha tenido en cuenta que se busca poder usar materiales flexibles, de ahí que la guía para el filamento esté lo más próxima posible al punto de tracción. Una vez introducido el filamento en esa guía, es conducido hasta el adaptador del hotend y de ahí al hotend.

4.4. Engrane de los extrusores

El engrane de un extrusor u otro nos permite alternar entre dos materiales. A su vez, con este movimiento de engrane y desengrane se ha aprovechado para producir también el desplazamiento de las boquillas requerido, ya que el movimiento lo realizará todo el conjunto extrusor. El movimiento de engrane y desengrane es vertical, bajando o subiendo la base del extrusor a lo largo de la guía del soporte. Las bases de los extrusores son accionadas por el mecanismo, bajan (hasta la parte baja de la guía vertical del soporte) hasta encontrarse con el piñón, si lo que se desea es extruir, o suben hasta separarse en vertical una distancia en la que ya no haya contacto entre dientes, si lo que se busca es cambiar de boquilla.

Se ha diseñado de tal forma que solo uno de los dos extrusores este engranado a la hora de trabajar con él. Ya que si los dos están engranados la extrusión en uno significa la retracción en el otro. De ahí que se requiera el mecanismo para realizar el cambio de uno a otro.

Conocidos los diámetros primitivos de piñón y rueda podemos calcular la relación de transmisión (i) que tendrá la reductora:

$$i = \frac{D_{p2}}{D_{p1}} = \frac{24}{8} = 3$$

Con el número de dientes y el módulo se calcula la distancia entre centros (L) que deberá haber entre piñón y engranaje:

$$L = \frac{M \cdot (Z_1 + Z_2)}{2} = \frac{0,5 \cdot (16 + 48)}{2} = 16 \text{ mm}$$

Con esta distancia se busca la mejor disposición de la rueda dentada para que se pueda producir bien el engrane con el piñón, echando un vistazo a la figura 47 se llega a las siguientes conclusiones:

- Si el engrane se da a la altura de la línea roja, en primer lugar, chocarían entre si las ruedas dentadas de los dos extrusores. Y, en segundo lugar, sería más fácil que se diera una situación de choque entre un diente del

piñón y uno de la rueda. Por lo tanto, un punto de engrane en la línea roja o próximo se descarta.

- Si el engrane se da a la altura de la línea amarilla, cuando la rueda dentada baje para engranar con el piñón, los dientes de ambas se empujan en los flancos, facilitando el contacto sin darse la situación de choque entre dientes. Esta posición sería favorable, pero tiene el inconveniente de que implicaría aumentar la distancia horizontal entre boquillas, perdiendo superficie de impresión y aumentando el conjunto en anchura.

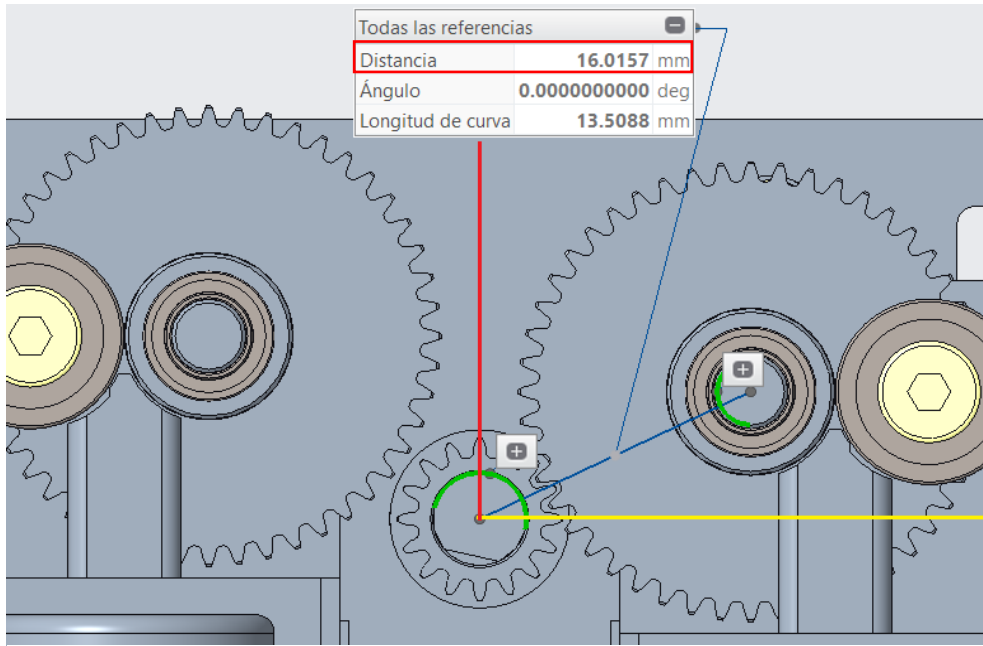


Figura 47. Distancia entre centros y puntos de engrane

Por lo tanto, buscando mantener una distancia horizontal entre boquillas que no sea excesiva y buscando que el engrane se produzca con facilidad (proximidad a la horizontal), se ha decidido que el engrane se dé a aproximadamente 25° , como puede comprobarse en la figura 48.

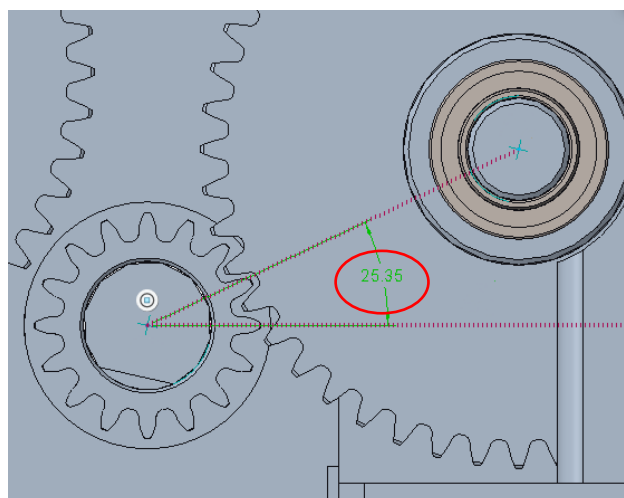


Figura 48. Ángulo entre el plano que contiene los ejes y el plano horizontal

Otro factor a tener en cuenta es el desengrane, ya que la distancia que suba en vertical debe ser suficiente como para que entre los dientes no haya ningún contacto. Para que no haya contacto entre dientes, la distancia entre centros deberá ser mayor que la distancia que hay entre centros de las circunferencias exteriores de piñón y rueda (figura 49).

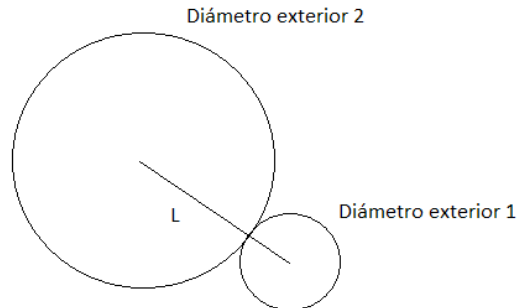


Figura 49. Esquema de la distancia entre centros en el desengrane

$$L_{desengrane} > \frac{D_{e1} + D_{e2}}{2} = 17 \text{ mm}$$

Si la distancia entre centros es mayor a 17 mm en la posición más alta de la base del extrusor (posición de reposo), entonces no habrá contacto entre dientes.

Con trigonometría se puede calcular la distancia vertical que deberá subir como mínimo la base, para esa distancia entre centros de 17 mm (véase la figura 50). Las dos cotas X, se mantienen constantes ya que la base sube vertical.

$$\text{Cos}(25,35) = X/16 \quad X = 14,46 \text{ mm}$$

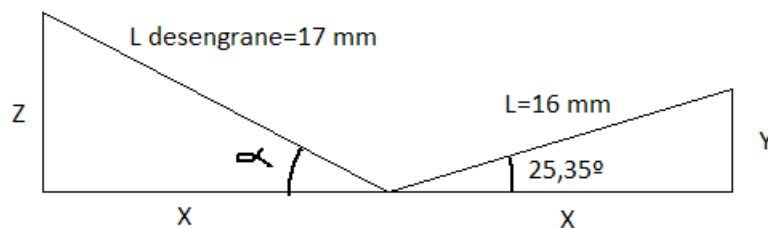


Figura 50. Boceto para el cálculo de la distancia vertical mínima

$$\text{sen}(25,35) = Y/16 \quad Y = 6,85 \text{ mm}$$

$$\text{cos}(\alpha) = 14,46/17 \quad \alpha = 31,72^\circ$$

$$\text{sen}(\alpha) = Z/17 \quad Z = 8,94 \text{ mm}$$

$$Z - Y = 2,09 \text{ mm}$$

Esos 2,09 mm son la distancia en vertical mínima que debe subir la base del extrusor para que se produzca el desengrane. Para asegurar el desengrane, se ha

redondeado a los 3 mm. Con estos 3 mm en vertical la distancia entre centros en el desengrane aumenta hasta los 17,51 mm, como se puede ver en la figura 51.

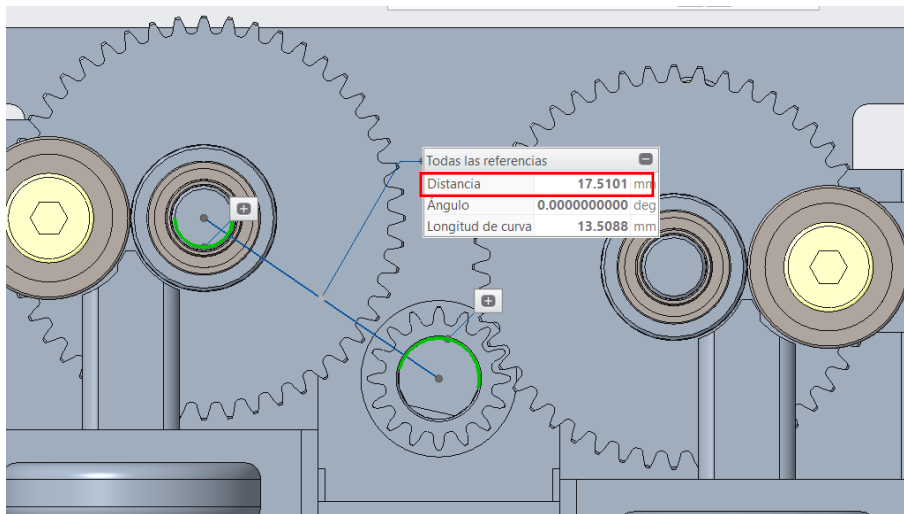


Figura 51. Distancia entre centros en el desengrane

En el Anexo 1, se realiza el cálculo a flexión de los engranajes, simplemente como comprobación, ya que son componentes reutilizados de extrusores con la misma relación de transmisión y por tanto sometidos a los mismos esfuerzos.

4.5. Sistema de translación de las boquillas

El sistema encargado de la translación de las boquillas es el mecanismo formado por el servo, la barra con los dos salientes cilíndricos, la guía de la parte trasera de la base de los extrusores y la guía vertical del soporte del conjunto.

El servo es el encargado de accionar la barra, por medio de un pasador que le une a la guía practicada en la barra.

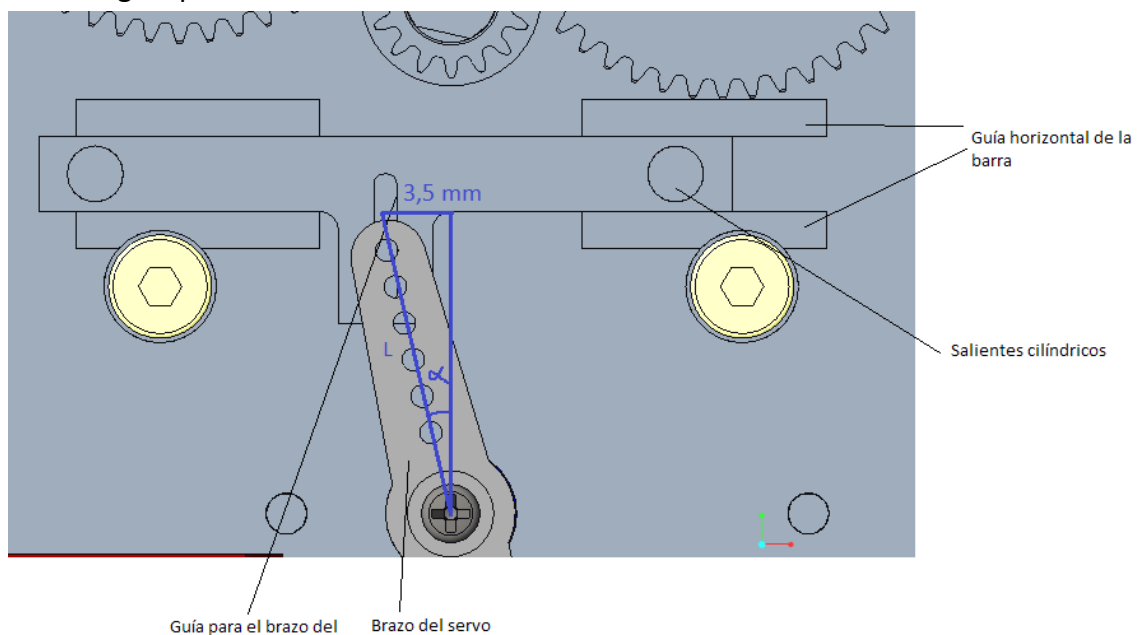
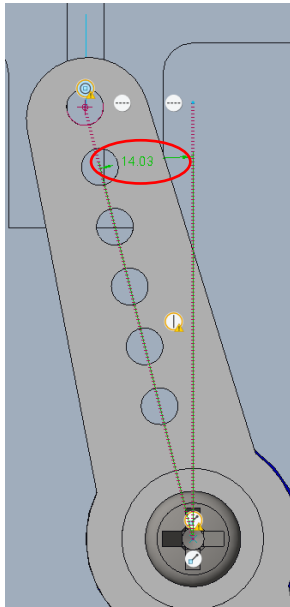


Figura 52. Esquema del movimiento del servo

Como puede apreciarse en la figura 52, el movimiento angular del servo será pequeño. La barra se moverá en horizontal, desde su posición central, una distancia de 3,5 mm, hacia la izquierda y hacia la derecha. Esta distancia se obtiene con la herramienta de medida de CREO Parametric en el ensamblaje del conjunto. Por otra parte, se conoce también desde CREO la longitud del brazo del servo ($L=14,45$ mm). Se puede calcular cual será el ángulo (α) entre el brazo del servo y la vertical hacia uno de los lados, hacia el otro lado será exactamente igual.



$$\text{sen}(\alpha) = \frac{3,5}{14,45} \quad \alpha = 14,02^\circ$$

Figura 53. Ángulo girado por el servo

Por tanto, la distancia angular total que se moverá el servo será el doble de este ángulo, $28,04^\circ$.

La barra, como se ha dicho es movida por el servo y se desplaza horizontalmente a lo largo de la guía que hay para ella en el soporte del conjunto. La distancia total que se desplaza cuando se hace el cambio de una boquilla a la otra, es de 7 mm ($3,5+3,5$). En sus dos extremos posee unos salientes con forma cilíndrica, los cuales se introducen en la guía que tienen las bases del extrusor en su parte trasera, obsérvese la figura 54.

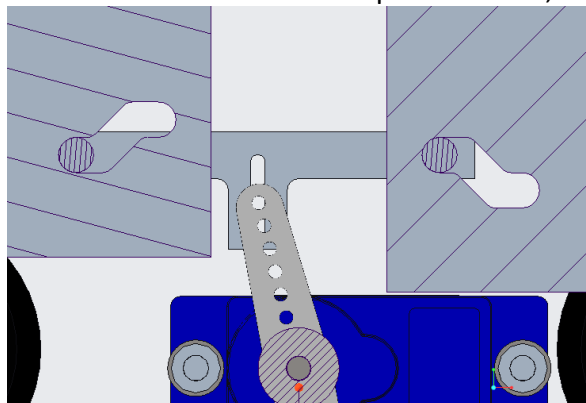


Figura 54. Sección frontal de las guías de las bases y de los salientes de la barra

Estos salientes, que tienen un diámetro de unos 2,99 mm, se mueven a lo largo de estas guías (trayectorias figuras 55 y 56) y transmiten la fuerza del servo a estas, haciendo que las bases de los extrusores se muevan verticalmente. La geometría de estas guías puede observarse en la figura 57.

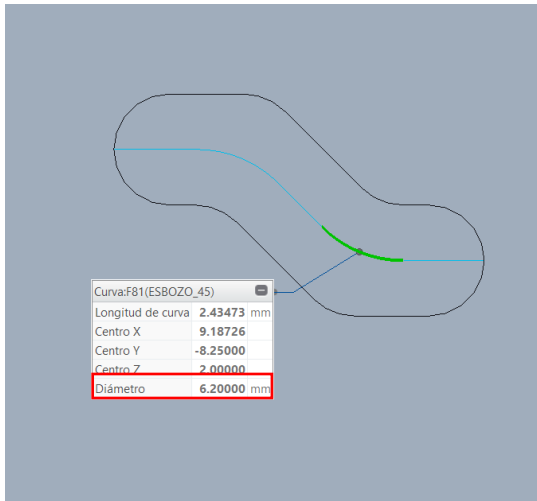


Figura 55. Trayectoria del punto central del saliente de la barra (Redondeo)

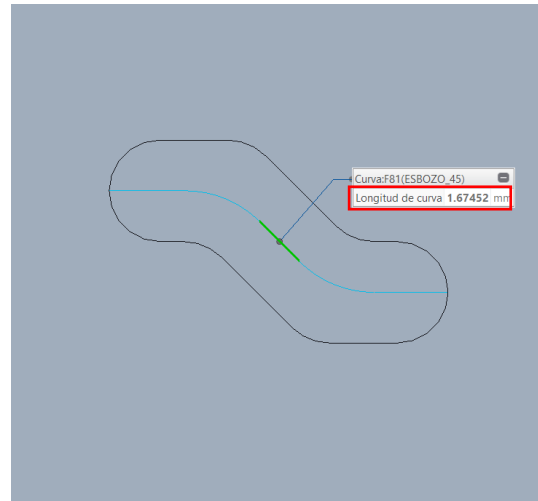


Figura 56. Trayectoria del punto central del saliente de la barra (Zona inclinada)

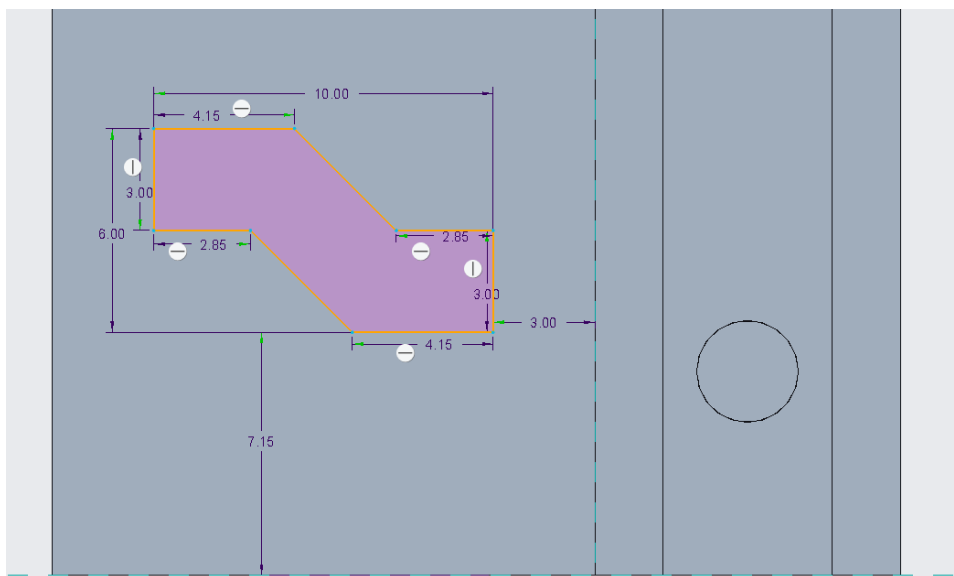


Figura 57. Geometría de la guía de la base del extrusor izquierdo

Como se ve, la longitud máxima de la guía es de 10 mm, si a esta longitud le restamos el diámetro de los salientes de la barra (aproximadamente 3 mm) se tienen los 7 mm que se ha dicho que se desplazaba la barra. La altura máxima de la guía son 6 mm, restando el diámetro de 3 mm de los salientes, se obtiene un valor de 3 mm, esta es la diferencia de altura que existe entre el extrusor que está trabajando y el que está en reposo, o lo que es lo mismo, es la diferencia de altura entre las boquillas (figura 58).

A la zona inclinada de la guía se le ha dado un ángulo de 45° , con el objetivo de que no fuese la guía demasiado larga en horizontal, por la limitación de espacio. Si bien, se sabe que si el ángulo es menor de 45° se facilita más el deslizamiento entre el saliente de la barra y la zona inclinada de la guía.

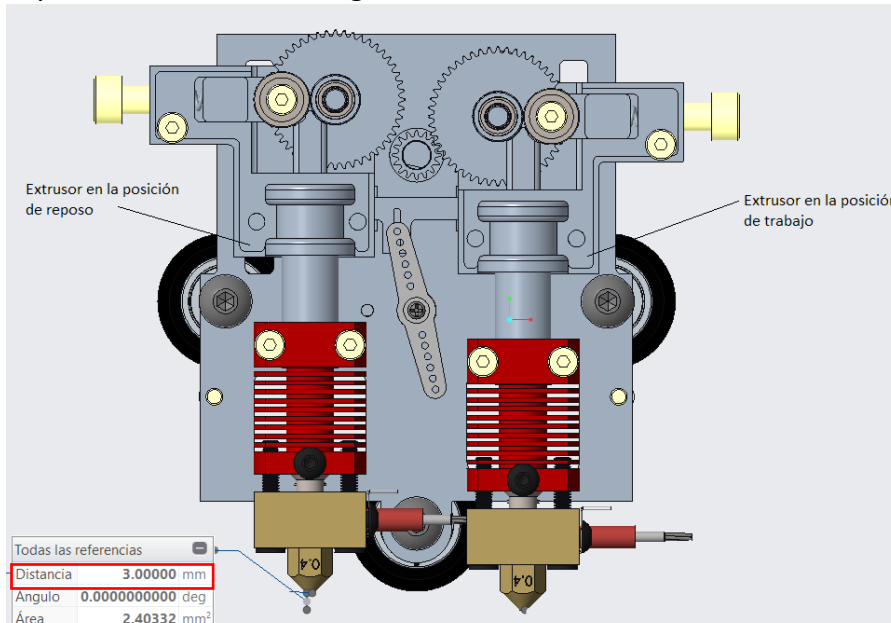


Figura 58. Diferencia de altura entre las boquillas

El último elemento de este mecanismo son las guías verticales del soporte del conjunto. Dentro de estas se mueven las bases de los extrusores verticalmente (figura 59), permitiendo esa diferencia de alturas entre boquillas y el engrane-desengrane. Cuando una de las bases se encuentra en la parte inferior de esta guía vertical (posición de trabajo), coincide con que se produce el engrane de ese extrusor, mientras el otro se encuentra en la posición de reposo desengranado.

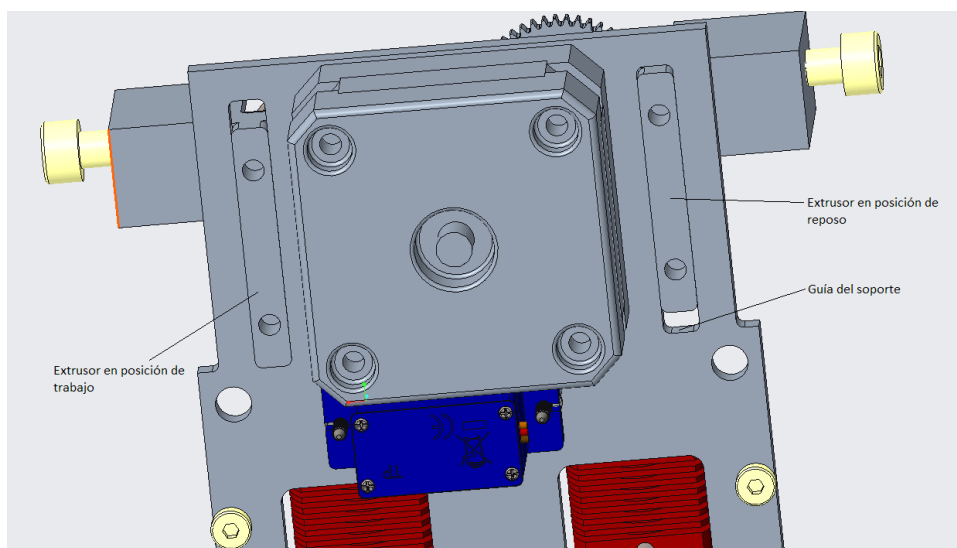


Figura 59. Guías verticales del soporte

En la figura 60, se puede observar cuales son las posiciones de los salientes de la barra, dependiendo de si el extrusor está en la posición de trabajo o en la de reposo.

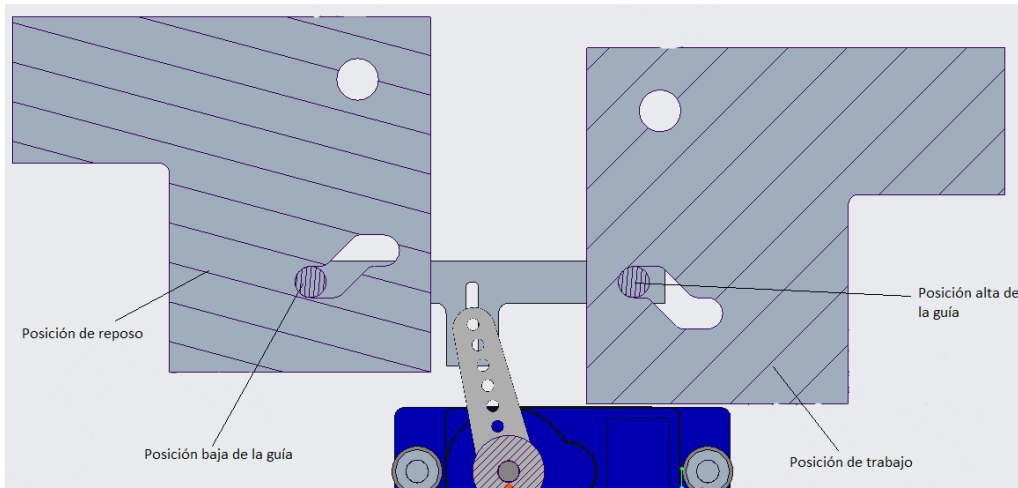


Figura 60. Posiciones del saliente en la guía de la base del extrusor

Cuando se quiere cambiar de boquilla el servo girará hacia el otro lado y la barra hará subir al que estaba extruyendo y bajar al que estaba en reposo.

4.5.1. Análisis de fuerzas que intervienen

Se analizan las fuerzas que intervienen para dos posiciones concretas del servo, una cuando el brazo forma 15° con la vertical (ya que es más desfavorable que los 14° que gira realmente hacia cada lado) y la otra cuando el brazo está completamente vertical (0°). En el primer caso, uno de los extrusores se encuentra en la posición de trabajo y el otro en la de reposo, y en el segundo caso ambos extrusores se encuentran a la misma altura.

Para los dos casos planteados el objetivo es calcular el valor del momento motor (M_m) necesario para que el sistema pueda moverse partiendo de esa posición.

Los resultados que se han obtenido son los siguientes:

- Para la posición de 15° : $M_m = 0,04424 \text{ N} \cdot \text{m} = 4,24 \text{ N} \cdot \text{cm}$
- Para la posición de 0° : $M_m = 0,03761 \text{ N} \cdot \text{m} = 3,761 \text{ N} \cdot \text{cm}$

Mientras que el par del servo a 4,8 V, visto en el apartado 4.1.4., es de:

$$1,6 \text{ kg} \cdot \text{cm} = 15,68 \text{ N} \cdot \text{cm}$$

Según estos resultados, el servo podría iniciar el movimiento, ya que es mayor el par que puede generar. Estos resultados no se tienen muy en cuenta, ya que he tenido problemas con el programa (EES) para resolver el sistema de ecuaciones. El programa dependiendo del orden en que introducías las ecuaciones calculaba, no calculaba o solamente calculaba las ecuaciones de cada sólido por separado, pero todas juntas no.

El desarrollo puede verse en el Anexo 2.

4.6. Resultados obtenidos

En este apartado se mostrará la consecución de las soluciones a los problemas planteados en el apartado 3.

4.6.1. Tamaño conseguido

Como se ha dicho, la anchura no podía ser excesiva, ya que se busca que se pueda usar en una impresora Ender 3 y también que no se reduzca mucho la superficie de impresión. El factor principal del que depende esa anchura del conjunto es del punto donde se produce el engrane de los extrusores, que determina la distancia entre boquillas y por tanto también la anchura. Otro factor del que depende es de la anchura del motor, ya que impide acercar más las bases del extrusor entre sí, debido a que se necesita el espacio para las guías verticales del soporte.

La máxima anchura del conjunto es de aproximadamente 101 mm, como se ve en la figura 61. En el apartado 3.2. se ha visto que la anchura del marco de la Ender 3 es de 250 mm y la máxima anchura del cabezal es de 76 mm. La diferencia entre ambos cabezales es de 25 mm, por lo que se considera un buen resultado teniendo en cuenta que es extrusión multipunto.

La distancia entre boquillas es de casi 38 mm, como se puede ver en la figura 62. Siendo el área de impresión de la cama de 48400 mm² (220 x 220 mm), significa una reducción del área hasta los 31680 mm² (144 x 220 mm), véase la figura 63. En términos porcentuales, significa una pérdida del 34,5 % de la superficie de impresión.

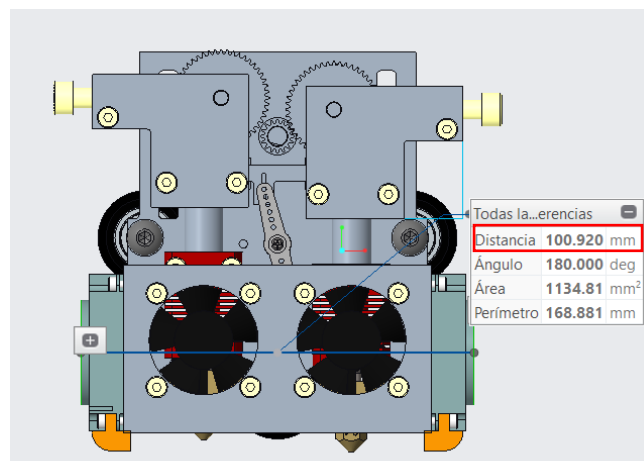


Figura 61. Máxima anchura del conjunto



Figura 62. Distancia entre boquillas

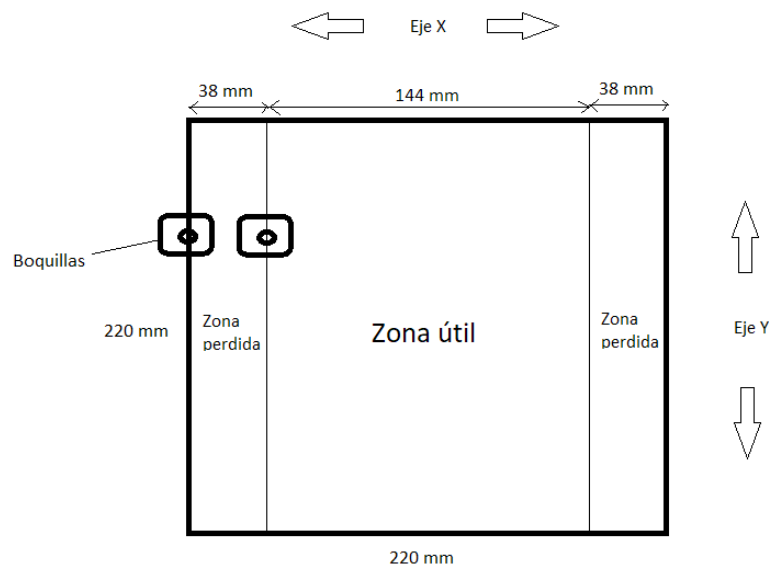


Figura 63. Boceto de la reducción de la superficie de impresión

En cuanto a la altura del conjunto, con la distribución planteada en el apartado 3.2., se ha minimizado la distancia entre motor, servo y perfil de la impresora, para que la altura no fuese excesiva. La distribución de los componentes y la altura máxima del conjunto se pueden ver en la figura 64. También puede verse que el adaptador del hotend cumple la misión de mantener las boquillas por debajo de la rueda inferior del soporte (concretamente a 3,3 mm por debajo en el caso de la boquilla en posición de trabajo).

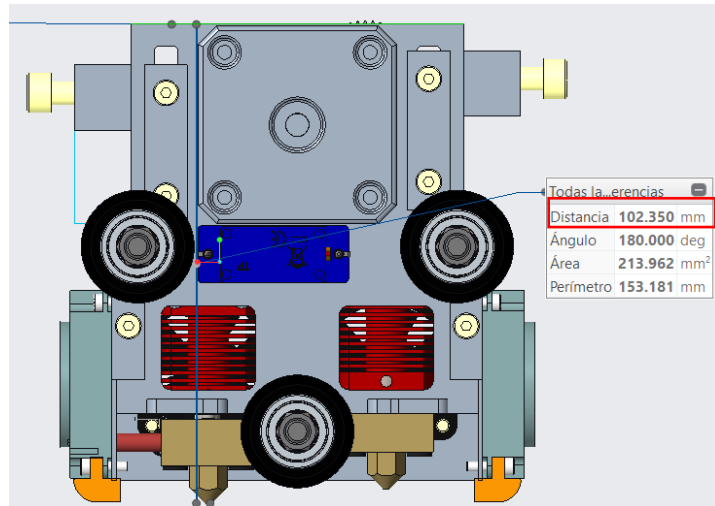


Figura 64. Máxima altura del conjunto

Por último, la profundidad máxima del conjunto puede verse en la figura 65. Como se ve, el componente más pesado que es el motor, se encuentra encima del eje X.

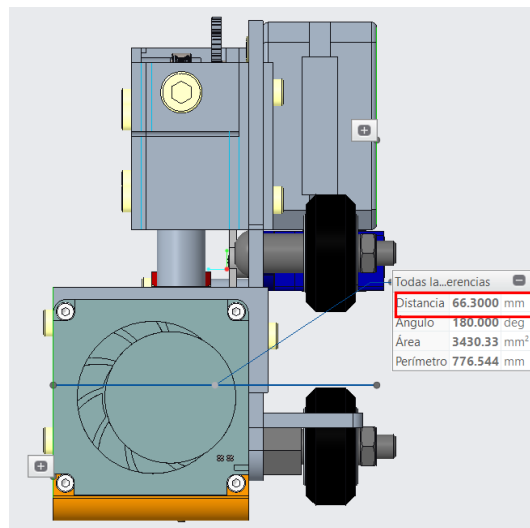


Figura 65. Máxima profundidad del conjunto

4.6.2. Peso conseguido

El peso de los componentes se ha obtenido asignándoles material en CREO Parametric, o se ha obtenido pesándolo, en el caso de algún elemento comercial, de los extrusores facilitados por el tutor. El peso de cada componente se ha visto en los dos primeros subapartados del apartado 4. Sumando todos estos pesos, teniendo en cuenta que hay multiplicar algunos de los pesos por el número de veces que está presente en el conjunto, se obtiene un peso de 473,5 gr, a este peso hay que añadirle el peso de los tornillos que se usan en el montaje de todo el conjunto. Este peso se obtiene también aproximadamente de CREO, con el material que el programa les asigna y tiene un valor de 33,2 gr.

- Peso total del conjunto: 506,7 gr.
- Peso de cada extrusor: 112,43 gr.
- Peso de un extrusor directo monopunto comercial [26] (incluido el motor): 380 gr (Hemera), 400 gr (Anet A8), 366 gr (Titán E3D).

4.6.3. Altura de las boquillas y generación de los cuatro movimientos conseguido

Para este problema se ha conseguido un resultado conjunto, ya que la base del extrusor y el hotend se mueven solidarios. Con la actuación del mecanismo planteado se consigue una altura entre boquillas de 3mm, esta altura es a su vez suficiente para que no haya contacto entre dientes, dejando un solo extrusor engranado y permitiéndole realizar los movimientos de extrusión y retracción (figura 66).

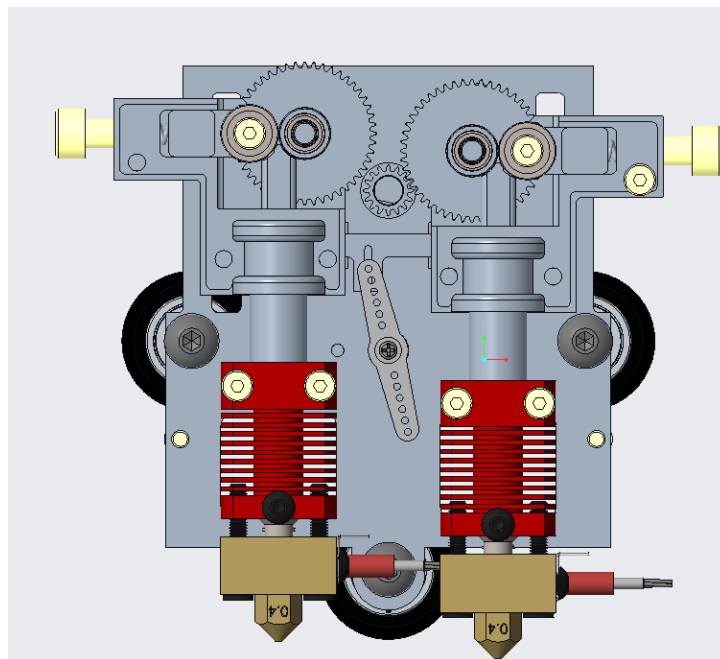


Figura 66. Extrusor izquierdo a 3 mm por encima en la posición de reposo

5. Simulación con CREO Parametric

Se realiza una simulación con CREO Parametric del movimiento del mecanismo que forman el brazo del servo, la barra horizontal y los dos extrusores, con el fin de obtener el valor de la cinemática y de las fuerzas que intervienen en el mecanismo, en especial, el valor del momento que se deberá ejercer en el brazo del servo para poder mover todo el mecanismo.

Se definen las conexiones entre cada uno de los elementos que forman el mecanismo (figura 67) y a continuación se crea un análisis cinemático y dinámico.

Como la velocidad de giro del servo son $0,10s/60^\circ$ (a 6 V), se toma esta velocidad para llevar a cabo la simulación, creando un motor en CREO con la siguiente velocidad angular en $^\circ/s$.

$$\frac{0.10}{60} s/^\circ = 600 \text{ }^\circ/s$$

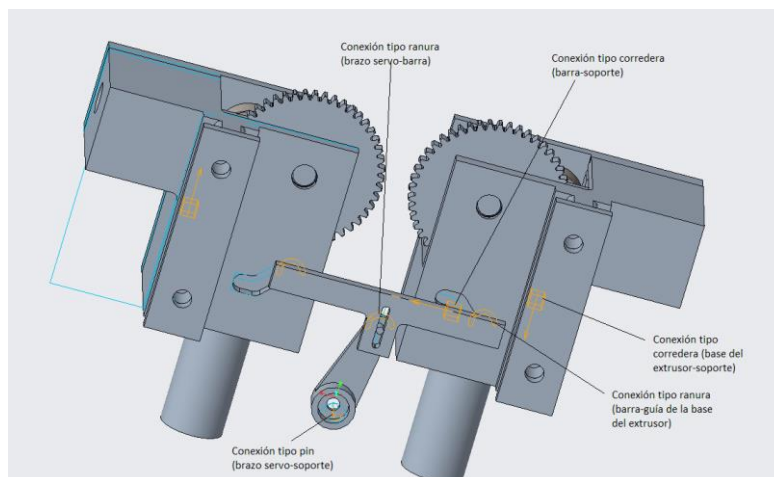


Figura 67. Conexiones entre los distintos elementos del mecanismo

En cuanto a la fricción, se establecen los coeficientes de fricción estático y dinámico con un valor de 1 ambos, en todas las ranuras y correderas del mecanismo, ya que es el valor máximo que permite el programa y no es posible dar el valor de 1,35 que sería según la tabla 8, que puede verse en el Anexo 2, apartado A2.1. *Determinación del coeficiente de rozamiento.*

Los resultados de la cinemática del mecanismo para la simulación a $600 \text{ }^\circ/s$, son los que se muestran a continuación.

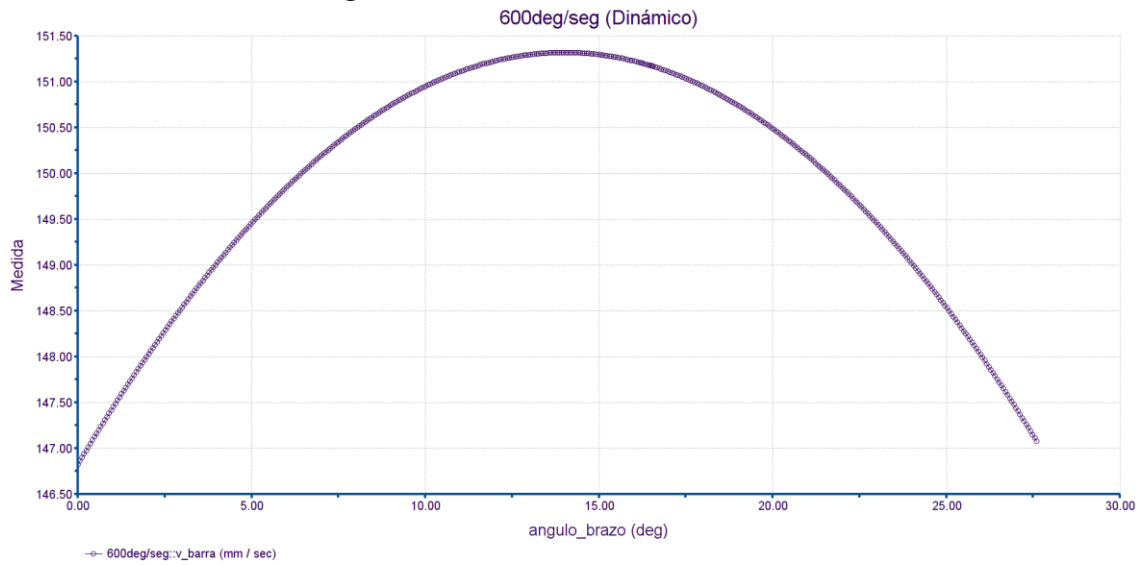


Figura 68. Velocidad horizontal de la barra frente al ángulo del brazo del servo

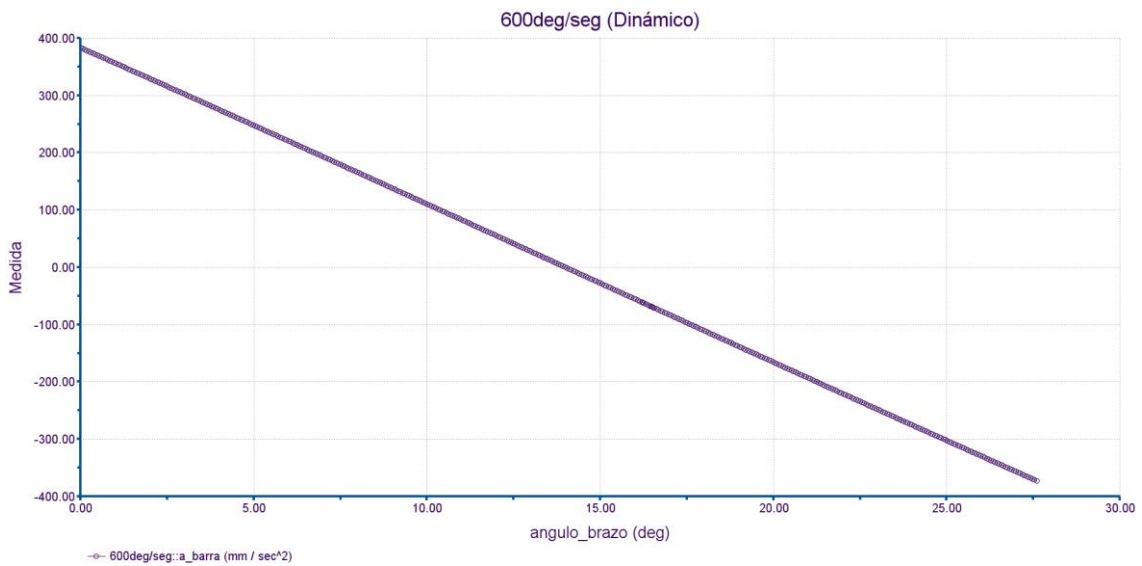


Figura 69. Aceleración horizontal de la barra frente al ángulo del brazo del servo

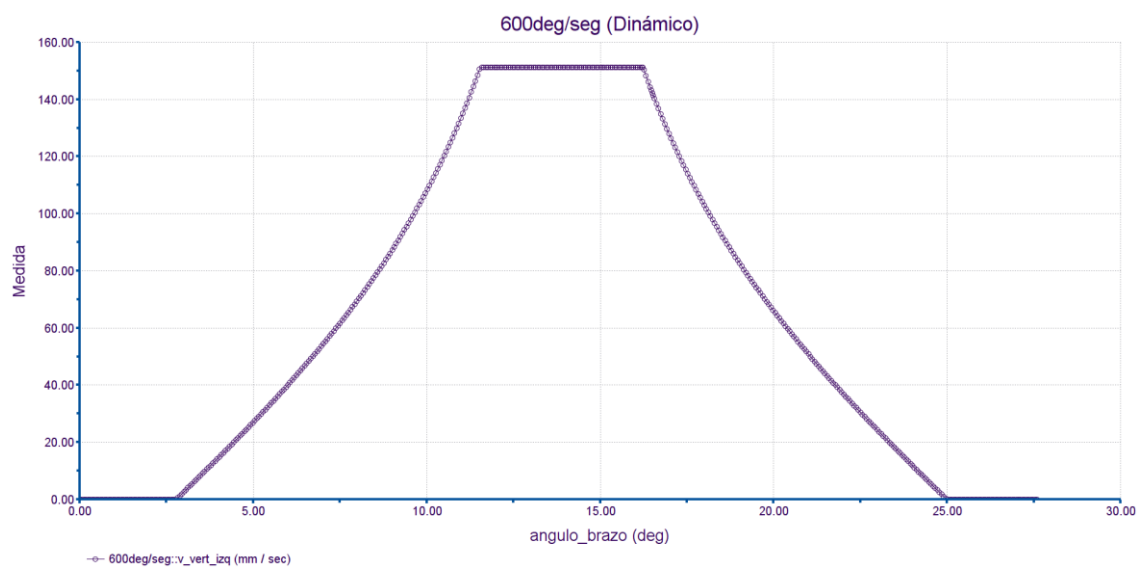


Figura 70. Velocidad vertical del extrusor izquierdo frente al ángulo del brazo del servo

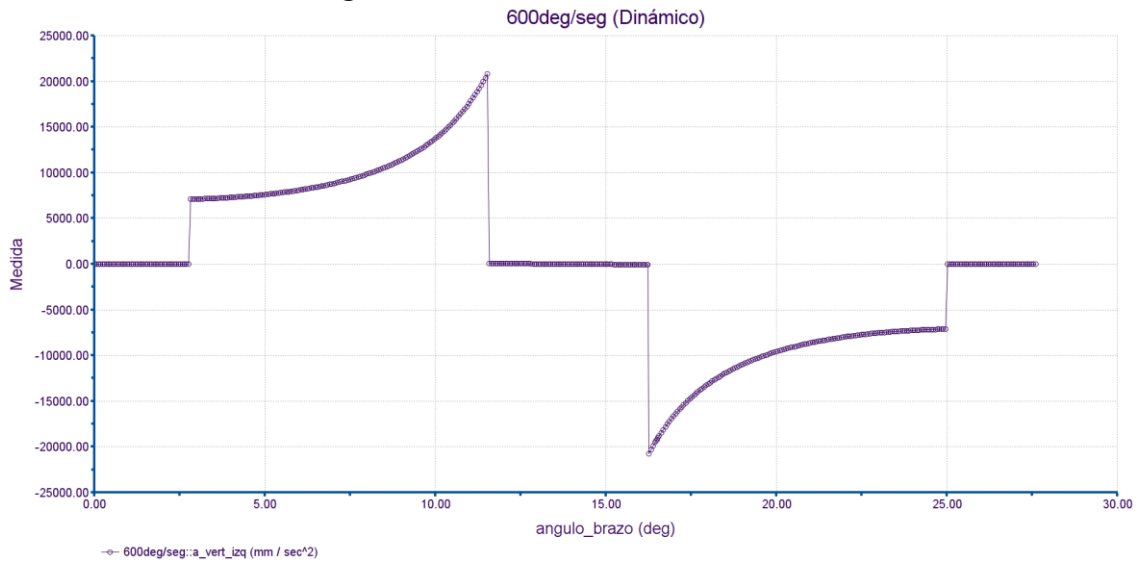


Figura 71. Aceleración vertical del extrusor izquierdo frente al ángulo del brazo del servo

En cuanto a la dinámica del mecanismo los resultados se muestran en las siguientes figuras.

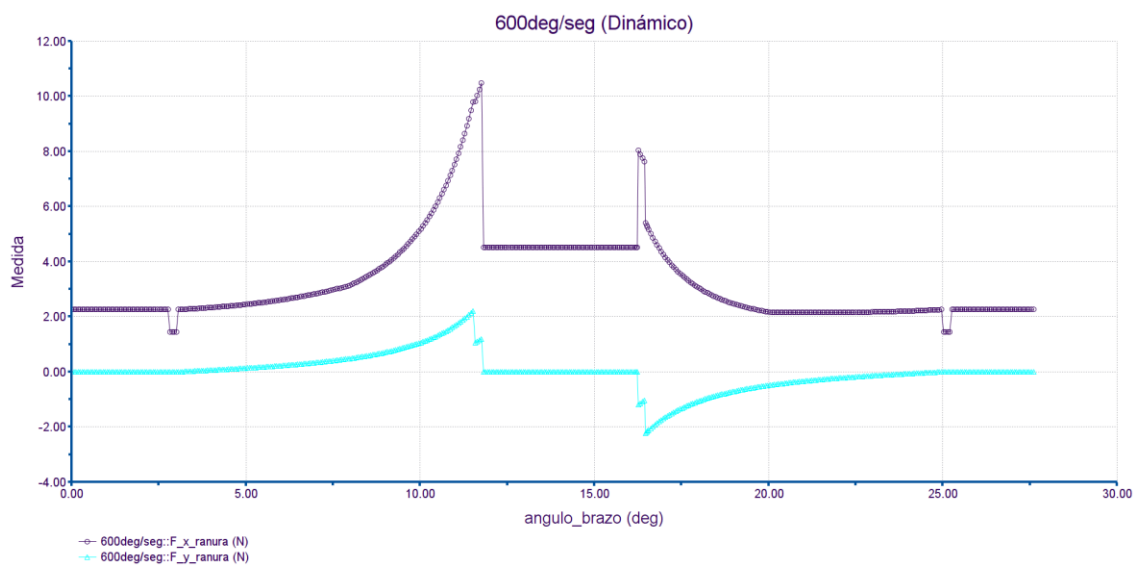


Figura 72. Fuerzas en dirección X e Y en la ranura de la barra

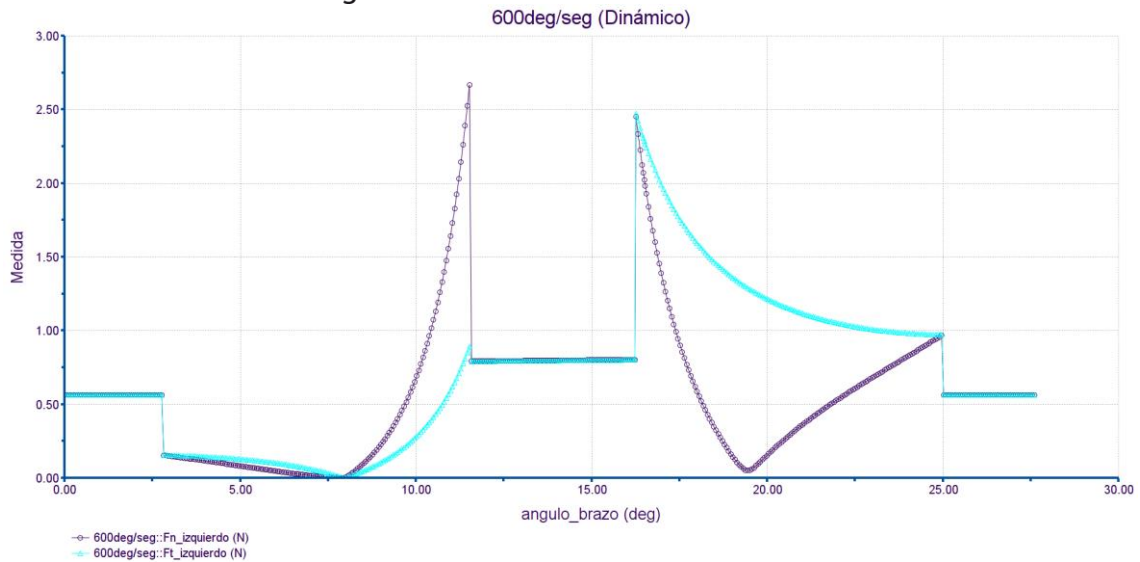


Figura 73. Fuerzas normal y tangente en la ranura de la base del extrusor izquierdo

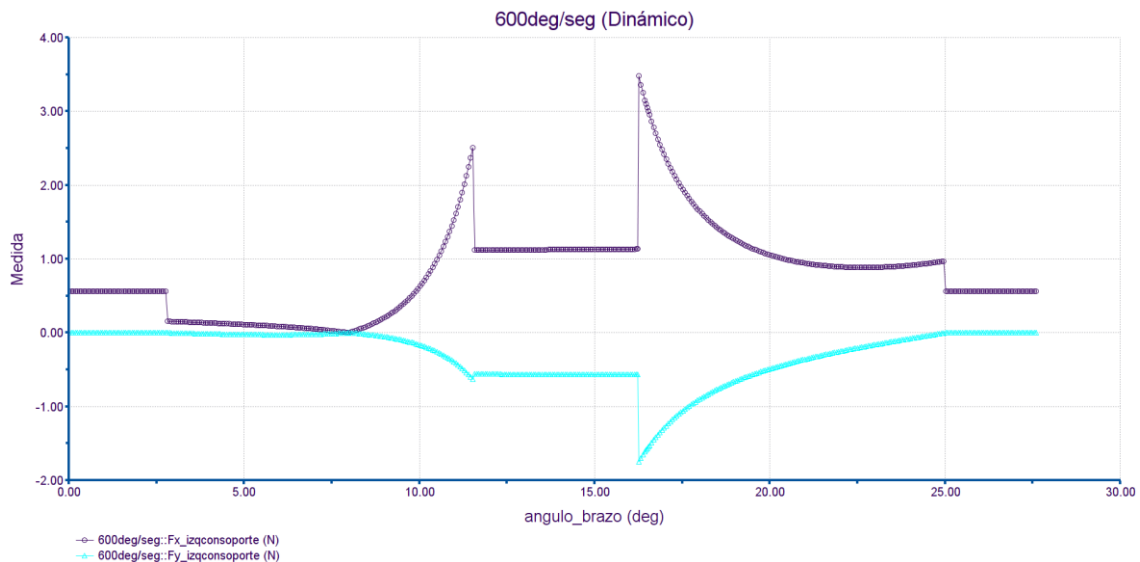


Figura 74. Fuerzas en dirección X e Y entre la base del extrusor izquierdo y la guía del soporte

Como puede verse en las gráficas, los valores de la cinemática obtenidos tienen sentido, tanto para la barra como para el extrusor izquierdo (para el derecho serían los mismos, pero la gráfica al revés).

El problema aparece con los resultados de la simulación dinámica (figuras 72, 73 y 74). En estas gráficas, los puntos en azul oscuro representan los valores de la fuerza normal que se da en el contacto en las guías entre los distintos componentes del mecanismo, mientras que los de color azul claro, representan la fuerza de rozamiento en esas ranuras o guías. El problema que se detecta en estos resultados es que ambas gráficas (fuerza normal y de rozamiento) deberían estar superpuestas, ya que como se ha dicho antes, se realiza la simulación con un coeficiente de rozamiento igual a 1, lo que significa que ambas fuerzas deberían tener el mismo valor.

Como estos valores de las fuerzas no son correctos, el valor del momento motor que dé CREO tampoco lo será.

Por tanto, debido a que no ha sido posible encontrar el fallo por el cual el programa no representaba correctamente las fuerzas y momentos que se le pedían, se plantea la creación de un programa que resuelva la cinemática y la dinámica para distintas posiciones del mecanismo.

El desarrollo de este programa puede verse en el *Anexo 3*.

A continuación, se muestran los resultados de la cinemática, con las mismas condiciones de velocidad angular del servo ($600^\circ/\text{s}$) y con un coeficiente de rozamiento $\mu = 1,35$.

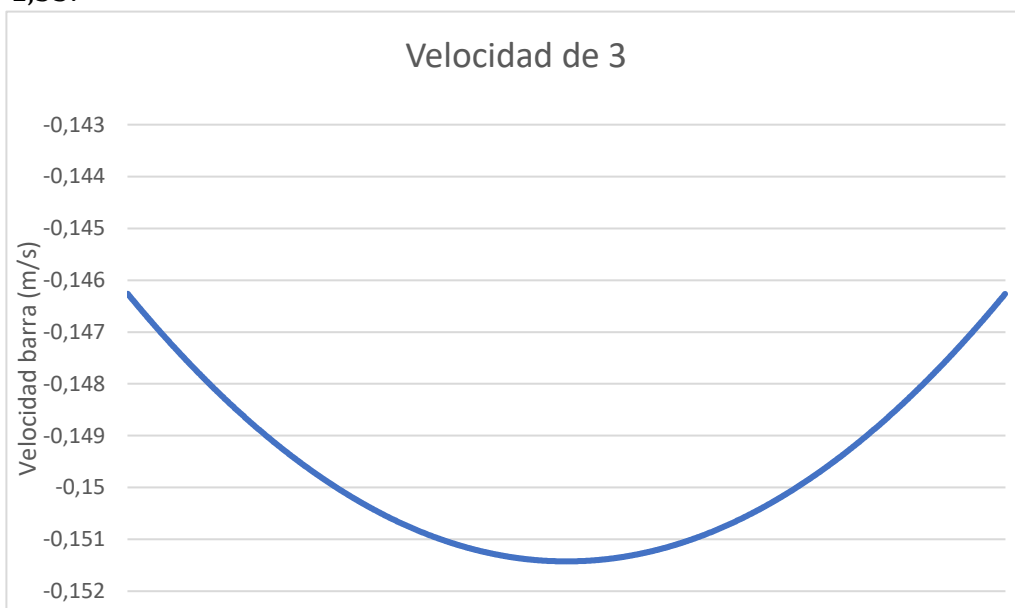


Figura 75. Resultado de la velocidad de la barra con el programa desarrollado

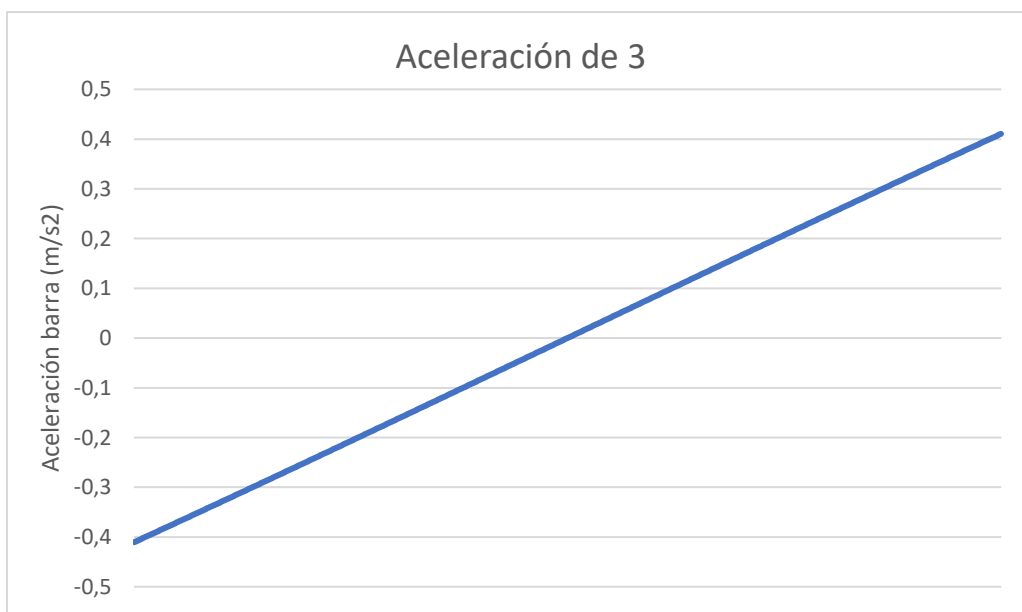


Figura 76. Resultado de la aceleración de la barra con el programa desarrollado



Figura 77. Resultado de la velocidad del extrusor derecho con el programa desarrollado



Figura 78. Resultado de la aceleración del extrusor derecho con el programa desarrollado

Como puede verse los resultados de la cinemática tienen sentido y coinciden con los resultados obtenidos con CREO.

La dinámica con las mismas condiciones es la que puede verse en la figura 79.

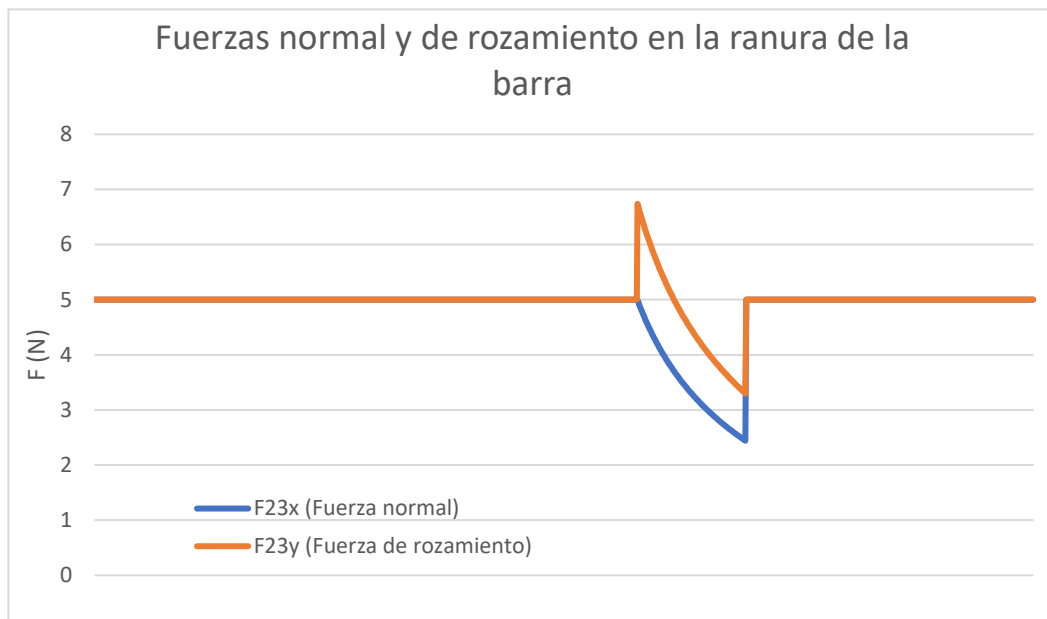


Figura 79. Resultado de las fuerzas en la ranura de la barra con el programa desarrollado

En este caso, puede verse que, si existe la proporcionalidad entre ambas fuerzas que se esperaba obtener, por lo que a priori el programa funciona correctamente, aunque solo calcule un pequeño tramo. Sin embargo, el tramo horizontal, en el que ambas fuerzas están superpuestas, se corresponde con zonas en las que el problema no cumple con las condiciones impuestas y se le asigna un valor aleatorio, en este caso 5, y, por tanto, con esta configuración de velocidad angular del servo, coeficiente de rozamiento e inclinación de las ranuras de las bases, el mecanismo no se movería.

Solo se muestra este valor de los resultados de la dinámica, ya que si este no es posible tampoco lo será el momento motor.

El problema de que no cumpla las condiciones, se encuentra en que los valores de la aceleración son muy grandes y en sus cambios de signo. Valores de la aceleración por encima de $g=9,8 \text{ m/s}^2$, hacen que el valor de la fuerza de inercia crezca mucho y esto sumado a su cambio de sentido hace que se tenga una resultante vertical (formada por F_i y mg) muy grande cuando va en la misma dirección que el peso y más pequeña cuando tienen sentidos opuestos. Esta resultante vertical tiene que ser compensada por la resultante de las fuerzas de rozamiento y sus normales, dándose situaciones donde no es posible.

Por lo tanto, la solución final se obtendrá jugando con los valores de velocidad angular del servo, coeficiente de rozamiento y ángulo de las ranuras de los extrusores, para disminuir las aceleraciones, hasta obtener una solución que cumpla los requisitos.

El coeficiente de rozamiento se puede reducir hasta un valor de $\mu = 0,3$, si se engrasan las ranuras, como puede verse en la tabla 8 del Anexo 2, apartado A2.1. *Determinación del coeficiente de rozamiento.*

El servo alimentado a 4,8 V tiene una velocidad de giro de $0,12 \text{ s}/60^\circ = 500^\circ/\text{s}$ (apartado 4.1.4.).

Reduciendo lo máximo posible la inclinación de las ranuras, se puede llegar a conseguir un ángulo de $26,56^\circ$ en la ranura. En la trayectoria (figura 81), lo único que cambia es la longitud del tramo inclinado que pasa a ser de 5,24 mm, la altura de la ranura se conserva para seguir cumpliendo los 3 mm de diferencia de altura entre boquillas.

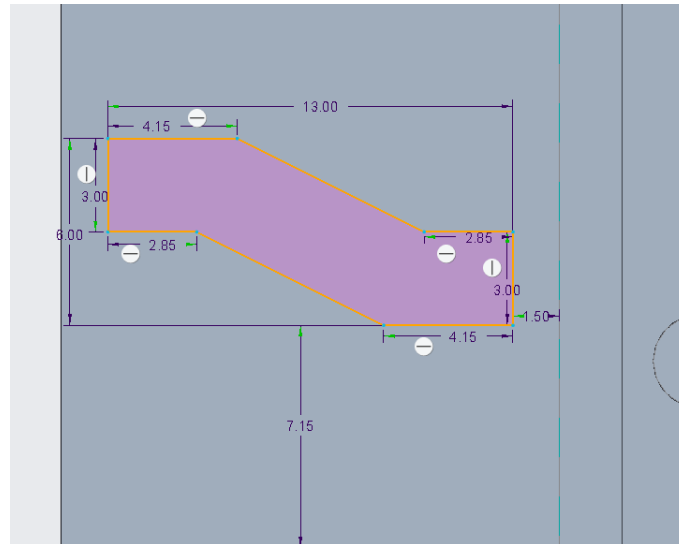


Figura 80. Nueva geometría con inclinación de $26,56^\circ$

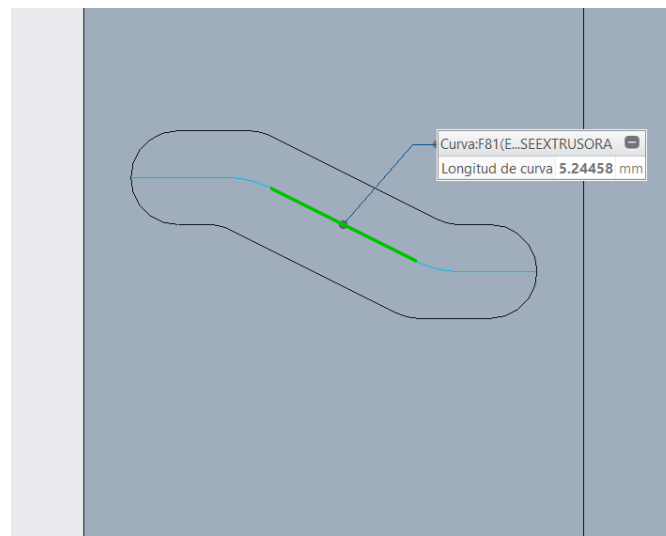


Figura 81. Nueva trayectoria con inclinación de $26,56^\circ$

Con esta nueva geometría de la ranura de las bases, el ángulo que gira el servo aumenta, y pasa a estar entre $20,24^\circ$ y $-20,24^\circ$.

El resultado del momento motor para este caso es el siguiente (figura 82).

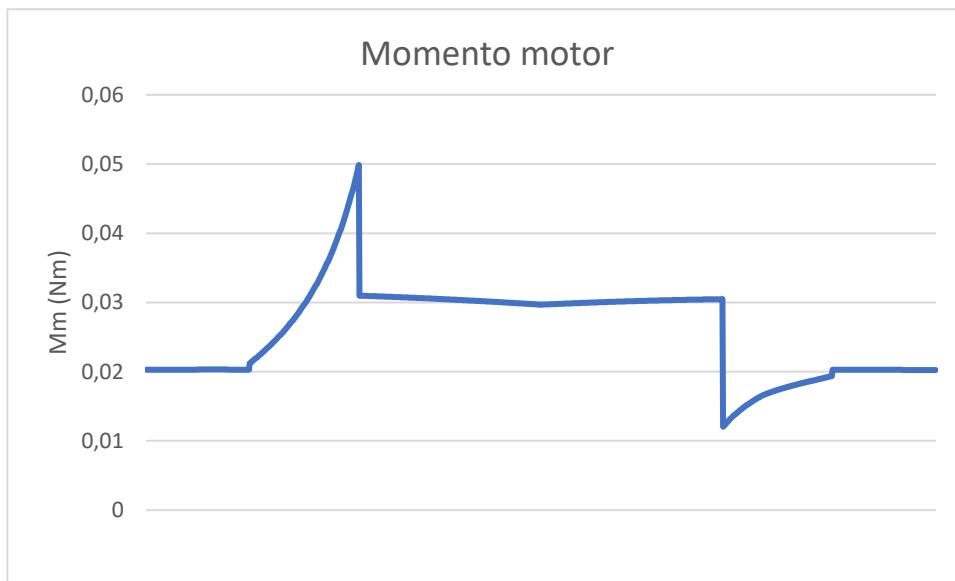


Figura 82. Resultado del momento motor

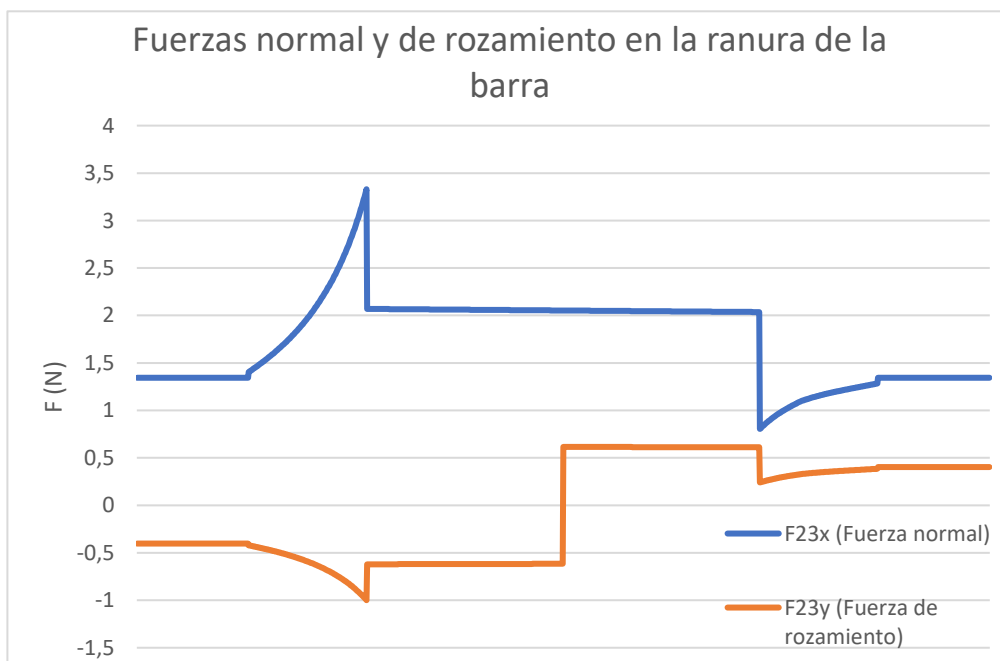


Figura 83. Resultado de las fuerzas en la ranura de la barra

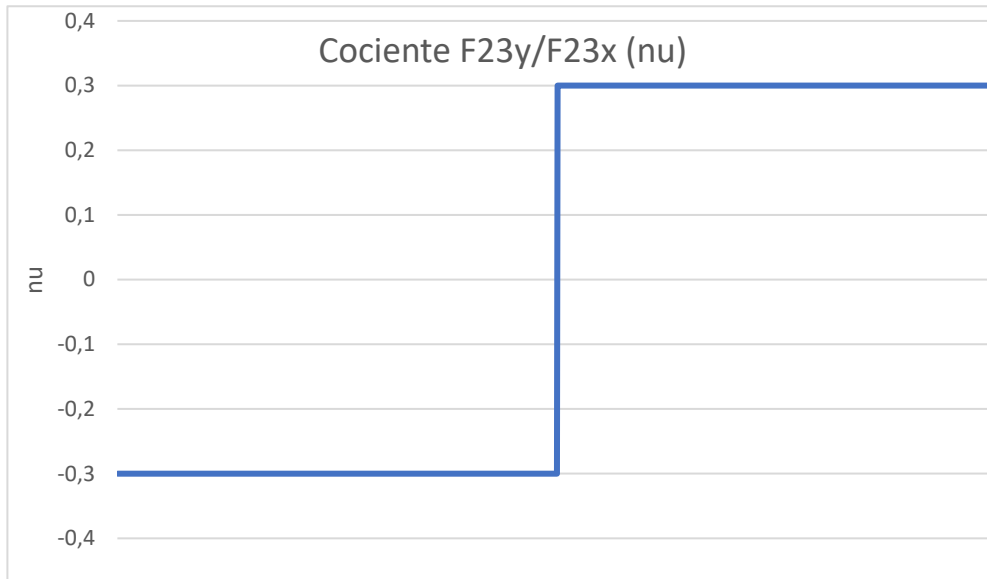


Figura 84. Cálculo del coeficiente de rozamiento en la ranura de la barra

En las figuras 83 y 84 puede verse que existe proporcionalidad entre la fuerza de rozamiento y la fuerza normal, en la ranura de la barra. Además, el programa calcula para todas las posiciones, por tanto, se toma el valor del momento motor de la figura 82 como válido.

El valor máximo del momento es: $M_m = 0,05 Nm = 50Nmm$

El valor del par que puede dar el servo alimentado a 4,8 V es:

$$M = 1,6 kg \cdot cm = 15,68 Ncm = 156,8 Nmm$$

Como se aprecia, el par que puede ofrecer el servo es tres veces mayor que el par que necesita el sistema para moverse. Por tanto, con esta nueva configuración de las ranuras de las bases de los extrusores el sistema se movería, dándose por válida la solución.



6. Conclusiones y desarrollos futuros

Este proyecto concluye con el diseño de un primer prototipo de un extrusor directo que permita el uso de dos materiales. Partiendo de un análisis de mercado, para conocer que soluciones existen en el mercado para la extrusión múltiple, se ha llegado a la conclusión de diseñar este extrusor, con el objetivo de superar las desventajas de los sistemas ya existentes.

La adaptación de este extrusor a una impresora 3D comercial como es el caso de la Ender 3, se ha visto que es posible por tamaño (101 mm de anchura, frente a los 76 mm del cabezal de la Ender 3), pero podría sacársele más provecho en una impresora más robusta (inercias) y con una mayor superficie de impresión, ya que como se ha visto la distancia entre boquillas recorta superficie de impresión en el eje X, perdiendo un 34,5% de superficie de impresión.

Por otra parte, en cuanto al peso se ha logrado un buen resultado debido al uso de un solo motor, en comparación con extrusores del mercado que usan una extrusión directa monopunto, ya que como se ha visto no llega a pesar más del doble que uno de estos. Mientras que los extrusores directos multipunto del mercado son básicamente dos extrusores directos, con dos motores y dos boquillas, sobre el mismo eje X de la impresora. Se ha planteado también que el material de los componentes fabricados sea aluminio, para a la vez poder tener resistencia y ligereza. Sin embargo, cabría la posibilidad de reducir más el peso afinando más el diseño, usando por ejemplo un solo ventilador de capa para ambos hotend, eliminando material sobrante, etc.

Tal y como se ha diseñado este extrusor permite realizar los dos movimientos básicos, la extrusión y la retracción, en cada una de las dos boquillas por independiente, y a la vez, permite que exista una diferencia de cotas entre la boquilla que se usa y la que está en espera. Todo esto gracias al mecanismo que hace posible conmutar entre un extrusor u otro. Si bien el diseño a priori permite estos movimientos, la mejor forma de saber si funcionaría es fabricar este primer prototipo, para así poder comprobar que el mecanismo funciona como se plantea o que el engrane y desengrane se dan correctamente y sin problemas como podría ser el choque entre dientes.

Una de las aportaciones de este proyecto es la posibilidad que tendría de imprimir con multitud de materiales (incluidos flexibles), y sobre todo para imprimir piezas con geometrías más complejas, que requieran un material que luego sea fácil de eliminar para construir apoyos, con lo que se ahorraría mucho tiempo de impresión.

Una de las dificultades que se ha encontrado ha sido, encontrar la manera de poder desplazar las boquillas con un mecanismo, y como disponer todo para poder llevar esto a cabo, y todo afectando lo mínimo posible al peso. Otra de las dificultades ha sido el diseño de los componentes por el tiempo dedicado hasta encontrar una solución satisfactoria, y sobre todo la colocación de estos en el conjunto, ya que había que tener muchos factores a tener en cuenta, entre ellos aprovechar al máximo los



espacios teniendo en cuenta todos los elementos necesarios en un sistema de extrusión, para evitar dimensiones excesivas.

La principal dificultad encontrada ha sido a la hora de calcular las fuerzas que intervienen, para intentar sacar un valor del momento motor necesario. En primer lugar, se han presentado problemas con el programa EES, el cual no sabía resolver el sistema de ecuaciones para las dos posiciones planteadas. Finalmente, tras muchas revisiones, se ha logrado que muestre algún resultado para el momento motor, pero no se considera aceptable. En segundo lugar, otra gran dificultad se ha presentado con la simulación en CREO. El programa da unos valores que se consideran lógicos de la cinemática, pero en los resultados de la dinámica falla, ya que al representar los valores de fuerzas normales y de rozamiento en las ranuras y guías, debería existir una proporcionalidad (en el caso de la simulación, deberían ser iguales los valores al usar un coeficiente de rozamiento de 1) entre ambas gráficas. Por tanto, a la vista de que no existe esa proporcionalidad, no se considera tampoco aceptable el valor de momento motor que dé CREO. Al igual que con EES, se ha buscado cuál ha podido ser el fallo, simulando en distintas condiciones de velocidades angulares del servo y con distintos tipos de conexiones entre los sólidos, pero no se ha logrado encontrar.

Debido a estos inconvenientes que se han presentado, se ha visto la necesidad de crear un programa informático, que calcule para cada posición la cinemática y la dinámica del mecanismo, para así obtener un valor del momento motor necesario. Con este programa se llega a la conclusión de que el problema planteado inicialmente (ranuras a 45° , coeficiente de rozamiento de 1,35, velocidad de giro del servo de $600^\circ/s$) no tendría solución. Ante esto, se ha buscado reducir lo máximo posible esos tres parámetros (inclinación de ranuras, coeficiente de rozamiento y velocidad de giro). La inclinación de las ranuras se ha disminuido lo máximo posible, sin que afecte a diseño planteado, llegando a esos $26,56^\circ$. El coeficiente de rozamiento, se ha buscado reducirlo hasta el valor que tendría si las ranuras y guías estuvieran lubricadas, logrando ese 0,3, si bien, también se podría haber planteado el uso de otros materiales o usar guías con postizos de otro material. El valor de velocidad de giro se reduce a $500^\circ/s$, simplemente cambiando la alimentación del servo de 6 V a 4,8 V. Actuando sobre estos tres parámetros se ha logrado una solución válida, en la que el servo da un par hasta tres veces superior al que se necesitaría.

Este proyecto, aparte de para afianzar y aplicar conocimientos adquiridos durante la carrera, me ha servido desde el punto de vista personal para introducirme en el mundo de la impresión 3D (FDM) del cuál apenas conocía. Además, este proyecto me ha permitido conocer y aprender a manejar a nivel básico un nuevo software de diseño como es CREO Parametric, el cual tampoco conocía.

Finalmente, en cuanto a los desarrollos futuros en este proyecto, estaría en primer lugar la fabricación del mismo, viendo si es viable fabricarlo por su geometría y tamaños de componentes, materiales, etc. En segundo lugar, también estaría el acople del mismo a la Ender 3, desarrollando la programación necesaria para la comunicación



entre la impresora y el servo, en función de la boquilla y material que quiera emplear. Otro posible desarrollo es la sensorización de las boquillas, para conocer su posición.



7. Bibliografía

- [1] Colaboradores de Wikipedia. *Impresión 3D* [en línea]. Wikipedia, La enciclopedia libre, 2021 [fecha de consulta: 25 de agosto del 2021]. Disponible en <https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Impresi%C3%B3n_3D&oldid=137790839>.
- [2] VALVERDE PONCE, Roxana. *IMPRESORAS 3D: Marco teórico, modelos de desarrollo y campos de aplicación* [en línea]. Tesis, Universidad de Castilla la Mancha, 2015, [consulta: 25 de agosto de 2021]. pp. 59-61. Disponible en: <http://hdl.handle.net/10578/10513>
- [3] ¿Que tipos de movimiento existen en impresión 3D FDM?, 2021. En: *Capa Sobre Capa* [en línea] [consulta: 12 de septiembre de 2021]. Disponible en: <https://capasobrecapa.com/tipos-movimiento-fdm/>
- [4] Colaboradores de Wikipedia. *Ácido poliláctico* [en línea]. Wikipedia, La enciclopedia libre, 2021 [fecha de consulta: 26 de agosto del 2021]. Disponible en <https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=%C3%81cido_polil%C3%A1ctico&oldid=133889019>.
- [5] *Ultimaker Support* [en línea] [consulta: 13 de septiembre de 2021]. Disponible en: <https://support.ultimaker.com/hc/en-us/articles/360011962720-Ultimaker-PLA-TDS>
- [6] *Ultimaker Support* [en línea] [consulta: 13 de septiembre de 2021]. Disponible en: <https://support.ultimaker.com/hc/en-us/articles/360012759139-Ultimaker-ABS-TDS>
- [7] Colaboradores de Wikipedia. *Tereftalato de polietileno* [en línea]. Wikipedia, La enciclopedia libre, 2021 [fecha de consulta: 26 de agosto del 2021]. Disponible en <https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Tereftalato_de_polietileno&oldid=136437599>.
- [8] *Ultimaker Support* [en línea] [consulta: 13 de septiembre de 2021]. Disponible en: <https://support.ultimaker.com/hc/en-us/articles/360021702539-Ultimaker-PETG-TDS>
- [9] Colaboradores de Wikipedia. *Poliuretano termoplástico* [en línea]. Wikipedia, La enciclopedia libre, 2021 [fecha de consulta: 13 de septiembre del 2021]. Disponible en <https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Poliuretano_termopl%C3%A1stico&oldid=134785734>.
- [10] *All3DP.com* [en línea] [consulta: 26 de agosto de 2021]. Disponible en: <https://all3dp.com/es/1/filamento-3d-filamento-impresora-3d/>
- [11] *Omnexus.specialchem.com* [en línea] [consulta: 13 de septiembre de 2021]. Disponible en: <https://omnexus.specialchem.com/polymer-properties/properties/hardness-shore-d>
- [12] *Omnexus.specialchem.com* [en línea] [consulta: 13 de septiembre de 2021]. Disponible en: <https://omnexus.specialchem.com/polymer-properties/properties/hardness-shore-d>
- [13] *Ultimaker Support* [en línea] [consulta: 13 de septiembre de 2021]. Disponible en: <https://support.ultimaker.com/hc/en-us/articles/360011962600-Ultimaker-Nylon-TDS>



- [14] *Ultimaker Support* [en línea] [consulta: 13 de septiembre de 2021]. Disponible en: <https://support.ultimaker.com/hc/en-us/articles/360011963160-Ultimaker-PVA-TDS>
- [15] RECREUS, APRENDE. ¿Qué es la 'dureza Shore'? En: *Recreus* [en línea]. 2021. [consulta: 13 de septiembre de 2021]. Disponible en: <https://recreus.com/es/noticias/aprende-con-recreus/que-es-la-dureza-shore->
- [16] LORENZO, JORGE, 2021. Qué son y Cómo elegir el Hotend y Extrusor Perfecto para tu Impresora 3D. En: *Of3lia* [en línea]. 2021. [Consulta: 29 de agosto de 2021]. Disponible en: <https://of3lia.com/guia-extrusor-y-hotend-impresora-3d/>
- [17] RECREUS, APRENDE, 2021. Extrusión directa vs. tipo bowden. En: *Recreus* [en línea]. 2021. [Consulta: 13 de septiembre de 2021]. Disponible en: <https://recreus.com/es/noticias/aprende-con-recreus/extrusion-directa-vs-tipo-bowden>
- [18] LORENZO, JORGE, 2021. Qué son y Cómo elegir el Hotend y Extrusor Perfecto para tu Impresora 3D. En: *Of3lia* [en línea]. 2021. [Consulta: 29 de agosto de 2021]. Disponible en: <https://of3lia.com/guia-extrusor-y-hotend-impresora-3d/>
- [19] Creality Ender 3 assembly by Coillote, 2018. En: *Thingiverse.com* [en línea][Consulta: 14 de septiembre de 2021]. Disponible en: <https://www.thingiverse.com/thing:3044639/files>
- [20] *Amazon.es* [en línea] [consulta: 14 de septiembre de 2021]. Disponible en: <https://www.amazon.es/WJN-Motor-Motor-0-42N-m-impresi%C3%B3n-tama%C3%B1o/dp/B0837Y3Z37?th=1>
- [21] FRASSON, Matheus, 2017. Free CAD Designs, Files & 3D Models | The GrabCAD Community Library. En: *Grabcad.com* [en línea]. 2017. [Consulta: 30 de agosto de 2021]. Disponible en: <https://grabcad.com/library/sg90-micro-servo-9g-tower-pro-1>
- [22] CASTRO SNURMACHER, Antonio. Tutorial teórico práctico con servos y Arduino. - Dron Profesional [En línea]. En: *Dron Profesional*. 9 septiembre 2019. [Consulta: 30 de agosto de 2021]. Disponible en: <https://dronprofesional.com/blog/tutorial-teorico-practico-con-servos-y-arduino/>
- [23] CASTRO AVILES, Alejandro, 2020. Free CAD Designs, Files & 3D Models | The GrabCAD Community Library. En: *Grabcad.com* [en línea]. 2020. [Consulta: 30 de agosto 2021]. Disponible en: <https://grabcad.com/library/ender-3-hot-end-1>
- [24] Feveal. Free CAD Designs, Files & 3D Models | The GrabCAD Community Library, 2019. En: *Grabcad.com* [en línea] [Consulta: 30 de agosto de 2021]. Disponible en: <https://grabcad.com/library/ventilador-cabezal-impresora-40x40-1>
- [25] Creality Ender 3 assembly by Coillote, 2018. En: *Thingiverse.com* [en línea][Consulta: 14 de septiembre de 2021]. Disponible en: <https://www.thingiverse.com/thing:3044639/files>
- [26] Peter. Extrusor HEMERA: Analizando uno de los mejores extrusores del mercado [en línea]. En: *3DWork*. 28 de febrero de 2020. [consulta: 15 de setiembre de 2021]. Disponible en: <https://3dwork.io/extrusor-hemera-analizando-uno-de-los-mejores-extrusores-del-mercado/>



[27] CANALÍS MARTINEZ, Paula. MALÓN LITAGO, Hugo. *Cálculo Y Selección De Elementos De Máquinas*, 2018. Universidad de Zaragoza, Departamento de Ingeniería Mecánica.

[28] Aprenda acerca de la aleación de aluminio A380, 2021. En: *Dynacast* [en línea][Consulta: 18 de septiembre de 2021]. Disponible en: <https://www.dynacast.com/es-mx/recursos/material-information/metales/aluminio/aluminum-alloy-a380>

[29] Coefficients Of Friction - Roy Mech, 2013. En: *Roytech.org* [en línea][Consulta: 18 de septiembre de 2021]. Disponible en: https://roytech.org/Useful Tables/Tribology/co_of_frict.html



Anexos

Anexo 1. Cálculo a flexión de los engranajes

Se realiza el cálculo a flexión de los dientes de piñón y rueda dentada a modo de comprobación de que soportarán los esfuerzos.

Se comprueba en primer lugar que no se produzca interferencia. El valor límite del número de dientes depende del ángulo de presión.

$$Z_1 = \frac{2}{\text{sen}^2\alpha} \quad 16 = \frac{2}{\text{sen}^2\alpha} \quad \alpha = 20^\circ$$

Para un piñón con $\alpha = 20^\circ$ y $Z_1 < 18$ dientes:

Para un piñón con un ángulo de presión $\alpha = 20^\circ$, con un número de dientes inferior a 18		
Número de dientes en el piñón	Nº máximo de dientes en la rueda sin que se produzca interferencia	Relación de transmisión límite aproximada
17	1309	77
16	101	6
15	45	3
14	26	2
13	16	1

Tabla 1. Valores límite del número de dientes

Fuente: [27]

Para un piñón de 16 dientes, el número máximo de dientes en la rueda para que no se produzca interferencia es $Z = 101$ dientes. Se cumple, ya que $Z_2 = 48$ dientes.

De la figura 23 se conoce el par motor $M_m = 0,42 \text{ Nm}$. Este par será el momento torsor sobre el eje del motor M_{t1} .

En el cálculo de engranajes hay que mayorar las cargas. Esta corrección se realiza introduciendo dos coeficientes o factores que son:

f_d : coeficiente de esfuerzos dinámicos

f_s : coeficiente de servicio

$$M_{tc} = M_t \cdot f_d \cdot f_s$$

Para determinar los valores de f_d y f_s se recurre a las tablas 2 y 3. Los cálculos se refieren al piñón, de ahí el subíndice 1.

FACTOR DE SERVICIO	
Tipo de máquina	Factor f_s
Para cargas uniformes sin choque, como: ventiladores, maquinaria de elevación, máquinas centrífugas, transmisiones por correa, etc.	De 1,00 a 1,25
Para cargas con choque medio, como: máquinas sometidas a frecuentes arranques, compresores, máquinas alternativas, herramientas portátiles neumáticas y eléctricas, bombas alternativas, etc.	De 1,25 a 1,50
Para cargas con choque fuerte, como: trenes laminadores, machacadoras de piedra, maquinaria de dragados, punzonadoras, compresores monocilíndricos, etc.	De 1,50 a 2,00

Tabla 2. Factor de servicio

Fuente: [27]

FACTOR DE ESFUERZOS DINÁMICOS	
Tipo de montaje	Factor f_d
Para engranajes de la máxima precisión obtenidos por rectificado u otro procedimiento similar. Velocidad del círculo primitivo igual o menor que 1.200 m/min	$f_d = 1 + \frac{\sqrt{V}}{43}$
Para engranajes tallados por generación, sin rectificar, y con velocidades del círculo primitivo igual o menor que 1.200 m/min.	$f_d = 1 + \frac{V}{360}$
Para engranajes ordinarios fabricados con fresa de módulo o con fresa madre, de una sóla pasada. Velocidad del círculo primitivo igual o inferior a 600 m/min.	$f_d = 1 + \frac{V}{180}$

Tabla 3. Factor de esfuerzos dinámicos

Fuente: [27]

El factor de servicio (f_s) tiene en cuenta el tipo de máquina que se esté accionando. Como está sometida arranques frecuentes, el factor de servicio esta entre los valores de 1,25 y 1,5 (Tabla 2). Para estar del lado de la seguridad se escoge un valor de:

$$f_s = 1,5$$



El factor de esfuerzos dinámicos (f_d), permite tener en cuenta en el cálculo la calidad del engranaje. Se selecciona la tercera opción de la tabla 3, ya que la velocidad del círculo primitivo es menor a 600 m/min.

De la figura 23 de las características técnicas del motor se toman los datos de:

- Ángulo por paso: $1,8^\circ/\text{paso}$
- Frecuencia máxima de operación sin carga ≥ 1400 PPS (Pasos por segundo)

A partir de estos datos se calculan las máximas revoluciones por minuto sin carga, para poder calcular la velocidad V del círculo primitivo de la tabla 3.

$$\frac{360^\circ}{1,8^\circ/\text{paso}} = 200 \frac{\text{pasos}}{\text{vuelta}}$$

$$\frac{1400 \text{ pasos/segundo}}{200 \text{ pasos/vuelta}} = 7 \frac{\text{vueltas}}{\text{segundo}} = 420 \text{ rpm}$$

$$V \left[\frac{\text{m}}{\text{min}} \right] = 2\pi \cdot n[\text{rpm}] \cdot \frac{D_{p1}[\text{m}]}{2} = 2\pi \cdot 420 \cdot \frac{0,008}{2} = 10,6 \text{ m/min}$$

Sustituyendo el valor de V en la expresión de la tabla 3 se obtiene el valor de f_d :

$$f_d = 1 + \frac{V}{180} = 1 + \frac{10,6}{180} = 1,06$$

El momento torsor corregido en el eje del piñón es, por tanto:

$$M_{tc1} = M_{t1} \cdot f_d \cdot f_s = 420 \cdot 1,06 \cdot 1,5 = 667,8 \text{ N} \cdot \text{mm}$$

Se determina el factor de forma del diente o coeficiente de Lewis (y_1) con la tabla 4, en función del número de dientes del piñón y el ángulo de presión α .

$$Z_1 = 16 \text{ dientes}$$

$$\alpha = 20^\circ$$

FACTOR DE FORMA DEL DIENTE "y"							
Nº de dientes	Altura normal 20°	Altura normal 14,5° o 15°	Diente corto 20°	Nº de dientes	Altura normal 20°	Altura normal 14,5° o 15°	Diente corto 20°
10	0,064	0,056	0,083	25	0,108	0,097	0,133
11	0,072	0,061	0,092	27	0,111	0,099	0,136
12	0,078	0,067	0,099	30	0,114	0,101	0,139
13	0,083	0,071	0,103	34	0,118	0,104	0,142
14	0,088	0,075	0,108	38	0,122	0,106	0,145
15	0,092	0,078	0,111	43	0,126	0,108	0,147
16	0,094	0,081	0,115	50	0,130	0,110	0,151
17	0,096	0,084	0,117	60	0,134	0,113	0,154
18	0,098	0,086	0,120	75	0,138	0,115	0,158
19	0,100	0,088	0,123	100	0,142	0,117	0,161
20	0,102	0,090	0,125	150	0,146	0,119	0,165
21	0,104	0,092	0,127	300	0,150	0,122	0,170
23	0,106	0,094	0,130	Cremallera	0,154	0,124	0,175

Tabla 4. Factor de forma del diente "y"

Fuente: [27]

Se obtiene un valor de: $y_1 = 0,094$

Se determina el coeficiente de rigidez (δ) de acuerdo a la tabla 5. Este valor depende del tipo de montaje. Se considera sobre apoyos ordinarios $\delta = 15$.

COEFICIENTE DE RIGIDEZ	
Tipo de montaje	Coefficiente δ
Engranajes sobre ejes robustos, soportados por rodamientos o cojinetes apoyados sobre soportes rígidos.	Hasta 30
Engranajes con buen asiento en cajas reductoras o de velocidad en general.	Hasta 25
Engranajes sobre apoyos ordinarios.	Hasta 15

Tabla 5. Coeficiente de rigidez

Fuente: [27]

Entre la longitud del diente y el módulo se debe cumplir una determinada relación, que garantice el contacto a lo largo de todo el engranaje. A partir del valor de δ podemos calcular el valor máximo de longitud del diente (b_{max}).

$$\delta = \frac{b}{M} \quad b_{max} = M \cdot \delta = 0,5 \cdot 15 = 7,5mm$$

El valor de longitud de diente $b_1 = 4 mm$, por tanto, cumple.

Con todos los coeficientes calculados y con el momento torsor en el eje mayorado, se puede ya calcular el valor de la tensión máxima de trabajo admisible en el diente, si este valor de tensión que se genera en la base del diente es menor que la tensión que puede soportar el material, no se producirá el fallo a flexión. Con la siguiente expresión [27] se calcula este valor de σ_{1adm} :

$$M = 0,8 \cdot \sqrt{\frac{M_{tc1}}{\delta \cdot D_{p1} \cdot \gamma_1 \cdot \sigma_{1adm}}}$$

$$0,5 = 0,8 \cdot \sqrt{\frac{667,8 \text{ Nmm}}{15 \cdot 8 \text{ mm} \cdot 0,094 \cdot \sigma_{1adm} \text{ MPa}}}$$

$$\sigma_{1adm} = 151,6 \text{ MPa}$$

Como se ha dicho este anexo sirve a modo de comprobación, ya que piñón y ruedas dentadas son elementos comerciales, que se usan en extrusoras de idénticas características y por tanto cumplen con los esfuerzos a los que son sometidos. Dado que no se conoce el material exacto con el que está fabricado, solo se sabe que es de acero, se supone un acero de peores características. El material del piñón supuesto es un acero F-113, con una $\sigma_{adm} = 190 \text{ MPa}$, como puede apreciarse en la tabla 6.

MATERIALES PARA ENGRANAJES					
ACEROS AL CARBONO					
Símbolo IFA	Símbolo CEN/EN	Tipo de acero Tratamiento	Rm en N/mm ² (x1000 MPa)	Dureza	σ_{adm} en N/mm ² (x100 MPa)
F-111	F-1110	Extra suave Normalizado	36-46	110-135 HB	14
F-113	F-1130	Semi-suave Normalizado	55-62	150-170 HB	19
F-114	F-1140	Semi-duro. Normalizado	62-70	190-210 HB	22

Tabla 6. Propiedades mecánicas de aceros al carbono

Fuente: [27]

$$\sigma_{1adm} = 151,6 \text{ MPa} < 190 \text{ MPa}$$

Por tanto, como la tensión que soporta el material es menor que la admisible dada en las propiedades, el piñón cumple.

Como el material de la rueda dentada es distinto (Aluminio A380), se calcula la tensión a la que estará sometido, con la siguiente relación [27]:



$$\sigma_{2adm} = \sigma_{1adm} \cdot \frac{y_1}{y_2} = 151,6 \cdot \frac{0,094}{0,129} = 110,5 \text{ MPa}$$

El valor de y_2 se ha obtenido interpolando en la tabla 4, con:

$$Z_2 = 48 \text{ dientes}$$

$$\alpha = 20^\circ$$

El valor de la tensión de trabajo del material es menor que el límite elástico del aluminio y, por tanto, cumple.

$$\sigma_{2adm} = 110,5 \text{ MPa} < 160 \text{ MPa}$$

PROPIEDADES MECÁNICAS

Metric

COMPARAR	Material	Aleación	Resistencia a la tensión	Límite de elasticidad (0.2%)	Resistencia al impacto	Resistencia a la Cizalladura	Dureza	Elongación	Aleación
			MPa	MPa	J	MPa	Brinell (HB)	% in 50mm	
<input type="checkbox"/>	Aluminio	A380	324	160	4	190	80	3.5	Cold Chamber Die Casting

Tabla 7. Propiedades mecánicas del aluminio A380

Fuente: [28]

Como tampoco se conoce el aluminio concreto de esta rueda dentada ya que no se encuentra información al respecto, se supone el de peores características.

Se puede apreciar por los resultados, que como era de esperar el piñón es el más solicitado y, por tanto, el que fallaría antes, a igualdad de material en piñón y rueda dentada.



Anexo 2. Análisis de las fuerzas que intervienen en el mecanismo

Se calculan dos situaciones del servo, la primera, la más desfavorable para él, en su posición de mayor ángulo con la vertical y con una base en posición de trabajo y la otra en la posición de reposo, y la segunda en su posición neutral, en la que está el brazo del servo completamente vertical y las dos bases del extrusor a la misma altura.

En ambas configuraciones se calcula el momento motor necesario (Mm) en el momento justo antes de arrancar ($a=0$). Para así poder comparar de forma orientativa con el par que nos puede entregar el servo.

En primer lugar, se determina el coeficiente de rozamiento μ .

A2.1. Determinación del coeficiente de rozamiento

El coeficiente de rozamiento μ se da en las guías del mecanismo, en las del soporte (las dos verticales donde se alojan las bases y la del alojamiento de la barra horizontal), en las practicadas en las bases del extrusor y en la guía de la barra horizontal donde se une con el brazo del servo. Como el material que se ha supuesto para la fabricación de estos componentes es aluminio, se toma el coeficiente de rozamiento estático entre aluminio-aluminio de la tabla 8.

Material 1	Material 2	Coefficient Of Friction				Test method
		DRY		Greasy		
		Static	Sliding	Static	Sliding	
Aluminum	Aluminum	1,05-1,35	1,4	0,3		
Aluminum	Mild Steel	0,61	0,47			
Brake Material	Cast Iron	0,4				
Brake Material	Cast Iron (Wet)	0,2				
Brass	Cast Iron		0,3			
Brick	Wood	0,6				
Bronze	Cast Iron		0,22			
Bronze	Steel			0,16		
Cadmium	Cadmium	0,5		0,05		
Cadmium	Mild Steel		0,46			
Cast Iron	Cast Iron	1,1	0,15		0,07	
Cast Iron	Oak		0,49		0,075	

Tabla 8. Coeficiente de rozamiento aluminio-aluminio

Fuente: [29]

$$\mu = 1,35$$

Se toma este valor, ya que es el más desfavorable.

A2.2. Determinación de la fuerza de rozamiento

La fuerza de rozamiento entre el brazo del servo y la guía de la barra horizontal y entre los salientes de la barra horizontal y la guía practicada en la parte trasera de las bases, se calcula de la forma: $F_r = \mu \cdot N$

La fuerza de rozamiento que se da entre la barra horizontal y el soporte donde se aloja, y entre las bases y las guías verticales del soporte que las sustenta, se calcula con la fórmula que se deduce al plantear la suma de momentos respecto al punto donde se cruzan los ejes de simetría de la figura 85. Donde N es la distribución de tensiones debida a la carga Q , F_1 y F_2 son las fuerzas de rozamiento, y F es la fuerza necesaria para mover el sistema.

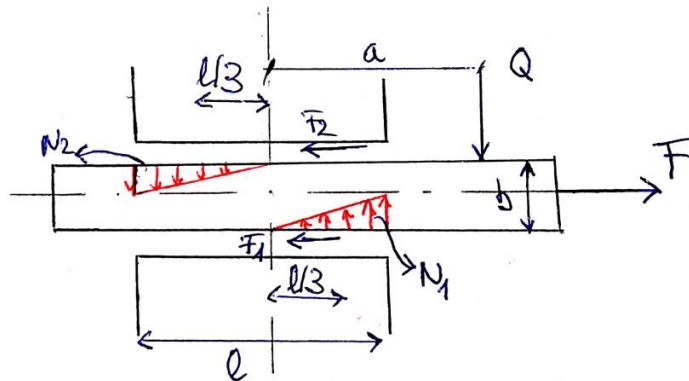


Figura 85. Planteamiento para la deducción del cálculo de la fuerza de rozamiento

Del sumatorio de fuerzas en Y se tiene: $N_1 = Q + N_2$

Del sumatorio de fuerzas en X se tiene: $F = F_1 + F_2 = \mu \cdot (N_1 + N_2)$

Planteando la suma de momentos con respecto al punto central donde se cortan los dos ejes de simetría:

$$(N_1 + N_2) \cdot \frac{l}{3} + F_2 \cdot \frac{b}{2} - F_1 \cdot \frac{b}{2} = Q \cdot a$$

Despejando:

$$N_2 = Q \cdot \left(\frac{3a}{2l} + \frac{3\mu b}{4l} - \frac{1}{2} \right)$$

$$N_1 = Q \cdot \left(\frac{3a}{2l} + \frac{3\mu b}{4l} + \frac{1}{2} \right)$$

$$F = \mu \cdot Q \cdot \left(\frac{3a}{l} + \frac{3\mu b}{2l} \right) = \frac{3\mu Q}{l} \cdot \left(a + \frac{\mu b}{2} \right)$$

Siendo $M = Q \cdot a$, el valor del momento que genera la carga Q , dependiendo de la distancia a la que se encuentre del punto respecto al cual se tomen los momentos.

$$F = \frac{3\mu}{l} \cdot \left(M + \frac{\mu Q b}{2} \right)$$

A2.3. Cálculo del momento motor en la posición más desfavorable

La posición más desfavorable para el servo es aquella en la que el ángulo que forma con la vertical es mayor. Como se ha visto en el apartado 4.5., el mayor valor del ángulo que llega a alcanzar es de $14,02^\circ$ con la vertical, si bien para los cálculos se va a utilizar el valor de 15° , por ser más desfavorable aún. A continuación, se plantean los diagramas de sólido libre de los elementos que forman parte del mecanismo, de forma simplificada por facilitar los cálculos. El brazo del servo será la barra 2, la barra horizontal con los salientes será la barra 3, el extrusor izquierdo la 4, el derecho la 5 y el soporte sería el elemento 1 o bancada.

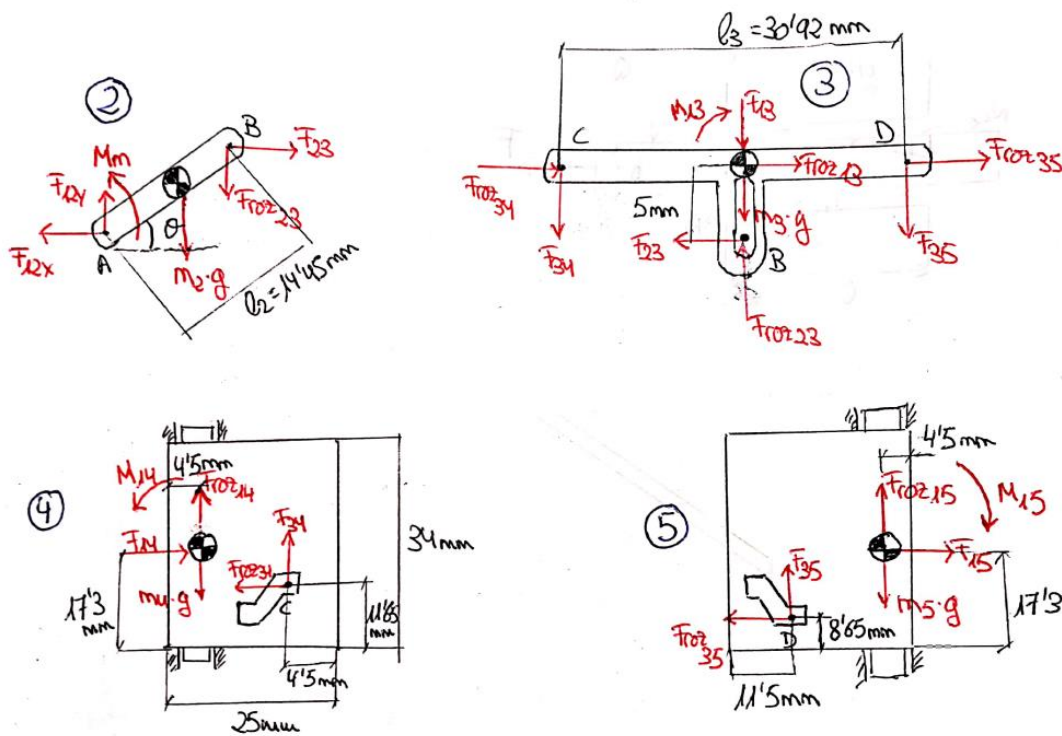


Figura 86. Diagramas de sólido libre para la posición más desfavorable

Datos:

$$\begin{aligned} \theta &= 90 - 15 = 75^\circ \\ m_2 &= 0.001 \text{ kg} \\ l_2 &= 0.01445 \text{ m} \\ m_3 &= 0.00098 \text{ kg} \\ l_3 &= 0.03092 \text{ m} \\ m_4 &= m_5 = 0.113 \text{ kg} \\ \mu &= 1,35 \\ g &= 9,8 \text{ m/s}^2 \end{aligned}$$



Para el sólido 2:

$$\sum F_X = 0: \quad F_{23} = F_{12X}$$

$$\sum F_Y = 0: \quad F_{12Y} = m_2 \cdot g + F_{roz23}$$

$$\sum M_A = 0: \quad M_m - m_2 \cdot g \cdot \cos(\theta) \cdot \frac{l_2}{2} - F_{roz23} \cdot \cos(\theta) \cdot l_2 - F_{23} \cdot \text{sen}(\theta) \cdot l_2 = 0$$

Para el sólido 3:

$$\sum F_X = 0: \quad F_{roz35} + F_{roz13} + F_{roz34} - F_{23} = 0$$

$$\sum F_Y = 0: \quad -F_{35} - m_3 \cdot g - F_{13} + F_{roz23} - F_{34} = 0$$

$$\sum M_G = 0: \quad -F_{35} \cdot \frac{l_3}{2} - M_{13} - F_{23} \cdot 0,005 + F_{34} \cdot \frac{l_3}{2} = 0$$

Para el sólido 4:

$$\sum F_X = 0: \quad F_{14} = F_{roz34}$$

$$\sum F_Y = 0: \quad F_{34} + F_{roz14} = m_4 \cdot g$$

$$\sum M_G = 0: \quad M_{14} - F_{roz34} \cdot \frac{(17,3-11,65)}{1000} + F_{34} \cdot \frac{(25-4,5-4,5)}{1000} = 0$$

Para el sólido 5:

$$\sum F_X = 0: \quad F_{15} = F_{roz35}$$

$$\sum F_Y = 0: \quad F_{roz15} + F_{35} = m_5 \cdot g$$

$$\sum M_G = 0: \quad -M_{15} - F_{roz35} \cdot \frac{(17,3-8,65)}{1000} - F_{35} \cdot \frac{(25-11,5-4,5)}{1000} = 0$$

Las fuerzas de rozamiento se calculan con las siguientes expresiones:

$$F_{roz23} = \mu \cdot F_{23}$$

$$F_{roz34} = \mu \cdot F_{34}$$

$$F_{roz35} = \mu \cdot F_{35}$$

$$F_{roz13} = \frac{3\mu}{l_{guía3}} \cdot \left(M_{13} + \frac{\mu \cdot F_{13} \cdot b_3}{2} \right)$$

$$F_{roz14} = \frac{3\mu}{l_{guía4}} \cdot \left(M_{14} + \frac{\mu \cdot F_{14} \cdot b_4}{2} \right)$$



$$F_{roz15} = \frac{3\mu}{l_{guía5}} \cdot \left(M_{15} + \frac{\mu \cdot F_{15} \cdot b_5}{2} \right)$$

Con $l_{guía}$ la longitud de la guía en contacto con la barra que se desplaza en su interior y b la anchura de la guía. Estos son datos que se obtienen midiendo sobre cada elemento en CREO Parametric.

$$l_{guía3} = 26 \text{ mm}$$

$$b_3 = 4 \text{ mm}$$

$$l_{guía4} = 34 \text{ mm}$$

$$b_4 = 5 \text{ mm}$$

$$l_{guía5} = 34 \text{ mm}$$

$$b_5 = 5 \text{ mm}$$

Resolviendo el sistema de ecuaciones con EES, se obtienen los siguientes valores de fuerzas y momento motor. Véase la figura 87.

SOLUTION

Unit Settings: SI C kPa kJ mass deg

$$b_3 = 0,004$$

$$F_{12x} = 2,327$$

$$F_{14} = 0,5886$$

$$F_{34} = 0,436$$

$$Fr_{14} = 0,6714$$

$$Fr_{34} = 0,5886$$

$$l_2 = 0,01445$$

$$l_{guía4} = 0,034$$

$$M_{14} = -0,00365$$

$$m_3 = 0,00098$$

$$M_m = 0,04424$$

$$nu_4 = 1,35$$

$$b_4 = 0,005$$

$$F_{12y} = 3,151$$

$$F_{15} = 0,679$$

$$F_{35} = 0,5029$$

$$Fr_{15} = 0,6045$$

$$Fr_{35} = 0,679$$

$$l_3 = 0,03092$$

$$l_{guía5} = 0,034$$

$$M_{15} = -0,0104$$

$$m_4 = 0,113$$

$$v = 1,35$$

$$nu_5 = 0,6$$

$$b_5 = 0,005$$

$$F_{13} = 2,193$$

$$F_{23} = 2,327$$

$$Fr_{13} = 1,059$$

$$Fr_{23} = 3,141$$

$$g = 9,8$$

$$l_{guía3} = 0,026$$

$$M_{13} = -0,01267$$

$$m_2 = 0,001$$

$$m_5 = 0,113$$

$$nu_3 = 0,6$$

$$tita = 75$$

Figura 87. Resultados del sistema de ecuaciones con EES para la posición más desfavorable

El valor del momento motor es $M_m = 0,04424 \text{ N} \cdot \text{m} = 4,24 \text{ N} \cdot \text{cm}$

El par del servo a 4,8 V, visto en el apartado 4.1.4., es de:

$$1,6 \text{ kg} \cdot \text{cm} = 15,68 \text{ N} \cdot \text{cm}$$

Por tanto, se puede ver que el valor del par que nos puede ofrecer el servo (15,68 Ncm), es mucho mayor que el momento motor necesario (4,24 Ncm) que se ha calculado.

A2.4. Cálculo del momento motor en la posición vertical del brazo del servo

Esta posición del servo es más favorable que la anterior, ya que su ángulo con la vertical es cero, por tanto, es la posición en la que más fuerza puede realizar. Se realiza el cálculo en esta posición debido a que cuando el ángulo del brazo del servo con la vertical es cero, las dos bases de los extrusores se encuentran a la misma altura, con los salientes de la barra horizontal en el punto medio de la parte inclinada de la guía de las bases. A continuación, se plantean los diagramas de sólido libre para esta nueva configuración.

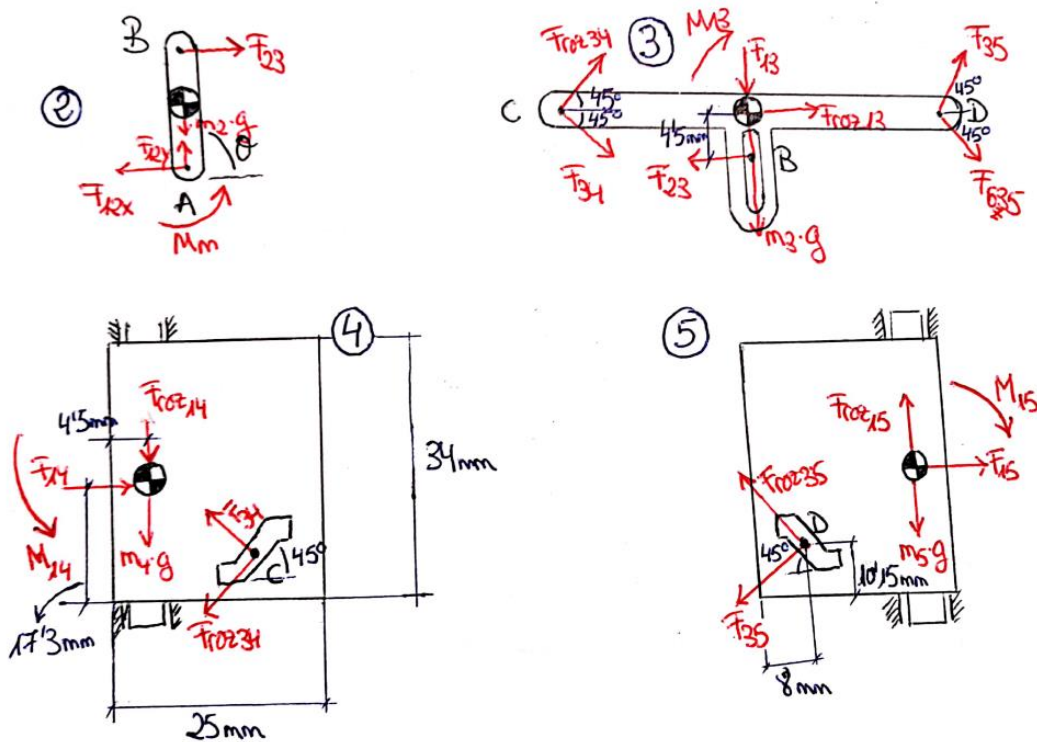


Figura 88. Diagramas de sólido libre para la posición vertical del brazo del servo

Datos:

Ángulo de la guía = 45°

$\theta = 90^\circ$

$m_2 = 0.001 \text{ kg}$

$l_2 = 0.01445 \text{ m}$

$m_3 = 0.00098 \text{ kg}$

$l_3 = 0.03092 \text{ m}$

$m_4 = m_5 = 0.113 \text{ kg}$

$\mu = 1,35$

$g = 9,8 \text{ m/s}^2$



Se plantean ahora de nuevo las ecuaciones de equilibrio para el momento justo antes de arrancar en esta posición.

Para el sólido 2:

$$\begin{aligned}\sum F_X = 0: & \quad F_{23} = F_{12X} \\ \sum F_Y = 0: & \quad F_{12Y} = m_2 \cdot g \\ \sum M_A = 0: & \quad M_m - F_{23} \cdot l_2 = 0\end{aligned}$$

Para el sólido 3:

$$\begin{aligned}\sum F_X = 0: & \quad F_{35} \cdot \cos(45) + F_{roz35} \cdot \cos(45) + F_{roz13} - F_{23} + F_{roz34} \cdot \cos(45) + F_{34} \cdot \cos(45) \\ & \quad = 0 \\ \sum F_Y = 0: & \quad F_{35} \cdot \text{sen}(45) - F_{roz35} \cdot \text{sen}(45) - m_3 \cdot g - F_{13} + F_{roz34} \cdot \text{sen}(45) - F_{34} \cdot \text{sen}(45) \\ & \quad = 0 \\ \sum M_G = 0: & \quad F_{35} \cdot \text{sen}(45) \cdot \frac{l_3}{2} - F_{roz35} \cdot \text{sen}(45) \cdot \frac{l_3}{2} - M_{13} - F_{23} \cdot 0,0045 - F_{roz34} \cdot \text{sen}(45) \cdot \frac{l_3}{2} \\ & \quad + F_{34} \cdot \text{sen}(45) \cdot \frac{l_3}{2} = 0\end{aligned}$$

Para el sólido 4:

$$\begin{aligned}\sum F_X = 0: & \quad F_{14} = F_{34} \cdot \cos(45) + F_{roz34} \cdot \cos(45) \\ \sum F_Y = 0: & \quad -F_{roz14} - m_4 \cdot g + F_{34} \cdot \text{sen}(45) - F_{roz34} \cdot \text{sen}(45) = 0 \\ \sum M_G = 0: & \quad M_{14} + F_{34} \cdot \text{sen}(45) \cdot \frac{12,5}{1000} - F_{34} \cdot \cos(45) \cdot \frac{7,15}{1000} - F_{roz34} \cdot \text{sen}(45) \cdot \frac{12,5}{1000} - F_{roz34} \\ & \quad \cdot \cos(45) \cdot \frac{7,15}{1000} = 0\end{aligned}$$



Para el sólido 5:

$$\sum F_X = 0: \quad F_{15} = F_{roz35} \cdot \cos(45) + F_{35} \cdot \cos(45)$$

$$\sum F_Y = 0: \quad F_{roz15} - m_5 \cdot g + F_{roz35} \cdot \sen(45) - F_{35} \cdot \sen(45) = 0$$

$$\sum M_G = 0:$$

$$\begin{aligned} -M_{15} - F_{roz35} \cdot \sen(45) \cdot \frac{12,5}{1000} - F_{roz35} \cdot \cos(45) \cdot \frac{7,15}{1000} - F_{35} \cdot \cos(45) \cdot \frac{7,15}{1000} \\ + F_{35} \cdot \sen(45) \cdot \frac{12,5}{1000} = 0 \end{aligned}$$

Las fuerzas de rozamiento se calculan con las mismas expresiones de antes:

$$F_{roz34} = \mu \cdot F_{34}$$

$$F_{roz35} = \mu \cdot F_{35}$$

$$F_{roz13} = \frac{3\mu}{l_{guía3}} \cdot \left(M_{13} + \frac{\mu \cdot F_{13} \cdot b_3}{2} \right)$$

$$F_{roz14} = \frac{3\mu}{l_{guía4}} \cdot \left(M_{14} + \frac{\mu \cdot F_{14} \cdot b_4}{2} \right)$$

$$F_{roz15} = \frac{3\mu}{l_{guía5}} \cdot \left(M_{15} + \frac{\mu \cdot F_{15} \cdot b_5}{2} \right)$$

Con $l_{guía}$ la longitud de la guía en contacto con la barra que se desplaza en su interior y b la anchura de la guía. Estos son datos que se obtienen midiendo sobre cada elemento en CREO Parametric.

$$l_{guía3} = 26 \text{ mm}$$

$$b_3 = 4 \text{ mm}$$

$$l_{guía4} = 34 \text{ mm}$$

$$b_4 = 5 \text{ mm}$$

$$l_{guía5} = 34 \text{ mm}$$

$$b_5 = 5 \text{ mm}$$



Resolviendo el sistema de ecuaciones con EES, se obtienen los siguientes valores de fuerzas y momento motor. Véase la figura 89.

SOLUTION

Unit Settings: SI C kPa kJ mass deg

alfa = 45	b3 = 0,004	b4 = 0,005
b5 = 0,005	F12x = 2,603	F12y = 0,0098
F13 = -0,5254	F14 = 0,8348	F15 = 0,09534
F23 = 2,603	F34 = 0,5024	F35 = -0,3852
Fr13 = 1,673	Fr14 = 1,232	Fr15 = 0,4673
Fr34 = 0,6782	Fr35 = 0,5201	g = 9,8
l2 = 0,01445	l3 = 0,03092	lguia3 = 0,026
lguia4 = 0,034	lguia5 = 0,034	M13 = -0,02353
M14 = 0,007523	M15 = -0,008683	m2 = 0,001
m3 = 0,00098	m4 = 0,113	m5 = 0,113
Mm = 0,03761	$\nu = 1,35$	nu3 = 0,6
nu4 = 1,35	nu5 = 0,6	tita = 90

Figura 89. Resultados del sistema de ecuaciones con EES para la posición vertical del brazo del servo

El valor del momento motor es $M_m = 0,03761 \text{ N} \cdot \text{m} = 3,761 \text{ N} \cdot \text{cm}$

El momento motor que se requiere es también menor que el par que nos puede ofrecer el servo (15,68 N·cm), por tanto, en ambas condiciones el servo podría iniciar el movimiento del mecanismo.

Anexo 3. Programa para el cálculo de la cinemática y dinámica

Se comienza planteando cual será la posición, velocidad y aceleración de la barra en función del ángulo θ entre el brazo del servo y la vertical. Con $15^\circ < \theta < -15^\circ$

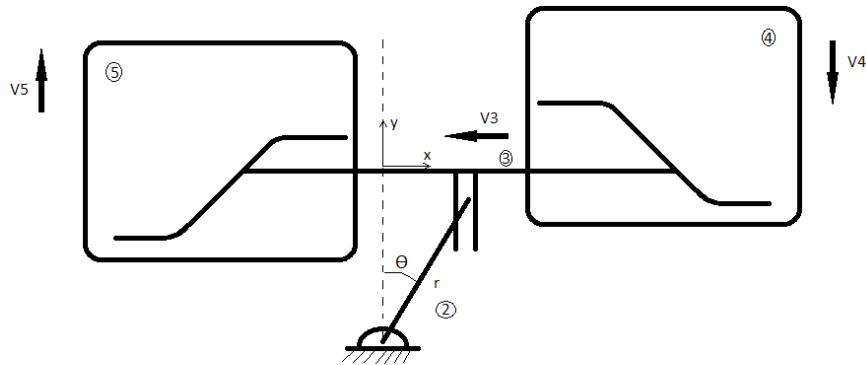


Figura 90. Boceto del mecanismo

A partir del dibujo de la figura 90 se plantean las ecuaciones de posición, velocidad y aceleración para la barra. La barra no tiene velocidades y aceleraciones verticales ya que se encuentra guiada, teniendo solo componentes horizontales. El brazo del servo gira a velocidad angular constante ($\dot{\theta} = cte$).

$$\begin{aligned}x_3 &= -r \cdot \text{sen } \theta \\ \dot{x}_3 &= -r \cdot \dot{\theta} \cdot \text{cos } \theta \\ \ddot{x}_3 &= r \cdot \dot{\theta}^2 \cdot \text{sen } \theta\end{aligned}$$

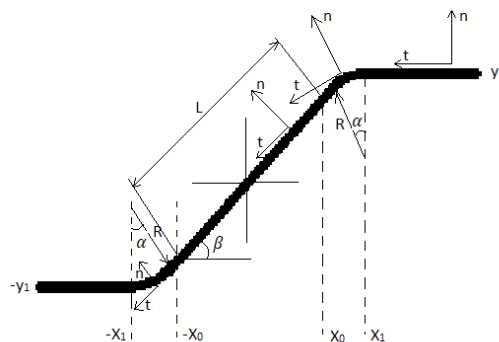


Figura 91. Boceto para el cálculo de las distintas posiciones en la guía de la base del extrusor

Se ha dividido la guía en cinco tramos (figura 91), para calcular, según en que punto de la guía se encuentre el saliente de la barra, la posición, velocidad y aceleración vertical del extrusor.

$$x_0 = \frac{l}{2} \cdot \text{cos } \beta$$



$$x_1 = x_0 + R \cdot \operatorname{sen} \beta = \frac{l}{2} \cdot \cos \beta + R \cdot \operatorname{sen} \beta$$
$$y_1 = \frac{l}{2} \cdot \operatorname{sen} \beta + (R - R \cdot \cos \beta) = \frac{l}{2} \cdot \operatorname{sen} \beta + R \cdot (1 - \cos \beta)$$

l : longitud de la trayectoria de la zona inclinada de la guía

β : ángulo de la zona inclinada de la guía

R : radio del redondeo de la trayectoria

Para el caso de la ranura de la base del extrusor izquierdo (sólido 5), que según la figura 90 es el extrusor que está subiendo, se tendría:

- $x \geq -x_0$

- $x \leq x_0$

$$y = x \cdot \tan \beta$$

$$\dot{y} = \dot{x} \cdot \tan \beta$$

$$\ddot{y} = \ddot{x} \cdot \tan \beta$$

- $x \geq x_0$ y $x \leq x_1$

$$\alpha = \operatorname{arcsen} \left(\frac{x_1 - x}{R} \right)$$

$$\dot{\alpha} = \frac{-\dot{x}/R}{\sqrt{1 - \left(\frac{x_1 - x}{R}\right)^2}} = \frac{-\dot{x}}{\sqrt{R^2 - (x_1 - x)^2}}$$

$$y = y_1 - R \cdot (1 - \cos \alpha)$$

$$\dot{y} = -R \cdot \dot{\alpha} \cdot \operatorname{sen} \alpha = -R \cdot \frac{-\dot{x}}{\sqrt{1 - \left(\frac{x_1 - x}{R}\right)^2}} \cdot \operatorname{sen} \alpha = \dot{x} \cdot \tan \alpha$$

$$\ddot{y} = -R \cdot (\ddot{\alpha} \cdot \operatorname{sen} \alpha + \dot{\alpha}^2 \cdot \cos \alpha) = \ddot{x} \cdot \tan \alpha - \frac{\dot{x}^2}{R \cdot \cos^3 \alpha}$$

- $x > x_1$

$$y = y_1$$

$$\dot{y} = 0$$

$$\ddot{y} = 0$$



- $x < -x_0$

- $x > -x_1$

$$\alpha = \arcsen\left(\frac{x_1 + x}{R}\right)$$

$$\dot{\alpha} = \frac{\dot{x}/R}{\sqrt{1 - \left(\frac{x_1 + x}{R}\right)^2}} = \frac{\dot{x}}{\sqrt{R^2 - (x_1 + x)^2}}$$

$$y = -y_1 + R \cdot (1 - \cos \alpha)$$

$$\dot{y} = R \cdot \dot{\alpha} \cdot \sen \alpha = R \cdot \frac{\frac{\dot{x}}{R}}{\sqrt{1 - \left(\frac{x_1 + x}{R}\right)^2}} \cdot \sen \alpha = \dot{x} \cdot \tan \alpha$$

$$\ddot{y} = -R \cdot (\ddot{\alpha} \cdot \sen \alpha + \dot{\alpha}^2 \cdot \cos \alpha) = -\dot{x} \cdot \tan \alpha + \frac{\dot{x}^2}{R \cdot \cos^3 \alpha}$$

- $x < -x_1$

$$\begin{aligned} y &= -y_1 \\ \dot{y} &= 0 \\ \ddot{y} &= 0 \end{aligned}$$

Donde x es la posición horizontal, e y la posición vertical del punto de la barra 3 en la trayectoria que sigue en las ranuras.

Para el sólido 4, que es el extrusor que está bajando los valores de las posiciones, velocidades y aceleraciones serán los mismos pero cambiados de signo.

Se plantea el equilibrio para cada sólido.

Para el sólido 5, que es el que sube, según se ha planteado, se tiene (en función del ángulo α , que irá desde 0° a 45°):

$$\sum F_x: F_{51}^n = F_{53}^t \cdot \cos \alpha + F_{53}^n \cdot \sen \alpha$$

$$\sum F_y: F_{53}^t \cdot \sen \alpha - F_{53}^n \cdot \cos \alpha + F_{51}^t = -m_5 g + F_{i5}$$

$$F_{51}^t = \pm \mu_{51} \cdot F_{51}^n$$

$$F_{53}^t = \pm \mu_{53} \cdot F_{53}^n$$

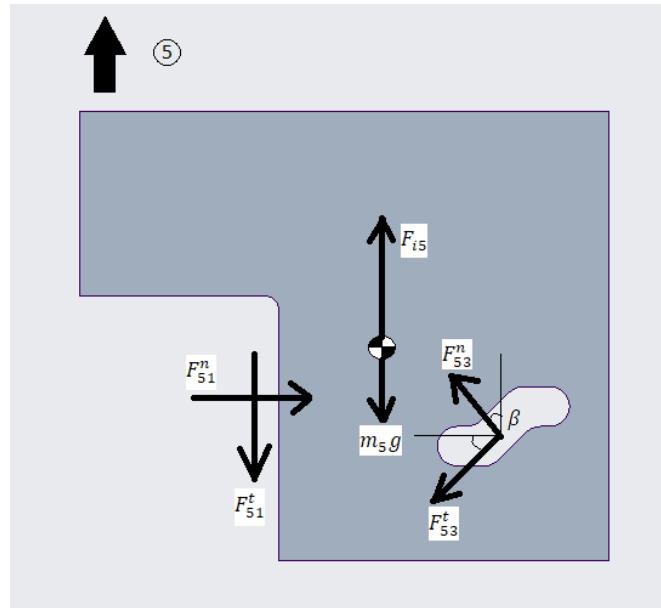


Figura 92. Diagrama de sólido libre del sólido 5

Para el sólido 4, que es el que baja:

$$\sum F_x: F_{41}^n - F_{43}^t \cdot \cos \alpha + F_{43}^n \cdot \text{sen } \alpha = 0$$

$$\sum F_y: F_{43}^t \cdot \text{sen } \alpha + F_{43}^n \cdot \cos \alpha + F_{41}^t = m_4 g - F_{i4}$$

$$F_{41}^t = \pm \mu_{41} \cdot F_{41}^n$$

$$F_{43}^t = \pm \mu_{43} \cdot F_{43}^n$$

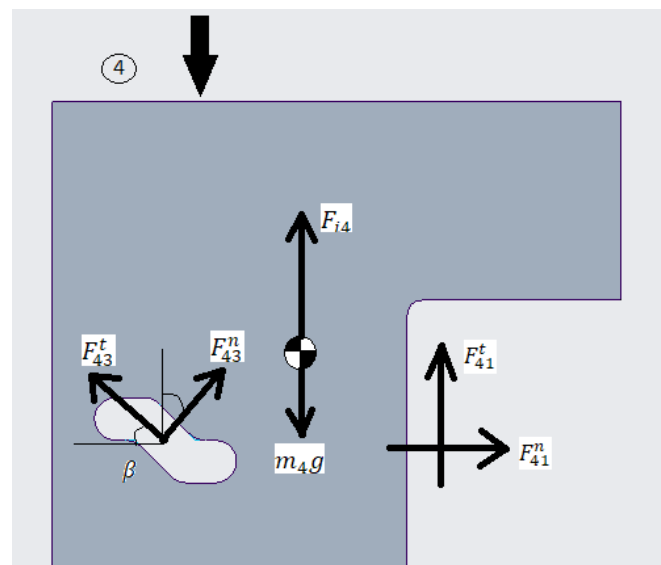


Figura 93. Diagrama de sólido libre del sólido 4

Para el sólido 3:

$$\sum F_x: F_{i3} + F_{31x} - F_{23x} - F_{43}^n \cdot \text{sen } \alpha + F_{43}^t \cdot \text{cos } \alpha + F_{53}^t \cdot \text{cos } \alpha + F_{53}^n \cdot \text{sen } \alpha = 0$$

$$\sum F_y: F_{31y} - m_3g + F_{23y} - F_{43}^n \cdot \text{cos } \alpha - F_{43}^t \cdot \text{sen } \alpha + F_{53}^t \cdot \text{sen } \alpha - F_{53}^n \cdot \text{cos } \alpha = 0$$

$$F_{31x} = \mu_{31} \cdot F_{31y}$$

$$F_{23y} = \mu_{32} \cdot F_{23x}$$

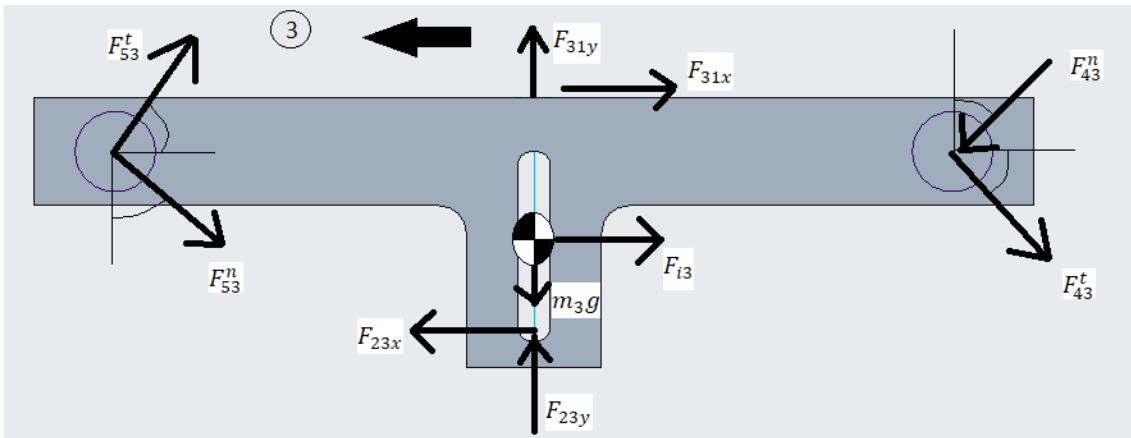


Figura 94. Diagrama de sólido libre del sólido 3

Y, por último, para el sólido 2 solamente se plantea la ecuación para el cálculo del momento motor:

$$M_m = m_2g \cdot \text{sen } \theta \cdot r_{cdg} + F_{23y} \cdot \text{sen } \theta \cdot r_{brazo} + F_{23x} \cdot \text{cos } \theta \cdot r_{brazo}$$

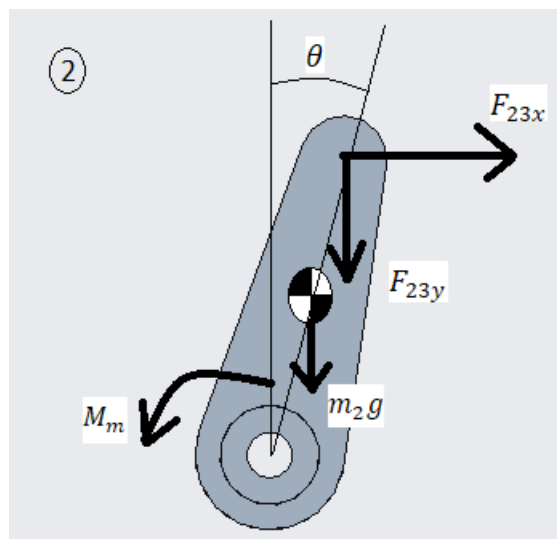


Figura 95. Diagrama de sólido libre del sólido 2



Una vez esta todo planteado y tomados todos los datos necesarios, se desarrolla el código del siguiente programa, que calculará la cinemática y la dinámica, con el objetivo de obtener un valor para el momento motor.

```
1. // DEFINICION DE VARIABLES
2. //definición de entrada
3.
4. float g=9.81; //9810;
5.
6. float timin=-20.24; //Angulo mínimo // -20.24°
   y 20.24° para inclinación de 26.56° //-15 y 15
   para inclinación de 45°
7. float timax=20.24 ; //Angulo maximo
8. float deltati=0.03375; //0.025 para
   15° //0.03375 para 26.56° //Incremento
   del ángulo de entrada en °
9. float w=500; //500; //600 //velocidad
   angular de entrada °/seg
10. //opcion rápida 6V 0.1
   seg/60° 600°/seg
11. //opcion lenta 4.8V
   0.12seg/60° 500°/seg 1.6 o 1.8 Kg.cm 0.1568 o
   0.1764 Nw.m
12. //coeficientes de fricción
13. float nu31=.3;
14. float nu32=.3;
15.
16. float nu41=.3;
17. float nu43=.3;
18. float nu51=.3;
19. float nu53=.3;
20.
21.
22. float bta=26.56; //26.56
   //35; //45 //angulo de la zona inclinada
23. float R=0.0031; //Radio del redondeo
24. //definición de geometría
25.
26. float rbrazo=0.01446; //14.46; //rad
   io del brazo en m
27. float rCDGbrazo=0.0046; //4.6; //rad
   io del CDG del brazo en m
28. float l=0.00524; //0.001675; //1.675 mm para
   45°; l=5.24 mm para inclinación de
   26.56° //longitud zona inclinada en m
```



```
29.    float x0;           //inicio del
redondeo
30.    float x1;           //fin del redondeo
31.    float y1;           //fin del redondeo
32.
33.    //Auxiliares
34.    float factor=PI/180; //paso a radianes
35.    float factoi=1/factor; //paso a grados
36.
37.    //Masas en Kg
38.    float m2=0.001;
39.    float m3=0.00098; //0.00098;
40.    float m4=0.113;
41.    float m5=0.113;
42.
43.    //distancias para dinámica en metros
//milímetros
44.    float a_cdg2=0.0046; //4.6;
45.    float b_cdg2=0.00985; //9.85;
46.    float c_cdg3=0.01546; //15.46;
47.    float d_cdg3=0.01546; //15.46;
48.    float dv_cdg3=0.000659; //0.659;
49.    float b_cdg3=0.003; //3;
50.    float dhc_cdg4=0.00956; //9.56;
51.    float dhd_cdg5=0.00956; //9.56;
52.    float dvc_cdg4=0.00605; //6.05;
53.    float dvd_cdg5=0.00605; //6.05;
54.
55.    float lguia3=0.026; //26;
56.    float b3=0.004; //4;
57.    float lguia4=0.034; //34;
58.    float b4=0.005; //5;
59.    float lguia5=0.034; //34;
60.    float b5=0.005; //5;
61.
62.    //Salidas
63.    float[] tita=new float[1201]; //angulo de
    entrada respecto de la vertical
64.    float[] alfa=new float[1201]; //angulo
    del radio de contacto con la vertical
65.    float[] x3=new float[1201]; //posición
    de la barra
66.    float[] y4=new float[1201]; //posicion
    y del extrusor
67.    float[] y5=new float[1201]; //posicion
    y del extrusor
```



```
68.    float[] v3=new float[1201];           //velocidad
de la barra
69.    float[] v4=new float[1201];           //velocidad
del extrusor
70.    float[] v5=new float[1201];           //velocidad
del extrusor
71.    float[] a3=new float[1201];           //aceleraci
ón de la barra
72.    float[] a4=new float[1201];           //aceleraci
ón del extrusor 4
73.    float[] a5=new float[1201];           //aceleraci
ón del extrusor 5
74.
75.    float[] F53n=new float[1201];
76.    float[] F53t=new float[1201];
77.    float[] F51n=new float[1201];
78.    float[] F51t=new float[1201];
79.
80.    float[] F43n=new float[1201];
81.    float[] F43t=new float[1201];
82.    float[] F41n=new float[1201];
83.    float[] F41t=new float[1201];
84.
85.    float[] F35x=new float[1201];
86.    float[] F35y=new float[1201];
87.    float[] F34x=new float[1201];
88.    float[] F34y=new float[1201];
89.    float[] F23x=new float[1201];
90.    float[] F23y=new float[1201];
91.    float[] Mm=new float[1201];
92.
93.    //Auxiliares
94.    float ti;                               //Angulo de entrada,
respecto a la vertical
95.    float Mmax=-4000;
96.    float Mmin=4000;
97.    float comp=-0.001; //Valor de comparación
98.    float[][] A=new float[4][5];
99.    float[][] B=new float [4][5];
100.   float nu1, nu3;
101.   int tipo4=0;
102.   int tipo5=0;
103.
104.   PrintWriter fichero;
105.   void setup()
106.   {
```



```
107.     String nom_fichero=str(int(w))+"_"+str(int(
        nu43*100))+"_"+str(int(btā))+".txt";
108.     //fichero=createWriter("600_135_45.txt");
109.     fichero=createWriter(nom_fichero);
110.     size(1250,1000);
111.
112.     conversion();
113.     x0=1*cos(btā)/2;           //posición de inicio
        de redondeo
114.     x1=x0+R*sin(btā);        //posición de fin de
        redondeo
115.     y1=1*sin(btā)/2+R*(1-cos(btā)); //posición
        de zona plana
116.     ti=timin;                // angulo de inicio
117.
118.     for(int i=0;i<1201;i++)
119.     {
120.         //Calcula posiciones, velocidades y
        aceleraciones
121.         cinematica(i);
122.
123.         //Calculos de dinámica
124.         dinamica_4(i);
125.         dinamica_5(i);
126.         dinamica_3(i);
127.         dinamica_2(i);
128.     }
129.     println (Mmax);
130.     println (Mmin);
131.     guarda_datos();
132. }
133. void cinematica(int i)
134. {
135.     //Para la barra (solido 3)
136.     x3[i]=-rbrazo*sin(ti);
137.     v3[i]=-rbrazo*w*cos(ti);
138.     a3[i]=rbrazo*w*w*sin(ti);
139.     //Asigna valores de zona plana
140.     v4[i]=0;
141.     a4[i]=0;
142.
143.     //Para el extrusor que desciende (solido
        4)
144.     if(-x0<=x3[i])
145.     {
146.         if(x3[i]<=x0)           //Zona de rampa
147.         {
```



```
148.         alfa[i]=bta;
149.         y4[i]=x3[i]*tan(bta);
150.         v4[i]=v3[i]*tan(bta);
151.         a4[i]=a3[i]*tan(bta);
152.     }
153.     else if (x0<x3[i])
154.     {
155.         if(x3[i]<=x1)           //Zona del
redondeo
156.         {
157.             alfa[i]=asin((x1-x3[i])/R);
158.             y4[i]=y1-R*(1-cos(alfa[i]));
159.             v4[i]=v3[i]*tan(alfa[i]);
160.             a4[i]=a3[i]*tan(alfa[i])-
v3[i]*v3[i]/(R*cos(alfa[i])*cos(alfa[i])*cos(alfa
[i]));
161.         }
162.         else                   //Zona
horizontal
163.         {
164.             y4[i]=y1;
165.         }
166.     }
167. }
168. else // Si x3[i]<=-x0
169. {
170.     if(x3[i]>=-x1)           //Zona otro
redondeo
171.     {
172.         alfa[i]=asin((x1+x3[i])/R);
173.         y4[i]=-y1+R*(1-cos(alfa[i]));
174.         v4[i]=v3[i]*tan(alfa[i]);
175.         a4[i]=-
a3[i]*tan(alfa[i])+v3[i]*v3[i]/(R*cos(alfa[i])*co
s(alfa[i])*cos(alfa[i]));
176.     }
177.     else                   //Otra zona
plana
178.     {
179.         y4[i]=-y1;
180.     }
181. }
182.
183. //Para el extrusor que asciende (solido
5) Por simetría
184.     y5[i]=-y4[i];
185.     v5[i]=-v4[i];
```



```
186.     a5[i]=-a4[i];
187.     //Asigan ángulo y lo incrementa
188.     tita[i]=ti;
189.     ti=ti+deltati;
190. }
191.
192.
193.
194. void dinamica_5(int i)
195. { //para barra 5
196.     float Fi5y=-m5*a5[i];
197.     A[0][0]=1;
198.     A[0][1]=0;
199.     A[0][2]=-sin(alfa[i]);
200.     A[0][3]=-cos(alfa[i]);
201.     A[0][4]=0;
202.
203.     A[1][0]=0;
204.     A[1][1]=1;
205.     A[1][2]=-cos(alfa[i]);
206.     A[1][3]=sin(alfa[i]);
207.     A[1][4]=-m5*g+Fi5y;
208.     copia(); //copia los valores
    fijos a la matriz del sistema
209.
210.     B[2][0]=-nu51;
211.     B[3][2]=-nu53;
212.     sistema( 4, B, "4", 1);
213.     if( (B[3][4]<comp) || (B[1][4]<comp)) //
    F43t<0 o F41t<0
214.     {
215.         copia();
216.         B[2][0]=-nu51;
217.         B[3][2]=nu53;
218.         sistema( 4, B, "4", 1);
219.         if( (B[3][4]<comp) || (B[1][4]<comp))
    //F43t<0 o F41t<0
220.         {
221.             copia();
222.             B[2][0]=nu51;
223.             B[3][2]=nu53;
224.             sistema( 4, B, "4", 1);
225.             if( (B[3][4]<comp) || (B[1][4]<comp))
    //F43t<0 o F41t<0
226.             {
227.                 copia();
228.                 B[2][0]=nu51;
```




```
229.         B[3][2]=-nu53;
230.         sistema( 4, B, "4", 1);
231.     }
232. }
233. }
234.
235.     if (B[1][4]>=comp && B[3][4]>=comp)
236.     {
237.         F51n[i]=B[0][4];
238.         F51t[i]=B[1][4];
239.         F53n[i]=B[2][4];
240.         F53t[i]=B[3][4];
241.     }
242.     else
243.     {
244.         F53n[i]=5;
245.         F53t[i]=5;
246.         F51n[i]=5;
247.         F51t[i]=5;
248.     }
249. }
250.
251. void dinamica_4(int i)
252. {
253.     float Fi4y=-m4*a4[i];
254.     A[0][0]=1;
255.     A[0][1]=0;
256.     A[0][2]=sin(alfa[i]);
257.     A[0][3]=-cos(alfa[i]);
258.     A[0][4]=0;
259.
260.     A[1][0]=0;
261.     A[1][1]=1;
262.     A[1][2]=cos(alfa[i]);
263.     A[1][3]=sin(alfa[i]);
264.     A[1][4]=m4*g-Fi4y;
265.
266.     copia();
267.
268.     B[2][0]=-nu41;
269.     B[3][2]=-nu43;
270.     sistema( 4, B, "4", 1);
271.     if( (B[3][4]<comp) || (B[1][4]<comp)) //
        F43t<0 o F41t<0
272.     {
273.         copia();
274.         B[2][0]=-nu41;
```



```
275.     B[3][2]=nu43;
276.     sistema( 4, B, "4", 1);
277.     if( (B[3][4]<comp)  || (B[1][4]<comp))
//F43t<0  o F41t<0
278.     {
279.         copia();
280.         B[2][0]=nu41;
281.         B[3][2]=nu43;
282.         sistema( 4, B, "4", 1);
283.         if( (B[3][4]<comp)  || (B[1][4]<comp))
//F43t<0  o F41t<0
284.         {
285.             copia();
286.             B[2][0]=nu41;
287.             B[3][2]=-nu43;
288.             sistema( 4, B, "4", 1);
289.         }
290.     }
291. }
292.
293. if (B[1][4]>=comp && B[3][4]>=comp)
294. {
295.     F41n[i]=B[0][4];
296.     F41t[i]=B[1][4];
297.     F43n[i]=B[2][4];
298.     F43t[i]=B[3][4];
299. }
300. else
301. {
302.     F41n[i]=5;
303.     F41t[i]=5;
304.     F43n[i]=5;
305.     F43t[i]=5;
306. }
307. }
308.
309. void dinamica_3(int i)
310. {
311.     F34x[i]=5;
312.     F34y[i]=5;
313.     F35x[i]=5;
314.     F35y[i]=5;
315.     F23x[i]=5;
316.     F23y[i]=5;
317.     if (F43t[i]!=5 && F43n[i]!=5 && F53t[i]!=5
&& F53n[i]!=5)
318.     {
```



```
319.     float F43x=-
        F43t[i]*cos(alfa[i])+F43n[i]*sin(alfa[i]);
320.     float F43y=F43t[i]*sin(alfa[i])+F43n[i]*c
        os(alfa[i]);
321.     float F53x=-F53t[i]*cos(alfa[i])-
        F53n[i]*sin(alfa[i]);
322.     float F53y=-
        F53t[i]*sin(alfa[i])+F53n[i]*cos(alfa[i]);
323.     F34x[i]=-F43x;
324.     F34y[i]=-F43y;
325.     F35x[i]=-F53x;
326.     F35y[i]=-F53y;
327.     float F31y=m3*g-F34y[i]-F35y[i];
328.     float F31x=nu31*abs(F31y);
329.     float F32x=m3*a3[i]-F35x[i]-F34x[i]-F31x;
330.     F23x[i]=-F32x;
331.     F23y[i]=nu32*abs(F23x[i]);
332.     if (tita[i]<0) F23y[i]=-F23y[i];
333.     }
334. }
335. void dinamica_2(int i)
336. {
337.     Mm[i]=5;
338.     if (F23x[i]!=5 && F23y[i]!=5)
339.     {
340.         Mm[i]=((F23y[i]*rbrazo-
            m2*g*rCDGbrazo)*sin(tita[i])+F23x[i]*cos(tita[i]*
            rbrazo));
341.         if (Mm[i]>Mmax) Mmax=Mm[i];
342.         if (Mm[i]<Mmin) Mmin=Mm[i];
343.     }
344. }
345. void pinta_4()
346. {
347.     stroke(0,0,100);
348.     line(0,250+98,1200,250+98);
349.     line(0,250-98,1200,250-98);
350.     pinta(a4,10);
351.     fill(0,0,100);
352.     text("Acel 4",10,100);
353.
354.     stroke(250,0,0);
355.     pinta(F41t,30);
356.     fill(250,0,0);
357.     text("F41t",10,20);
358.
359.     stroke(250,0,250);
```



```
360.     pinta (F41n, 30);
361.     fill (250, 0, 250);
362.     text ("F41n", 10, 40);
363.
364.     stroke (0, 0, 250);
365.     pinta (F43t, 30);
366.     fill (0, 0, 250);
367.     text ("F43t", 10, 60);
368.
369.     stroke (0, 250, 250);
370.     pinta (F43n, 30);
371.     fill (0, 250, 250);
372.     text ("F43n", 10, 80);
373. }
374.
375. void pinta_5()
376. {
377.     stroke (0, 0, 100);
378.     line (0, 750+98, 1200, 750+98);
379.     line (0, 750-98, 1200, 750-98);
380.     pinta_abajo (a5, 10);
381.     fill (0, 0, 100);
382.     text ("Acel 5", 10, 600);
383.
384.     stroke (250, 0, 0);
385.     pinta_abajo (F51t, 30);
386.     fill (250, 0, 0);
387.     text ("F51t", 10, 520);
388.
389.     stroke (250, 0, 250);
390.     pinta_abajo (F51n, 30);
391.     fill (250, 0, 250);
392.     text ("F51n", 10, 540);
393.
394.     stroke (0, 0, 250);
395.     pinta_abajo (F53t, 30);
396.     fill (0, 0, 250);
397.     text ("F53t", 10, 560);
398.
399.     stroke (0, 250, 250);
400.     pinta_abajo (F53n, 30);
401.     fill (0, 250, 250);
402.     text ("F53n", 10, 580);
403. }
404.
405. void pinta_con1()
406. {
```



```
407.     stroke(250,0,0);
408.     pinta(F51t,30);
409.     fill(250,0,0);
410.     text("F51t",10,20);
411.
412.     stroke(250,0,250);
413.     pinta(F51n,30);
414.     fill(250,0,250);
415.     text("F51n",10,40);
416.
417.     stroke(0,0,250);
418.     pinta(F41t,30);
419.     fill(0,0,250);
420.     text("F41t",10,60);
421.
422.     stroke(0,250,250);
423.     pinta(F41n,30);
424.     fill(0,250,250);
425.     text("F41n",10,80);
426. }
427.
428. void pinta_con3()
429. {
430.     stroke(250,0,0);
431.     pinta(F53t,30);
432.     fill(250,0,0);
433.     text("F53t",10,20);
434.
435.     stroke(250,0,250);
436.     pinta(F53n,30);
437.     fill(250,0,250);
438.     text("F53n",10,40);
439.
440.     stroke(0,0,250);
441.     pinta(F43t,30);
442.     fill(0,0,250);
443.     text("F43t",10,60);
444.
445.     stroke(0,250,250);
446.     pinta(F43n,30);
447.     fill(0,250,250);
448.     text("F43n",10,80);
449. }
450.
451. void draw()
452. {
453.     pinta_referencias();
```



```
454.     float ac_max, ac_min;
455.     ac_min=10000;
456.     ac_max=-10000;
457.     for(int i=0;i<1201;i++)
458.     {
459.         if (a4[i]>ac_max) ac_max=a4[i];
460.         if (a4[i]<ac_min) ac_min=a4[i];
461.     }
462.     pinta_cine();
463.
464.     //pinta_con1();
465.     //pinta_con3();
466.     //pinta_5();
467.     //pinta_4();
468. }
469.
470. void pinta_cine()
471. {
472.     stroke(0,0,100);
473.     // pinta2(matriz, amplificacion, posicion)
474.     pinta(Mm,10);
475.     fill(0,0,100);
476.     text("Acel Extr",10,130);
477. }
478.
479. void pinta( float[] dato, float escala)
480. {
481.     for (int i=1;i<1201;i++)
482.     {
483.         line (i-1,250-escala*dato[i-1], i, 250-
         escala*dato[i]);
484.     }
485. }
486.
487. void pinta_abajo( float[] dato, float escala)
488. {
489.     for (int i=1;i<1201;i++)
490.     {
491.         line (i-1,750-escala*dato[i-1], i, 750-
         escala*dato[i]);
492.     }
493. }
494.
495. void pinta2( float[][] dato, float escala, in
    t vector)
496. {
497.     for (int i=1;i<1201;i++)
```



```
498.     {
499.         line (i-1,500-escala*dato[i-1][vector],
500.             i, 500-escala*dato[i][vector]);
501.     }
502.
503.     void conversion () //Pasa de grados a
        radianes
504.     {
505.         timin=timin*factor;
506.         timax=timax*factor;
507.         deltati=deltati*factor;
508.         w=w*factor;
509.         bta=bta*factor;
510.     }
511.
512.     void copia ()
513.     {
514.         for(int j=0;j<2;j++)
515.             for(int jj=0;jj<5;jj++)
516.                 {
517.                     B[j][jj]=A[j][jj];
518.                     B[j+2][jj]=0;
519.                 }
520.         B[2][1]=1;
521.         B[3][3]=1;
522.     }
523.
524.     void pinta_referencias ()
525.     {
526.         stroke(0,150,0);
527.         line(155,0,155,1000);
528.         line(506,0,506,1000);
529.         line(599,0,599,1000);
530.         line(692,0,692,1000);
531.         line(1045,0,1045,1000);
532.         line(1200,0,1200,1000);
533.         stroke(0);
534.         line(0,250,1200,250);
535.         line(600,260,600,240);
536.         line(1200,260,1200,240);
537.
538.         line(0,750,1200,750);
539.         line(600,760,600,740);
540.         line(1200,760,1200,740);
541.     }
542.     void guarda_datos ()
```



```
543.     {
544.         fichero.println("tita;
x3;v3;a3;y4;v4;a4;y5;v5;a5;F43n;F43t;F41n;F41t;F5
3n;F53t;F51n;F51t;F34x;F34y;F35x;F35y;F23x;F23y;M
m");
545.         for(int i=0;i<1201;i++)
546.         {
547.             fichero.print(tita[i]);fichero.print(";")
;
548.             fichero.print(x3[i]);fichero.print(";");
549.             fichero.print(v3[i]);fichero.print(";");
550.             fichero.print(a3[i]);fichero.print(";");
551.             fichero.print(y4[i]);fichero.print(";");
552.             fichero.print(v4[i]);fichero.print(";");
553.             fichero.print(a4[i]);fichero.print(";");
554.             fichero.print(y5[i]);fichero.print(";");
555.             fichero.print(v5[i]);fichero.print(";");
556.             fichero.print(a5[i]);fichero.print(";");
557.             fichero.print(F43n[i]);fichero.print(";")
;
558.             fichero.print(F43t[i]);fichero.print(";")
;
559.             fichero.print(F41n[i]);fichero.print(";")
;
560.             fichero.print(F41t[i]);fichero.print(";")
;
561.             fichero.print(F53n[i]);fichero.print(";")
;
562.             fichero.print(F53t[i]);fichero.print(";")
;
563.             fichero.print(F51n[i]);fichero.print(";")
;
564.             fichero.print(F51t[i]);fichero.print(";")
;
565.             fichero.print(F34x[i]);fichero.print(";")
;
566.             fichero.print(F34y[i]);fichero.print(";")
;
567.             fichero.print(F35x[i]);fichero.print(";")
;
568.             fichero.print(F35y[i]);fichero.print(";")
;
569.             fichero.print(F23x[i]);fichero.print(";")
;
570.             fichero.print(F23y[i]);fichero.print(";")
;
571.             fichero.print(F23y[i]);fichero.print(";")
;
```




```
572.     fichero.print(Mm[i]);fichero.print(";");
573.     fichero.println(" ");
574.     }
575.     fichero.flush(); //Escribe últimos datos
en fichero9
576.     fichero.close(); //Cierra el fichero
577. }
578.
579.
580.
581.
582.
583.
584. /*
585.     El programa resuelve un sistema de
ecuaciones nxn
586.     dado por A*X=B
587.     La entrada es una matriz C[n][n+1]
588.     donde los C[i,n] son la columna B
589.     y los C[i,j] son los elementos de A 0<=i<=n
0<=j<=n
590.     http://www.mailxmail.com/curso-algoritmos-
programacion-cientifica/sistemas-ecuaciones-
lineales
591.     */
592.
593.     void sistema(int n, float C[][], String tipit
o, int pos)
594.     {
595.         boolean sinsol=false;
596.         //Busca pivote (mayor término en columna j)
597.         for(int j=0;j<n && sinsol==false ;j++)
598.         {
599.             float mayor=abs(C[j][j]);
600.             int fila=j;
601.             for (int i=j+1;i<n;i++)
602.             {
603.                 if (mayor<abs(C[i][j]))
604.                 {
605.                     mayor=abs(C[i][j]);
606.                     fila=i;
607.                 }
608.             }
609.             if (mayor==0)
610.                 sinsol=true;
611.             else
```



```
612.     {           //intercambia filas si el mayor no
esta en la diagonal
613.         if (fila!=j)
614.         {
615.             for(int i=j;i<=n;i++) //Desde i hasta
j-1 son cero
616.             {
617.                 float aux=C[j][i];
618.                 C[j][i]=C[filas][i];
619.                 C[filas][i]=aux;
620.             }
621.         }
622.         //Normaliza
623.         float pivote=C[j][j];
624.         for(int i=j;i<=n;i++)
625.             C[j][i]=C[j][i]/pivote;
626.
627.         //Hace ceros
628.         for(int i=0; i<n;i++)
629.         {
630.             if(i!=j)
631.             {
632.                 float factor=C[i][j];
633.                 for(int k=j;k<=n;k++)
634.                     C[i][k]=C[i][k]-factor*C[j][k];
635.             }
636.         }
637.     }
638. }
639. if(sinsol==true)
640.     println("SISTEMA DE "+tipito+" SIN
SOLUCION para posicion ", pos);
641. }
```



Índice de figuras

Figura 1. Impresora 3D cartesiana.....	7
Figura 2. Impresora 3D delta	7
Figura 3. Relación entre las escalas Shore.....	9
Figura 4. Conjunto de extrusor	10
Figura 5. Componentes del fusor o hotend.....	11
Figura 6. Ejemplo de extrusor con adaptación para filamento flexible (derecha).....	11
Figura 7. Extrusión directa (izquierda) y extrusión indirecta o Bowden (derecha).....	12
Figura 8. Extrusor con accionamiento directo.....	13
Figura 9. Ejemplo de extrusor con reductora.....	13
Figura 10. Motor Nema 17 tipo pancake.....	14
Figura 11. Configuraciones de sistemas multimaterial	15
Figura 12. Hotend Diamond con 3 entradas de filamento	15
Figura 13. Hotend Chimera de doble boquilla	15
Figura 14. Mecanismo de extrusión Prusa	16
Figura 15. Boceto de la solución para las boquillas.....	17
Figura 16. Anchura del marco de Ender 3	18
Figura 17. Cabezal del extrusor de Ender3.....	18
Figura 18. Distribución planteada	19
Figura 19. Motores Nema 17	20
Figura 20. Boceto de la solución para los cuatro movimientos	21
Figura 21. Extrusor Kingroon	22
Figura 22. Extrusor OMG V2-S.....	22
Figura 23. Características técnicas del motor	23
Figura 24. Dibujo del motor.....	23
Figura 25. Dibujo del servo	24
Figura 26. Hotend CR10 MK8	24
Figura 27. Hotend E3D V6.....	25
Figura 28. Piñón.....	25
Figura 29. Rueda dentada y rueda de tracción	26
Figura 30. Ventilador de capa.....	26
Figura 31. Ventilador hotend.....	26
Figura 32. Rueda del soporte.....	27
Figura 33. Perfil del eje X de la impresora sobre el que se mueve el soporte	27
Figura 34. Vista frontal del soporte.....	28
Figura 35. Vista posterior del soporte	28
Figura 36. Base izquierda vista por delante	29
Figura 37. Base izquierda vista por detrás.....	29
Figura 38. Tapa izquierda	30
Figura 39. Barra del mecanismo	30
Figura 40. Adaptador para el hotend	31
Figura 41. Taco del rodamiento de presión.....	31
Figura 42. Soporte de los ventiladores.....	32
Figura 43. Colocación de la placa de fijación.....	32



Figura 44. Disposición de los separadores de nylon	33
Figura 45. Pilaretes del servo	33
Figura 46. Sistema de extrusión	33
Figura 47. Distancia entre centros y puntos de engrane	35
Figura 48. Ángulo entre el plano que contiene los ejes y el plano horizontal	35
Figura 49. Esquema de la distancia entre centros en el desengrane.....	36
Figura 50. Boceto para el cálculo de la distancia vertical mínima	36
Figura 51. Distancia entre centros en el desengrane.....	37
Figura 52. Esquema del movimiento del servo	37
Figura 53. Ángulo girado por el servo	38
Figura 54. Sección frontal de las guías de las bases y de los salientes de la barra	38
Figura 55. Trayectoria del punto central del saliente de la barra (Redondeo).....	39
Figura 56. Trayectoria del punto central del saliente de la barra (Zona inclinada)	39
Figura 57. Geometría de la guía de la base del extrusor izquierdo.....	39
Figura 58. Diferencia de altura entre las boquillas.....	40
Figura 59. Guías verticales del soporte	40
Figura 60. Posiciones del saliente en la guía de la base del extrusor.....	41
Figura 61. Máxima anchura del conjunto.....	42
Figura 62. Distancia entre boquillas	43
Figura 63. Boceto de la reducción de la superficie de impresión	43
Figura 64. Máxima altura del conjunto	44
Figura 65. Máxima profundidad del conjunto.....	44
Figura 66. Extrusor izquierdo a 3 mm por encima en la posición de reposo	45
Figura 67. Conexiones entre los distintos elementos del mecanismo.....	46
Figura 68. Velocidad horizontal de la barra frente al ángulo del brazo del servo	47
Figura 69. Aceleración horizontal de la barra frente al ángulo del brazo del servo	47
Figura 70. Velocidad vertical del extrusor izquierdo frente al ángulo del brazo del servo	47
Figura 71. Aceleración vertical del extrusor izquierdo frente al ángulo del brazo del servo	48
Figura 72. Fuerzas en dirección X e Y en la ranura de la barra	48
Figura 73. Fuerzas normal y tangente en la ranura de la base del extrusor izquierdo..	49
Figura 74. Fuerzas en dirección X e Y entre la base del extrusor izquierdo y la guía del soporte.....	49
Figura 75. Resultado de la velocidad de la barra con el programa desarrollado.....	50
Figura 76. Resultado de la aceleración de la barra con el programa desarrollado.....	50
Figura 77. Resultado de la velocidad del extrusor derecho con el programa desarrollado.....	51
Figura 78. Resultado de la aceleración del extrusor derecho con el programa desarrollado.....	51
Figura 79. Resultado de las fuerzas en la ranura de la barra con el programa desarrollado.....	52
Figura 80. Nueva geometría con inclinación de 26,56°	53
Figura 81. Nueva trayectoria con inclinación de 26,56°	53
Figura 82. Resultado del momento motor	54
Figura 83. Resultado de las fuerzas en la ranura de la barra	54



Figura 84. Cálculo del coeficiente de rozamiento en la ranura de la barra	55
Figura 85. Planteamiento para la deducción del cálculo de la fuerza de rozamiento ...	69
Figura 86. Diagramas de sólido libre para la posición más desfavorable	70
Figura 87. Resultados del sistema de ecuaciones con EES para la posición más desfavorable	72
Figura 88. Diagramas de sólido libre para la posición vertical del brazo del servo	73
Figura 89. Resultados del sistema de ecuaciones con EES para la posición vertical del brazo del servo	76
Figura 90. Boceto del mecanismo	77
Figura 91. Boceto para el cálculo de las distintas posiciones en la guía de la base del extrusor.....	77
Figura 92. Diagrama de sólido libre del sólido 5	80
Figura 93. Diagrama de sólido libre del sólido 4	80
Figura 94. Diagrama de sólido libre del sólido 3	81
Figura 95. Diagrama de sólido libre del sólido 2	81



Índice de tablas

Tabla 1. Valores límite del número de dientes.....	62
Tabla 2. Factor de servicio	63
Tabla 3. Factor de esfuerzos dinámicos	63
Tabla 4. Factor de forma del diente "y"	65
Tabla 5. Coeficiente de rigidez	65
Tabla 6. Propiedades mecánicas de aceros al carbono.....	66
Tabla 7. Propiedades mecánicas del aluminio A380	67
Tabla 8. Coeficiente de rozamiento aluminio-aluminio	68