



UNIVERSIDAD DE JAÉN

Escuela Politécnica Superior de Linares

Trabajo Fin de Grado

DISEÑO Y FABRICACIÓN DE UN PEINE MECÁNICO PARA LA RECOLECCIÓN DE ACEITUNA

Alumno: Alberto Moreno Molina

Tutores: Juan Antonio Almazán Lázaro
Elías López Alba

Depto.: Ingeniería Mecánica y Minera

Linares, noviembre 2023



UNIVERSIDAD DE JAÉN
Escuela Politécnica Superior de Linares

Grado en Ingeniería Mecánica

Trabajo Fin de Grado

DISEÑO Y FABRICACIÓN DE UN PEINE MECÁNICO PARA LA RECOLECCIÓN DE ACEITUNA

Una firma manuscrita en tinta púrpura, que parece leer "Alberto", con una línea horizontal extendida a la derecha.

Fdo. Alberto Moreno Molina

Tutores: Juan Antonio Almazán Lázaro / Elías López Alba

Fdo. Juan Antonio Almazán Lázaro / Elías López Alba

Linares, noviembre 2023

Índice de Contenido

1. Resumen	5
2. Introducción	6
2.1. Historia	7
2.2. Sistemas de derribo actuales	9
2.2.1. Método del ordeño	9
2.2.2. Vareo tradicional	9
2.2.3. Vibración	10
2.3. Evaluación de sistemas similares actuales	12
3. Justificación y objetivos del proyecto	21
4. Normativa	23
5. Fundamentos teóricos	29
6. Diseño y dimensionamiento	40
6.1. Boceto inicial	42
6.2. Materiales	48
6.3. Predimensionado	51
6.4. Diseño CAD	56
6.4.1. Bancada:	58
6.4.2. Engranaje-Cigüeñal (Barra 0-1)	59
6.4.3. Rodamientos conectores de cigüeñal y biela	59
6.4.4. Bielas (Barra 1-2)	61
6.4.5. Varilla deslizadora (Barra 2-3)	61
6.4.6. Conexión Bancada-Pértiga	63
6.4.7. Porta-rodamientos	64
6.4.8. Cabezal porta-peines	68
6.4.9. Balancín (Barra 3-4)	70
6.4.10. Peines	70
7. Prototipado	71
7.1. Impresión 3D	72
7.2. Herramientas utilizadas	81
7.3. Componentes y productos utilizados para el montaje	85
7.4. Fabricación y montaje	87
8. Presupuesto	103
9. Planos	105
10. Bibliografía	108

11. Anexos.....	110
11.1. Anexo 1. Cálculos cinemáticos realizados en Excel.....	110
11.2. Anexo 2. Estudio de engranajes bancada	113

1. Resumen

En este proyecto se propone el desarrollo de un vareador mecánico que combine las ventajas de los motores de gasolina y eléctrico, permitiendo a los agricultores contar con ambas opciones utilizando el mismo cuerpo. Esto ahorra costes de diseño y fabricación al no requerir un diferente estudio para la creación de una máquina distinta para cada motor. Además, se destaca la posibilidad de cambiar el tipo de motor con tan solo quitar 3 tornillos.

Uno de los objetivos principales es garantizar la eficiencia y comodidad de la máquina, ya que, si fatiga demasiado al operario, no podrá trabajar jornadas completas y los resultados no serán satisfactorios. También se busca garantizar la fiabilidad del vareador mecánico, para que pueda resistir el uso continuo durante la temporada de recolección prácticamente sin dar fallo.

Se propone el uso de una pértiga fija y un cabezal con doble peine y movimiento lateral para evitar daños en el árbol durante la recolección. Esta configuración de movimiento del cabezal no se encuentra en ninguna máquina con motor a gasolina, lo cual es valorado por los agricultores que buscan sistemas que causen el menor daño posible al olivo.

Los objetivos específicos del proyecto incluyen la evaluación de los sistemas de recolección actuales, el diseño y prototipado de un vareador mecánico, así como la realización de un presupuesto económico que permita la fabricación de la máquina de forma accesible y sin necesidad de personal cualificado.

2.Introducción

La superficie española dedicada al cultivo es de casi 17 millones de hectáreas, lo que supone que entorno al 34% del territorio español está dedicado a la agricultura [1] . La mayor parte de la superficie se dedica a la siembra de cultivos herbáceos (cereales, hortalizas, patatas...), seguido de los cultivos leñosos, donde destaca el olivar.

El desarrollo de maquinaria ha sido necesario para agilizar las tareas en el campo, así como mejorar las condiciones del trabajador, es por eso, que en los últimos 50 años el mundo rural se ha mecanizado [2] . Todos los trabajos agrícolas comienzan por la siembra, un cuidado y una futura recolección, y es en esta última etapa donde se centra este proyecto.

España tiene más de 340 millones de olivos, conteniendo el bosque humanizado más grande del mundo, que se encuentra en Jaén, compuesto por más de 64 millones de olivos [3].En el mundo del olivo, la tarea que requiere mayor coste es la recolección y es por ello que con frecuencia aparecen nuevas alternativas para mejorar y agilizar la recogida de aceituna (Ilustración 1: Paisaje olivarero).



Ilustración 1: Paisaje olivarero

Este proyecto se centra, dentro de la recolección, en la parte de derribar el fruto del árbol. Se diseñará un peine mecánico para la recolección tanto de aceituna como almendra y pistacho, introduciendo una máquina capaz de funcionar tanto con un motor gasolina como con uno eléctrico.

Esta máquina está dirigida a todo tipo de operarios, tanto a los empresarios que depositan su confianza en los motores gasolina por la experiencia que tienen utilizándolos, como a las nuevas generaciones de recolectores que apuestan por la innovación y el desarrollo de tecnologías más limpias. También permitiría utilizar distintas fuentes de energía, y por ello, podría funcionar en lugares apartados de la electricidad (común en regiones subdesarrolladas), o en función de los costos energéticos

2.1. Historia

La maquinaria agrícola ha tenido una gran evolución en los últimos tiempos, no queda tan atrás cuando nuestros padres y abuelos contaban que prácticamente todas las tareas del campo se realizaban a mano, sin utilización de maquinaria alguna, solo y en el mejor de los casos con la ayuda de animales.

Fue en la segunda mitad del siglo XX cuando se empezaron a utilizar tractores en el cultivo español, con marcas como Ebro, Motransa, Barreiros y Lanz (Ilustración 2: Tractores Barreiros [4]), dedicados principalmente al arado de tierras y al transporte de recolecciones [2].



Ilustración 2: Tractores Barreiros

En el sector olivarero pronto aparecerían las primeras patentes relacionadas con la recolección y sobre todo para el derribo de la aceituna [5] . A mediados de los años 60, aparecen los primeros vibradores instalados sobre tractores (Ilustración 3: Tractor con vibrador Gould SM-16 [6]), accionados por un sistema hidráulico el cual era movido por la toma de fuerza del tractor . Debido a la gran eficiencia de estas nuevas máquinas, el desarrollo fue a más, llegando hasta nuestros días, donde se siguen utilizando [6].



Ilustración 3: Tractor con vibrador Gould SM-16

La maquinaria pesada estaba dirigida a personas de gran poder adquisitivo y no todos los campesinos se lo podían permitir, fue por lo que surgen máquinas vibradoras de pequeño tamaño, las cuales van sobre el propio operario (Ilustración 4: Operario con vareadora mecánica. [7]). Estas máquinas se popularizan entre el pequeño y mediano agricultor, debido a que sin realizar una gran inversión los resultados obtenidos son bastantes satisfactorios.



Ilustración 4: Operario con vareadora mecánica.

2.2. Sistemas de derribo actuales

2.2.1. Método del ordeño

Es el método más antiguo y consiste en retirar a mano las aceitunas directamente del árbol, depositándolas en un capazo o espuerta que lleva cada operario (Ilustración 5: Ordeño del olivo [8]). Este método es utilizado para las aceitunas de mesa o aceites de máxima calidad, ya que evita totalmente cualquier agresión al fruto. Es un proceso tedioso y poco rentable, normalmente se realiza de forma familiar y para consumo propio. La principal ventaja de este método es que no se le hace daño al olivo.



Ilustración 5: Ordeño del olivo

2.2.2. Vareo tradicional

Método en el que el operario utiliza una vara para golpear al olivo y así hacer caer la aceituna (Ilustración 6: Proceso de vareo). Este proceso es más rápido que el ordeño, pero como es normal se hace más daño al árbol, rompiendo algunos brotes nuevos del olivo. Como norma general, este proceso se complementa con la utilización de maquinaria que veremos a continuación.



Ilustración 6: Proceso de vareo

2.2.3. Vibración

Consiste en hacer vibrar las ramas del olivo utilizando una pinza o gancho que lo agitan y hacen que la aceituna se desprenda del árbol. Hay diferentes máquinas con las que ponemos vibrar.

- **Vibrador pesado**

Consiste en un apero el cual va sobre un tractor generalmente, aunque se puede adaptar a otras máquinas como barredoras, excavadoras y mini-excavadoras (Ilustración 7: Vibrador de tractor [9]). El vibrador mueve repetitivamente el tronco del árbol haciendo que caigan los frutos.



Ilustración 7: Vibrador de tractor

- **Vibrador autopropulsado “Buggy”**

Vehículo autopropulsado que consta con un vibrador incorporado y cuya función es el vibrado de árboles (Ilustración 8: Buggy Pellenc [10]). El vibrado con buggy es más ágil que el realizado con tractores ya que la tracción la proporcionan las ruedas delanteras, teniendo solo una rueda loca atrás y proporcionando una gran maniobrabilidad, minimizando la cantidad de fruto pisada.



Ilustración 8: Buggy Pellenc

- **Cosechadoras cabalgantes**

Vehículos normalmente autopropulsados con una estructura que les permite circular sobre los olivos. Incorporan sistemas de vibración por varillas flexibles que minimizan el daño al árbol (Ilustración 9: Cosechadora cabalgante New Holland [11]). Para la utilización de este tipo de maquinaria es necesaria la previa preparación del olivar, hablamos de fincas con plantones de un pie y generalmente de intensivo o súper intensivo. Este tipo de máquinas realizan la función de derribo y recogida de aceituna, depositando el fruto directamente en un cajón o en un remolque mediante una cinta transportadora.



Ilustración 9: Cosechadora cabalgante New Holland

- **Vibrador manual**

Se trata de una máquina de unos 15 kg, la cual va sobre el operario. Consta de un motor a gasolina unido a un grupo que transforma el movimiento giratorio del motor en un movimiento lineal acotado, utilizando básicamente un movimiento biela-manivela. El movimiento de las ramas se produce gracias a un gancho el cual encaja sobre las mismas y transmite el movimiento (Ilustración 10: Operario utilizando vibrador manual [12]).



Ilustración 10: Operario utilizando vibrador manual

- **Vareador o peine mecánico**

Máquina manual compuesta por un motor que transmite el movimiento a un cabezal con varillas que golpea y hace vibrar las ramas del árbol haciendo así caer la aceituna. Es una máquina que no lleva demasiado tiempo en el mercado, aunque es cierto que se ha dado a conocer rápidamente debido a su buen funcionamiento (Ilustración 11: Diferentes tipos de vareadores mecánicos).

Dentro de este grupo de máquinas podemos distinguir entre dos tipos principalmente, las accionadas motor un motor de combustión interna o las que funcionan con un motor eléctrico



Ilustración 11: Diferentes tipos de vareadores mecánicos

2.3. Evaluación de sistemas similares actuales

El estudio y desarrollo de vareadores o peines mecánicos es bastante reciente, aunque es cierto que hay numerosas marcas que han apostado por estas máquinas. La ligereza y eficiencia son sus principales características, además de ser una máquina que respeta al olivo provocando daños mínimos.

Antes de comenzar al realizar el diseño de nuestra máquina hemos investigado sobre productos similares fabricados por diferentes marcas, estudiando cada una de las partes de la máquina y analizando ventajas e inconvenientes.

El fabricante alemán Stihl, especializado en maquinaria agrícola ligera presenta 3 modelos diferentes de peines mecánicos (Ilustración 12: Gama de peines mecánicos Stihl [13]).

Dispone de dos modelos con motor gasolina los cuales comparten el mismo cabezal y motor, cuya única diferencia está en la pértiga que une el motor con el cabezal, el modelo SP 92 TC-2 permite desmontable de la máquina en dos partes mientras que el modelo SP 92 C-2 no [13]. El otro modelo disponible consta con un motor eléctrico que se alimenta de una batería que va sobre la espalda del operario.



Ilustración 12: Gama de peines mecánicos Stihl

Las máquinas Stihl se caracterizan por su peso y comodidad, además de fiabilidad al llevar casi un siglo ofreciendo maquinaria agrícola. Stihl apuesta por un cabezal compuesto por dos peines o rastrillos con movimiento lateral en sentido contrario en toda su gama de peines mecánicos (Ilustración 13: Cabezal Peine Stihl [13]).



Ilustración 13: Cabezal Peine Stihl

La marca Zanon [14] también apuesta por la investigación y desarrollo de peines mecánicos innovadores, trabajando únicamente con motores eléctricos y sistemas neumáticos, además presenta vareadores con pértiga telescópica extensible que permiten su uso en todo tipo de árboles sin importar el tamaño. Sus máquinas son consideradas de las mejores del mercado debido a su gran fiabilidad, agilidad y eficacia.

En la gama de vareadores eléctricos ponemos diferenciar dos tipos diferentes en función de donde se sitúe la batería para la alimentación del motor eléctrico del peine.

- **Sobre el propio operario:**

La batería se sitúa en una mochila la cual lleva el operario, proporcionando agilidad a la hora de desplazarse en el trabajo y poco riesgo de rotura de cables, ya que la distancia de cable entre la batería y el peine es corta, minimizando riesgos de enchancharse con obstáculos que presente el terreno [14] (Ilustración 14: Zanon murciélago).



Ilustración 14: Zanon murciélago

Encontramos dos máquinas de este tipo, la Karbonium Gold Cartucho y la Murciélago, presentan su mayor diferencia en el cabezal (Ilustración 15: Cabezal Zanon Karbonium Gold Cartuch y Zanon Murciélago). La Karbonium Gold Cartucho presenta un cabezal compuesto por dos peines con movimiento lateral en sentido contrario mientras que la Murciélago tiene un cabezal compuesto por dos peines con movimiento lateral en el mismo sentido, por lo que los peines nunca se cruzan.

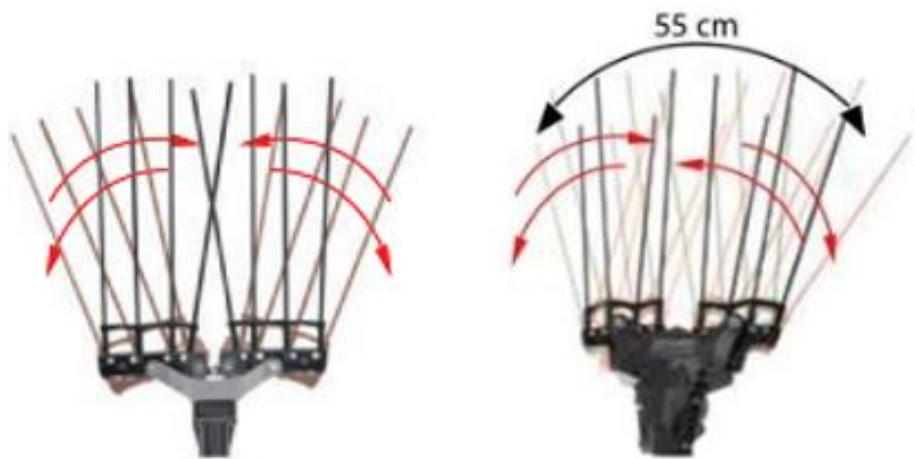


Ilustración 15: Cabezal Zanon Karbonium Gold Cartuch y Zanon Murciélago

- Sobre carro o remolque:

El modelo Mambo cuenta con una batería que se transporta en un carro de mano o pequeño remolque [14] (Ilustración 16: Zanon Mambo). Se suele dejar en medio de 4 olivos, para así mover la batería las mínimas veces posibles, una vez terminados esos 4 olivos se procede a volver a mover el carro hasta las nuevos olivos a varear. La utilización de estos tipos de peines suele ser más engorrosa ya que el cable que alimenta al motor es bastante largo y se suele enganchar en rastrojos y otros obstáculos que presente el olivar. Estas máquinas están diseñadas para recolecciones no profesionales ni intensivas.



Ilustración 16: Zanon Mambo

El otro tipo de peines que nos ofrece la marca son los neumáticos [14] (Ilustración 17: Kit Zanon carbonium air), aún poco visibles en los olivares. El principal inconveniente que tienen es la necesidad de un compresor de aire potente el cual necesita una batería o un grupo electrógeno para funcionar, teniendo que realizar una gran inversión y siendo engorroso el transporte de la máquina. La única ventaja que presenta es su ligereza.



Ilustración 17: Kit Zanon carbonium air

Pellenc es otra de las marcas que apuesta por el diseño y fabricación de este tipo de maquinaria, al igual que Zanon apuesta por la utilización de un motor eléctrico y dispone de un solo modelo, el peine vibrador Pellenc olivion [10](Ilustración 18: Peine Pellenc Olivion), disponible con pértiga fija o telescópica.

Esta marca presenta un nuevo cabezal, compuesto por un solo peine de movimiento horizontal lateral y siendo revolucionario ya que los daños que presentaba al árbol eran prácticamente nulos.



Ilustración 18: Peine Pellenc Olivion

Otras marcas como Campagnola intentan desarrollar cabezales para aumentar el rendimiento de sus máquinas, apostando también en el desarrollo de máquinas eléctricas [15].

Con su vareador Alice intenta obtener unos rendimientos superiores a la competencia montando un cabezal con doble peine superpuesto de movimiento vertical (Ilustración 19: Cabezal de peine Campagnola Alice). Los resultados no fueron los esperados, ya que mover las ramas hacia arriba y abajo no favorecía la caída del fruto, además con un mayor número de piezas mecánicas presenta más probabilidad de rotura y mayor coste de fabricación, no siendo la opción más recomendable.



Ilustración 19: Cabezal de peine Campagnola Alice

Otra opción presentada por la misma marca es el peine Campagnola Hercules [15] (Ilustración 20: Peine Campagnola Hercules). Se caracteriza por tener un cabezal convexo de movimiento elíptico, además cuenta con una pértiga extensible y dos velocidades de uso. El rendimiento obtenido es comparable con el de las marcas líderes en el mercado, con la ventaja de poder conseguirse a un precio más reducido, convirtiéndose en una muy buena opción para los agricultores.



Ilustración 20: Peine Campagnola Hercules

Otros tipos de vareadores son los de movimiento oscilante, marcas como Agrotechnic [16] pone este tipo de vareadores en el mercado (Ilustración 21: Vareador Agrotechnic X.32, Ilustración 22: Movimiento Agrotechnic X.32). Una máquina que presenta buenos resultados, pero orientada al pequeño agricultor donde la máquina no funciona en jornadas profesionales.



Ilustración 21: Vareador Agrotechnic X.32



Ilustración 22: Movimiento Agrotechnic X.32

Existen otras marcas menos conocidas que también fabrican peines mecánicos, generalmente de menos calidad y menos eficaces que los de las grandes marcas, pero quizás una buena opción para agricultores pequeños y recolecciones familiares. Muchas de estas marcas, por ejemplo, Sakawa, presenta una máquina convertible, la cual comparte un mismo motor para diferentes accesorios de rápido montaje (Ilustración 23: Máquina Sakawa con accesorios). El accesorio de peine para olivos tiene el mismo sistema que el que emplea Sthil, un cabezal que cuenta con dos peines de movimiento lateral en sentido contrario.



Ilustración 23: Máquina Sakawa con accesorios

Estas son algunas de las marcas que se dedican a la fabricación de peines mecánicos. Como se ha visto, principalmente se utilizan dos tipos de motores para el funcionamiento de la máquina, los eléctricos y los de combustión interna.

Al agricultor no le resulta sencillo elegir entre las diferentes máquinas del mercado, debido a la gran variedad ofrecida y la primera pregunta que suele surgir es si elegir una máquina con un motor gasolina o apostar por una con motor eléctrico.

El motor de gasolina se lleva utilizando en este tipo de maquinaria desde su creación, es por ello que muchos agricultores se deciden por estas máquinas, ya que conocen estos motores y saben de su fiabilidad, aparte, normalmente tienen experiencia en la reparación de los mismos. La principal ventaja del motor gasolina es su autonomía, pudiendo trabajar jornadas completas con tan solo rellenar un par de veces el depósito con combustible. Sin embargo, son motores más pesados, ruidos y contaminantes que los eléctricos.

La incorporación de motores eléctricos en vareadores mecánicos ha sido una revolución en los últimos años, una de sus principales características es el poco ruido que generan estos motores, además de ser máquinas ligeras y ergonómicas. Estos motores necesitan menos mantenimiento y son más respetuosos con el medio ambiente.

Otra de las preguntas que se suele hacer el agricultor es ¿qué tipo de cabezal debo elegir? La Empresa Agrieuro [17], distribuidora de una amplia gama de peines mecánicos facilita a sus clientes la siguiente tabla intentando orientarlos (Ilustración 24: Características de cada cabezal dependiendo del movimiento del peine).

GUÍA SINTÉTICA	VERTICAL	HORIZONTAL	OSCILANTE
Dimensión aceitunas	[Icono aceituna] [Barra 1/4] [Icono aceituna]	[Icono aceituna] [Barra 3/4] [Icono aceituna]	[Icono aceituna] [Barra 1/4] [Icono aceituna]
Resistencia al desprendimiento	[Icono aceituna] [Barra 1/4] [Icono aceituna]	[Icono aceituna] [Barra 3/4] [Icono aceituna]	[Icono aceituna] [Barra 1/4] [Icono aceituna]
Espesor frondas	[Icono rama] [Barra 1/4] [Icono rama]	[Icono rama] [Barra 3/4] [Icono rama]	[Icono rama] [Barra 1/4] [Icono rama]
Rendimiento	[Icono aceituna] [Barra 1/4] [Icono aceituna]	[Icono aceituna] [Barra 3/4] [Icono aceituna]	[Icono aceituna] [Barra 1/4] [Icono aceituna]
Levedad	[Icono bolsa] [Barra 1/4] [Icono bolsa]	[Icono bolsa] [Barra 3/4] [Icono bolsa]	[Icono bolsa] [Barra 1/4] [Icono bolsa]
Manejabilidad-Comfort	[Icono persona] [Barra 1/4] [Icono persona]	[Icono persona] [Barra 3/4] [Icono persona]	[Icono persona] [Barra 1/4] [Icono persona]
Nivel de profesionalidad	[Icono gráfico] [Barra 1/4] [Icono gráfico]	[Icono gráfico] [Barra 3/4] [Icono gráfico]	[Icono gráfico] [Barra 1/4] [Icono gráfico]
Consumo batería	[Icono batería] [Barra 1/4] [Icono batería]	[Icono batería] [Barra 3/4] [Icono batería]	[Icono batería] [Barra 1/4] [Icono batería]
Nivel de vibraciones	[Icono onda] [Barra 1/4] [Icono onda]	[Icono onda] [Barra 3/4] [Icono onda]	[Icono onda] [Barra 1/4] [Icono onda]

Ilustración 24: Características de cada cabezal dependiendo del movimiento del peine

Las máquinas con mayor rendimiento son las que incorporan un cabezal con movimiento lateral, además de ser las más manejables y cómodas.

Una vez hemos estudiado las especificaciones y características que nos facilitan los fabricantes sobre sus máquinas y antes de comenzar a realizar el diseño de nuestro peine mecánico es interesante contar con las opiniones de clientes que han utilizado diferentes marcas y modelos y son quienes realmente presentan sus las ventajas e inconvenientes.

La mayoría de agricultores comparten la misma opinión, confirmando que, en cuanto a comodidad y eficiencia, la Zanon Murciélago y la Pellenc Olivion son las mejores, siendo máquinas muy similares. Los cabezales de ambas máquinas tienen un movimiento horizontal de los peines en el mismo sentido, evitando que las ramas quiebren y produzcan daños al olivo.

3. Justificación y objetivos del proyecto

En este proyecto se afrontará el diseño, cálculo y prototipado de un peine mecánico que ofrezca al mercado un nuevo producto que permita contar tanto con las ventajas del motor gasolina como las del eléctrico sin necesidad de comprar dos máquinas diferentes.

Con el diseño de esta máquina se pretende llegar a todo el público, como se ha indicado anteriormente la principal duda que tiene el agricultor antes de comprar este tipo de máquina es si comprar una con motor gasolina o con motor eléctrico. Con esta máquina se ofrecerán las dos versiones contando con el mismo cuerpo, pero diferente motor, ahorrando en diseño y fabricación de dos modelos diferentes.

Además, otra de las ventajas que presenta esta máquina es que en caso de que el cliente cambie sus necesidades o no esté satisfecho con el funcionamiento de un tipo de motor, se puede adaptar el otro tipo de motor sin necesidad de cambiar el cuerpo del peine, siendo mucho más económico y sostenible que comprar otra máquina nueva.

Se pretende fabricar una máquina que garantice eficacia y comodidad. Al ser máquinas cuyo peso va sobre propio el operario, es necesario que la máquina sea lo más ergonómica posible, ya que por muy eficaz que esta sea, si fatiga mucho al operario, no será capaz de realizar jornadas de trabajo completas y los resultados obtenidos no serán satisfactorios.

Otra de las cuestiones que se tendrán en cuenta es la fiabilidad del vareador mecánico, son máquinas que se utilizan solamente durante la recolección, por lo tanto, se debe garantizar que la máquina sea capaz de resistir el uso de la temporada prácticamente sin dar un solo fallo, para así, cuando termine la campaña de recolección hacer un mantenimiento y estar listas para próximas recolecciones.

Teniendo en cuenta todo lo anterior y habiendo estudiado los productos de otras marcas se ha decidido la utilización de una pértiga fija para reducir el número de piezas mecánicas de la máquina y por instalar un cabezal con doble peine y movimiento lateral en el mismo sentido, evitando así el cizallamiento de ramas y corte de nuevos brotes que son los que producirán futuras cosechas.

Es importante tener en cuenta que no existe ninguna máquina con motor a gasolina que incorpore este sistema de movimiento de cabezal, el cual es el más respetuoso con el olivo. Los agricultores buscan sistemas que dañen lo menos posible al olivo para que así el árbol utilice todos los nutrientes disponibles para producir fruto y no para recuperarse de los daños ocasionados durante la recolección.

Así, se plantea el objetivo general de diseñar un peine mecánico innovador que permita el uso de un motor tanto eléctrico como de combustión, al mismo tiempo que se mantienen las prestaciones de cualquiera de las dos variantes actuales.

Como objetivos específicos, se afrontará:

- Evaluación de las características de los sistemas de recolección actuales.
- Diseño de un vareador de tipo peines mecánicos.
- Prototipado de componentes y ensamblaje.
- Realizar un diseño que permita ser fabricado en cualquier parte del planeta y sin necesidad de un personal especializado.
- Cálculo económico en forma de presupuesto.

4. Normativa

Para comenzar a diseñar la máquina, ha sido necesario consultar con la normativa vigente para así realizar un trabajo efectivo desde el primer momento. A continuación, se mostrarán los puntos que pueden interesar para la fabricación del peine mecánico del Real Decreto 1644/2008, de 10 de octubre [18], por el que se establecen las normas para la comercialización y puesta en servicio de las máquinas.

Un dato interesante a tener en cuenta sería que, en ferias, exposiciones, demostraciones y eventos similares, se podrán presentar máquinas o cuasi máquinas que no cumplan plenamente las disposiciones de este real decreto, siempre que exista un cartel visible en el que se indique con claridad tal circunstancia y que no se podrá disponer de dichas máquinas antes de que estas se pongan en conformidad.

En la normativa, se definen definiendo algunos términos:

“«Máquina»: Conjunto de partes o componentes vinculados entre sí, de los cuales al menos uno es móvil, asociados para una aplicación determinada, provisto o destinado a estar provisto de un sistema de accionamiento distinto de la fuerza humana o animal, aplicada directamente.”

“«Dispositivo amovible de transmisión mecánica»: Componente amovible destinado a la transmisión de potencia entre una máquina automotora o un tractor y una máquina receptora uniéndolos al primer soporte fijo. Cuando se comercialice con el resguardo se debe considerar como un solo producto.”

“«Fabricante»: Persona física o jurídica que diseñe y/o fabrique una máquina o una cuasi máquina cubierta por este real decreto y que sea responsable de la conformidad de dicha máquina o cuasi máquina con este real decreto, con vistas a su comercialización, bajo su propio nombre o su propia marca, o para su propio uso. En ausencia de un fabricante en el sentido indicado, se considerará fabricante cualquier persona física o jurídica que comercialice o ponga en servicio una máquina o una cuasi máquina cubierta por este real decreto.”

"Requisitos esenciales de seguridad y de salud": Disposiciones obligatorias relativas al diseño y la fabricación de los productos sujetos al presente real decreto para garantizar un nivel elevado de protección de la salud y la seguridad de las personas y, en su caso, de los animales domésticos y los bienes, así como, cuando sea aplicable, del medio ambiente.



En el documento se definen distintos puntos que se han tenido en cuenta durante el desarrollo de este proyecto, tal cual se indica en el Real Decreto, se cita:

- **En términos de seguridad, el documento indica:**

“1.1.2 Principios de integración de la seguridad: Al diseñar y fabricar una máquina y al redactar el manual de instrucciones, el fabricante o su representante autorizado deberá prever no solo el uso previsto de la máquina, sino también cualquier mal uso razonablemente previsible. Las máquinas se deben diseñar y fabricar de manera que se evite su utilización de manera incorrecta, cuando ello pudiera generar un riesgo. En su caso, en el manual de instrucciones se deben señalar al usuario los modos que, por experiencia, pueden presentarse en los que no se debe utilizar una máquina. Las máquinas se deben diseñar y fabricar teniendo en cuenta las molestias que pueda sufrir el operador por el uso necesario o previsible de un equipo de protección individual. Las máquinas deberán entregarse con todos los equipos y accesorios especiales imprescindibles para que se puedan regular, mantener y utilizar de manera segura.”

“1.1.5 Diseño de la máquina con vistas a su manutenzione. La máquina o cada uno de sus diferentes elementos: Se debe poder manipular y transportar con seguridad. Estará embalada o diseñada para que pueda almacenarse sin riesgos ni deterioro. Esto se tendrá en cuenta en futuros trabajos en los que se diseñe la funda para los peines y evitar daños a personas, anclajes para amarrar la maquina fácilmente)”

2.2.1 Generalidades. Las máquinas portátiles y/o las máquinas guiadas a mano: Según el tipo, poseerán una superficie de apoyo de dimensiones suficientes y tendrán los suficientes medios de prensión y de sujeción correctamente dimensionados, dispuestos de manera que la estabilidad de la máquina pueda garantizarse en las condiciones de funcionamiento previstas, salvo si ello fuera técnicamente imposible o si existiera un órgano de accionamiento independiente, en el caso de que los medios de prensión no puedan soltarse con total seguridad, llevarán órganos de accionamiento de puesta en marcha y/o de parada dispuestos de tal manera que el operador no tenga que soltar los medios de prensión para accionarlos, no presentarán riesgos de puesta en marcha intempestiva ni de seguir funcionando después de que el operador haya soltado los medios de prensión. Habría que tomar medidas equivalentes si este requisito no fuera técnicamente realizable, permitirán, en caso necesario, la observación visual de la zona peligrosa y de la acción de la herramienta en el material que se esté trabajando.

1.2.3 Puesta en marcha. La puesta en marcha de una máquina solo deberá poder efectuarse mediante una acción voluntaria ejercida sobre un órgano de accionamiento previsto a tal efecto.

1.2.4 Parada. 1.2.4.1 Parada normal. Las máquinas estarán provistas de un órgano de accionamiento que permita su parada total en condiciones seguras.

1.6.5 Limpieza de las partes interiores. La máquina se debe diseñar y fabricar de manera que sea posible limpiar las partes interiores que hayan contenido sustancias o preparados peligrosos sin penetrar en ellas; asimismo, si es necesario desbloquearlas, la operación deberá poder realizarse desde el exterior. Si fuese imposible evitar tener que penetrar en la máquina, esta se debe diseñar y fabricar de forma que sea posible efectuar la limpieza con total seguridad.

3.6.2 Marcado. Cada máquina debe llevar, de forma legible e indeleble, las indicaciones siguientes: La potencia nominal expresada en kilovatios (kW), la masa en la configuración más usual en kilogramos (kg), y, en su caso: El máximo esfuerzo de tracción previsto en el gancho de tracción en Newtons (N), el máximo esfuerzo vertical previsto sobre el gancho de tracción en Newtons (N).

- **En cuanto a peligros mecánicos el documento indica:**

1.3.1 Riesgo de pérdida de estabilidad. La máquina, así como sus elementos y equipos, deberán ser suficientemente estables para que se pueda evitar el vuelco, la caída o los movimientos incontrolados durante el transporte, montaje, desmontaje y cualquier otra acción relacionada con la máquina. Si la propia forma de la máquina o la instalación a que se destina no permiten garantizar la suficiente estabilidad, habrá que disponer unos medios de fijación adecuados, que se indicarán en el manual de instrucciones.

1.3.2 Riesgo de rotura en servicio. Tanto las partes de la máquina como las uniones entre ellas tendrán que poder resistir a las sollicitaciones a las que se vean sometidas durante la utilización. Los materiales utilizados tendrán una resistencia suficiente, adaptada a las características del entorno de utilización previsto por el fabricante o su representante autorizado, en particular respecto a los fenómenos de fatiga, envejecimiento, corrosión y abrasión. El manual de instrucciones debe indicar los tipos y la frecuencia de las inspecciones y mantenimientos necesarios por motivos de seguridad. En su caso, indicará las piezas que puedan desgastarse, así como los criterios para su sustitución.

1.3.4 Riesgos debidos a superficies, aristas o ángulos. Los elementos de la máquina que sean accesibles no presentarán, en la medida que lo permita su función, ni aristas, ni ángulos pronunciados, ni superficies rugosas que puedan producir lesiones.

1.3.7 Riesgos relacionados con los elementos móviles. Los elementos móviles de la máquina se deben diseñar y fabricar a fin de evitar los riesgos de contacto que puedan provocar accidentes o, cuando subsistan los riesgos, estarán provistos de resguardos o de dispositivos de protección.

1.5.4 Errores de montaje.—Los errores susceptibles de ser cometidos en el montaje o reposición de determinadas piezas que pudiesen provocar riesgos deberán imposibilitarse mediante el diseño y la fabricación de dichas piezas o, en su defecto, mediante indicaciones que figuren en las propias piezas y/o en sus respectivos cárteres. Las mismas indicaciones figurarán en los elementos móviles y/o en sus respectivos cárteres cuando, para evitar un riesgo, sea preciso conocer el sentido del movimiento.

- **En cuanto a ergonomía:**

1.5.9 Vibraciones. La máquina se debe diseñar y fabricar de manera que los riesgos que resulten de las vibraciones que ella produzca se reduzcan al nivel más bajo posible, teniendo en cuenta el progreso técnico y la disponibilidad de medios de reducción de las vibraciones, especialmente en su fuente.

3.6.3.1 Vibraciones. En el manual de instrucciones se indicará lo siguiente sobre las vibraciones que la máquina transmita al sistema mano-brazo o a todo el cuerpo: El valor total de las vibraciones a las que esté expuesto el sistema mano-brazo, cuando excedan de $2,5 \text{ m/s}^2$. Cuando este valor no exceda de $2,5 \text{ m/s}^2$, se debe mencionar este hecho, el valor cuadrático medio más elevado de la aceleración ponderada a la que esté expuesto todo el cuerpo, cuando este valor exceda de $0,5 \text{ m/s}^2$. Cuando este valor no exceda de $0,5 \text{ m/s}^2$, se debe mencionar este hecho, la incertidumbre de la medición.

Estos valores se medirán realmente en la máquina considerada, o bien se establecerán a partir de mediciones efectuadas en una máquina técnicamente comparable y representativa de la máquina a fabricar. Cuando no se apliquen normas armonizadas, las vibraciones se deben medir utilizando el código de medición que mejor se adapte a la máquina. Deberán describirse las condiciones de funcionamiento de la máquina durante la medición, así como los códigos de medición utilizados para esta.

1.1.6 Ergonomía. En las condiciones previstas de utilización, habrán de reducirse al mínimo posible la molestia, la fatiga y el estrés físico y psíquico del operador, teniendo en cuenta principios ergonómicos como los siguientes: Adaptarse a las diferencias morfológicas, de fuerza y de resistencia de los operadores. Proporcionar espacio suficiente para los movimientos de las distintas partes del cuerpo del operador, Evitar un ritmo de trabajo determinado por la máquina. Evitar que la vigilancia requiera una concentración prolongada. Adaptar el interfaz hombre-máquina a las características previsibles de los operadores.

- **En cuanto a protección contra peligros mecánicos, el documento indica:**

4.1.2.1 Riesgos debidos a la falta de estabilidad. La máquina se debe diseñar y fabricar de modo que la estabilidad exigida en el punto 1.3.1 se mantenga tanto en servicio como fuera de servicio, incluidas todas las fases de transporte, montaje y desmontaje, durante los fallos previsibles de un elemento y también durante los ensayos efectuados de conformidad con el manual de instrucciones. Para ello, el fabricante o su representante autorizado deberá utilizar los métodos de verificación apropiados.

“4.1.2.3 Resistencia mecánica. La máquina, los accesorios de elevación y sus elementos deben poder resistir los esfuerzos a los que estén sometidos durante el funcionamiento y, si procede, cuando no funcionen, en las condiciones de instalación y de funcionamiento previstas y en todas las configuraciones pertinentes, teniendo en cuenta, en su caso, los efectos producidos por los factores atmosféricos y por las fuerzas ejercidas por las personas. Este requisito debe cumplirse igualmente durante el transporte, montaje y desmontaje.” Por ello, la máquina y los accesorios de elevación se deben diseñar y fabricar de manera que se eviten los fallos debidos a la fatiga o al desgaste habida cuenta del uso previsto.

Igualmente, se prestará atención a los materiales elegidos, tal como indica el documento, “los materiales empleados se deben elegir teniendo en cuenta el ambiente de trabajo previsto, prestando especial atención en lo que respecta a la corrosión, abrasión, golpes, temperaturas extremas, fatiga, fragilidad y envejecimiento. La máquina y los accesorios de elevación se deben diseñar y fabricar de modo que puedan soportar sin deformación permanente o defecto visible las sobrecargas debidas a las pruebas estáticas. Los cálculos de resistencia deben tener en cuenta el valor del coeficiente de prueba estática seleccionado de forma que garantice un nivel de seguridad adecuado; dicho coeficiente tendrá, como regla general, los valores siguientes: a) Máquinas movidas por la fuerza humana y accesorios de elevación: 1,5; b) otras máquinas: 1,25.”

5. Fundamentos teóricos

Una vez estudiado el movimiento que debe realizar la máquina se puede comenzar a desarrollar el vareador mecánico. El elemento que va a estar en contacto con el árbol debe tener un movimiento lateral, por tanto, necesitamos un mecanismo que cuente con un grado de libertad, para asegurarnos de que esto se cumpla utilizaremos la ecuación de Kutzbach-Grubler [19]:

$$G.D.L = 3(N - 1) - 2J_1 - J_2$$

Siendo:

N el número de eslabones.

J_1 el número de pares con un grado de libertad.

J_2 el número de pares con dos grados de libertad.

A continuación, se muestran las representaciones gráficas de las posibles opciones para el mecanismo de nuestra máquina, marcando las juntas con un grado de libertad en rojo (J_1) y las de dos grados de libertad en amarillo (J_2).

-Mecanismo 1 (Ilustración 25: Esquemas simplificados Opción 1):

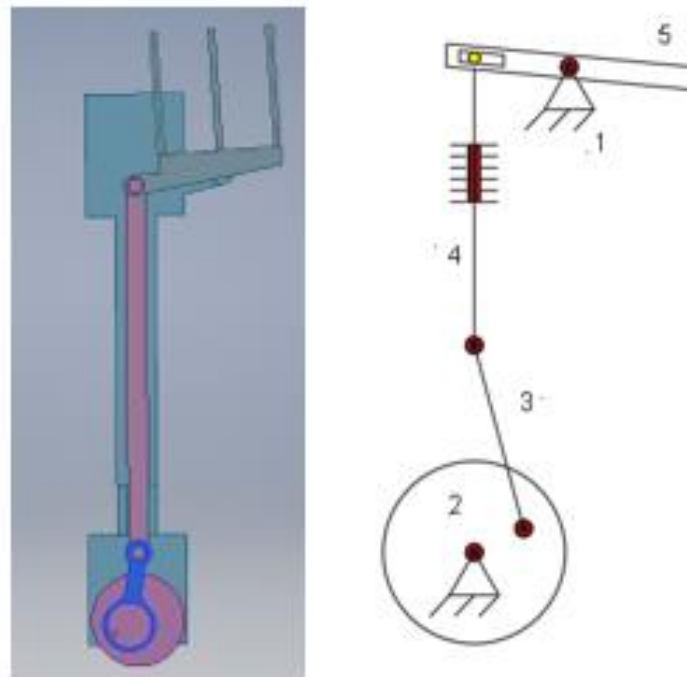


Ilustración 25: Esquemas simplificados Opción 1

Aplicando la fórmula obtenemos un mecanismo con un grado de libertad.

$$G.D.L = 3(5 - 1) - 2 * 5 - 1 = 1$$

- Mecanismo 2 (Ilustración 26: Esquema simplificado Opción 2):

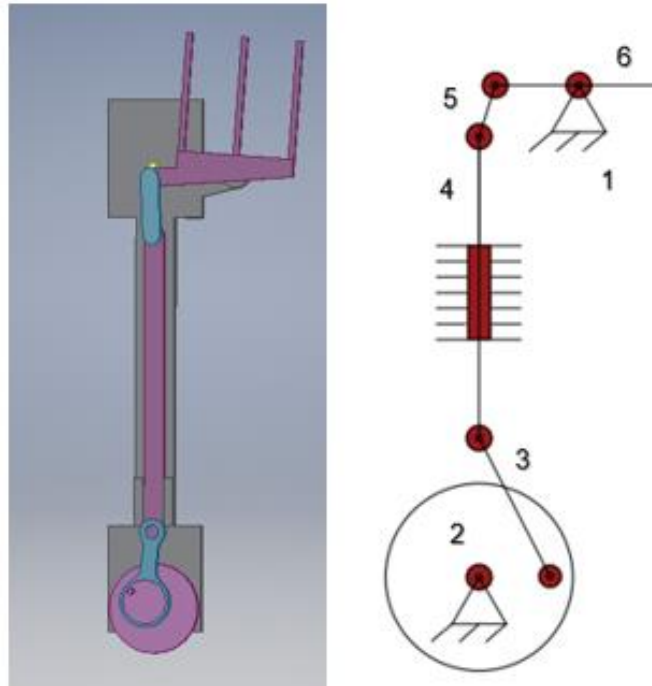


Ilustración 26: Esquema simplificado Opción 2

Aplicando la ecuación de Kutzbach-Grubler:

$$G.D.L = 3(6 - 1) - 2 * 7 = 1$$

De igual modo, el mecanismo conserva un grado de libertad.

La opción elegida para desarrollar el prototipo será la segunda, la principal ventaja que presenta el sistema 2 frente al 1 es la ausencia de juntas con dos grados de libertad. La opción 2 dispone de una barra más, que aun sabiendo que a mayor piezas mecánicas mayor riesgo de rotura puede haber, se optará por esta opción.

La frecuencia de vibración óptima con la que se desprende el fruto del árbol será uno de los datos más importantes a tener en cuenta la hora de dimensionar y fabricar la máquina. El estudio de Karim Kouraba [20] recoge en la siguiente tabla la frecuencia de vibración idónea para la caída de fruto de diferentes árboles (Tabla 1: Frecuencia óptima de vibración para cada árbol).

Cultivo	Tipo de árbol	Frecuencia (ciclos/s)
Albaricoquero	1	15-30
Almendo	1	15-25
Cerezo	4	12-24
Ciruelo	2	15-25
Manzano	2	15-25
Melocotón	3	15-25
Nogal	3	15-20
Naranja	5	10-15
Olivo	5	20-35

Tabla 1: Frecuencia óptima de vibración para cada árbol

En la tabla se comprueba que el almendo y el olivo tienen un rango de vibración óptimo común, concretamente entre 20 y 25 ciclos por segundo. Este dato será fundamental para el diseño de la máquina, obteniendo así una mayor eficiencia de la misma.

Según el mecanismo elegido (opción 2), el eslabón 6 realiza un ciclo completo cuando el cigüeñal del mecanismo de una vuelta completa (eslabón 2), es decir, la frecuencia del eslabón 6 irá condicionada por la velocidad angular del eslabón 2. Conocidos los datos de la frecuencia óptima para el derribo del fruto ,20-25 Hz, se puede determinar el rango en el que debe estar comprendida la velocidad angular del eslabón 2, siendo esta entre 125 y 157 radianes por segundo.

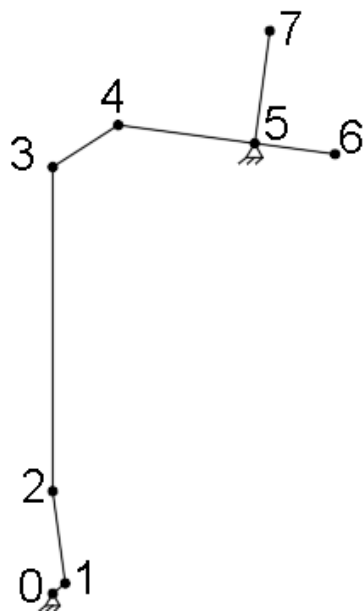
Para seguir realizando cálculos de velocidades y aceleraciones de cada uno de los eslabones es necesario concretar una velocidad angular determinada del eslabón 2, para ello será necesaria la elección del motor, adelantando que el motor a gasolina seleccionado tendrá una velocidad angular máxima de 6000 rpm (638.3 rad/s). Para conseguir la velocidad del eslabón 2 deseada será necesaria la instalación de un par de engranajes para conseguir una reducción de velocidad angular (Tabla 2: Datos engranajes).

Los diámetros primitivos de los engranajes son de 17.85 mm y 73.95 mm (Anexo 2. Estudio de engranajes), siendo la velocidad lineal del punto de contacto de ambos engranajes de 11215.5 mm/s, quedando la velocidad angular del eslabón 2 como 151,7 rad/s y una frecuencia de 24.1 Hz en el eslabón de salida.

D_prim1(mm)	17,85
D_prim2(mm)	73,95
Wmotor(rpm)	6000
Wmotor(rad/s)	628,3185307
Vengranaje(mm/s)	11215,48577
W01(rad/s)	151,6630936

Tabla 2:Datos engranajes

A continuación, se procederá a calcular los valores de velocidad y aceleración en ciertas juntas para poder dimensionar las distintas piezas de la máquina. Anteriormente se han numerado los eslabones del mecanismo, ahora se numerarán las juntas necesarias para facilitar la comprensión de los cálculos y la longitud de cada barra.



barra	Longitud(m)
0-1	0,01
1-2	0,057
2-3	1,7
3-4	0,048
4-5	0,085
5-7	0,2

Ilustración 27: Esquema simplificado del mecanismo

Para los siguientes cálculos se han utilizado las siguientes ecuaciones cinemáticas [19], siendo $\vec{w}$ la velocidad angular y $\vec{a}$ la aceleración angular del eslabón:

$$\vec{V}_B = \vec{V}_A + \vec{V}_{B/A} = \vec{V}_A + \vec{w}(k) \times \vec{r}_{B/A}$$

$$\vec{a}_B = \vec{a}_A + \vec{a}_{B/A} = \vec{a}_A + \vec{a}(k) \times \vec{r}_{B/A} - w^2 \vec{r}_{B/A}$$

Para realizar los cálculos para las diferentes posiciones del mecanismo se ha supuesto que cuando la barra 01 coincide con la horizontal por el lado derecho de la junta 0, el ángulo α será 0° . Se han realizado los cálculos para 35 diferentes posiciones del mecanismo, aumentando para cada una de ellas 10° el valor de Alpha.

Se procederá a la realización de los cálculos para un ángulo determinado, concretamente para Alpha igual a 30° . En primer lugar, se obtendrán los valores de velocidad para cada una de las juntas.

$$\vec{V}_1 = \vec{V}_0 + \vec{\omega}_{01} \times \vec{r}_{01}$$

$$\vec{V}_1 = 151.6\hat{k} \times 0.01[\cos 30 \hat{i} + \sin 30 \hat{j}] = -0.758\hat{i} + 1.312\hat{j} \text{ (m/s)}$$

$$\vec{V}_2 = \vec{V}_1 + \vec{\omega}_{12} \times \vec{r}_{12}$$

$$\vec{V}_2 = -0.758\hat{i} + 1.312\hat{j} + \vec{\omega}_{12} \times 0.057[-\sin 8.73 \hat{i} + \cos 8.73 \hat{j}]$$

$$\vec{V}_2 = -0.758\hat{i} + 1.312\hat{j} + [0.0563 \omega_{12}\hat{i} - 0.00865 \omega_{12}\hat{j}]$$

Como se puede observar se tienen como incógnitas $\vec{V}_2$ y $\vec{\omega}_{12}$ en una sola ecuación, para la resolución se tendrá en cuenta que la junta 2 solo tendrá un desplazamiento vertical, por lo tanto cuando se proceda a la descomposición de la ecuación en sistema de coordenadas xy se sabe que $\vec{V}_{2x} = 0$.

$$\hat{i}: 0 = -0.758 - 0.0563\vec{\omega}_{12} \quad ; \quad \vec{\omega}_{12} = -13.46 \hat{k} \text{ rad/s}$$

$$\hat{j}: V_{2y} = 1.312 - 0.00865\omega_{12} = 1.429 \hat{j} \text{ m/s}$$

$$V_{2y} = V_2 = V_3 = 1.429 \hat{j} \text{ m/s}$$

La barra 2-3 se encuentra en traslación, por tanto, en un instante determinado, la velocidad será la misma en módulo y sentido para todos sus puntos.

Para calcular $\vec{V}_4$ será necesario igualar las dos ecuaciones de velocidad posibles obtenidas refiriéndose a cada una de las barras que son contiguas al nudo, se procederá a la descomposición de la ecuación en coordenadas xy y se obtendrá tanto el valor de la velocidad en el nudo 4 como la velocidad angular de la barra 45. Se tendrá en cuenta que la velocidad lineal de un nudo fijo (Nudo 5) es nula.

$$\vec{V}_4 = \vec{V}_3 + \vec{w}_{34} \times \vec{r}_{34}$$

$$\vec{V}_4 = \vec{V}_5 + \vec{w}_{45} \times \vec{r}_{45} ; \vec{V}_5 = 0$$

$$\vec{V}_3 + \vec{w}_{34} \times \vec{r}_{34} = \vec{V}_5 + \vec{w}_{45} \times \vec{r}_{45}$$

$$1.429\hat{j} + 0.01112 w_{34}\hat{j} - 0.0466 w_{34}\hat{i} = (-0.0848\hat{i} - 0.00453\hat{i}) w_{45}$$

$$\hat{i}: -0.0466 w_{34} = -0.0848 w_{45}$$

$$\hat{j}: 0.01112w_{34} + 1.429 = -0.0848 w_{45}$$

Se tiene un sistema con dos ecuaciones y dos incógnitas, resolviendo se obtienen los siguientes resultados.

$$w_{34} = -1.616 \hat{k}^{rad}/s ; w_{45} = -16.63 \hat{k}^{rad}/s$$

Una vez conocidos los valores de las velocidades angulares se podrá sustituir en cualquiera de las ecuaciones planteadas anteriormente y obtener el valor de $\vec{V}_4$.

$$\vec{V}_4 = -16.63\hat{k} * [-0.0848\hat{i} + 0.00453\hat{j}] = 0.0754\hat{i} + 1.142\hat{j} m/s$$

Una vez obtenidas todas las velocidades lineales de los nudos y las velocidades angulares de las barras para este ángulo Alpha se puede proceder al cálculo de las aceleraciones.

$$\vec{a}_1 = \vec{a}_0 + \vec{\alpha}_{01} \times \vec{r}_{01} - w_{01}^2 \vec{r}_{01}; \quad \vec{a}_0 \text{ y } \vec{\alpha}_{01} = 0$$

$$\vec{a}_1 = -151.6^2 (0.00866\hat{i} + 0.005\hat{j})$$

$$\vec{a}_1 = -199.2\hat{i} - 115.0\hat{j} \text{ m/s}^2$$

Para el cálculo de la aceleración en el nudo 2, al igual que en el caso de la velocidad, debido a la restricción de la barra, solo se someterá a traslación en sentido vertical, por tanto, la aceleración solo tendrá componente $\hat{j}$.

$$\vec{a}_2 = \vec{a}_1 + \vec{\alpha}_{12} \times \vec{r}_{12} - w_{12}^2 \vec{r}_{12}$$

$$\vec{a}_2 = -199.2\hat{i} - 115.0\hat{j} + \vec{\alpha}_{12}\hat{k} \times [-0.00866\hat{i} + 0.0563\hat{j}] - (-13.46)^2 * (-0.00866\hat{i} + 0.0563\hat{j})$$

$$\hat{i}: 0 = -199.2\hat{i} - 0.0563\alpha_{12} + 1.569; \quad \alpha_{12} = -3510.3 \text{ rad/s}^2$$

$$\hat{j}: a_{2y} = -115.0 + 30.39 - 10.19 = -94.8 \text{ m/s}^2$$

$$\vec{a}_3 = \vec{a}_2 = -94.8\hat{j} \text{ m/s}^2$$

Para el cálculo de $\vec{a}_4$ se plantearán dos ecuaciones al igual que en el caso de la velocidad, se igualarán y se descompondrá en coordenadas xy para obtener un sistema con dos ecuaciones y dos incógnitas.

$$\vec{a}_4 = \vec{a}_3 + \vec{\alpha}_{34} \times \vec{r}_{34} - w_{34}^2 \vec{r}_{34}$$

$$\vec{a}_4 = -94.8\hat{j} + \vec{\alpha}_{34}\hat{k} \times [0.01112\hat{i} + 0.0466\hat{j}] - (-1.616)^2 * (0.01112\hat{i} + 0.0466\hat{j})$$

$$\vec{a}_4 = (-0.0290 - 0.0466\alpha_{34})\hat{i} + (-0.1216 + 0.01141\alpha_{34} - 94.8)\hat{j}$$

$$\vec{a}_4 = \vec{a}_5 + \vec{\alpha}_{45} \times \vec{r}_{45} - w_{45}^2 \vec{r}_{45}; \vec{a}_5 = 0$$

$$\vec{a}_4 = \alpha_{45}\hat{k} \times [-0.0848\hat{i} + 0.00453\hat{j}] - (-16.63^2) * (-0.0848\hat{i} + 0.00453\hat{j})$$

$$\vec{a}_4 = (23.4 - 0.00453\alpha_{45})\hat{i} + (-1.252 - 0.0848\alpha_{45})\hat{j}$$

Igualando ambas expresiones de $\vec{a}_4$ y se obtiene:

$$\vec{\alpha}_{34} = -391.43\hat{k} \text{ rad/s}^2$$

$$\vec{\alpha}_{45} = 1155\hat{k} \text{ rad/s}^2$$

Una vez obtenidos los valores de las aceleraciones angulares se puede calcular el valor de $\vec{a}_4$ utilizando cualquiera de las ecuaciones planteadas anteriormente.

$$\vec{a}_4 = (23.4 - 0.00453\alpha_{45})\hat{i} + (-1.252 - 0.0848\alpha_{45})\hat{j}$$

$$\vec{a}_4 = 18.16\hat{i} - 99.2\hat{j} \text{ m/s}^2$$

Obtenidos el valor de velocidad angular y aceleración angular de la base del peine, barra 4-5, se procede al cálculo de la aceleración en el punto de contacto de la varilla con el olivo.

La varilla tiene una longitud total de 35 cm y se supondrá que el punto de contacto con el olivo se dará a 20 cm desde la base del peine, una vez dicho esto se podrá calcular la aceleración del punto 7.

$$\vec{a}_7 = \vec{a}_5 + \vec{\alpha}_{45} \times \vec{r}_{57} - \omega_{45}^2 \vec{r}_{57}; \vec{a}_5 = 0$$

$$\vec{a}_7 = 1155.25\hat{k} \times [0.0106\hat{i} + 0.1997\hat{j}] - (-16.63^2) * (0.0106\hat{i} + 0.1997\hat{j})$$

$$\vec{a}_7 = -233\hat{i} - 42.9\hat{j} \text{ m/s}^2$$

$$|\vec{a}_7| = 237.6 \text{ m/s}^2$$

Se han realizado todos los cálculos cinemáticos para α igual a 30° para mostrar el proceso, pero para agilizar los cálculos se ha realizado una tabla en Excel donde será fácilmente visible las situaciones críticas y los valores de los datos calculados.

El primer paso para comenzar a dimensionar la máquina será conocer la fuerza que ejerce el olivo sobre nuestra máquina, para ello se utilizará la segunda ley de Newton.

$$\vec{F} = m \cdot \vec{a}$$

Con la ayuda de los datos calculados en Excel, se seleccionará el valor máximo de aceleración en el punto 7, lugar donde las varillas del peine y el olivo están en contacto, siendo este valor de 622 m/s^2 cuando α es 90° .

Una vez conocido el valor de la aceleración máxima se procederá al cálculo de la masa que moverá el peine, para ello se estimará el volumen aproximado de zona foliar del olivo que moverá el peine (Ilustración 28: volumen de control ocupado por las varillas).

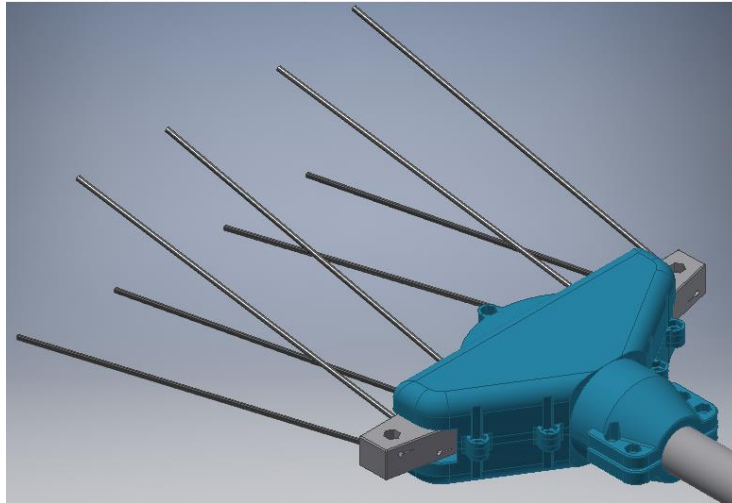


Ilustración 28: volumen de control ocupado por las varillas

Para calcular el volumen de control donde trabajará la máquina se ha estudiado el peine, que es la pieza que está en contacto directo con el árbol. Básicamente se ha calculado el área lateral que abarcan dos varillas y se ha multiplicado por la longitud del peine.

$$V_c = [35 \cos(10) * 35 \sin(10)] * 10 = 2094.6 \text{ cm}^3$$

El siguiente paso para poder obtener el valor de masa que moverá el vareador será estimar la densidad de la zona en la que se trabajará (Tabla 3: Valores de densidad y porcentajes de cada elemento en la zona foliar). Para la realización de los cálculos se estudiará el olivo que es el árbol con mayor densidad foliar.

Para el cálculo de la densidad en la zona foliar del olivo con aceituna se ha estimado que el volumen foliar total de una planta adulta es aproximadamente de 7.38 m^3 , tal como se ha estimado a partir de unas medidas tomadas en campo para este proyecto, en cultivos de envergadura media, espacio que produce una carga máxima aproximada de 90 kilogramos de aceituna. De aquí se podrá obtener el valor de masa de aceituna por volumen en la zona foliar del olivo.

Densidad	Valor	Porcentaje en zona foliar
Madera de olivo	950 kg/m ³	3%
Aire	1,29 kg/m ³	75,80%
Aceituna	1100 kg/m ³	1,20%
Hoja de olivo	20 kg/m ³	20%

Tabla 3: Valores de densidad y porcentajes de cada elemento en la zona foliar

Teniendo en cuenta los valores de la tabla mostrada, se puede proceder al cálculo de la densidad.

$$\rho_{foliar} = 0.012\rho_{aceituna} + 0.03\rho_{madera} + 0.2\rho_{hoja} + 0.758\rho_{aire} = 41.7 \text{ kg/m}^3$$

Una vez calculados densidad y volumen de la zona donde trabaja la máquina es sencillo obtener el valor de la masa.

$$m = \rho_{foliar} * V_T = 41.7 \text{ kg/m}^3 * 2094.6 \text{ cm}^3 * 1\text{m}^3/10^6\text{cm}^3 = 0.087 \text{ kg}$$

Considerando el ángulo de las varillas exteriores de los peines hacia fuera, suponemos:

$$m = 0.1 \text{ kg}$$

Para estar del lado de la seguridad, se ha supuesto que no solamente se mueve la zona foliar estrictamente restringida por el volumen que ocupan las varillas del peine, sino que también se moverá parte de la rama. Para el cálculo del volumen total puesto un coeficiente de mayoración de 3.

$$m_t = 3 * 0.1 \text{ kg} = 0.30 \text{ kg}$$

Se procederá al cálculo de la fuerza:

$$F_T = 0.30 \text{ kg} * 622 \text{ m/s}^2 = 187 \text{ N}$$

Una vez conocida la fuerza máxima que tendrá que resistir la máquina se procederá al dimensionamiento de las diferentes piezas que la forman.

6. Diseño y dimensionamiento

Esta máquina trabajará principalmente en el olivo, aunque también será compatible para la recolección de almendra y pistacho. Antes de dimensionar la máquina es interesante conocer el entorno donde va a trabajar.

Tanto el almendro, el pistachero y el olivo comienzan a producir fruto a partir del quinto o sexto año desde la plantación, siendo su tamaño bastante pequeño en comparación con el que conseguirán con los años (Ilustración 29: Olivar joven con cosecha). Simplificando, se puede concretar que estos árboles comienzan a producir cuando tiene una altura alrededor del metro o metro y medio.

Como es normal, en las primeras recolecciones la cantidad de fruto obtenido será escasa, conforme pase el tiempo y los árboles crezcan aumentarán la producción.



Ilustración 29: Olivar joven con cosecha

No todos los olivos tienen las mismas dimensiones, al igual que los almendros y pistachos, todo dependerá del cuidado que se les dé y de la zona en la que se encuentren principalmente. En zonas de umbría, que además son muy frescas, tenderán a ser bastante altos, buscando la luz del sol, es por eso que el agricultor en este tipo de zonas debe realizar trabajos de corta prácticamente año tras año, eliminando las ramas más altas y guiando los nuevos brotes para que no tiendan a ir hacia arriba, para así hacer más cómoda y ágil la recolección. En zonas de solano es bastante común realizar trabajos de corta cada dos años, ya que tienden a crecer más a lo ancho que a lo alto.

Por norma general un olivo cuidado adulto en plena producción suele rondar los 3-4 metros de altura, al igual que el pistachero (Ilustración 30: Pistachero adulto), los almendros en cambio tienden a ser un poco más altos, rondando los 4,5 o 5 metros. Hay que aclarar que cada agricultor realiza la tala en función del tipo de maquinaria que utiliza para la recolección, por norma general los agricultores que no utilizan maquinaria pesada (Vibradores de tractor, Buggys...) tienden a tener el árbol bastante accesible para poder trabajar tanto con vibradoras ligeras como con peines mecánicos los cuales lleva el operario.

Estos datos serán útiles para dimensionar la máquina, para no tener problemas cuando se trabaje en árboles adultos.



Ilustración 30: Pistachero adulto

6.1. Boceto inicial

Una vez estudiado el mecanismo procederemos a dimensionar las diferentes piezas de nuestra máquina. La longitud total de la máquina rondará los 2.20 m, asemejándose a la competencia, medida coherente teniendo en cuenta que la parte baja de la máquina trabajará sobre el operario a una posición que rondará en metro de altura, pudiéndose elevar hasta que el operario quede con los brazos extendidos hacia arriba para poder alcanzar los frutos de las zonas más altas.

Se comenzará describiendo los posibles motores que podrán instalarse en la máquina. El motor de gasolina proviene de un antiguo corta setos que se obtuvo del mercado de segunda mano. Así, se tiene un motor 2 tiempos de 26 cc y 1 CV de potencia (Ilustración 31: Parte delantera del motor a gasolina, Ilustración 32: Parte posterior del motor de gasolina). La velocidad máxima del motor es de 6500 rpm, y tiene un peso de 2.5 kg y unas dimensiones de 20x20x15 cm.

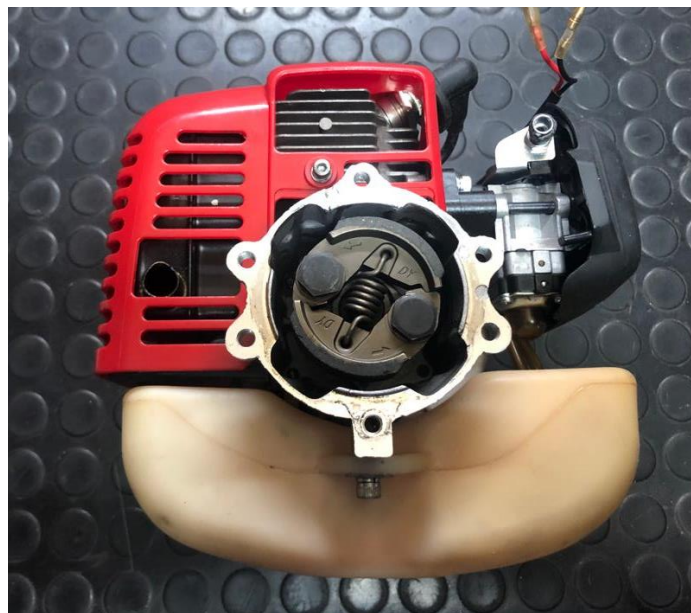


Ilustración 31: Parte delantera del motor a gasolina



Ilustración 32: Parte posterior del motor de gasolina

El motor eléctrico a 12v tiene un peso de 0.1 kg y tiene unas dimensiones de 4x4x9 cm (Ilustración 33: Motor eléctrico). El motor irá alimentado de una batería de 12v que se encontrará en una mochila la cual llevará el operario sobre su espalda.



Ilustración 33: Motor eléctrico

Entre el motor y la pértiga será necesario instalar una pieza que nos servirá como base para poder comenzar a instalar los diferentes elementos mecánicos de nuestro peine, a esta pieza la llamaremos bancada (Ilustración 34: Bancada).



Ilustración 34: Bancada

Sobre tal bancada irán instaladas diferentes piezas, la primera pieza a analizar será de la campana de embrague, elemento fundamental para el correcto funcionamiento de la máquina con el motor a gasolina. Se trata de un motor de 2 tiempos básico, y la parte transmisora del motor es un embrague que está conectado directamente con el cigüeñal, es decir, siempre que el motor esté arrancado se encontrará girando.

No sería cómodo ni útil que desde el primer momento que el motor esté funcionando nuestros peines estuviesen accionados, es por ello que monta un embrague que consta con un muelle, el cual se estira conforme aumentamos la velocidad angular del motor (aumentamos rpm) y permite que el embrague agarre sobre las paredes de la campana transmitiendo el movimiento solo cuando se acelere el motor (Ilustración 35: Bancada con campana de embrague instalada). Esa misma campana será utilizada para acoplar el motor eléctrico, se realizarán unos pequeños orificios en los cuales podremos instalar el motor.

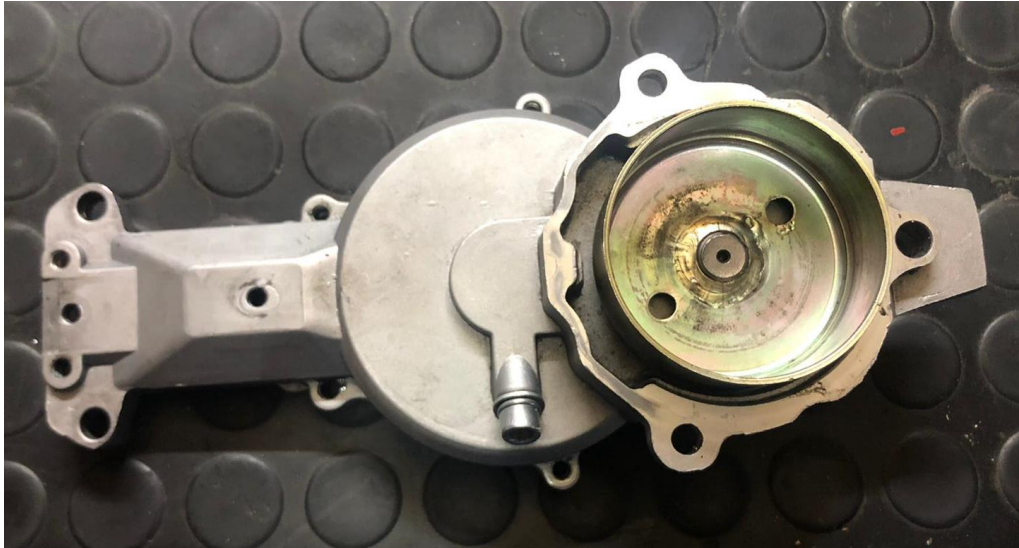


Ilustración 35: Bancada con campana de embrague instalada

Esa campana irá roscada a un eje el cual gira sobre un rodamiento instalado sobre la bancada. En el otro extremo de ese mismo eje se tiene un engranaje de 14 dientes que engranará con otro engranaje de 58 dientes que actúa como doble cigüeñal que constará con dos bielas posicionadas a 180° la una de la otra (Ilustración 36: Engranajes y bielas montadas en bancada). El movimiento opuesto vertical de las bielas nos permitirá el movimiento unidireccional de los peines gracias a dos barras que deslizarán sobre guías que se encontrarán tanto en la bancada como en la pértiga.

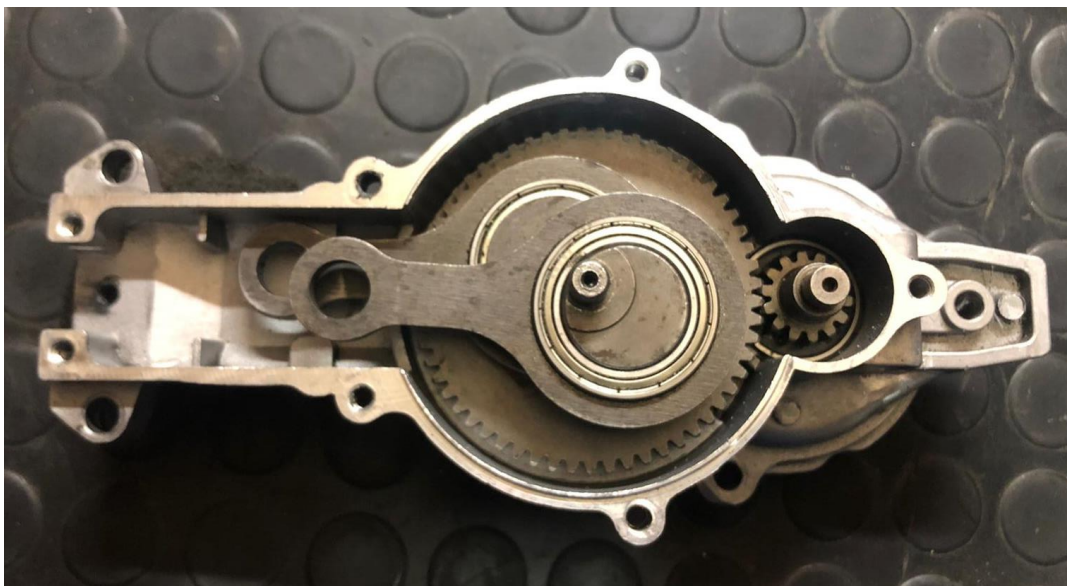


Ilustración 36: Engranajes y bielas montadas en bancada

La pértiga es la encargada de unir el cabezal con la bancada. Utilizaremos una barra cilíndrica de aluminio 3.2 cm de diámetro interior y 1.70 m de longitud aproximadamente (Ilustración 37: Barra de aluminio que se utilizará como pértiga). La misión de esta pieza además de aportar longitud a nuestra máquina será hacer de guía a las varillas que conectan las bielas con los peines.

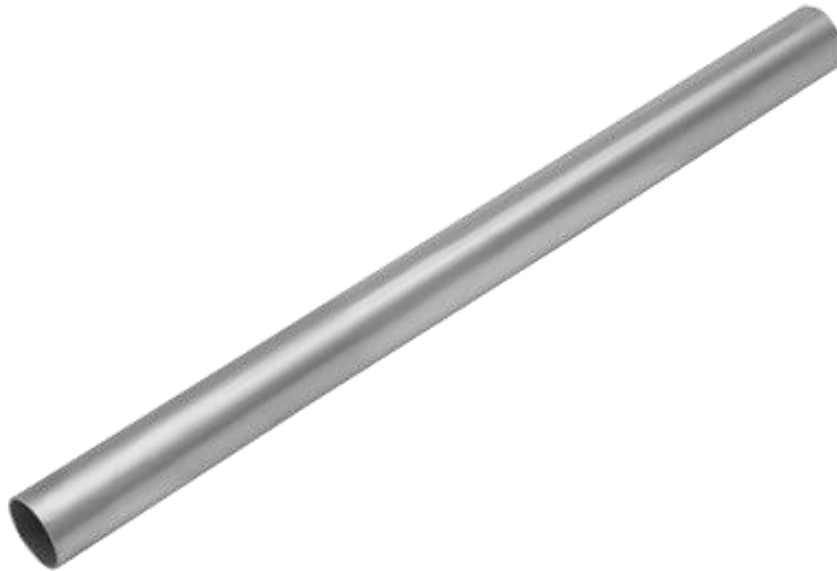


Ilustración 37: Barra de aluminio que se utilizará como pértiga

Para que sea posible la restricción de la barra 2-3 se instalarán unos rodamientos lineales en el interior de la barra fabricando una base en impresión 3D donde encajarán tanto en la barra de aluminio como en los rodamientos (Ilustración 38: Rodamiento lineal).



Ilustración 38: Rodamiento lineal

En nuestro prototipo instalaremos dos peines (rastrillos) que incorporarán 4 varillas que son las que tendrán contacto con el árbol y golpearán el fruto hasta desprenderlo. El movimiento de nuestros peines será horizontal y en el mismo sentido.

Para determinar la anchura de nuestros peines tendremos que tener en cuenta que nos encontramos ante árboles frondosos, por lo tanto, nuestras varillas estarán en continuo contacto con las ramas y una anchura demasiado grande, aparte de necesitar un motor con mayor potencia para poder mover debidamente las ramas, transmitirían demasiadas vibraciones hasta la parte baja de la máquina y por lo tanto al operario que trabaja con ella. Comenzaremos por instalar unos peines de 10 centímetros de ancho en la zona inferior, medida próxima a la de otros fabricantes [14] (Ilustración 39: Cabezal de la marca Zanon). La longitud de los pelos que van instalados en el cabezal tienen una longitud de 35 cm.



Ilustración 39: Cabezal de la marca Zanon

6.2. Materiales

En el apartado anterior se han comentado las diferentes piezas y sus medidas aproximadas, ahora se hablará sobre los materiales que se utilizarán para la fabricación de la máquina.

Ha de decirse que en la fabricación de maquinaria agrícola el material más utilizado es el acero por sus propiedades mecánicas y durabilidad. En este vareador no tendrá tanta presencia ya que al ser una máquina cuyo peso recae sobre el propio operario, se intentará optar por otros materiales más ligeros.

En el taller de casa se dispone de herramientas básicas, es por ello que para la fabricación de piezas complejas se utilizará una impresora 3D que permitirá obtener piezas ligeras e imposibles de fabricar sin una CNC.

En primer lugar, se hablará del material utilizado para la fabricación de piezas poliméricas, para la fabricación de piezas con impresora 3D utilizaremos ABS, debido a que es uno de los materiales más fáciles de imprimir y tiene unas propiedades mecánicas aceptables para la función que van a desempeñar las piezas a fabricar [21] (Ilustración 40: Comparación de las propiedades del PLA y del ABS).

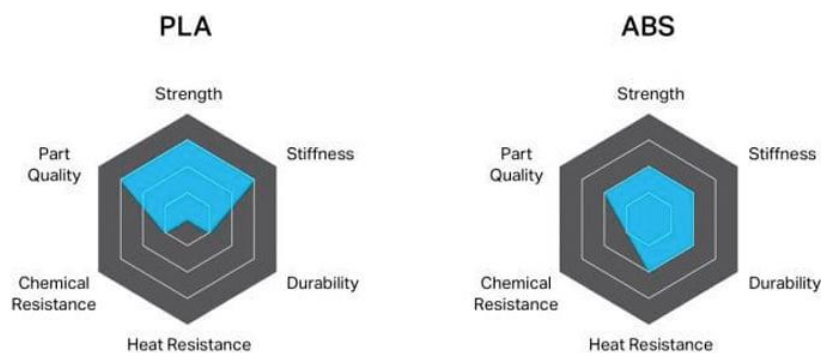


Ilustración 40: Comparación de las propiedades del PLA y del ABS

Las piezas que se fabricarán de este material serán las bases de los peines, el cabezal que conecta la pértiga con los peines y el conector de la pértiga con la bancada. Dicho filamento se obtendrá de la empresa Smart Materials 3d printing [22], ubicada en Alcalá la Real (Jaén) (Ilustración 41: Propiedades térmicas y mecánicas del ABS).

PROPIEDADES MECÁNICAS ¹	PLANO XY	PLANO ZX		
Resistencia a la tracción	32,9	12,5	MPa	ISO 527
Módulo de tracción	-	-	MPa	ISO 527
Resistencia a la flexión	68,1	20,7	MPa	ISO 178
Módulo de flexión	2245,9	140,8	MPa	ISO 178
Alargamiento al esfuerzo máximo	1,4	0,7	%	ISO 527
Alargamiento a la tracción a la rotura	2,6	0,7	%	ISO 527
Alargamiento por flexión a la rotura	8,8	2,5	%	ISO 178
Fuerza de Impacto Charpy (sin entalla)	50,3	5,3	kJ/m2	ISO 179
Dureza	82,7		Shore D	ISO 7619-1

PROPIEDADES TÉRMICAS			
Temperatura de transición vítrea (Tg)	104	°C	ISO 11357
VICAT B (50 N 50°C/h)	105	°C	ISO 306
HDT B (0,45 MPa)	99	°C	ISO 75

Ilustración 41: Propiedades térmicas y mecánicas del ABS

Para el cálculo y dimensionamiento de las piezas fabricadas en ABS se utilizará como tensión última antes de rotura estática el de resistencia a la tracción, es decir 32.9 MPa. A la hora de imprimir la pieza se tendrá que tener en cuenta el plano de impresión para que la tensión última corresponda con este valor.

Otro dato que es importante conocer del material sería el valor de tensión del límite a fatiga, ya que se trata de una máquina cuyas piezas están expuestas a movimientos repetitivos y rápidos. Al tratarse de un material polimérico, la resistencia a fatiga no queda definida, y la tensión admisible disminuye continuamente a medida que aumenta el número de ciclo. Por ello, y dada la escasez de fuentes de información, para la obtención de dicho valor se ha recurrido al foro *Forces in Mechanics* [23] de donde se ha obtenido la siguiente tabla que relaciona la tensión que soporta el material en función del número de ciclos (Gráfico 1: Tensión de fatiga en función del número de ciclos).

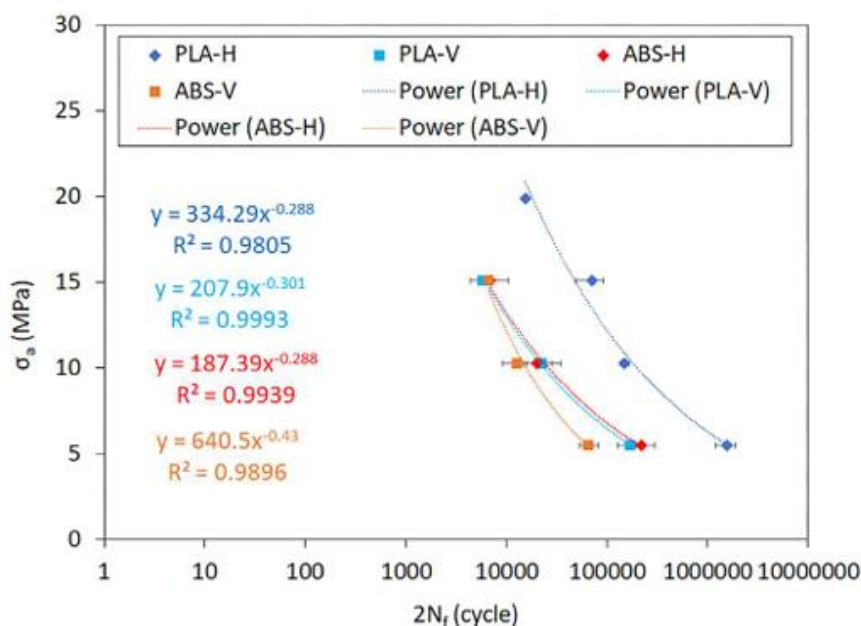


Gráfico 1: Tensión de fatiga en función del número de ciclos

Para la fabricación de piezas se utilizará el filamento ABS-H que es el que mejor resiste la fatiga. Con la ecuación (generada tras el ajuste de datos experimentales) $y = 187.39x^{-0.288}$ se obtendrá el valor de tensión para un número determinado de ciclos. Para materiales metálicos se suele decir que cuando cierta pieza supera 10^6 ciclos se considera que tiene vida infinita pero no es aplicable a materiales plásticos, aun así, teniendo en cuenta que la máquina trabaja a máxima potencia a una frecuencia de 24.1 Hz, suponiendo que las piezas aguantaran 1 millón de ciclos, resistirían 11 horas y media sin dar descanso a la máquina y trabajando constantemente a potencia máxima. Este valor se ha considerado aceptable para este tipo de máquina, que normalmente se encontrará trabajando de forma intermitente y a potencia inferior a la máxima.

$$\sigma_{fatiga} = 187.39 * 1000000^{-0.288} = 3.51 MPa$$

El aluminio también estará presente en la pértiga de la máquina, que como ya se ha comentado anteriormente será una barra circular de 35 mm de diámetro exterior y un espesor de 1.5 mm. A modo de curiosidad, esta barra será reciclada de un vibrador manual, el cual trabaja con grandes esfuerzos de tracción, compresión y flexión muy superiores a los que trabajará el vareador que se va a fabricar.

El resto de piezas que componen el vareador serán fabricadas en acero, es decir, las barras transmisoras, las bielas, los engranajes y la bancada.

6.3. Predimensionado

Una vez se han presentado y descrito todas las piezas que componen la máquina se procederá al estudio y dimensionado de las mismas.

Se comenzará por una de las piezas más importante de la máquina, los peines. Como se ha mencionado en apartados anteriores, el peine está compuesto por 4 varillas que golpearán al árbol sujetas a una base que corresponde a la barra 4-5 de nuestro esquema simplificado.

La fuerza total que la máquina debía realizar para mover el árbol calculada anteriormente se repartirá entre las 4 varillas. Analizando la base del peine y suponiendo en el nudo 4 un apoyo que no restringe el movimiento en el eje horizontal se obtiene el siguiente diagrama siendo las unidades de longitud centímetros (Ilustración 42: Diagrama fuerzas y momentos aplicados al peine):

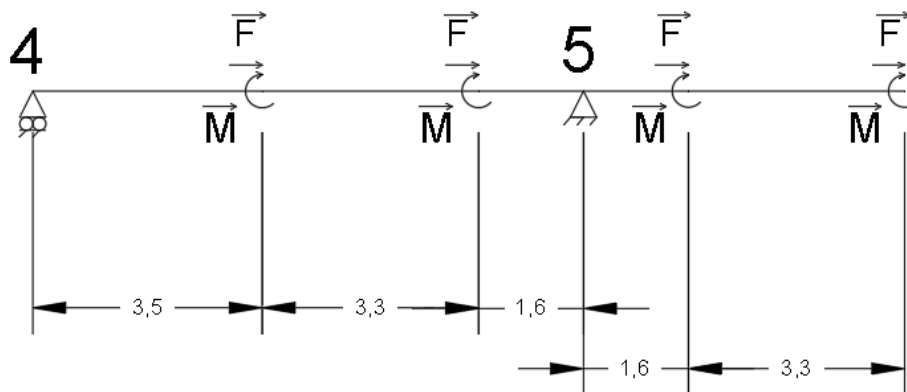


Ilustración 42: Diagrama fuerzas y momentos aplicados al peine

Realizando los cálculos del sólido libre se obtiene que:

$$\vec{F} = \vec{F}_T / 4 = 187 / 4 = 46.7 \text{ N}$$

$$\vec{M} = \vec{F} * 0.2 = 46.7 * 0.2 = 9.34 \text{ Nm}$$

Se obtienen los siguientes diagramas:

Momentos (Ilustración 43: Diagrama de momentos Barra 4-5-6):

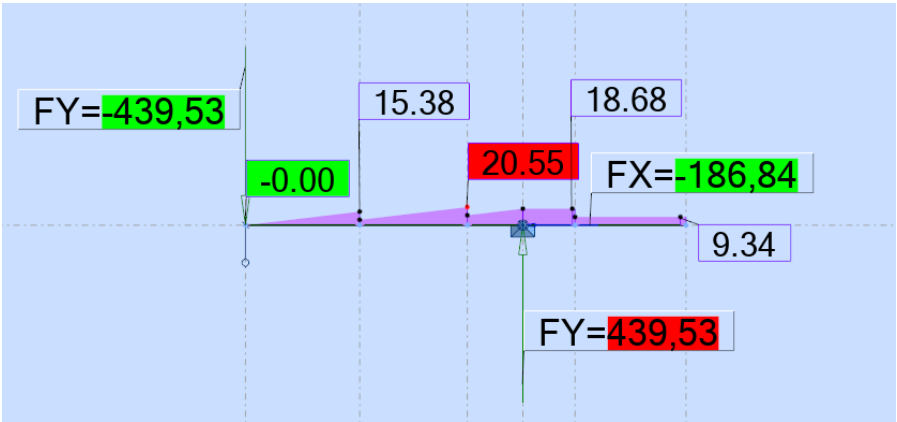


Ilustración 43: Diagrama de momentos Barra 4-5-6

Cortantes (Ilustración 44: Diagrama cortantes Barra 4-5-6):

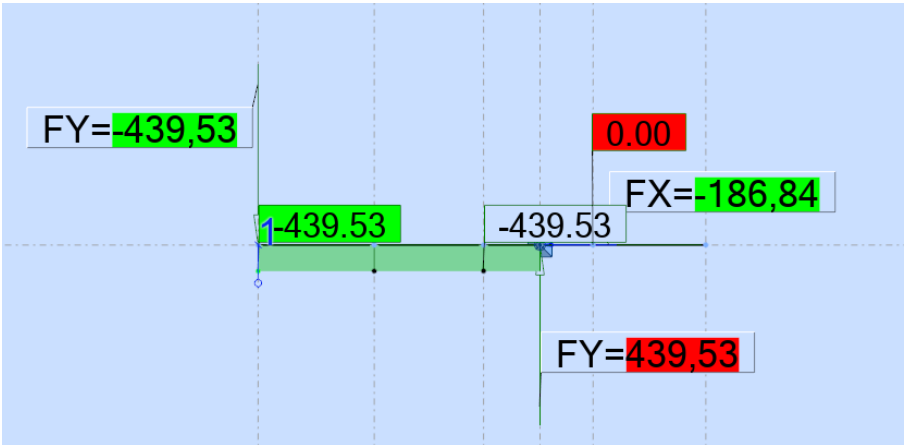


Ilustración 44: Diagrama cortantes Barra 4-5-6

Axiles (Ilustración 45: Diagrama axiles Barra 4-5-6):

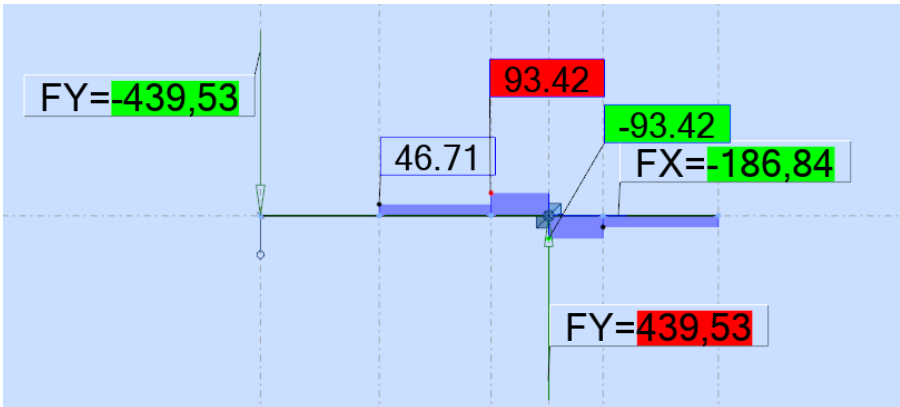


Ilustración 45: Diagrama axiles Barra 4-5-6

Estudiados los esfuerzos que soporta la pieza en el plano xy, podría ser interesante calcularlos en el plano xz, lugar donde se encontraría la componente del peso y otra fuerza casi despreciable que aplicaría el olivo sobre la máquina cuando ésta va deslizándose hacia abajo, esto se tendrá en cuenta al dimensionar la base del peine.

Analizando la viga 4-5-6 en el eje xy se obtienen los valores del punto crítico y se procederá al dimensionamiento.

$$M_y = -20.5 \text{ Nm}$$

$$V_z = 439.6 \text{ N} ; \text{ Despreciable frente al efecto del momento}$$

$$N = -93.4 \text{ N}$$

Se comenzará probando con una barra de sección de 2.5 cm de ancho y 4 cm de altura.

$$\theta_{adm} = \theta_{momento} + \theta_{axil} = \frac{Mc}{I} + \frac{F}{A}$$

$$\theta_{adm} = \frac{20.5 \text{ Nm} * 0.02\text{m}}{\frac{1}{12} * 0.025\text{m} * (0.04\text{m})^3} + \frac{93.4 \text{ N}}{0.025\text{m} * 0.04\text{m}} = 3075000 \text{ N/m}^2 + 93400 \text{ N/m}^2$$

$$\theta_{adm} = 3168400 \text{ N/m}^2 * \frac{1\text{m}^2}{10^6\text{mm}^2} = 3.16 \text{ MPa}$$

$$\theta_{adm} < \theta_{fatiga} < \theta_{tracción}$$

Para minimizar gastos y tiempo de fabricación se intentará realizar una sección variable en la altura de la base del peine, intentando mantener la tensión admisible en toda la pieza, reduciendo la cantidad de material en aquellas zonas donde los valores de momento flector y axil sean menores, manteniendo en toda la sección un coeficiente de seguridad alrededor de 1.1. El extremo exterior del peine se fabricará con una sección de 2.5x2.7 cm, obteniendo una tensión de 3.14 MPa, de esta forma además se reducirá peso (Ilustración 46: Boceto del peine).

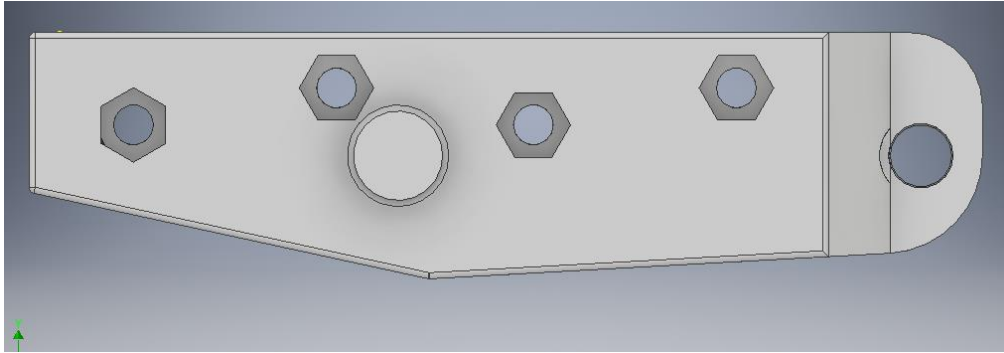


Ilustración 46: Boceto del peine

La siguiente pieza que se analizará será el balancín que corresponde con la barra 3-4. Esta pieza está sometida a fuerzas axiales de compresión y tracción. Del diagrama de sólido libre de la barra 4-5-6 se comprueba que el ángulo donde cambia la barra de compresión a tracción, punto donde está la aceleración máxima y por tanto ángulo crítico, la fuerza F_{34} es de 439.5 N.

Resistencia a la tracción 32.9 MPa. Se realizarán los cálculos para una sección de 12 mm x 8 cm.

$$\theta_{tracción} = \frac{F}{A} = \frac{439.5 \text{ N}}{7\text{mm} * 20\text{mm}} = 3.14 \text{ MPa}$$

La longitud de la barra 3-4 es de 4.8 cm, por lo tanto, debido a la poca longitud de la barra y a la sección de la misma no sería necesario plantearse el estudio a pandeo de la barra.

La barra 2-3 es la que mayor longitud tiene del mecanismo, además hay que tener en cuenta que tiene una restricción de movimiento vertical, por lo tanto no podrá considerarse como una barra biarticulada donde la dirección de las fuerzas se encuentra en la línea que conecta los dos puntos de conexión con barra móviles. Para reducir el riesgo a pandeo se pondrán varias restricciones de que solo permitan el movimiento vertical de la barra, de esta manera será posible utilizar una sección de menor tamaño sin riesgo de rotura.

La longitud total de la pértiga será aproximadamente de 1.70 m y estará dividida por un espaciador donde se pondrán unas guías para la varilla corredera que corresponde con la barra 2-3 (Ilustración 47: Diagrama fuerzas aplicadas a la varilla deslizante). Se instalarán guías en la zona baja, media y alta de la barra 2-3 a una separación aproximada de 0.8 m una de otra. Las fuerzas horizontales que actúan sobre la barra se despreciarán debido a que el momento que producirán será relativamente pequeño.

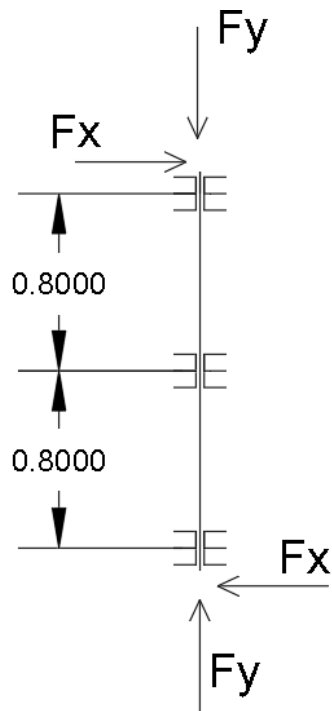


Ilustración 47: Diagrama fuerzas aplicadas a la varilla deslizante

$$F_x = 126.6 \text{ N}$$

$$F_y = 421 \text{ N}$$

Realizando los cálculos a pandeo y utilizando para la barra 2-3 una sección de diámetro 8mm quedaría:

$$P_{critica} = \frac{\pi^2 E I}{l^2} = \frac{\pi^2 * 210 \cdot 10^3 * \frac{\pi * 8^4}{64}}{800^2} = 651.2 \text{ N}$$

$$P_{critica} > F_y ; \text{Diámetro de varilla válido}$$

6.4. Diseño CAD

Antes de comenzar a diseñar las diferentes piezas de la máquina ha sido imprescindible pensar en cada una de las partes que la componen, las uniones que enlazan las diferentes barras y que al final lo que se diseña debe ser fabricable. Una vez se han cuadrado todas las piezas se ha procedido al diseño CAD (Ilustración 48: Prototipo)

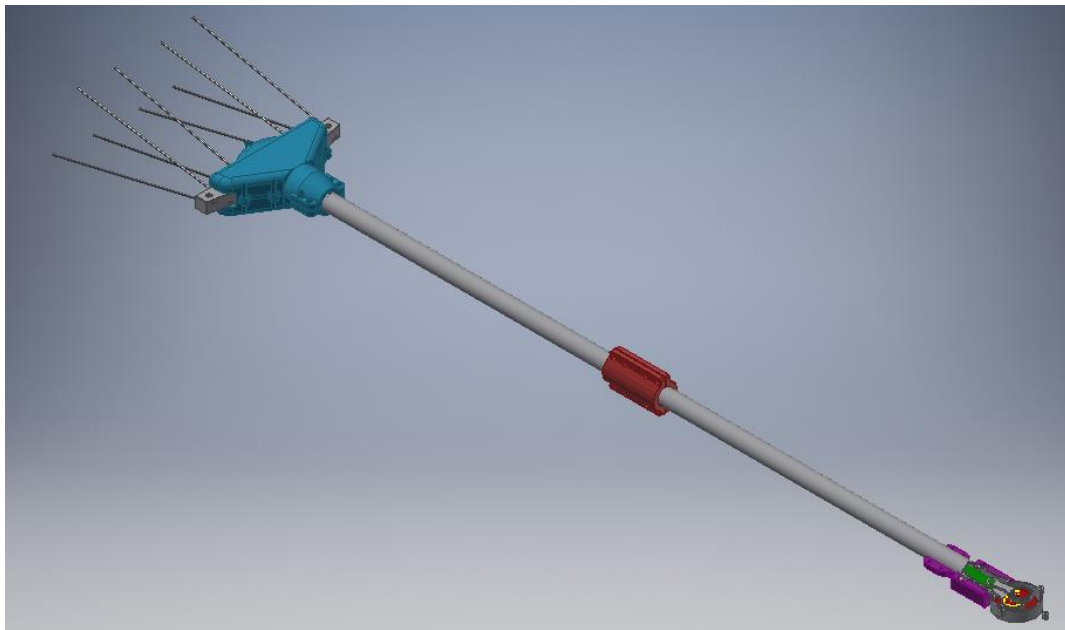


Ilustración 48: Prototipo

El primer problema que ha surgido ha sido relacionado con la barra 2-3, como ya se dijo esta barra está restringida en 3 puntos diferentes permitiendo solamente el movimiento vertical de la barra de 8mm.

Para que sea posible esta restricción se pondrán rodamientos lineales, el problema se plantea cuándo tendremos que meter los rodamientos teniendo en cada esquina de la barra las conexiones para conectar las otras barras, para la conexión del nudo 3 se utilizarán las cuchillas el corta-setos donde se soldarán las varillas de 8 mm, por tanto, por ese lado no se podrían meter los rodamientos.

La primera opción que se barajó fue la de utilizar un terminal de ojal (Ilustración 49: Ojal hembra), pero la conexión entre barras tendría más fricción y no permitiría nada de juego en el mecanismo de la máquina.



Ilustración 49: Ojal hembra

La solución elegida será la de poner la conexión del nudo 3 roscada (Ilustración 50: Rótula hembra M8), realizando rosca a la varilla de 8mm y empleando una rótula hembra de m8 para realizar la conexión entre barras. De esta manera la barra 2-3 sería desmontable



Ilustración 50: Rótula hembra M8

Una vez analizadas todas las partes de la máquina y creyendo que se han tenido en cuenta todos los problemas que puedan surgir, se procederá al diseño de la máquina utilizando Autodesk Inventor [24].

Ciertas piezas del vareador serán reutilizadas del corta-setos que se ha utilizado como base, para la toma de medidas para el futuro diseño CAD se ha utilizado un calibre o pie de rey, marca MiTutoyo 530-320, con resolución de 0.02 mm y un rango de medición de 0 a 15 cm.(Ilustración 51: Calibre).



Ilustración 51: Calibre

6.4.1. Bancada:

Esta es una de las piezas que junto a los engranajes y las bielas se han aprovechado del corta-setos que se compró. El diseño de esta pieza será útil para poder realizar el diseño de la pieza conectora entre la pértiga y la bancada (Ilustración 52: Bancada CAD).

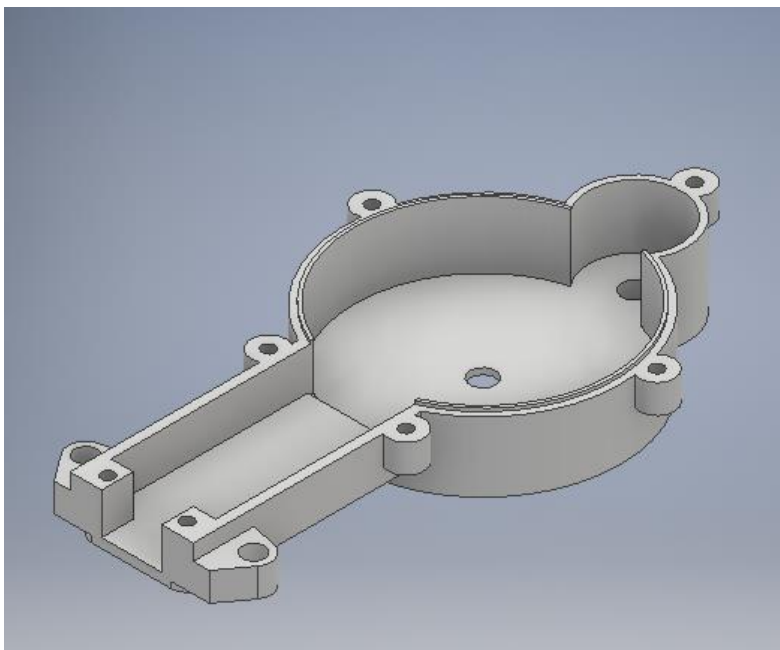


Ilustración 52: Bancada CAD

6.4.2. Engranaje-Cigüeñal (Barra 0-1)

Esta es otra de las piezas que se tenían, en la representación gráfica, para simplificar el diseño no se representarán los dientes del engranaje, se realizará una circunferencia con el diámetro medio del mismo (Ilustración 53: Cigüeñal CAD (Barra 0-1)).

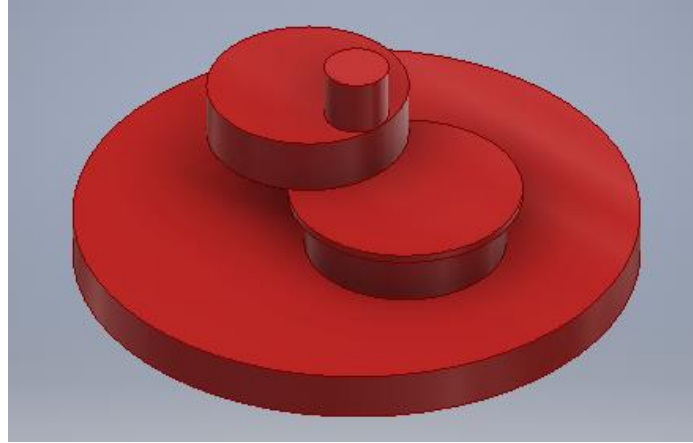


Ilustración 53: Cigüeñal CAD (Barra 0-1)

6.4.3. Rodamientos conectores de cigüeñal y biela

Interesa utilizar medidas comerciales para así abaratar y reducir el tiempo de fabricación de nuestro vareador mecánico.

Existen grandes empresas que se dedican a la fabricación de diferentes tipos y tamaños de rodamientos, como pueden ser SKF [25] y NSK [26]. En mi caso he apostado por la marca SKF, marca con muchos años de experiencia y que ofrece material de gran calidad (Ilustración 54: Rodamientos SKF).



Ilustración 54: Rodamientos SKF

La página web de SKF nos ofrece un buscador de rodamientos, introduciendo las características del rodamiento que necesitamos nos muestra los diferentes modelos que cumplen con nuestras necesidades. Siendo d el diámetro interior, D el diámetro exterior y B la anchura del rodamiento.

Para las dos bielas que conectan el engranaje transmisor de movimiento del motor con las varillas que suben por la pértiga hasta cada uno de los peines, se instalarán unos rodamientos rígidos de bolas SKF 61805. Posteriores análisis y trabajos futuros permitirán encontrar la vida del rodamiento instalado en las condiciones de funcionamiento previstas.

Designación	Dimensiones principales			Capacidad de carga básica		Velocidades nominales	
				dinámica	estática	Velocidad de referencia	Velocidad límite
	d [mm]	D [mm]	B [mm]	C [kN]	C_0 [kN]	[r/min]	[r/min]
☆ 61805	25	37	7	4.36	2.6	38 000	24 000

Tabla 4: Características rodamiento SKF 61805

El diseño CAD nos lo facilita la propia empresa (Ilustración 55: Rodamiento SKF 61805).

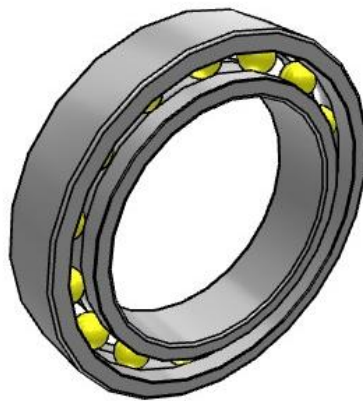


Ilustración 55: Rodamiento SKF 61805

Para la selección de rodamientos aparte de seleccionar las medidas necesarias es imprescindible comprobar que cumple con los requisitos a los que se van a someter, unos de los parámetros más a tener en cuenta serían la velocidad angular que soporta y la vida útil del rodamiento (Tabla 4: Características rodamiento SKF 61805).

6.4.4. Bielas (Barra 1-2)

Fabricadas con acero y encargadas de transmitir el movimiento a la barra 2-3 (Ilustración 56: Biela CAD), nuestro vareador contará con dos, cada una de ellas dirigirá el movimiento de cada peine.

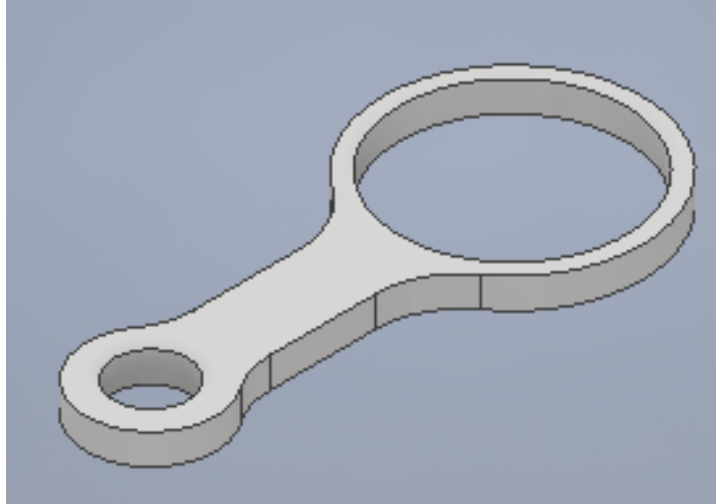


Ilustración 56: Biela CAD

6.4.5. Varilla deslizadora (Barra 2-3)

Esta pieza se ha considerado como la más importante para el buen funcionamiento de la máquina, ya que es la más larga y la que mayor riesgo tiene de vibraciones y descentraciones (Ilustración 57: Barra 2-3).

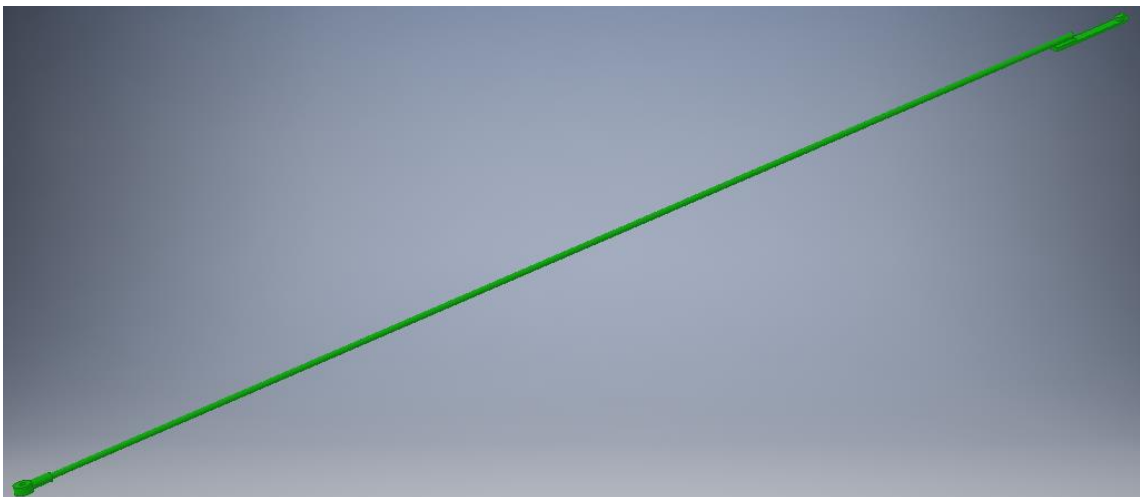


Ilustración 57: Barra 2-3

En el nudo 2 se hará una conexión por pasador propio de la barra 2-3 (Ilustración 58: Parte inferior barra 2-3), estando restringida la zona inferior de la barra por la bancada.

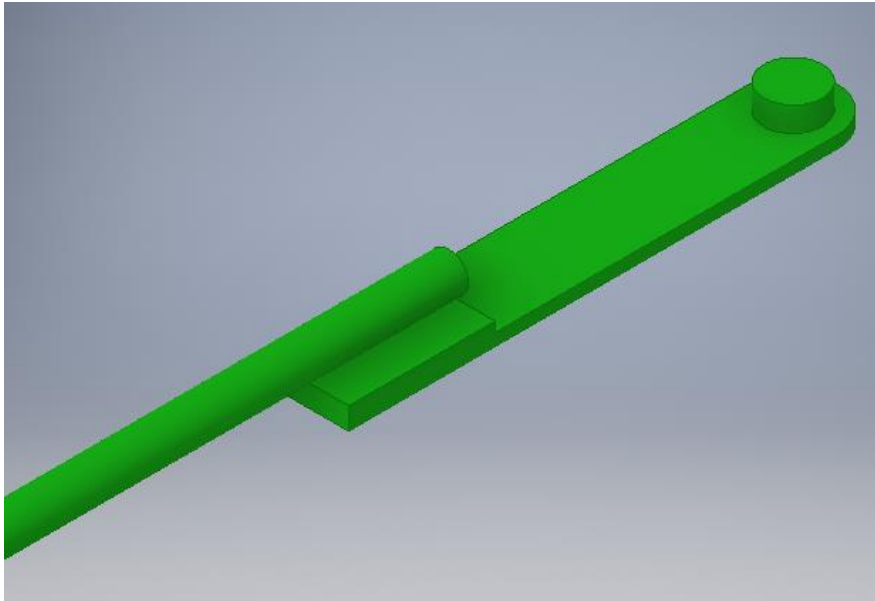


Ilustración 58: Parte inferior barra 2-3

Las demás restricciones se realizarán en la zona media y superior por rodamientos lineales ya mencionados antes.

En la parte superior de la barra 2-3 se instalará una rótula hembra de métrica 8 (Ilustración 59: Parte superior de la barra 2-3), de esta forma será desmontable la máquina y se podrán sustituir los rodamientos lineales en caso de avería sin ningún problema.

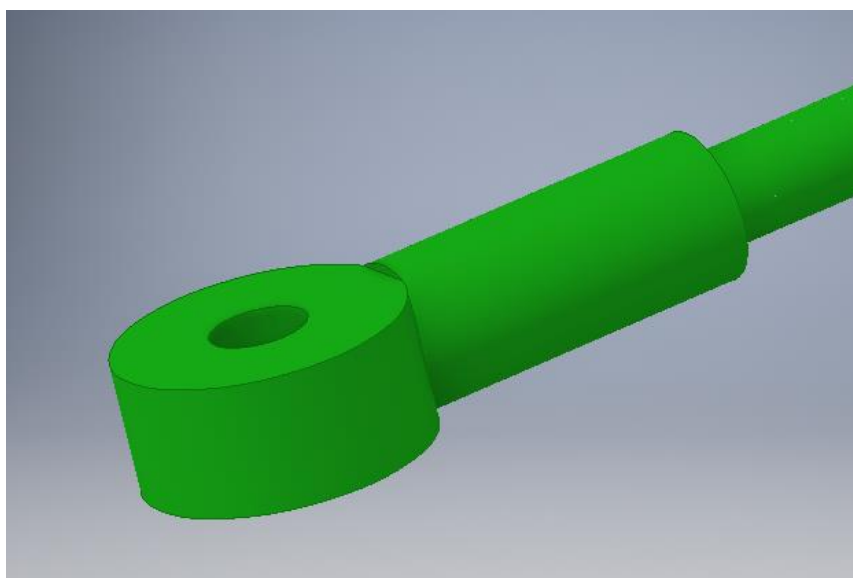


Ilustración 59: Parte superior de la barra 2-3

6.4.6. Conexión Bancada-Pértiga

La función de esta pieza será unir la bancada con la barra de aluminio, hay que tener en cuenta que la barra 2-3 tendrá paso por esta pieza y que será la pieza que aguantará toda la parte superior del vareador (Ilustración 60: Conexión pértiga superior CAD, Ilustración 61: Conexión pértiga inferior CAD).

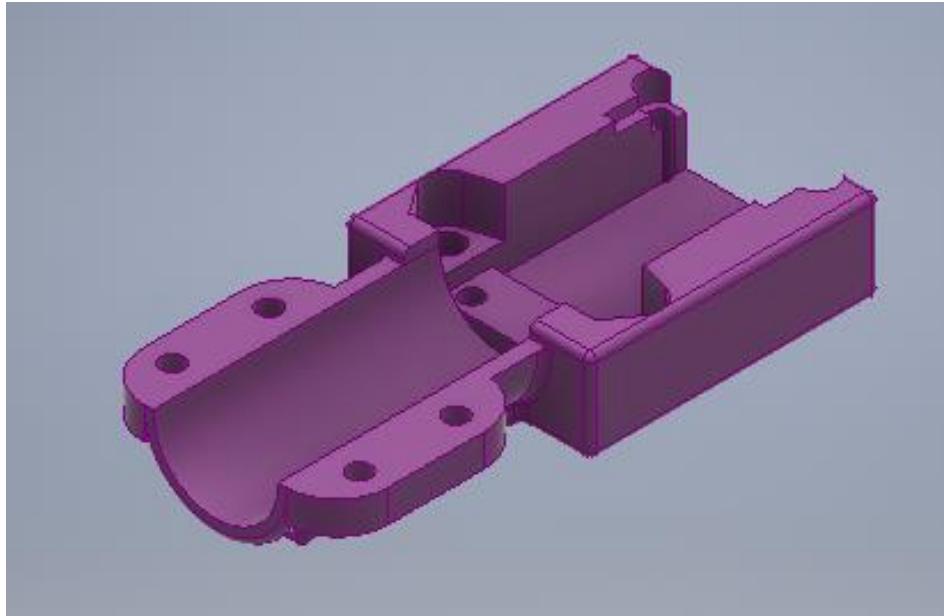


Ilustración 60: Conexión pértiga superior CAD

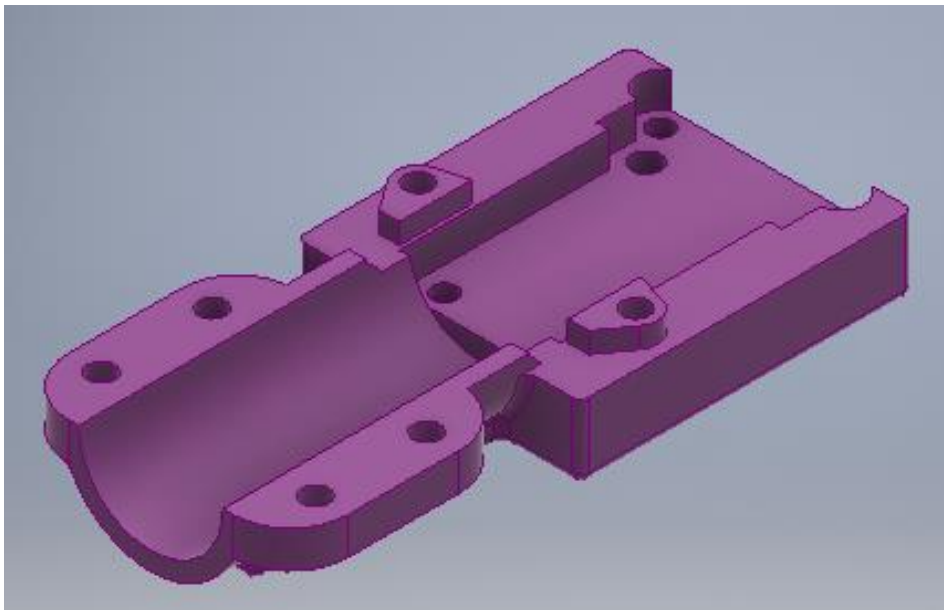
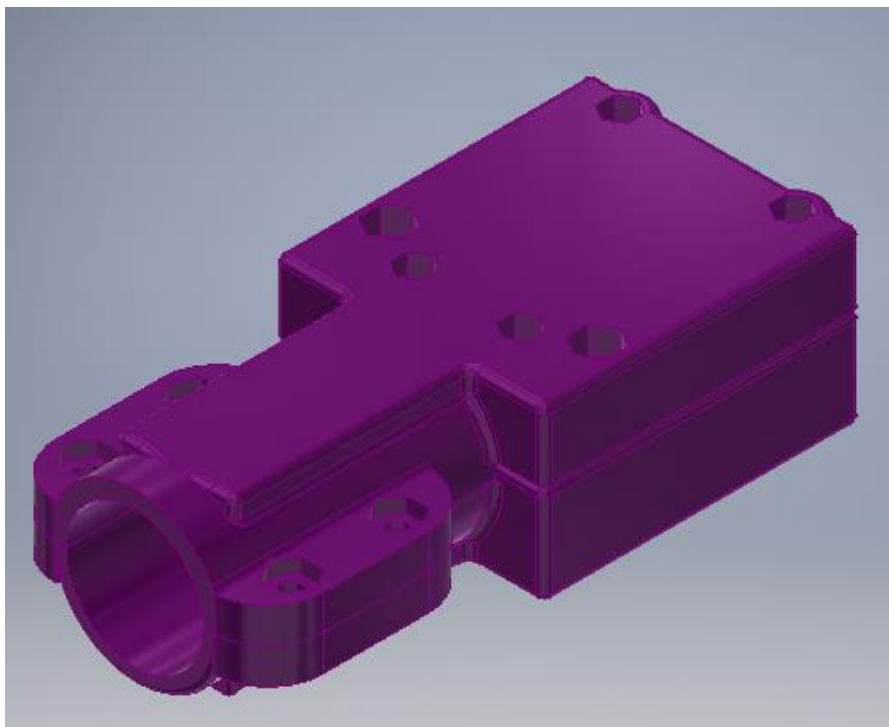


Ilustración 61: Conexión pértiga inferior CAD

Ambas partes encajan y permiten un agarre firme de la pértiga (Ilustración 62: Conexión bancada-pértiga CAD)



Ilustración 62: Conexión bancada-pértiga CAD

A la hora del diseño de la conexión de la bancada con la pértiga se ha tenido en cuenta que tanto la parte superior como la inferior están sometidas constantemente a tracción (Esfuerzo que peor soportan las piezas realizadas por fabricación aditiva), ya sea debido al propio peso de la máquina o a la fuerza que ejerce el olivo sobre la máquina cuando est  trabajando, por eso se han reforzado los anclajes de la barra de aluminio haciendo una parte plana que conecta con la parte inferior de ambas caras.

6.4.7. Porta-rodamientos

Para montar los rodamientos lineales que guiarán a la barra 2-3 ha sido necesario realizar unas piezas donde alojarlos de forma segura, a continuación, se mostrarán las piezas realizadas para la parte media y superior de la pértiga.

- Porta-rodamientos superior

Para el montaje de los rodamientos en la zona superior de la pértiga se ha optado por hacer una pieza que encaje en la parte interior de la pértiga y que se pueda separar por la mitad para introducir los rodamientos y evitar que se escapen

(Ilustración 63: Parte del porta-rodamientos superior, Ilustración 64: Porta rodamientos superior).

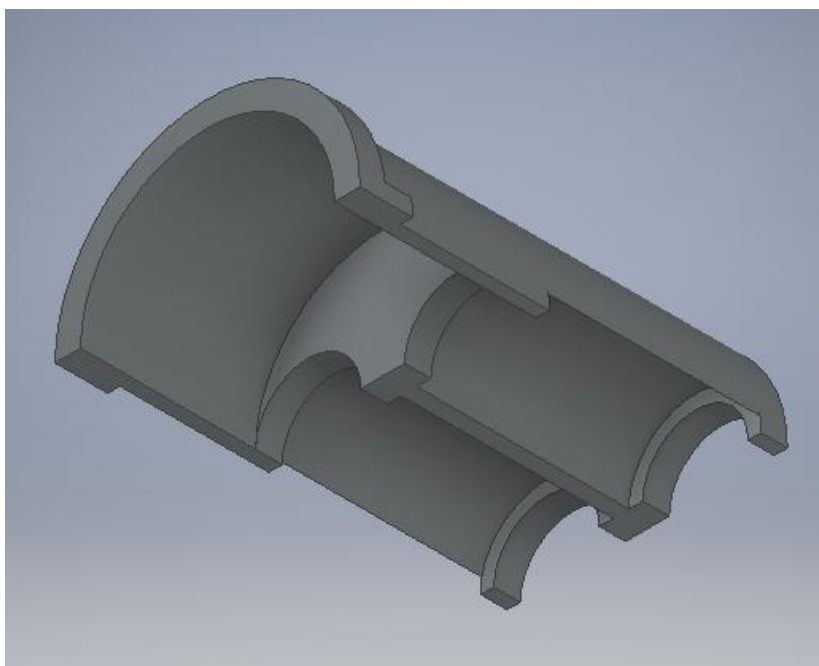


Ilustración 63: Parte del porta-rodamientos superior

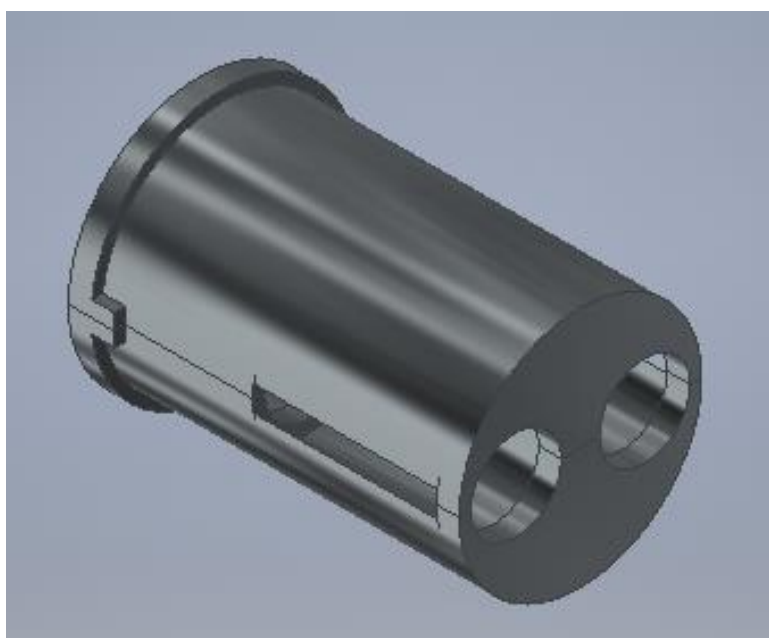


Ilustración 64: Porta rodamientos superior

- Porta-rodamientos medio

Esta pieza además de ser utilizada para portar los rodamientos que guían la barra 2-3, tendrá como función unir las dos barras de aluminio que forman la pértiga (Ilustración 65: Parte del porta-rodamientos medio Ilustración 66: Porta-rodamientos medio).

Para esta pieza al igual que en el porta-rodamientos superior se ha realizado una pieza partida por la mitad donde se instalarán los rodamientos lineales y encajará en la barra de aluminio.

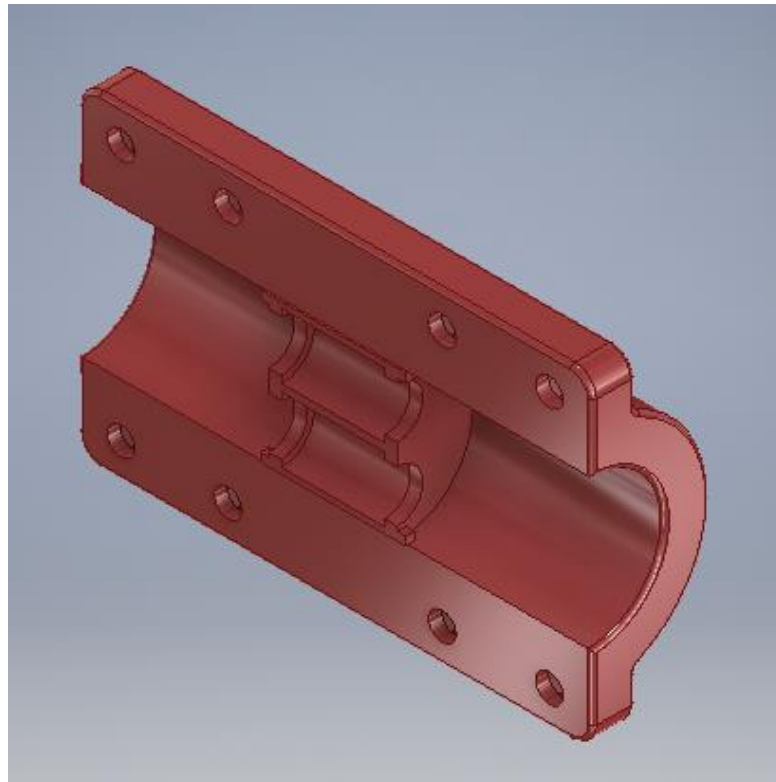


Ilustración 65: Parte del porta-rodamientos medio



Ilustración 66: Porta-rodamientos medio

Para que estas piezas no se muevan respecto a la pértiga se han realizado unas pequeñas muecas que encajarán y asegurarán de que no se mueven de su posición (Ilustración 67: Visualización de muecas de encaje de las barras de aluminio con el porta-rodamientos medio).

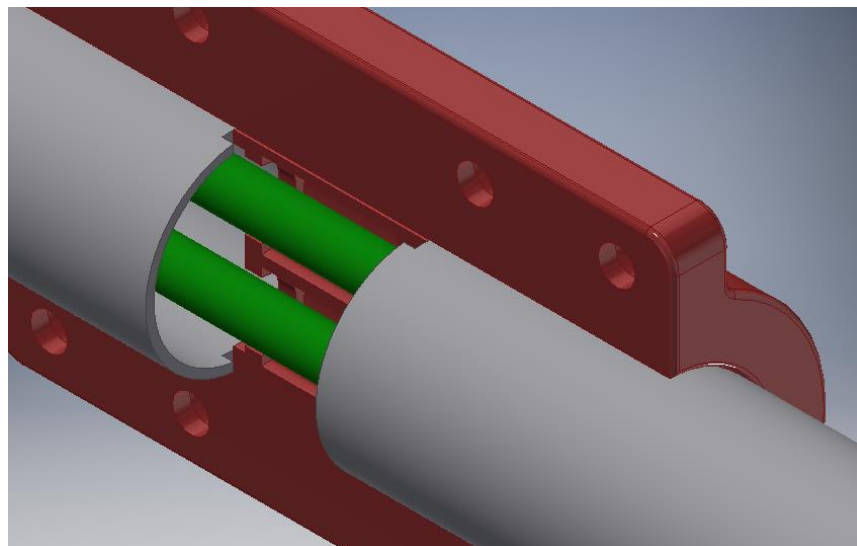


Ilustración 67: Visualización de muecas de encaje de las barras de aluminio con el porta-rodamientos medio

6.4.8. Cabezal porta-peines

Es la pieza instalada en la parte superior de la pértiga encargada de mantener los peines en la posición deseada y de cubrir el balancín y la cabeza de la varilla deslizante.

Está formado por dos partes casi simétricas que se diferencian por tener presencia de nervios que facilitarán el encaje entre ambas piezas y el alojamiento de la cabeza del tornillo o de la tuerca (Ilustración 68: Parte cabezal inferior, Ilustración 69: Parte cabezal inferior visto desde abajo).

Para realizar la conexión con la pértiga se utilizará como en los anteriores casos un sistema de apriete a presión que garantizará que las diferentes partes de la máquina queden en la posición indicada.

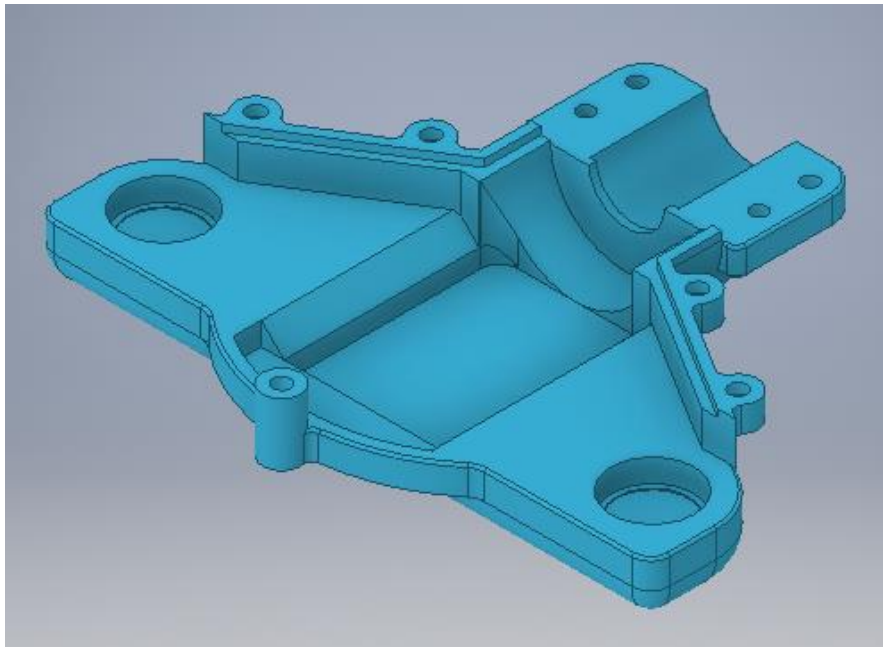


Ilustración 68: Parte cabezal inferior

Para la unión de las dos partes del cabezal se utilizarán 5 tornillos M6 aparte de los 4 que se utilizarán para la sujeción de la pértiga por presión. El tornillo que está posicionado en el eje de simetría de la pieza, además de servir como elemento de fijación, evitará la entrada de objetos de gran tamaño en el mecanismo.

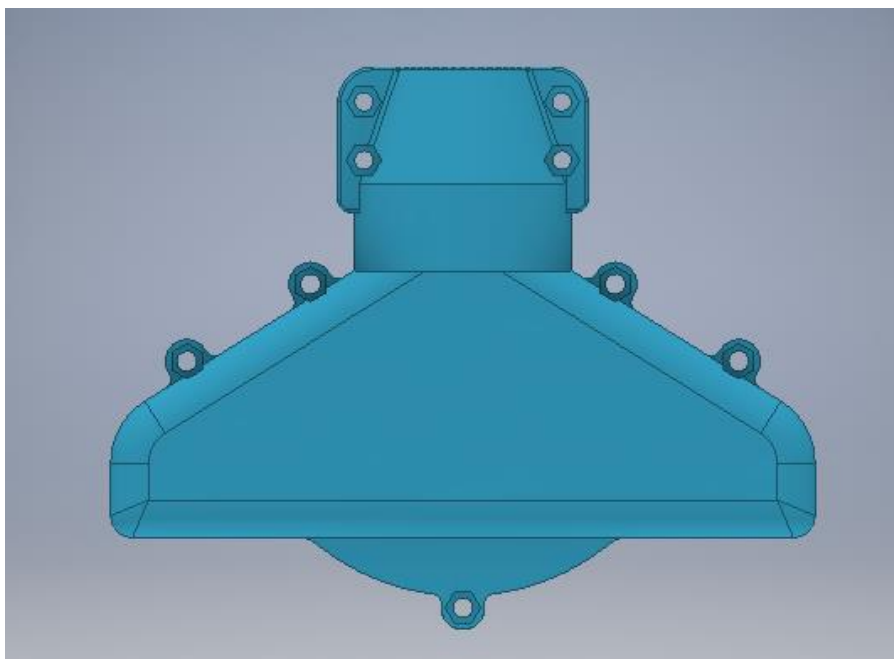


Ilustración 69: Parte cabezal inferior visto desde abajo

Una vez ensambladas las dos partes el cabezal cierra totalmente por la parte trasera, evitando la entrada de suciedad, protegiendo al mecanismo (Ilustración 70: Cabezal del vareador).

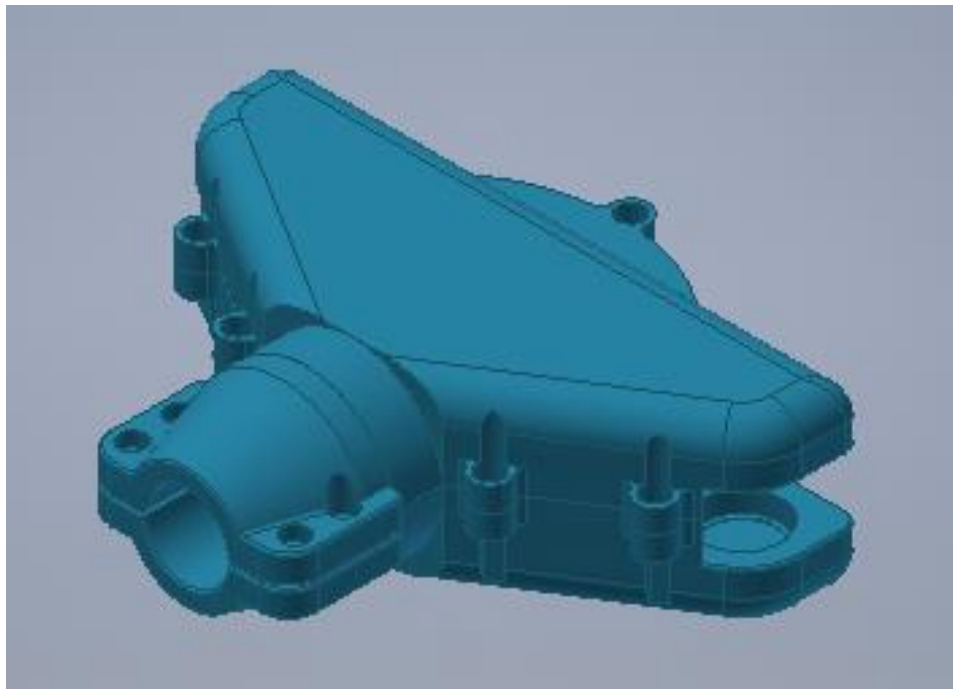


Ilustración 70: Cabezal del vareador

6.4.9. Balancín (Barra 3-4)

Pieza sometida a esfuerzos de tracción y compresión, la cual portará dos rodamientos, uno axial y otro radial (Ilustración 71: Barra 3-4).

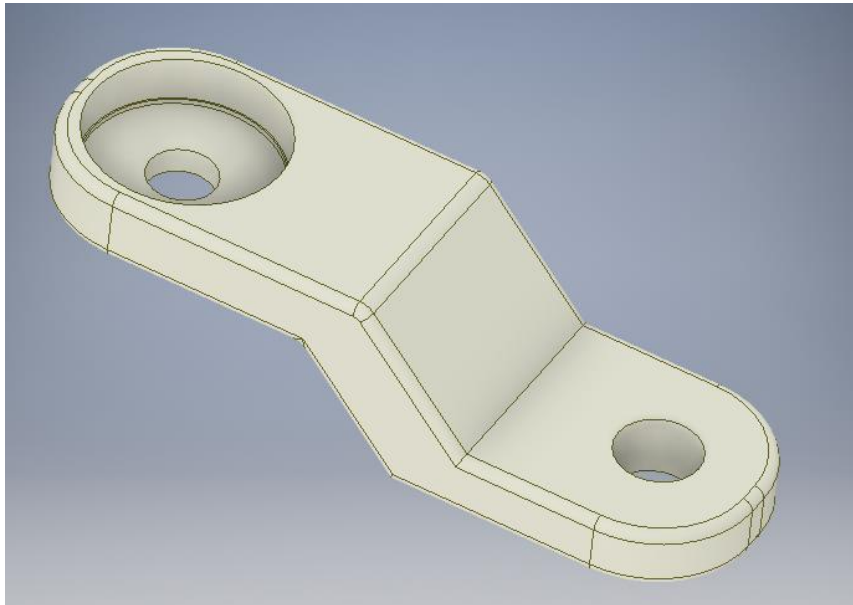


Ilustración 71: Barra 3-4

6.4.10. Peines

El vareador estará formado por dos peines sobre los que se instalarán un total de 8 varillas de 35 centímetros de largas. El ángulo total que hay entre las varillas será de 20° en el plano perpendicular a la parte superior del peine. Las varillas exteriores aparte tienen también un ángulo de 3.5° hacia fuera (Ilustración 72: Peine izquierdo, Ilustración 73: Peine derecho).

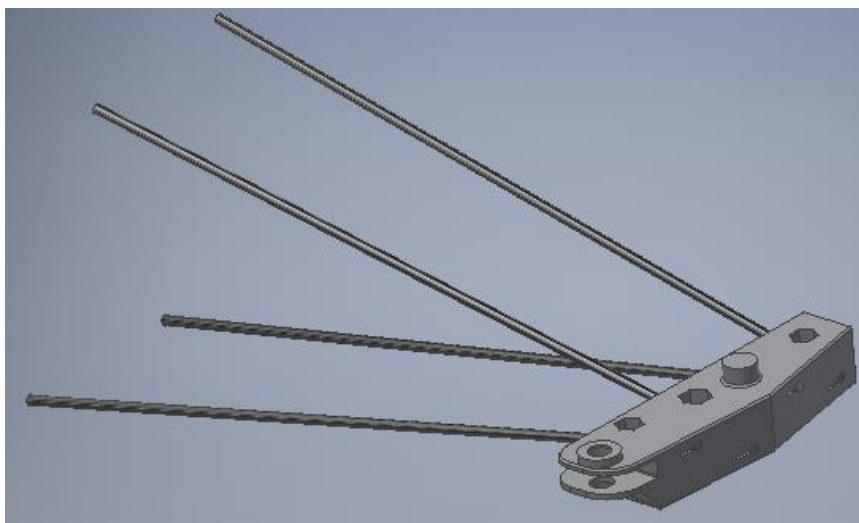


Ilustración 72: Peine izquierdo

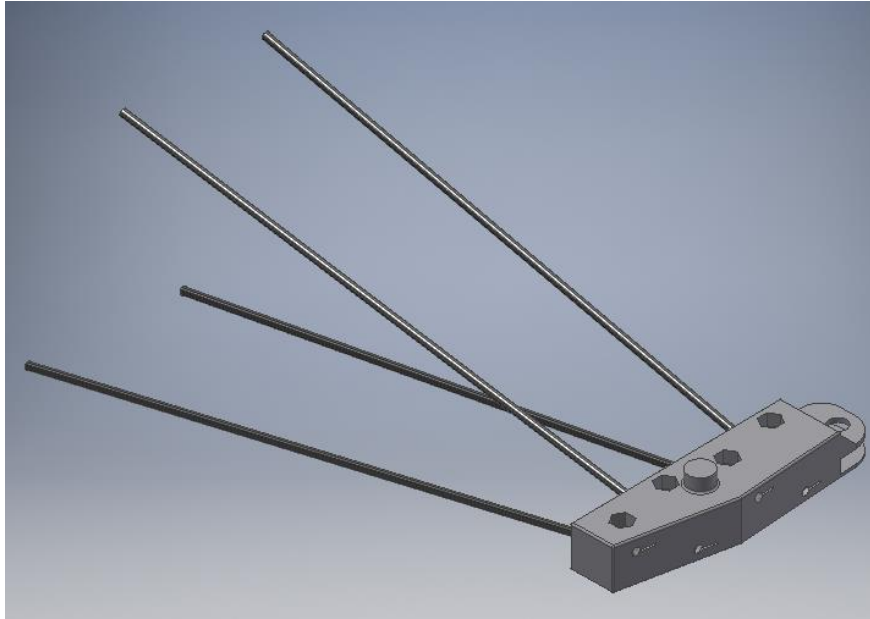


Ilustración 73: Peine derecho

7. Prototipado

Una vez calculadas y diseñadas todas las partes de la máquina se realiza la fabricación de cada uno de los componentes para su posterior montaje.. En este apartado se mostrará el proceso de fabricación de la máquina (Ilustración 74: Pieza CAD fabricada).

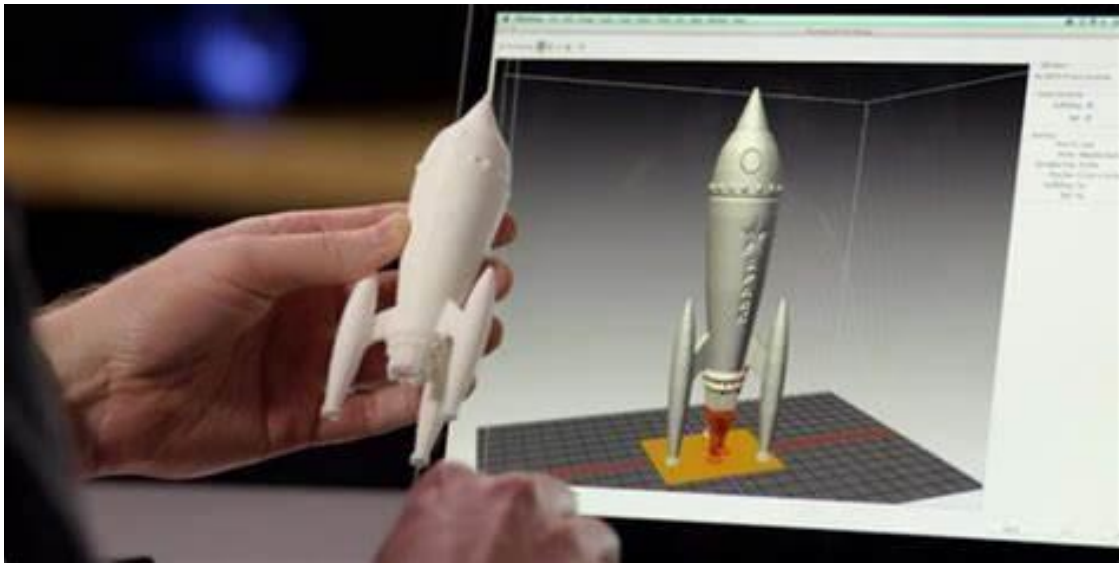


Ilustración 74: Pieza CAD fabricada

7.1. Impresión 3D

Como ya se mencionó anteriormente, la utilización de la impresora 3D ha sido crucial para el posible desarrollo del vareador propuesto. Se ha utilizado una impresora Ender 3 Pro [27] (Ilustración 75: Impresora 3D Ender 3 Pro). Es cierto que las propiedades mecánicas y térmicas que ofrecen las piezas realizadas por fabricación aditiva no son óptimas para el uso asignado, pero realizar un prototipo con impresión 3D ofrece varias ventajas significativas:

1. Rapidez y agilidad: La impresión 3D permite crear prototipos en un tiempo mucho más corto en comparación con los métodos tradicionales de fabricación. Esto acelera el proceso.
2. Costos reducidos: La impresión 3D elimina la necesidad de herramientas y moldes costosos, lo que reduce significativamente los costos de producción de prototipos. Además, se pueden utilizar materiales más económicos para.
3. Personalización y complejidad geométrica: La impresión 3D permite la creación de diseños altamente personalizados y complejos, ya que no hay restricciones en términos de formas y geometrías.
4. Reducción de desperdicio de material: La impresión 3D utiliza solo la cantidad exacta de material necesario para crear el prototipo, lo que reduce significativamente el desperdicio de material en comparación con los métodos tradicionales de fabricación.



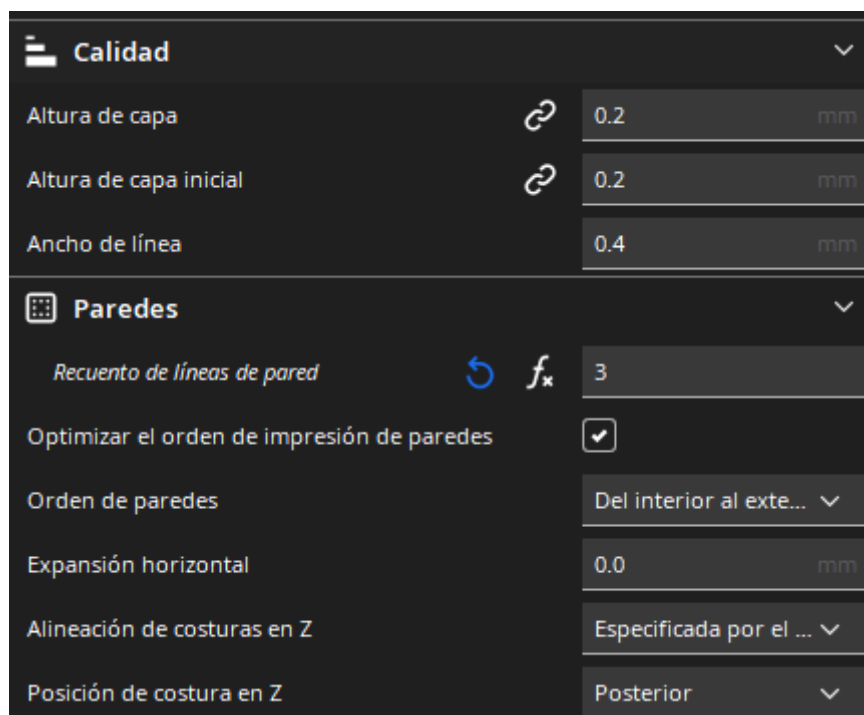
Ilustración 75: Impresora 3D Ender 3 Pro

Otro de los motivos por los que se ha realizado mediante esta técnica es para que se pueda fabricar a escala personal y prácticamente en cualquier parte del mundo, independientemente de que existan o no fábricas cercanas.

Una vez diseñadas las piezas y antes comenzar a imprimir ha sido necesario la utilización del programa Untimaker Cura, que ha sido el encargado de crear el código de impresión para nuestra impresora.

A la hora de imprimir el programa cuenta con una tabla de parámetros que se deben rellenar en función a los acabados que se necesiten, también es importante tener en cuenta las especificaciones del material que estemos utilizando. En este caso se ha utilizado ABS de color blanco y la impresora cuenta con una boquilla extrusora de 0.4 mm.

Se mostrarán los parámetros utilizados para la impresión de las piezas (Ilustración 76: Parámetros utilizados para calidad y paredes, Ilustración 77: Parámetros utilizados para paredes y relleno, Ilustración 78: Parámetros utilizados para velocidad).



The image shows a screenshot of the Cura software interface, specifically the 'Calidad' (Quality) and 'Paredes' (Walls) settings panels. The 'Calidad' panel is expanded, showing settings for 'Altura de capa' (Layer height) at 0.2 mm, 'Altura de capa inicial' (Initial layer height) at 0.2 mm, and 'Ancho de línea' (Line width) at 0.4 mm. The 'Paredes' panel is also expanded, showing settings for 'Recuento de líneas de pared' (Wall line count) at 3, 'Optimizar el orden de impresión de paredes' (Optimize wall print order) checked, 'Orden de paredes' (Wall order) set to 'Del interior al exte...' (From inside to outside), 'Expansión horizontal' (Horizontal expansion) at 0.0 mm, 'Alineación de costuras en Z' (Z-seam alignment) set to 'Especificada por el ...' (Specified by the ...), and 'Posición de costura en Z' (Z-seam position) set to 'Posterior' (Back).

Panel	Parámetro	Valor	Unidad
Calidad	Altura de capa	0.2	mm
	Altura de capa inicial	0.2	mm
	Ancho de línea	0.4	mm
Paredes	Recuento de líneas de pared	3	
	Optimizar el orden de impresión de paredes	☒	
	Orden de paredes	Del interior al exte...	
	Expansión horizontal	0.0	mm
	Alineación de costuras en Z	Especificada por el ...	
	Posición de costura en Z	Posterior	

Ilustración 76: Parámetros utilizados para calidad y paredes

Superior o inferior		
Capas superiores		2
Capas inferiores		2
Patrón superior/inferior		Líneas
Relleno		
Densidad de relleno		30.0 %
Patrón de relleno		Cúbico
Conectar líneas de relleno		☐
Porcentaje de superposición del relleno		30.0 %
Relleno antes que las paredes		☐

Ilustración 77: Parámetros utilizados para paredes y relleno

Velocidad		
Velocidad de impresión		40.0 mm/s
Velocidad de relleno		60.0 mm/s
Velocidad de pared exterior		20.0 mm/s
Velocidad de pared interior		30.0 mm/s
Velocidad superior/inferior		30.0 mm/s
Velocidad de soporte		20.0 mm/s
Velocidad de desplazamiento		150.0 mm/s
Velocidad de capa inicial		20.0 mm/s

Ilustración 78: Parámetros utilizados para velocidad

El resto de parámetros se han dejado los que venían por defecto.

A la hora de abrir los archivos en este programa hay que tener en cuenta que se deben exportar del programa de diseño en formato stl.

Una vez abierto el archivo e introducidos los parámetros mostrados anteriormente, el propio programa estima el tiempo de impresión, incluso indica la cantidad de material que se utilizará (Ilustración 79: Pantalla principal Ultimaker Cura).

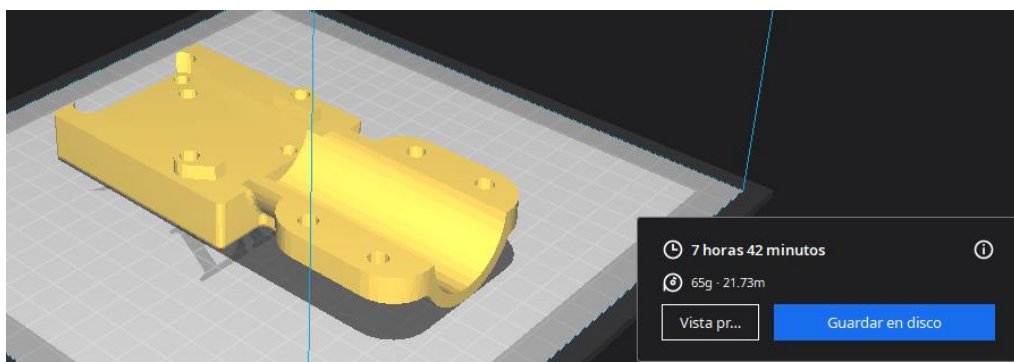


Ilustración 79: Pantalla principal Ultimaker Cura

A continuación se mostrará una tabla donde aparecerá la cantidad de material requerida, el tiempo de fabricación, y el número de piezas a imprimir para la fabricación de la máquina (Tabla 5: Información a tener en cuenta antes de imprimir).

	Piezas a imprimir	Tiempo de impresión	ABS utilizado (g)
Base pértiga superior	1	7h 24min	62
Base pértiga inferior	1	7h 42min	65
Porta-rodamientos medio tuerca	1	6h 36min	52
Porta-rodamientos medio cabeza tornillo	1	6h 35min	52
Porta-rodamientos superior	2	1h 5min	6
Balancín 3-4	2	52min	6
Peine derecho	1	6h 13min	51
Peine izquierdo	1	6h 13min	51
Cabezal tuerca	1	14h 12min	108
Cabezal cabeza tornillo	1	14h 8min	107
Total		71h	560 g

Tabla 5: Información a tener en cuenta antes de imprimir

Una vez el programa ha completado los cálculos se puede ver el proceso de fabricación pinchando en “Vista previa” (Ilustración 80: Vista previa de la pieza).

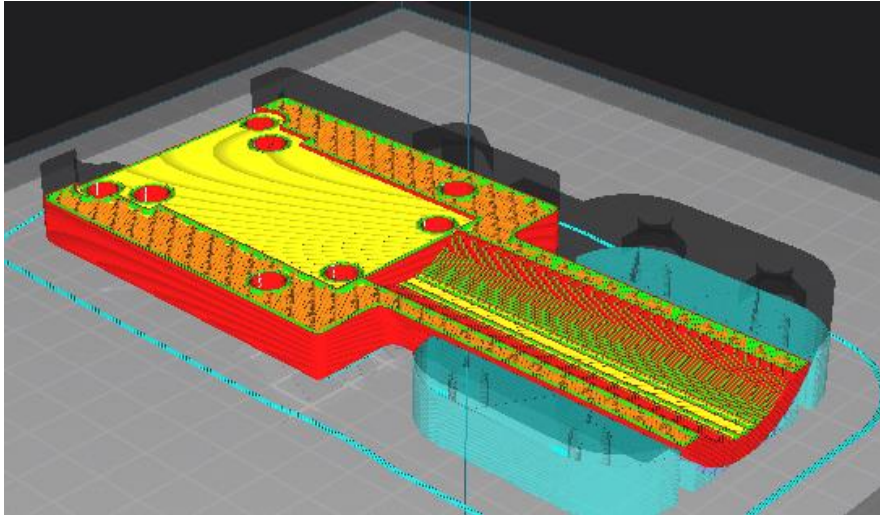


Ilustración 80: Vista previa de la pieza

A modo de curiosidad, el programa cuando detecta que alguna parte de la pieza está en voladizo, crea una pequeña estructura fácilmente retirable en la zona del voladizo para apoyarse y crear la pieza correctamente una vez tenga que imprimir en la zona volada, esta estructura nos la indica en color azul.

A continuación se mostrarán las piezas una vez impresas:

- Cabezal (Ilustración 81: Cabezal Vareador realizado por fabricación aditiva).

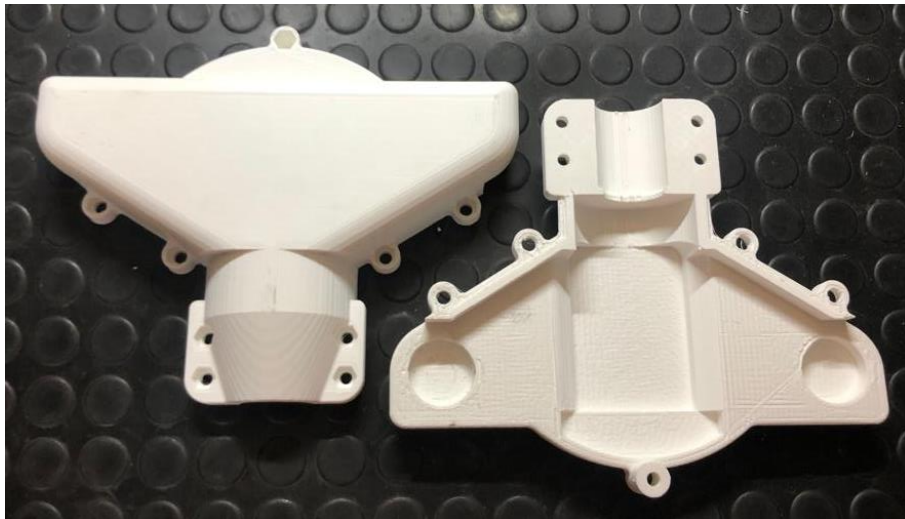


Ilustración 81: Cabezal Vareador realizado por fabricación aditiva

- Peines (Ilustración 82: Peines realizados por fabricación aditiva)

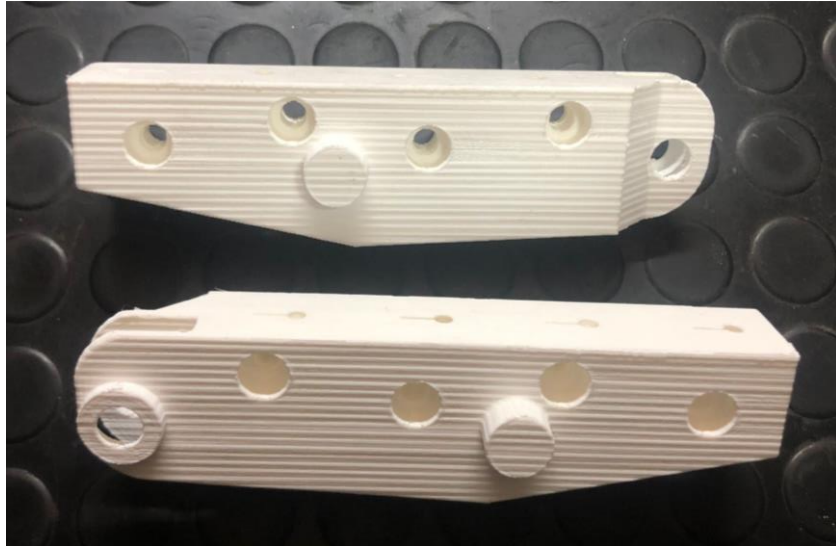


Ilustración 82: Peines realizados por fabricación aditiva

- Balancín (Ilustración 83: Balancines realizados por fabricación aditiva).

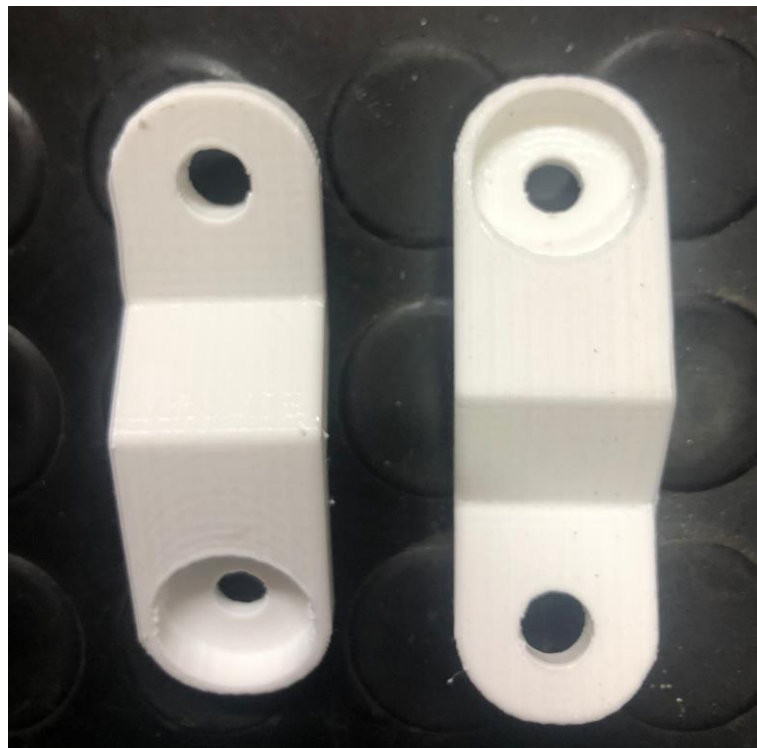


Ilustración 83: Balancines realizados por fabricación aditiva

- Porta-rodamientos superior (Ilustración 84: Porta-rodamientos superiores realizados por fabricación aditiva).

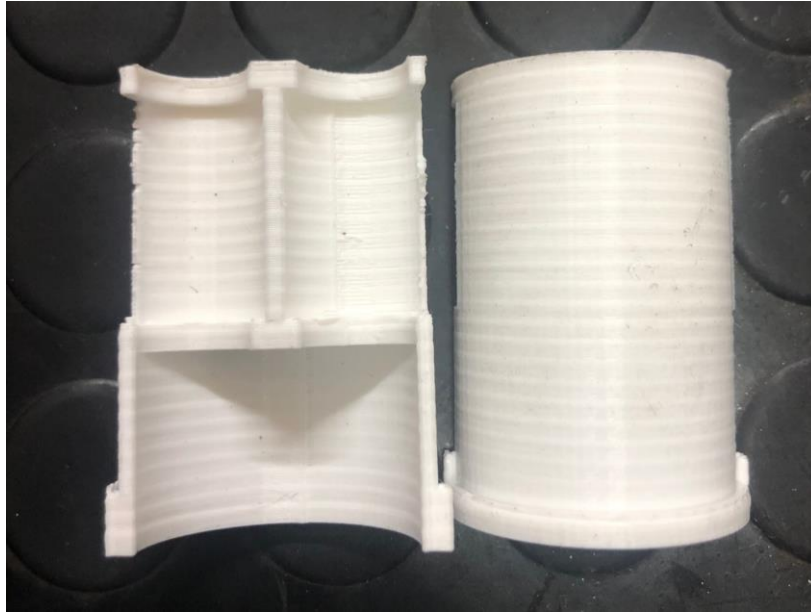


Ilustración 84: Porta-rodamientos superiores realizados por fabricación aditiva

- Porta-rodamientos medio (Ilustración 85: Porta-rodamientos medios realizados por fabricación aditiva).

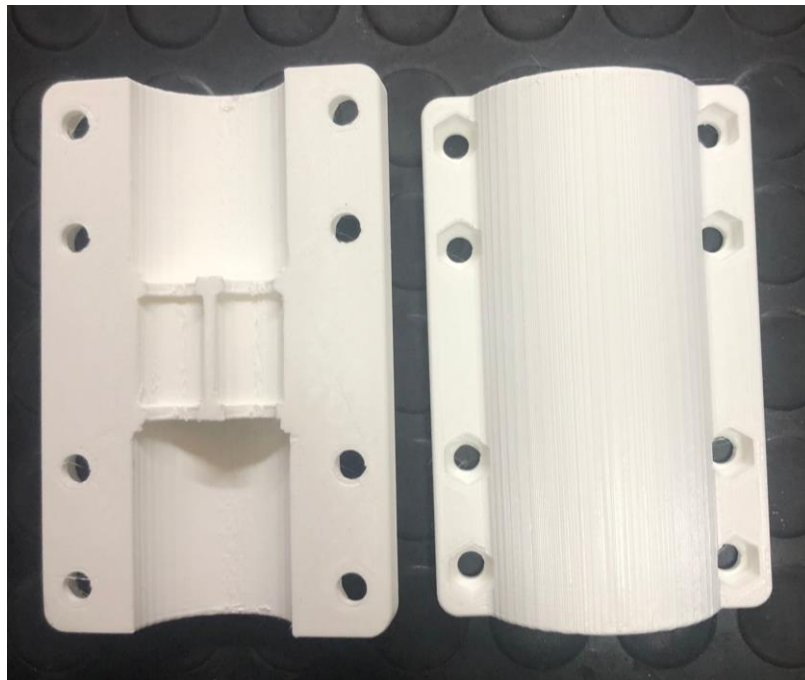


Ilustración 85: Porta-rodamientos medios realizados por fabricación aditiva

- Conexión Bancada-Pértiga (Ilustración 86: Conexión Bancada-Pértiga realizada por fabricación aditiva).



Ilustración 86: Conexión Bancada-Pértiga realizada por fabricación aditiva

Una vez impresas todas las piezas se pasará a realizar un buen acabado superficial, utilizando limas y lijas (Ilustración 87: Piezas listas para montar).

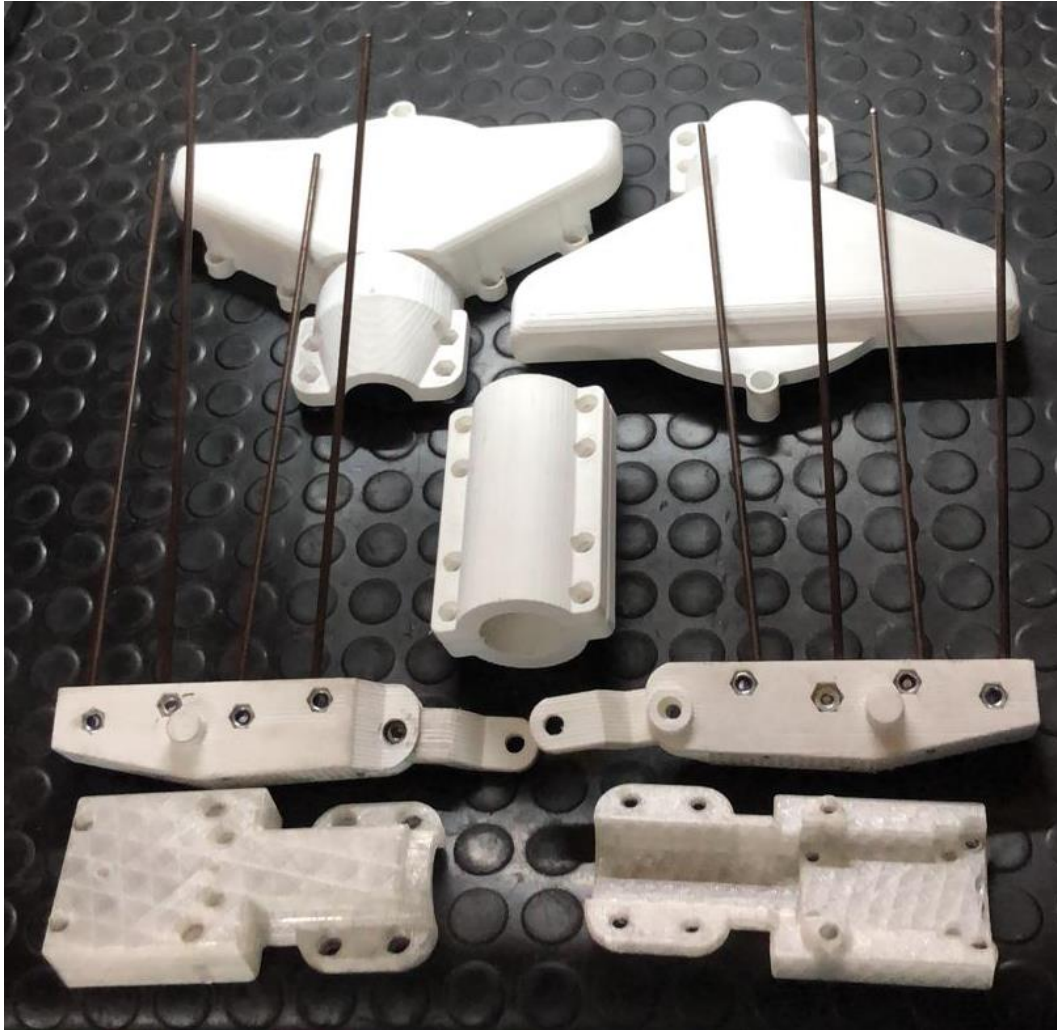


Ilustración 87: Piezas listas para montar

7.2. Herramientas utilizadas

Para la fabricación del vareador hemos utilizado tanto materiales metálicos como poliméricos, las piezas realizadas con impresión 3D están listas para su montaje en la máquina, sin embargo, el resto de componentes metálicos es necesario trabajarlos. A continuación, se expondrán las diferentes herramientas utilizadas para la fabricación de la máquina.

- **Banco o mesa de trabajo y tornillo de banco**

Lugar donde se ha trabajado para el montaje y fabricación de diferentes piezas (Ilustración 88: Banco de trabajo Ecowork BT2)



Ilustración 88: Banco de trabajo Ecowork BT2

Para trabajar cómodamente es imprescindible que cuente con un tornillo de banco (Ilustración 89: Tornillo de banco).



Ilustración 89: Tornillo de banco

- **Amoladora**

Se trata de una herramienta utilizada para el corte, desbaste y limpieza de materiales principalmente metálicos, ha sido utilizada para cortar las varillas deslizantes, así como cortar, desbatar y realizar las muescas en la barra de aluminio (Ilustración 90: Amoladora Black+Deker, Ilustración 91: Discos Bosch de milhojas y corte utilizados).



Ilustración 90: Amoladora Black+Deker



Ilustración 91: Discos Bosch de milhojas y corte utilizados

- **Soldadora de electrodo**

Herramienta utilizada para la fijación de metales (Ilustración 92: Soldadora Metal Works TEC 220 inverter de electrodo). Esta máquina se ha utilizado para soldar las varillas deslizantes a las barras originales del corta setos.



Ilustración 92: Soldadora Metal Works TEC 220 inverter de electrodo

- **Dremel 200**

Es una multiherramienta rotativa a la que se le pueden instalar diferentes accesorios como fresas, lijas, discos de corte, pulido... Se utiliza para trabajos minuciosos y de precisión, útil para dejar buenos acabados superficiales (Ilustración 93: Dremel 200).



Ilustración 93: Dremel 200

- **Terrajas**

Pieza metálica utilizada para forjar rosca (Ilustración 94: Juego de machos y terrajas BGS). Ha sido utilizada para realizar rosca en el extremo de las varillas deslizadoras, lugar donde ha sido instalada la rótula hembra.



Ilustración 94: Juego de machos y terrajas BGS

- **Limas**

Herramienta manual utilizada para desgastar tanto piezas metálicas como plásticas. Utilizada para realizar buenos acabados superficiales y evitar zonas cortantes (Ilustración 95: Juego de limas).



Ilustración 95: Juego de limas

7.3. Componentes y productos utilizados para el montaje

Los principales elementos que utilizaremos para el montaje serán tornillos, tuercas, clip y pasadores.

Para la sujeción de piezas externas al mecanismo se han utilizado tornillos de la misma métrica para agilizar el trabajo de montaje. Se han instalado tornillos de métrica 6 de cabeza de allen de diferentes longitudes, dependiendo de las necesidades. En el extremo del tornillo se han instalado tuercas antideslizantes que encajan en las propias piezas, de este modo además de evitar que los tornillos sobresalgan y puedan ser elementos punzantes será más rápido el proceso de montaje.

Papel de lija

Utilizado para ajustar y eliminar desperfectos con los que puede haber riesgo de corte (Ilustración 96: Papel de lija).



Ilustración 96: Papel de lija

Grasa

Para evitar el desgaste y contacto entre las diferentes piezas, además protege al equipo de agua y otros contaminantes (Ilustración 97: Rodamiento impregnado en grasa).



Ilustración 97: Rodamiento impregnado en grasa

Aceite lubricante

Se ha utilizado para la realización de la rosca, para lubricar y enfriar la varilla en el proceso (Ilustración 98: Aceite WD-40).



Ilustración 98: Aceite WD-40

7.4. Fabricación y montaje

Una vez diseñadas y fabricadas las piezas de plástico, se han comenzado a preparar el resto de piezas metálicas, a continuación, se mostrará el proceso de fabricación de las mismas.

- Varilla deslizante. (Barra 2-3):

Como ya se comentó anteriormente se fabricará utilizando una varilla de 8 mm de diámetro. En la parte superior se ha realizado una rosca de métrica M8x1.25 mm con la ayuda de una terraja (Ilustración 99: Varilla m8 cortada a 90°, Ilustración 100: Forjado de rosca con terraja, Ilustración 101: Rosca terminada).



Ilustración 99: Varilla m8 cortada a 90°



Ilustración 100: Forjado de rosca con terraja



Ilustración 101: Rosca terminada

A continuación, se procederá a preparar y soldar en el otro extremo de la varilla la conexión a la barra 1-2 (Ilustración 102: Cuchilla sin cortar, Ilustración 103: Comparación de una cuchilla cortada con otra sin cortar, Ilustración 104: Cuchillas cortadas). Utilizaremos las pletinas propias del corta setos para soldar la varilla.

El primer paso será cortar las cuchillas:



Ilustración 102: Cuchilla sin cortar



Ilustración 103: Comparación de una cuchilla cortada con otra sin cortar



Ilustración 104: Cuchillas cortadas

Una vez cortadas las cuchillas se cortará la pletina y se soldará la varilla de M8.

- Barras de aluminio de la pértiga.

Para la fabricación de la pértiga se han aprovechado dos trozos de una barra partida de una vibradora Sthil. La longitud aproximada de estos trozos era de 95 centímetros, por lo que se ha procedido al marcaje y corte de la barra a la medida deseada (75 cm) (Ilustración 105: Marcaje, Ilustración 106: Corte de pieza, Ilustración 107: Comprobación longitud de pieza, Ilustración 108: Comprobación ángulo de corte a 90°).



Ilustración 105: Marcaje



Ilustración 106: Corte de pieza



Ilustración 107: Comprobación longitud de pieza



Ilustración 108: Comprobación ángulo de corte a 90º

A continuación, se mostrará el proceso de montaje de la máquina.

El primer paso será instalar los rodamientos lineales en los porta-rodamientos (Ilustración 109: Rodamientos lineales instalados), en su montaje aplicaremos un poco de grasa.



Ilustración 109: Rodamientos lineales instalados

Seguidamente se montará la pértiga, instalando las dos barras de aluminio y montando los porta-rodamientos lineales. La barra superior cuenta con un porta-rodamientos superior que debe ser ajustado en las muecas correspondientes, entrando a presión (Ilustración 110: Instalación de porta-rodamientos superior).

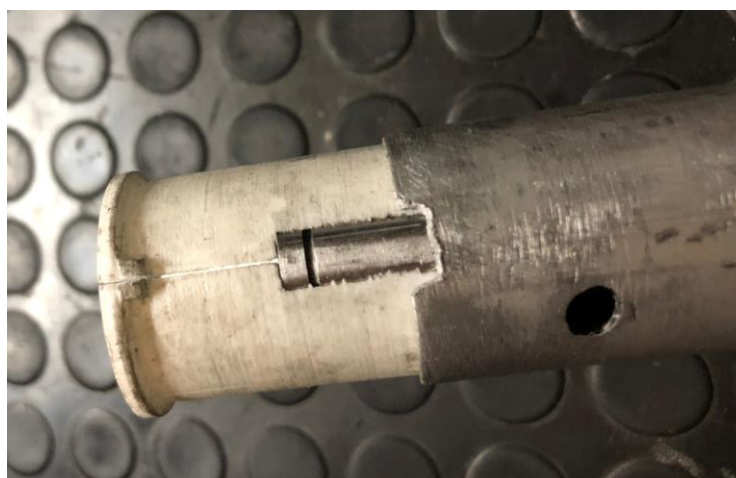


Ilustración 110: Instalación de porta-rodamientos superior

Entre ambas barras se montará el porta-rodamientos medio, ajustando las muescas correctamente (Ilustración 111: Porta-rodamientos medio instalado).

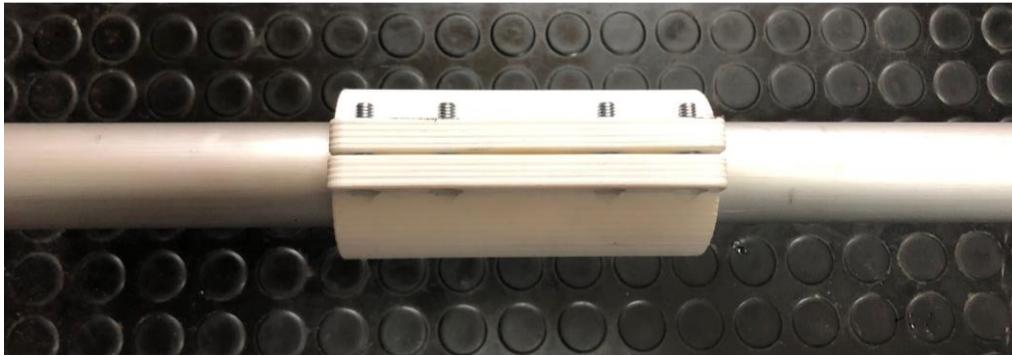


Ilustración 111: Porta-rodamientos medio instalado

El siguiente paso será instalar las varillas deslizantes que van dentro de la pértiga y roscar las rótulas en la punta superior (Ilustración 112: Rótulas y varillas instaladas).

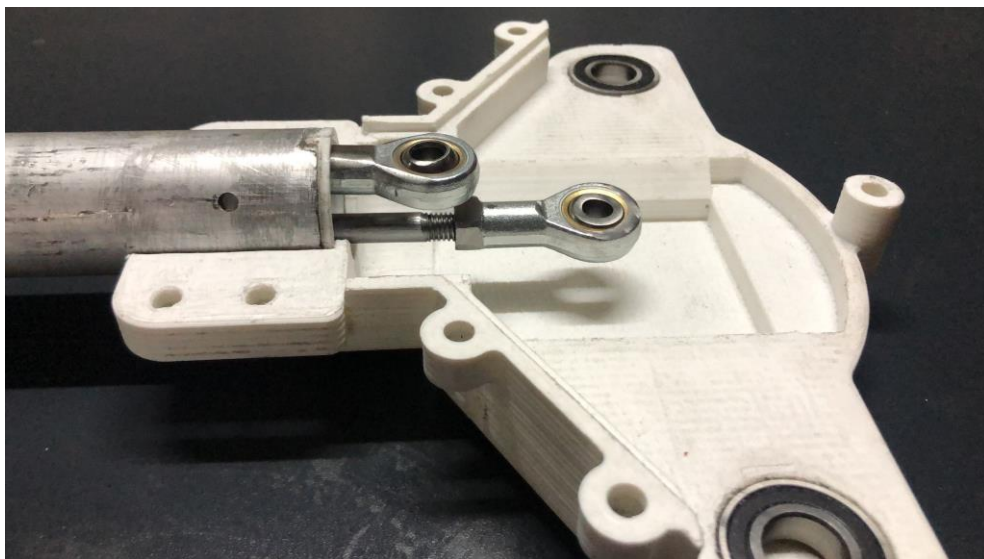


Ilustración 112: Rótulas y varillas instaladas

Es recomendable montar las 4 varillas cuanto antes en cada peine, ya que una vez montadas las partes del cabezal no será posible su instalación ni ajuste (Ilustración 113: Peines montados)

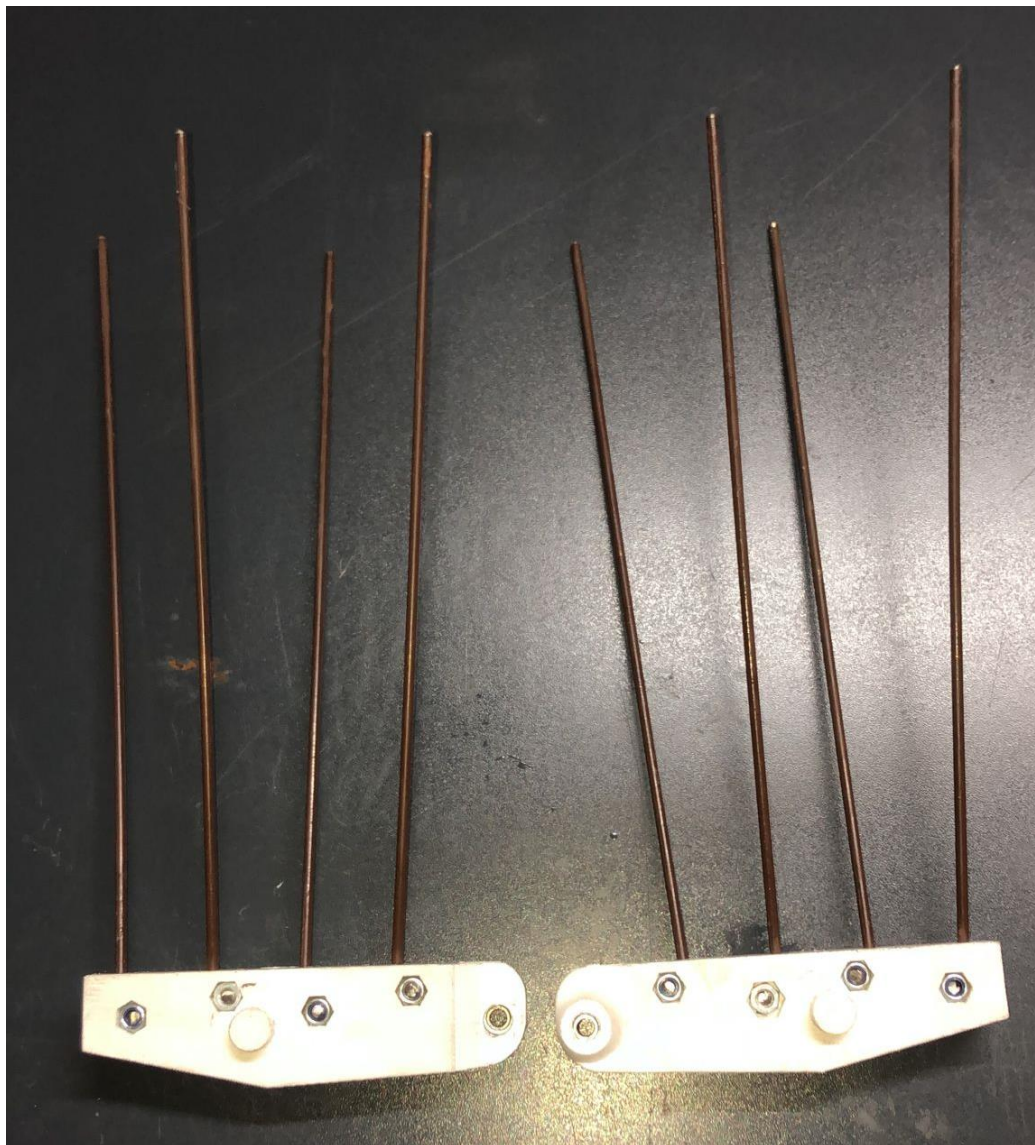


Ilustración 113: Peines montados

Una vez montadas las rótulas podremos poner los balancines en su posición y conectarlos con los peines (Ilustración 114: Peines y balancines instalados en el cabezal).

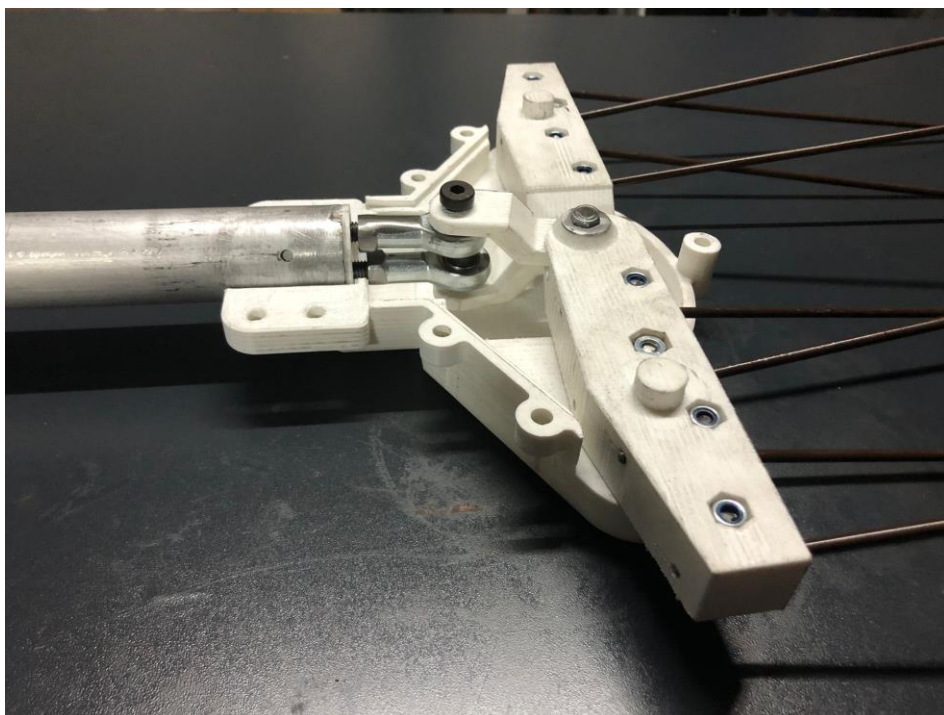


Ilustración 114: Peines y balancines instalados en el cabezal

El último paso a realizar para terminar de montar la parte superior del vareador será instalar las dos partes de cabezal, encajando los peines y asegurándonos que está perpendicular respecto a las varillas deslizantes (Ilustración 115: Parte superior del vareador montada).



Ilustración 115: Parte superior del vareador montada

Una vez montada la parte superior se comprobará que ambos peines tienen movilidad sin rozamientos y sin problemas (Ilustración 116: Peines girados hacia la derecha, Ilustración 117: Peines girados hacia la izquierda).



Ilustración 116: Peines girados hacia la derecha

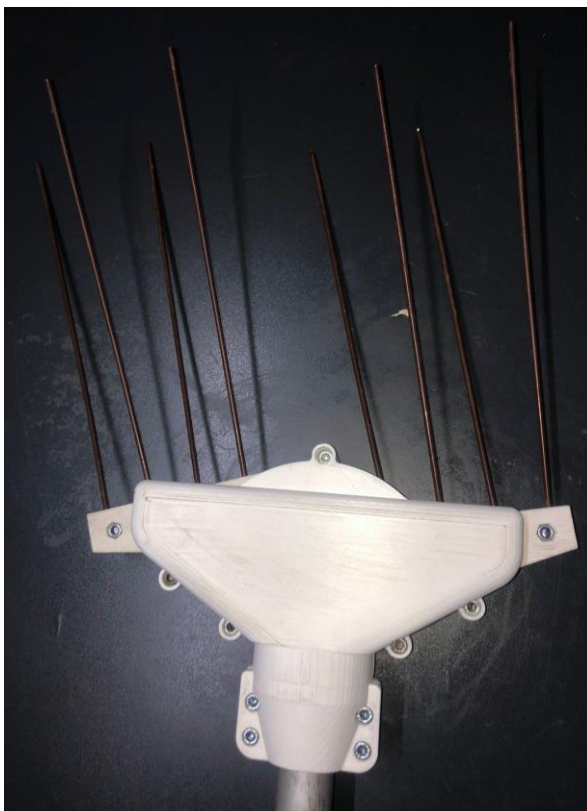


Ilustración 117: Peines girados hacia la izquierda

Una vez se han llevado a cabo todos los pasos anteriores, estamos preparados para comenzar a montar la parte inferior del vareador.

Se comenzará instalando el cigüeñal en la bancada y realizando la conexión de las varillas deslizantes con las bielas (Ilustración 118: Montaje parte baja, Ilustración 119: Instalación de pértiga en parte inferior del vareador).

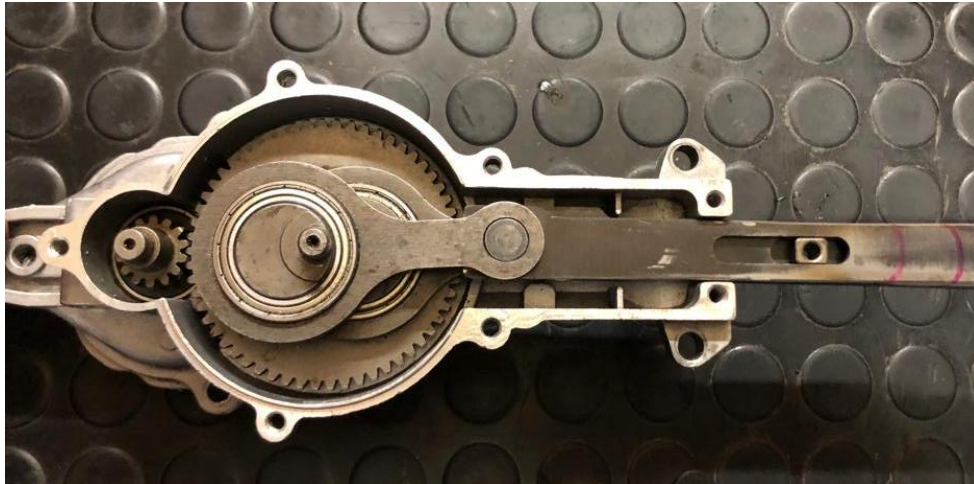


Ilustración 118: Montaje parte baja

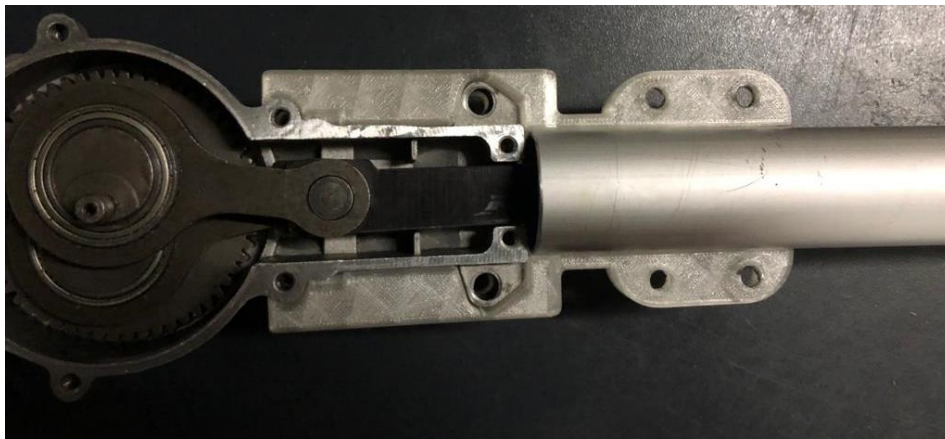


Ilustración 119: Instalación de pértiga en parte inferior del vareador

Una vez acoplado todo el mecanismo cerraremos la bancada e instalaremos la pieza que conecta la bancada con la pértiga (Ilustración 120: Parte inferior del vareador montada. Vista superior, Ilustración 121: Parte interior del vareador montada. Vista lateral, Ilustración 122: Parte baja vareador con motor eléctrico instalado).

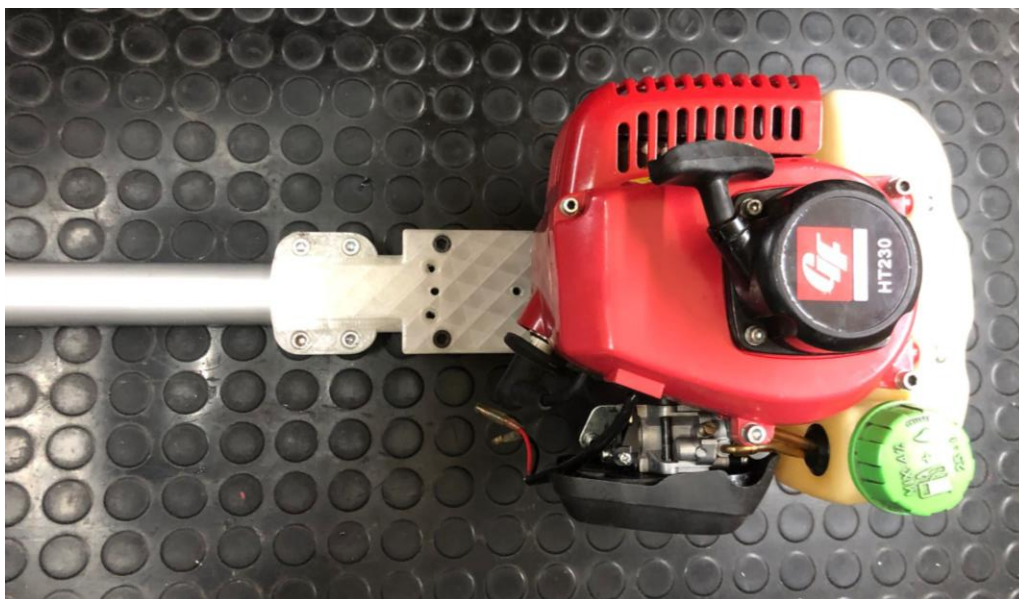


Ilustración 120: Parte inferior del vareador montada. Vista superior

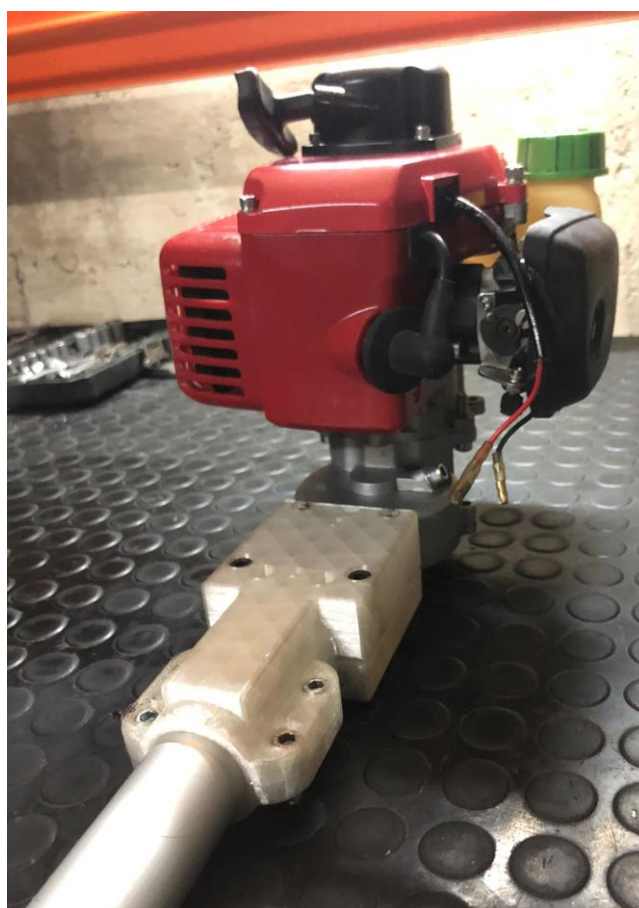


Ilustración 121: Parte interior del vareador montada. Vista lateral

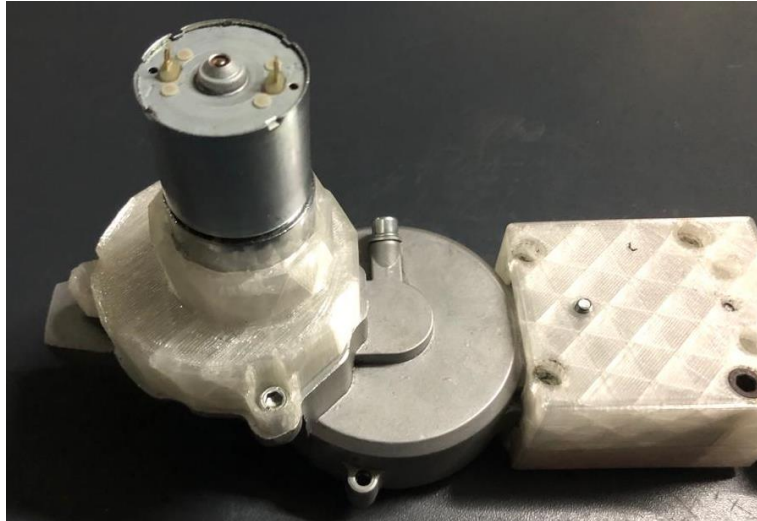


Ilustración 122: Parte baja vareador con motor eléctrico instalado

Para la fijación de las diferentes piezas se han utilizado tornillos de métrica M6 con sus correspondientes tuercas. Una vez montado la máquina estaría lista para trabajar (Ilustración 123: Vareador mecánico montado, Ilustración 124: Vareador mecánico terminado Ilustración 125: Vareador Moreli P-29, Ilustración 126: Vareador mecánico vista lateral, Ilustración 127: Vareador mecánico vista trasera)



Ilustración 123: Vareador mecánico montado



Ilustración 124: Vareador mecánico terminado



Ilustración 125: Vareador Moreli P-29



Ilustración 126: Vareador mecánico vista lateral



Ilustración 127: Vareador mecánico vista trasera

8. Presupuesto

Una vez fabricado el prototipo se podrán realizar los cálculos del coste del vareador.

- Corta setos:

Para la fabricación del vareador se optó por comprar un corta setos de segunda mano cuyo coste fue de 30€ aunque se podría haber adquirido nuevo por un coste estimado de 100€.

- Material para la impresora 3D:

El precio de un rollo de material ABS es de 28.95€ y tiene un peso de 750 gramos. El peso total de todas las piezas imprimidas en 3D es de 560 gramos, por lo tanto, el coste del material para la fabricación de un vareador es de 21.60€.

- Barra de aluminio:

Para la fabricación de este primer prototipo de han aprovechado varios trozos de varas de vibradoras Stihl partidas, por lo tanto, el coste ha sido de 0€. En caso de no disponer de este material, se puede comprar una barra de aluminio de las mismas dimensiones tanto de diámetro interior como exterior y con una longitud de 2 metros por 25.41€.

- Varillas deslizantes:

Las varillas de diámetro 8mm han tenido un coste de 7€ y se han tenido que utilizar unos 3 electrodos para la fabricación de las mismas que tienen un coste de unos 0.2€.

- Rodamientos:

El coste de los 4 rodamientos que van instalados en el cabezal es de 4.76€.
Los dos rodamientos radiales instalados en el balancín 3-4 tiene un precio de 0.5€.
Los dos rodamientos axiales instalados en el balancín 3-4 tiene un precio de 1.3€.
Los rodamientos lineales que guían a la varilla deslizante han costado 2.12€.

- Rótulas:

Se han utilizado dos rótulas cuyo coste son de 5.45€.

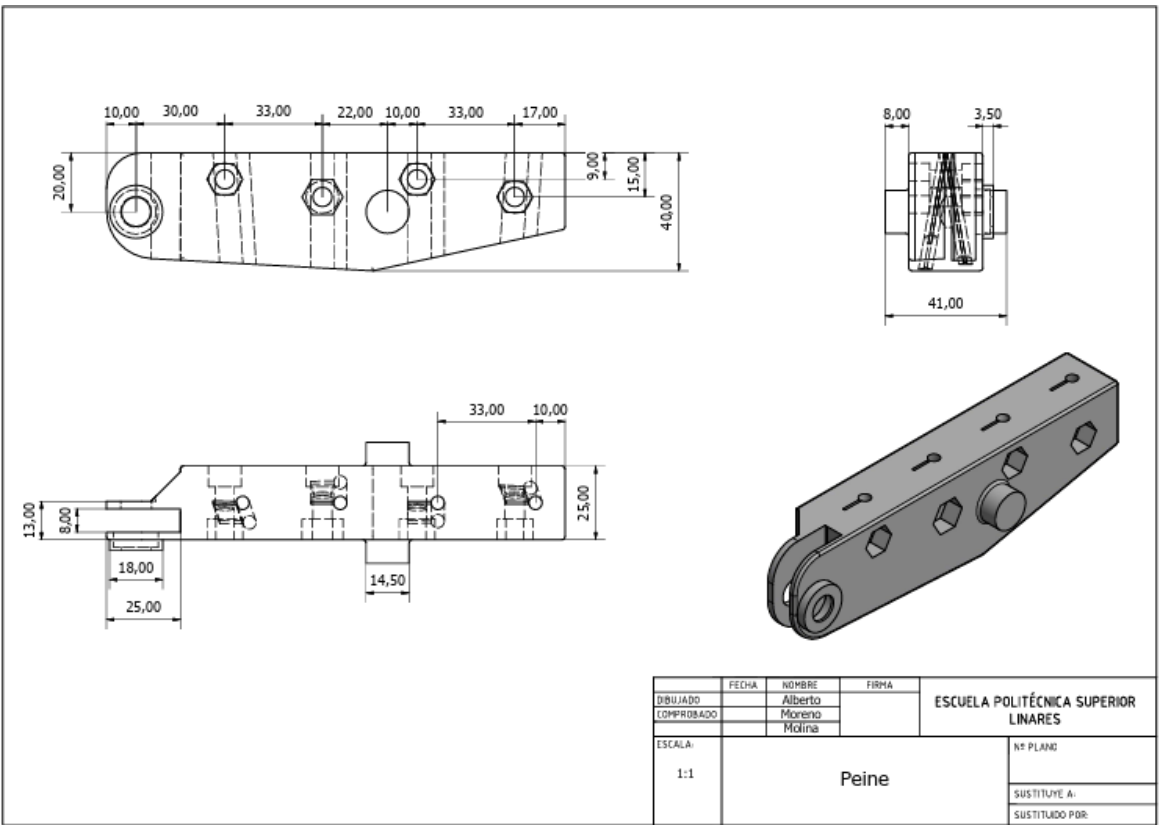
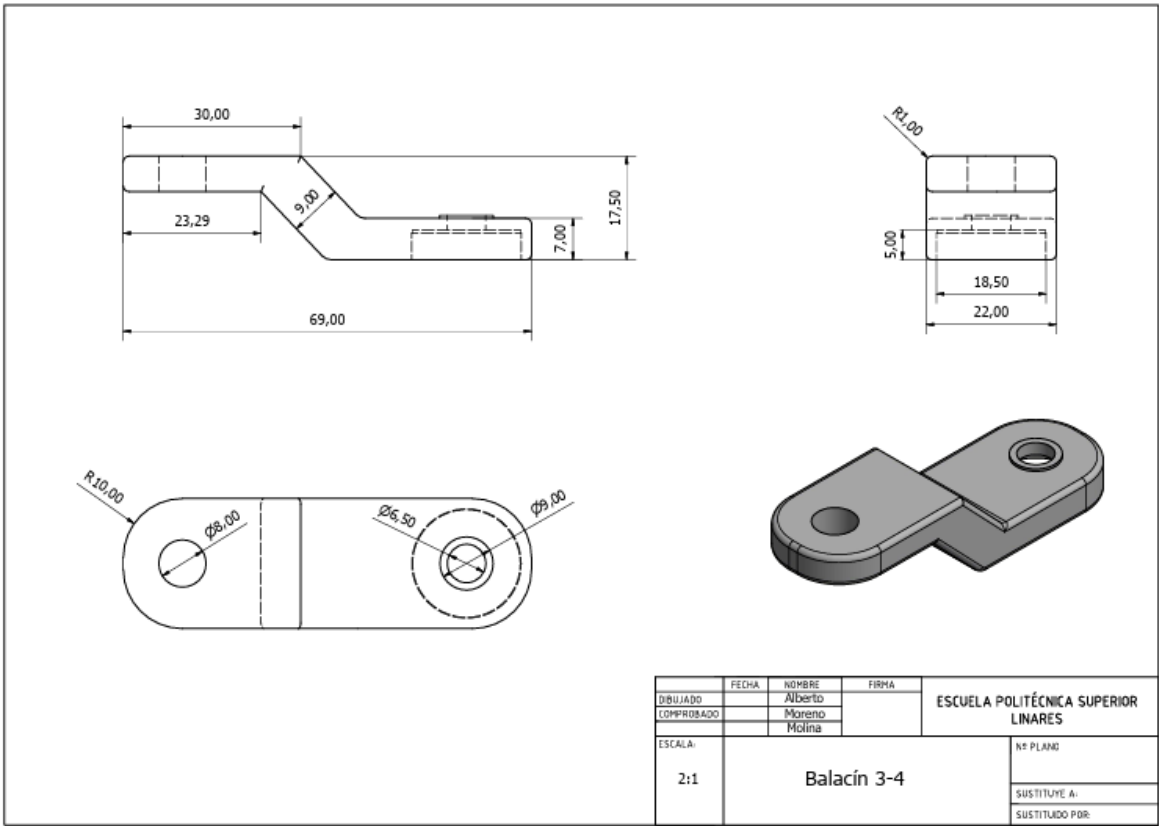
Material	Prototipo 1	Prototipo 2 (todo nuevo)
Corta setos	30	100
ABS	21,6	21,6
Barra aluminio	0	25,41
Varillas deslizaantes	7	7
Rodamientos	8,68	8,68
Rótulas	5,45	5,45
TOTAL (Euros)	72,73	168,14

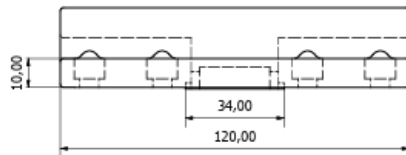
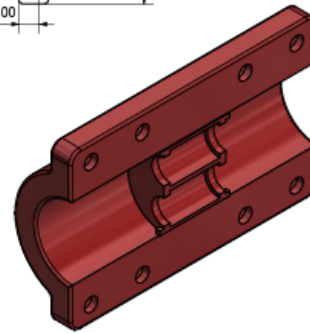
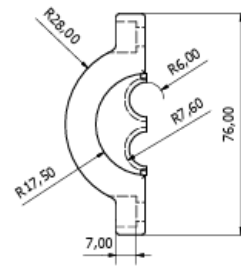
Tabla 6: Presupuesto materiales utilizados

La diferencia de coste del prototipo 2 frente al prototipo 1 viene dada por la necesidad de tener que comprar todas las partes de la máquina nuevas, como ya se comentó, para la fabricación de la primera máquina se han reutilizado muchas piezas.

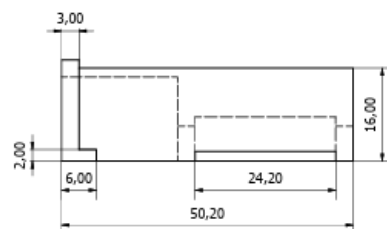
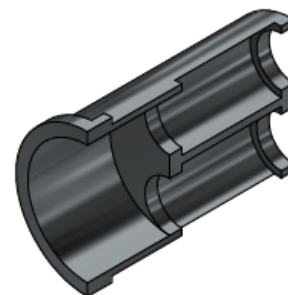
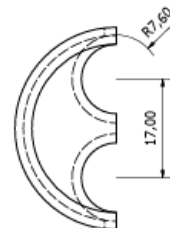
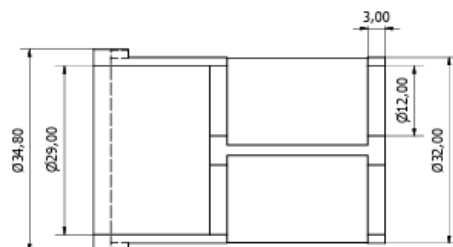
A modo de curiosidad y aprovechando el tema del reciclado para la fabricación de diferentes partes de la máquina, las varillas que golpean el olivo también se han realizado de forma casera, para ello se ha utilizado una vieja estantería cuyas repisas tenían varilla de 4,5mm, así además de apostar por el reciclado y utilización de productos locales, se ha reducido el coste de fabricación del vareador.

9. Planos

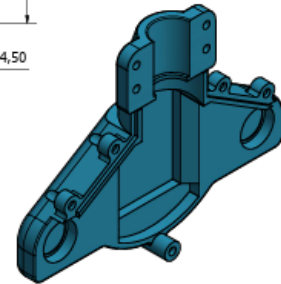




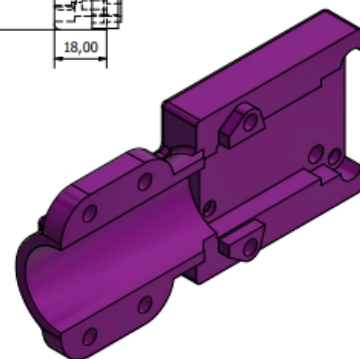
	FECHA	NOMBRE	FIRMA	ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR LINARES
DIBUJADO		Alberto		
COMPROBADO		Moreno		
ESCALA:		Molina		
1:1	Porta-rodamientos medio			Nº PLANO
				SUSTITUYE A:
				SUSTITUIDO POR:



	FECHA	NOMBRE	FIRMA	ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR LINARES
DISEÑADO		Alberto		
COMPROBADO		Moreno		
		Malina		
ESCALA:	Porta-rodamientos superior			Nº PLANO
2:1				SUSTITUYE A:
				SUSTITUIDO POR:



	FECHA	NOMBRE	FIRMA	ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR LINARES
DIBUJADO		Alberto		
COMPROBADO		Moreno		
		Molina		
ESCALA:	Cabezal Vareador			Nº PLANO
1:2				SUSTITUYE A:
				SUSTITUIDO POR:



	FECHA	NOMBRE	FIRMA	ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR LINARES
DEBILADO		Alberto		
COMPROBADO		Moreno		
		Molina		
ESCALA:	1:1	Parte superior conexión Bancada-Pértiga		NP PLANO
				SUSTITUYE A:
				SUSTITUYENDO A:

10. Bibliografía

- [1] F. L. F. Díaz, «Estudio de la evolución de las superficies de cultivo y cambios en las especies cultivadas en España en el periodo de 2011-2021».
- [2] B. ESPERANTE, «La motorización de una agricultura atlántica y ganadera de pequeños propietarios: La difusión de tractores agrícolas en Galicia, 1939-2000».
- [3] E. M. d. Adeoliva, «El olivar andaluz, el bosque humanizado más grande del planeta».
- [4] A. Delgado, «ABC,» 14 Junio 2019. [En línea]. Available: https://www.abc.es/espana/madrid/planb/abci-homenaje-eduardo-barreiros-jarama-201906140250_noticia.html.
- [5] J. George S. ARATA, «Harvester and components therefor, harvesting methods, collectors, and collection methods,» 2016.
- [6] F. C. C. y. J. L. S. Rebudilla, «Tratamientos previos al uso de medios mecánicos para la recolección de aceituna,» *Agricultura. Revista agropecuaria*, nº 420, 1967.
- [7] F. Metavir. [En línea]. Available: <http://www.aperosagricolas.com/vareador-cifarelli-sc800>.
- [8] Ministerio de agricultura, pesca y alimentación, [En línea]. Available: <https://www.mapa.gob.es/es/ministerio/archivos-biblioteca-mediateca/archivos/fotografias-labores-agricolas.aspx#prettyPhoto>.
- [9] Ministerio de agricultura, pesca y alimentación, [En línea]. Available: <https://www.mapa.gob.es/es/ministerio/servicios/informacion/plataforma-de-conocimiento-para-el-medio-rural-y-pesquero/observatorio-de-tecnologias-probadas/maquinaria-agricola/recol-aceituna-almz.aspx>.
- [10] «Pellenc,» [En línea]. Available: <https://www.pellenc.com/es-es/>.
- [11] «Camponuevotecnicas,» [En línea]. Available: <https://www.camponuevotecnicas.com/>.
- [12] «Ewimax,» [En línea]. Available: <https://www.ewimax.pl/product-eng-2735-CIFARELLI-SC605-SHAKER-PROFESSIONAL-FRUIT-PUMPING-PLUMBERS-BRANCHES-CHERRY-PLUMBERS-OLIVE-etc-PREMIUM-CLASS-ORCHARD-GARDEN-WITH-HOOK-OFFICIAL-DISTRIBUTOR-AUTHORIZED-CIFARELLI-DEALER.html>.
- [13] «Stihl,» [En línea]. Available: <https://www.stihl.es/es/c/vareadores-135142>.
- [14] «Zanon,» [En línea]. Available: <https://www.zanon.it/en/products/pro-electronic-line/>.
- [15] «Campagnola,» [En línea]. Available: <https://www.campagnola.es/#>.

- [16] «Agrotechnic,» [En línea]. Available: <http://www.agrotechnic.com/es/products/vibradores-de-oliva/>.
- [17] «Agrieuro,» [En línea]. Available: <https://www.agrieuro.es/ofertas.html>.
- [18] BOE 246, «Agencia Estatal Boletín Oficial del Estado,» 11 Octubre 2008. [En línea]. Available: <https://www.boe.es/eli/es/rd/2008/10/10/1644>.
- [19] M. R. F. y. G. G. Marín, Cinemática de mecanismo planos, Cáceres: Universidad de Extremadura. Servicio de publicaciones, 2020.
- [20] K. Kouraba, «ANÁLISIS DEL TIEMPO DE VIBRADO EN EL DERRIBO DE ACIUTUNA MEDIANTE VIBRADORES DE TRONCO,» 2005.
- [21] M. D. M. , J. A. G.-M. y. R. B. Joaquín Lluch-Cerezo, «Influence of Thermal Annealing Temperatures on Powder Mould Effectiveness to Avoid Deformations in ABS and PLA3D-Printed,» p. 19, 2022.
- [22] «Smartmaterials3d,» [En línea]. Available: <https://www.smartmaterials3d.com/en/>.
- [23] A. D. S. D. M. S. T. M. C. M. Azadi, «High-cycle bending fatigue properties of additive-manufactured ABS PLA polymers fabricated by fused deposition modeling 3D-printing.,» 2021.
- [24] «Autodesk,» [En línea]. Available: <https://www.autodesk.es/products/inventor/overview?term=1-YEAR&tab=subscription>.
- [25] «SKF,» [En línea]. Available: <https://www.skf.com/es>.
- [26] «NKS,» [En línea]. Available: <https://www.nskeurope.es/es.html>.
- [27] «Creality3dofficial,» [En línea]. Available: https://creality3dofficial.com/?sscid=b1k7_5qbqg&.
- [28] M. p. l. t. e. y. e. r. domagráfico, «Ministerio para la transición ecológica y el reto domagráfico,» 2023. [En línea]. Available: <https://www.miteco.gob.es/es/cambio-climatico/temas/mitigacion-politicas-y-medidas/agricola.html#principales-caracteristicas-del-sector>.
- [29] M. p. l. t. e. y. e. r. domagráfico, «Ministerio para la transición ecológica y el reto domagráfico,» 2023. [En línea]. Available: <https://www.miteco.gob.es/es/cambio-climatico/temas/mitigacion-politicas-y-medidas/agricola.html>.

11. Anexos

11.1. Anexo 1. Cálculos cinemáticos realizados en Excel

En las siguientes tablas se muestran todos los valores necesarios para el cálculo de la aceleración del punto 7 (Tabla 7: Cálculos cinemáticos, Tabla 8: Cálculos cinemáticos, Tabla 9: Cálculos cinemáticos).

alfa(°)	r01x(m)	r01y(m)	v1x(m/s)	v1y(m/s)	beta(°)	r2y(m)	r12x(m)	r12y(m)	w12(rad/s)	v2y(m/s)
0	0,01	0	0	1,51663094	10,10418272	0,05611595	-0,01	0,05611595	0	1,51663094
10	0,009848078	0,001736482	-0,2633602	1,4935899	9,949103313	0,05787929	-0,00984808	0,05614281	-4,69089787	1,53978623
20	0,009396926	0,003420201	-0,51871833	1,4251669	9,489006096	0,05964028	-0,00939693	0,05622008	-9,22656636	1,51186826
30	0,008660254	0,005	-0,75831547	1,31344092	8,739037666	0,06133826	-0,00866025	0,05633826	-13,4600432	1,43000831
40	0,007660444	0,006427876	-0,97487157	1,1618067	7,723565551	0,06291077	-0,00766044	0,0564829	-17,2595889	1,29402282
50	0,006427876	0,007660444	-1,1618067	0,97487157	6,475004647	0,06429685	-0,00642788	0,05663641	-20,5134258	1,10672933
60	0,005	0,008660254	-1,31344092	0,75831547	5,032413496	0,06544053	-0,005	0,05678028	-23,1319916	0,87397543
70	0,003420201	0,009396926	-1,4251669	0,51871833	3,440015612	0,06629422	-0,0034202	0,0568973	-25,0480605	0,60438774
80	0,001736482	0,009848078	-1,4935899	0,2633602	1,745762688	0,06682162	-0,00173648	0,05697354	-26,2154997	0,30888294
90	6,12574E-19	0,01	-1,51663094	9,2905E-17	0	0,067	-6,1257E-19	0,057	-26,6075603	1,092E-16
100	-0,00173648	0,009848078	-1,4935899	-0,2633602	-1,745762688	0,06682162	0,00173648	0,05697354	-26,2154997	-0,30888294
110	-0,0034202	0,009396926	-1,4251669	-0,51871833	-3,440015612	0,06629422	0,0034202	0,0568973	-25,0480605	-0,60438774
120	-0,005	0,008660254	-1,31344092	-0,75831547	-5,032413496	0,06544053	0,005	0,05678028	-23,1319916	-0,87397543
130	-0,00642788	0,007660444	-1,1618067	-0,97487157	-6,475004647	0,06429685	0,00642788	0,05663641	-20,5134258	-1,10672933
140	-0,00766044	0,006427876	-0,97487157	-1,1618067	-7,723565551	0,06291077	0,00766044	0,0564829	-17,2595889	-1,29402282
150	-0,00866025	0,005	-0,75831547	-1,31344092	-8,739037666	0,06133826	0,00866025	0,05633826	-13,4600432	-1,43000831
160	-0,00939693	0,003420201	-0,51871833	-1,4251669	-9,489006096	0,05964028	0,00939693	0,05622008	-9,22656636	-1,51186826
170	-0,00984808	0,001736482	-0,2633602	-1,4935899	-9,949103313	0,05787929	0,00984808	0,05614281	-4,69089787	-1,53978623
180	-0,01	1,22515E-18	-1,8581E-16	-1,51663094	10,10418272	0,05611595	0,01	0,05611595	-3,3112E-15	-1,51663094
190	-0,00984808	-0,00173648	0,2633602	-1,4935899	9,949103313	0,05440633	0,00984808	0,05614281	4,69089787	-1,44739358
200	-0,00939693	-0,0034202	0,51871833	-1,4251669	9,489006096	0,05279988	0,00939693	0,05622008	9,22656636	-1,33846554
210	-0,00866025	-0,005	0,75831547	-1,31344092	8,739037666	0,05133826	0,00866025	0,05633826	13,4600432	-1,19687353
220	-0,00766044	-0,00642788	0,97487157	-1,1618067	7,723565551	0,05005502	0,00766044	0,0564829	17,2595889	-1,02959058
230	-0,00642788	-0,00766044	1,1618067	-0,97487157	6,475004647	0,04897596	0,00642788	0,05663641	20,5134258	-0,84301381
240	-0,005	-0,00866025	1,31344092	-0,75831547	5,032413496	0,04812002	0,005	0,05678028	23,1319916	-0,64265551
250	-0,0034202	-0,00939693	1,4251669	-0,51871833	3,440015612	0,04750037	0,0034202	0,0568973	25,0480605	-0,43304892
260	-0,00173648	-0,00984808	1,4935899	-0,2633602	1,745762688	0,04712547	0,00173648	0,05697354	26,2154997	-0,21783746
270	-1,8377E-18	-0,01	1,51663094	-2,7871E-16	1,23151E-15	0,047	1,8377E-18	0,057	26,6075603	-2,2982E-16
280	0,001736482	-0,00984808	1,4935899	0,2633602	-1,745762688	0,04712547	-0,00173648	0,05697354	26,2154997	0,21783746
290	0,003420201	-0,00939693	1,4251669	0,51871833	-3,440015612	0,04750037	-0,0034202	0,0568973	25,0480605	0,43304892
300	0,005	-0,00866025	1,31344092	0,75831547	-5,032413496	0,04812002	-0,005	0,05678028	23,1319916	0,64265551
310	0,006427876	-0,00766044	1,1618067	0,97487157	-6,475004647	0,04897596	-0,00642788	0,05663641	20,5134258	0,84301381
320	0,007660444	-0,00642788	0,97487157	1,1618067	-7,723565551	0,05005502	-0,00766044	0,0564829	17,2595889	1,02959058
330	0,008660254	-0,005	0,75831547	1,31344092	-8,739037666	0,05133826	-0,00866025	0,05633826	13,4600432	1,19687353
340	0,009396926	-0,0034202	0,51871833	1,4251669	-9,489006096	0,05279988	-0,00939693	0,05622008	9,22656636	1,33846554
350	0,009848078	-0,00173648	0,2633602	1,4935899	-9,949103313	0,05440633	-0,00984808	0,05614281	4,69089787	1,44739358
360	0,01	-2,4503E-18	3,7162E-16	1,51663094	-10,10418272	0,05611595	-0,01	0,05611595	6,6224E-15	1,51663094

Tabla 7: Cálculos cinemáticos

alfa(°)	gamma(°)	delta(°)	r34x(m)	r34y(m)	r54x(m)	r54y(m)	W45(rad/s)	W34(rad/s)	V4x(m/s)	V4y(m/s)
0	76,75	0,45	0,01100162	0,0467222	-0,08499738	0,00066758	-17,8103287	-0,25447959	0,01188985	1,51383125
10	76,74	0,74	0,01100977	0,04672028	-0,08499291	0,00109778	-18,0616683	-0,42439312	0,01982777	1,53511376
20	76,69	1,02	0,01105054	0,04671066	-0,08498653	0,00151312	-17,7148888	-0,57384681	0,02680476	1,50552695
30	76,6	3,06	0,0111239	0,04669324	-0,08487881	0,00453744	-16,6357844	-1,61659226	0,07548393	1,4120255
40	76,48	4,1	0,01122167	0,04666984	-0,08478247	0,00607728	-15,0042527	-1,9538332	0,09118509	1,27209755
50	76,35	5,02	0,01132753	0,04664426	-0,08467396	0,0074378	-12,7974848	-2,04065993	0,09518507	1,0836137
60	76,22	5,78	0,01143333	0,04661844	-0,08456785	0,00856027	-10,0842595	-1,85171244	0,08632394	0,85280418
70	76,11	6,34	0,01152281	0,0465964	-0,08448015	0,0093864	-6,96288744	-1,40260667	0,06535643	0,58822577
80	76,04	6,69	0,01157973	0,04658229	-0,08442123	0,00990228	-3,55516748	-0,7557434	0,03520426	0,30013163
90	76,02	6,81	0,01159599	0,04657825	-0,08440031	0,01007907	-1,2565E-15	-2,719E-16	1,2665E-17	1,0605E-16
100	76,04	6,69	0,01157973	0,04658229	-0,08442123	0,00990228	3,55516748	0,7557434	-0,03520426	-0,30013163
110	76,11	6,34	0,01152281	0,0465964	-0,08448015	0,0093864	6,96288744	1,40260667	-0,06535643	-0,58822577
120	76,22	5,78	0,01143333	0,04661844	-0,08456785	0,00856027	10,0842595	1,85171244	-0,08632394	-0,85280418
130	76,35	5,02	0,01132753	0,04664426	-0,08467396	0,0074378	12,7974848	2,04065993	-0,09518507	-1,0836137
140	76,48	4,1	0,01122167	0,04666984	-0,08478247	0,00607728	15,0042527	1,9538332	-0,09118509	-1,27209755
150	76,6	3,06	0,0111239	0,04669324	-0,08487881	0,00453744	16,6357844	1,61659226	-0,07548393	-1,4120255
160	76,69	1,02	0,01105054	0,04671066	-0,08498653	0,00151312	17,7148888	0,57384681	-0,02680476	-1,50552695
170	76,74	0,74	0,01100977	0,04672028	-0,08499291	0,00109778	18,0616683	0,42439312	-0,01982777	-1,53511376
180	76,75	-0,45	0,01100162	0,0467222	-0,08499738	-0,00066758	17,8763278	-0,2554226	0,01193391	-1,519441
190	76,71	-1,6	0,01103423	0,04671451	-0,08496686	-0,00237334	17,1479404	-0,87120423	0,04069788	-1,45700665
200	76,64	-2,7	0,0110913	0,046701	-0,08490564	-0,00400405	15,9427123	-1,36689567	0,06383539	-1,35362618
210	76,53	-3,7	0,01118094	0,04667962	-0,08482283	-0,00548525	14,3322744	-1,68416236	0,07861605	-1,21570404
220	76,42	-4,53	0,01127054	0,04665807	-0,08473447	-0,00671339	12,3878687	-1,78242722	0,08316461	-1,04967949
230	76,3	-5,33	0,01136823	0,04663436	-0,08463248	-0,00789581	10,1926903	-1,72575748	0,08047959	-0,86263262
240	76,2	-5,92	0,01144961	0,04661445	-0,08454668	-0,00876688	7,79984849	-1,4669342	0,06838032	-0,65945133
250	76,11	-6,35	0,01152281	0,0465964	-0,08447851	-0,00940114	5,27120386	-1,06350125	0,04955533	-0,44530344
260	76,06	-6,61	0,01156347	0,04658633	-0,08443498	-0,00978439	2,65634917	-0,55790548	0,02599077	-0,22428879
270	76,04	-6,7	0,01157973	0,04658229	-0,08441951	-0,00991701	2,8042E-15	-5,97E-16	2,7809E-17	-2,3673E-16
280	76,06	-6,61	0,01156347	0,04658633	-0,08443498	-0,00978439	-2,65634917	0,55790548	-0,02599077	0,22428879
290	76,11	-6,35	0,01152281	0,0465964	-0,08447851	-0,00940114	-5,27120386	1,06350125	-0,04955533	0,44530344
300	76,2	-5,92	0,01144961	0,04661445	-0,08454668	-0,00876688	-7,79984849	1,4669342	-0,06838032	0,65945133
310	76,3	-5,33	0,01136823	0,04663436	-0,08463248	-0,00789581	-10,1926903	1,72575748	-0,08047959	0,86263262
320	76,42	-4,53	0,01127054	0,04665807	-0,08473447	-0,00671339	-12,3878687	1,78242722	-0,08316461	1,04967949
330	76,53	-3,7	0,01118094	0,04667962	-0,08482283	-0,00548525	-14,3322744	1,68416236	-0,07861605	1,21570404
340	76,64	-2,7	0,0110913	0,046701	-0,08490564	-0,00400405	-15,9427123	1,36689567	-0,06383539	1,35362618
350	76,71	-1,6	0,01103423	0,04671451	-0,08496686	-0,00237334	-17,1479404	0,87120423	-0,04069788	1,45700665
360	76,75	-0,45	0,01100162	0,0467222	-0,08499738	-0,00066758	-17,8763278	0,2554226	-0,01193391	1,519441

Tabla 8: Cálculos cinemáticos

alfa(°)	a1x(m/s²)	a1y(m/s)	a12(rad/s²)	a2y(m/s²)	a45(rad/s²)	a34(rad/s²)	a4x(m/s²)	a4y(m/s²)	a4(m/s²)	r57y(m)	r57x(m)	a7x(m/s²)	a7y(m/s²)	a7(m/s)
0	-230,01694	0	-4098,95821	40,9895821	-409,2496826	-582,929519	27,2350397	34,573388	44,0121182	0,19999383	0,00157078	81,3491483	-64,0824464	103,557925
10	-226,522466	-39,9420224	-4030,89468	-1,48085488	89,91615908	-591,391747	27,6280071	-8,00035863	28,7630408	0,19998332	0,00258302	-18,8243732	-65,0070756	67,6777431
20	-216,145221	-78,6704267	-3830,39747	-47,4624534	624,6840541	-550,809177	25,7250201	-53,5645742	59,4217154	0,19996831	0,00356028	-126,034292	-60,5294591	139,815801
30	-199,200513	-115,00847	-3507,94463	-94,8357372	1155,250771	-391,434318	18,2482665	-99,3120399	100,974653	0,19971484	0,01067634	-233,675388	-42,9370977	237,587418
40	-176,203198	-147,852039	-3079,1835	-141,090007	1675,480555	-191,715721	8,90450406	-143,419538	143,6957	0,19948816	0,01429949	-337,457737	-20,9517742	338,107529
50	-147,852039	-176,203198	-2562,78949	-183,562541	2149,830601	44,4920567	-2,12247025	-183,252796	183,265087	0,19923284	0,01750069	-431,183049	4,99404764	431,211969
60	-115,00847	-199,200513	-1978,38102	-219,691112	2551,126498	283,133026	-13,2384229	-216,613805	217,017963	0,19898318	0,0201418	-509,679541	31,1492303	510,630502
70	-78,6704267	-216,145221	-1344,95978	-247,242854	2855,923493	486,9134	-22,7110819	-241,723911	242,788473	0,19877682	0,02208564	-568,762144	53,4378397	571,266995
80	-39,9420224	-226,522466	-680,116048	-264,496662	3046,229805	624,507378	-29,0975978	-257,291639	258,931762	0,1986382	0,02329948	-605,392091	68,4649359	609,251205
90	-1,409E-14	-230,01694	-2,3959E-13	-270,370789	3110,943894	673,177253	-31,3554153	-262,56463	264,430231	0,19858897	0,02371545	-617,79913	73,7774479	622,188779
100	39,9420224	-226,522466	680,1160483	-264,496662	3046,229805	624,507378	-29,0975978	-257,291639	258,931762	0,1986382	0,02329948	-605,392091	68,4649359	609,251205
110	78,6704267	-216,145221	1344,959783	-247,242854	2855,923493	486,9134	-22,7110819	-241,723911	242,788473	0,19877682	0,02208564	-568,762144	53,4378397	571,266995
120	115,00847	-199,200513	1978,381017	-219,691112	2551,126498	283,133026	-13,2384229	-216,613805	217,017963	0,19898318	0,0201418	-509,679541	31,1492303	510,630502
130	147,852039	-176,203198	2562,789492	-183,562541	2149,830601	44,4920567	-2,12247025	-183,252796	183,265087	0,19923284	0,01750069	-431,183049	4,99404764	431,211969
140	176,203198	-147,852039	3079,183496	-141,090007	1675,480555	-191,715721	8,90450406	-143,419538	143,6957	0,19948816	0,01429949	-337,457737	-20,9517742	338,107529
150	199,200513	-115,00847	3507,944629	-94,8357372	1155,250771	-391,434318	18,2482665	-99,3120399	100,974653	0,19971484	0,01067634	-233,675388	-42,9370977	237,587418
160	216,145221	-78,6704267	3830,397466	-47,4624534	624,6840541	-550,809177	25,7250201	-53,5645742	59,4217154	0,19996831	0,00356028	-126,034292	-60,5294591	139,815801
170	226,522466	-39,9420224	4030,89468	-1,48085488	89,91615908	-591,391747	27,6280071	-8,00035863	28,7630408	0,19998332	0,00258302	-18,8243732	-65,0070756	67,6777431
180	230,01694	-2,818E-14	4098,95821	40,9895821	-405,1997644	-575,577278	26,8915215	34,6542521	43,8642351	0,19999383	-0,00157078	81,5394168	-63,2741681	103,209965
190	226,522466	39,9420224	4030,89468	78,4031899	-850,2491137	-491,819509	22,9667336	72,9408821	76,4711915	0,19992202	-0,00558433	171,625605	-54,0393732	179,932215
200	216,145221	78,6704267	3830,397466	109,8784	-1234,513907	-356,697795	16,6374195	105,834902	107,134636	0,19977797	-0,00942129	249,023298	-39,1468695	252,081496
210	199,200513	115,00847	3507,944629	135,181203	-1553,617702	-191,379933	8,90182829	132,908993	133,206768	0,19958312	-0,01290646	312,727043	-20,9454783	313,427689
220	176,203198	147,852039	3079,183496	154,61407	-1808,216214	-19,2857632	0,86402938	154,248475	154,250894	0,19937522	-0,01579621	362,937587	-2,03301029	362,943281
230	147,852039	176,203198	2562,789492	168,843856	-2003,84063	150,008485	-7,02940667	170,410299	170,555219	0,19913524	-0,01857839	400,965409	16,5397804	401,306397
240	115,00847	199,200513	1978,381017	178,709914	-2145,887256	292,709137	-13,6691124	181,961009	182,473706	0,19893338	-0,02062795	428,14355	32,1626175	429,349896
250	78,6704267	216,145221	1344,959783	185,047587	-2241,529952	401,589414	-18,7256548	189,622325	190,544683	0,19877296	-0,02212033	446,170177	44,0603643	448,340432
260	39,9420224	226,522466	680,1160483	188,548269	-2296,358559	469,431482	-21,872689	193,962027	195,191399	0,19867054	-0,0230221	456,381239	51,4651506	459,27388
270	4,2271E-14	230,01694	7,18767E-13	189,663091	-2314,255176	492,687192	-22,9504979	195,368277	196,71169	0,19863413	-0,02333415	459,690063	54,0011714	462,851035
280	-39,9420224	226,522466	-680,116048	188,548269	-2296,358559	469,431482	-21,872689	193,962027	195,191399	0,19867054	-0,0230221	456,381239	51,4651506	459,27388
290	-78,6704267	216,145221	-1344,95978	185,047587	-2241,529952	401,589414	-18,7256548	189,622325	190,544683	0,19877296	-0,02212033	446,170177	44,0603643	448,340432
300	-115,00847	199,200513	-1978,38102	178,709914	-2145,887256	292,709137	-13,6691124	181,961009	182,473706	0,19893338	-0,02062795	428,14355	32,1626175	429,349896
310	-147,852039	176,203198	-2562,78949	168,843856	-2003,84063	150,008485	-7,02940667	170,410299	170,555219	0,19913524	-0,01857839	400,965409	16,5397804	401,306397
320	-176,203198	147,852039	-3079,1835	154,61407	-1808,216214	-19,2857632	0,86402938	154,248475	154,250894	0,19937522	-0,01579621	362,937587	-2,03301029	362,943281
330	-199,200513	115,00847	-3507,94463	135,181203	-1553,617702	-191,379933	8,90182829	132,908993	133,206768	0,19958312	-0,01290646	312,727043	-20,9454783	313,427689
340	-216,145221	78,6704267	-3830,39747	109,8784	-1234,513907	-356,697795	16,6374195	105,834902	107,134636	0,19977797	-0,00942129	249,023298	-39,1468695	252,081496
350	-226,522466	39,9420224	-4030,89468	78,4031899	-850,2491137	-491,819509	22,9667336	72,9408821	76,4711915	0,19992202	-0,00558433	171,625605	-54,0393732	179,932215
360	-230,01694	5,6361E-14	-4098,95821	40,9895821	-405,1997644	-575,577278	26,8915215	34,6542521	43,8642351	0,19999383	-0,00157078	81,5394168	-63,2741681	103,209965
													acel.máxima	622,188779

Tabla 9: Cálculos cinemáticos

11.2. Anexo 2. Estudio de engranajes reductores de velocidad

Se comienza diseñando los engranajes directamente con una función de inventor que permite realizar engranajes fácilmente. Se introducen los valores de módulo de los engranajes previamente calculados, número de dientes, anchura de cara y ángulo de presión.

Se ponga el ángulo de presión que se ponga salta el aviso de que hay algún fallo de diseño, tras comprobar los cálculos hechos a mano y no encontrar ningún fallo se procede a realizarlos en Excel para así tener precisión con los valores obtenidos ya que arrastra más decimales. Se obtienen resultados prácticamente idénticos (Tabla 10: Cálculos realizados en Excel).

Cálculo engranajes	
Datos:	
Dext2(mm)	76,5
Dcc(mm)	47
Símbolo	Nombre
Z	nº dientes
Dprim	Diámetro primitivo
Dext	Diámetro exterior
Dint	Diámetro interior
P	Paso
m	Módulo
Dcc	Distancia entre los centro de los engranajes
S	Espesor del diente
Ang.esp	Ángulo de espesor
P.diente	Pie del diente
Fórmulas aplicadas	
$P=(360/Z)*(2*PI/360)$	
$P=PI*Dprim/Z$	
$Dext=Dprim+2*m$	
$Dprim=Z*m$	
$Dcc=(Dprim1+Dprim2)/2$	
$S=P/(19/40)$	
$Ang.esp=(360*S)/(2*Pi*Dprim/2)$	
$P.diente=1,25*m$	

Unidades en mm			
Dientes matemáticamente perfectos			
Engranaje 1 (14 dientes)		Engranaje 2 (58 dientes)	
Z	14	Z	58
Dext1	20,4	Dext	76,5
P	0,448798951	P	0,10833078
Dprim1	17,85	Dprim2	73,95
m	1,275	m	1,275
S	0,944839896	S	0,2280648
Ang.esp	6,065584128	Ang.esp	0,35340502
P.diente	1,59375	P.diente	1,59375

Tabla 10: Cálculos realizados en Excel

Tras esta comprobación se decide realizar el diseño del engranaje de 14 dientes realizando un boceto en Inventor. Utilizando los datos de Excel y variando igualmente el ángulo de presión, se comprueba que tampoco se obtiene un engranaje “perfecto”.

En las imágenes de boceto que aparecen a continuación se comprueba que independientemente del ángulo de presión que ponga, nunca se obtiene un diente que corte al diámetro exterior del engranaje como por ejemplo el que aparece en la siguiente foto (que no es correcto, ya que mantiene datos del engranaje, pero simplemente se ha variado el ángulo de espesor para intentar que se vea lo que se intenta decir) (Ilustración 128: Diseño de diente de engranaje mediante boceto).

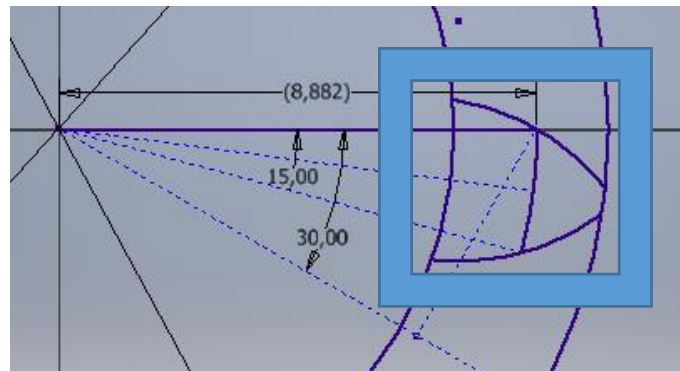


Ilustración 128: Diseño de diente de engranaje mediante boceto

El arco de línea que aparece entre las dos circunferencias (diámetro interior y exterior del engranaje) es el diámetro primitivo.

A continuación, se muestran dos imágenes de cada ángulo de precisión, el engranaje realizado en boceto, donde se visualiza que no es correcto y otra imagen donde aparecen los fallos que da Inventor cuando se utiliza su función de creación de engranajes.

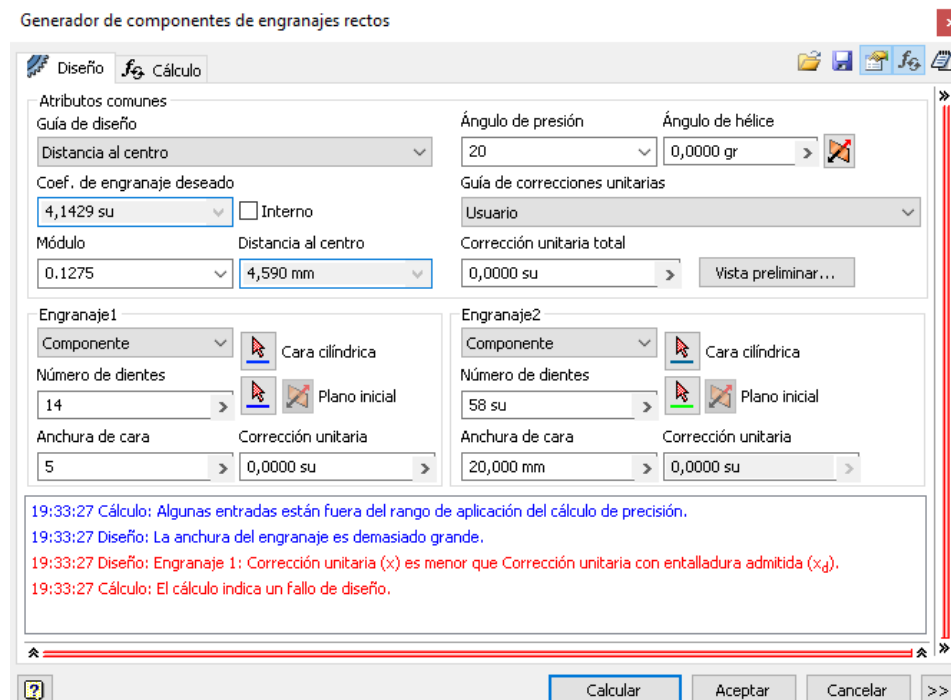


Ilustración 129: Diseño de engranajes con ángulo de presión de 20° utilizando función de inventor

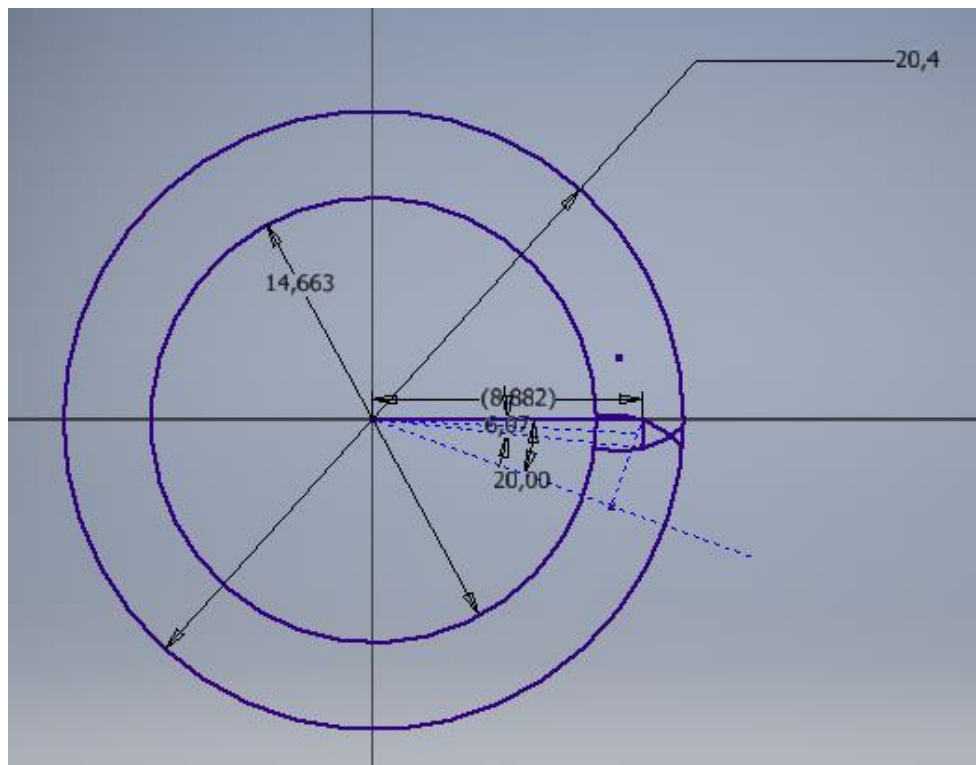


Ilustración 130: Diseño de engranaje con ángulo de presión de 20° mediante boceto de Inventor

Generador de componentes de engranajes rectos

Diseño **Cálculo**

Atributos comunes

Guía de diseño

Distancia al centro

Coef. de engranaje deseado

4,1429 su ☐ Interno

Módulo

0,1275

Distancia al centro

4,590 mm

Ángulo de presión

30

Ángulo de hélice

0,0000 gr

Guía de correcciones unitarias

Usuario

Corrección unitaria total

0,0000 su

Vista preliminar...

Engranaje1

Componente

Cara cilíndrica

Número de dientes

14

Plano inicial

Anchura de cara

5

Corrección unitaria

0,0000 su

Engranaje2

Componente

Cara cilíndrica

Número de dientes

58 su

Plano inicial

Anchura de cara

20,000 mm

Corrección unitaria

0,0000 su

19:34:14 Diseño: La punta del diente de la herramienta está truncada.

19:34:14 Cálculo: Algunas entradas están fuera del rango de aplicación del cálculo de precisión.

19:34:14 Diseño: La anchura del engranaje es demasiado grande.

19:34:14 Diseño: Engranaje 1: Corrección unitaria (x) es menor que Corrección unitaria sin concidad (x_2).

19:34:15 Cálculo: El cálculo indica un fallo de diseño.

Calcular Aceptar Cancelar >>

Ilustración 131:Diseño de engranajes con ángulo de presión de 30° utilizando función de inventor

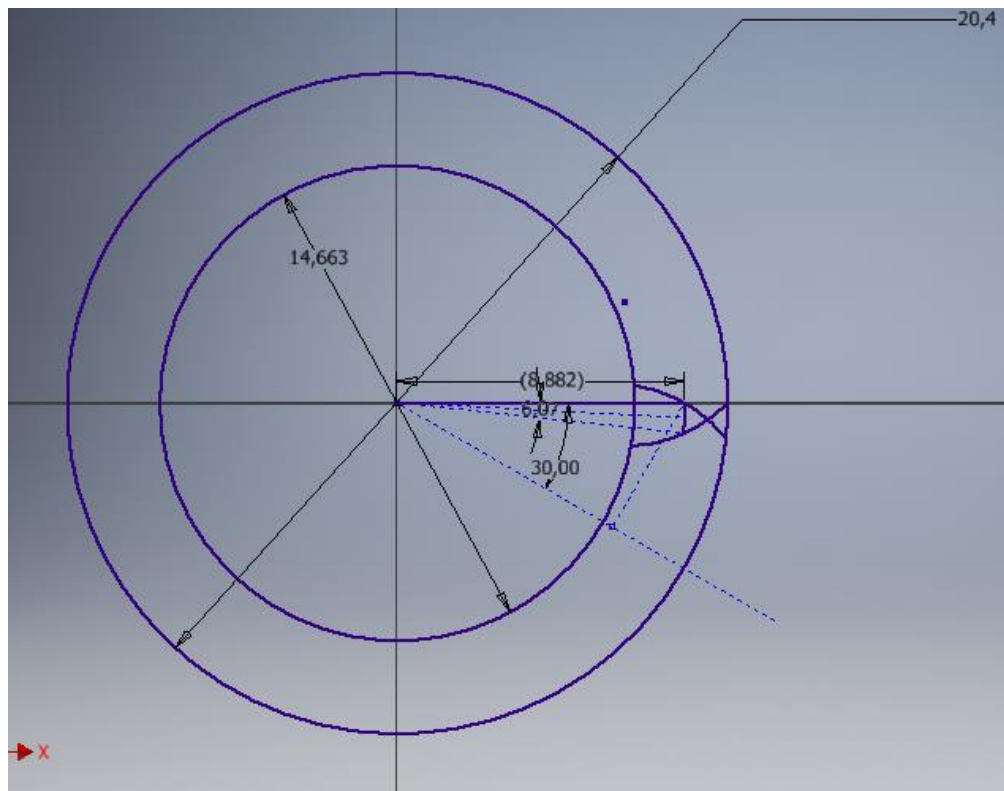


Ilustración 132: Diseño de engranaje con ángulo de presión de 30° mediante boceto de Inventor

Generador de componentes de engranajes rectos

Diseño **Cálculo**

Atributos comunes

Guía de diseño: Distancia al centro

Coef. de engranaje deseado: 4,1429 su ☐ Interno

Módulo: 0,1275 Distancia al centro: 4,590 mm

Ángulo de presión: 35 Ángulo de hélice: 0,0000 gr

Guía de correcciones unitarias: Usuario

Corrección unitaria total: 0,0000 su [Vista preliminar...](#)

Engranaje1

Componente:

Número de dientes: 14

Anchura de cara: 5 Corrección unitaria: 0,0000 su

Engranaje2

Componente:

Número de dientes: 58 su

Anchura de cara: 20,000 mm Corrección unitaria: 0,0000 su

19:35:33 Diseño: La punta del diente de la herramienta está truncada.
 19:35:33 Cálculo: Algunas entradas están fuera del rango de aplicación del cálculo de precisión.
 19:35:33 Cálculo: Algunas entradas están fuera del rango de aplicación del cálculo de resistencia.
 19:35:33 Diseño: La anchura del engranaje es demasiado grande.
 19:35:33 Diseño: La unidad del grosor del diente exterior es pequeña.
 19:35:33 Cálculo: El cálculo indica un fallo de diseño.

[Calcular](#) [Aceptar](#) [Cancelar](#) [>>](#)

Ilustración 133: Diseño de engranajes con ángulo de presión de 35° utilizando función de inventor

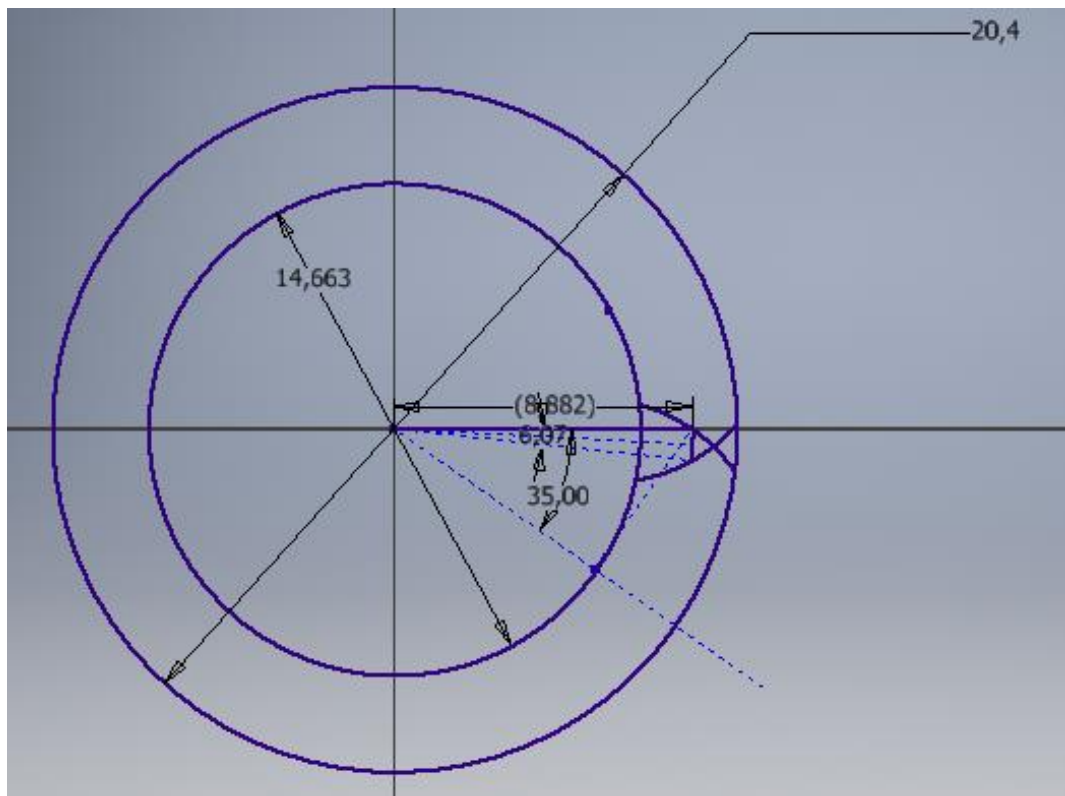


Ilustración 134: Diseño de engranaje con ángulo de presión de 35° mediante boceto de Inventor

Tras encontrar este fallo, donde supuestamente no es posible diseñar un engranaje perfecto con los datos que se habían medido en la pieza propia del corta-setos, se ha vuelto a montar para comprobarlo (Ilustración 135: Engranajes reductores de velocidad).



Ilustración 135: Engranajes reductores de velocidad

Se comprueba que la distancia entre el diámetro interior de un engranaje y el exterior del otro cuando los dientes están engranados es considerable en proporción al tamaño de los dientes y que cuando se fija uno, por ejemplo, el pequeño se puede mover notablemente el engranaje grande, es decir, tienen holgura.

Para que fuese posible la fabricación de esta reducción de velocidad por engranajes el fabricante optó por realizar engranajes con tolerancias significativas, como consecuencia se supone que elegiría un material con altas propiedades mecánicas para la fabricación de los mismos, para así, lidiar con el desgaste que pueden sufrir las piezas.