

AREA DE INGENIERÍA MECÁNICA

Departamento de Ingeniería Mecánica

Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial



**VNiVERSiDAD  
D SALAMANCA**

---

**Trabajo Fin de Grado**

**Grado en Ingeniería Mecánica**

**Simulación y Análisis de Sistemas  
Mecánicos Utilizando Herramientas  
Informáticas I**

**Analisis, simulación y prototipado de  
un mecanismo de amasadora**

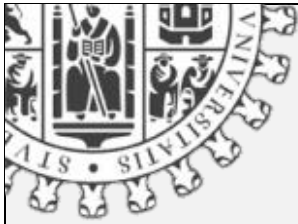
---

**Autor:** Francisco Añez Castaño

**Director:** Miguel Ángel Lorenzo Fernández

**Febrero 2022**





# Índice

## Capítulo I: Introducción

1.1. Presentación.....	5
1.2. Objetivos.....	10
1.3. Planteamiento.....	11

## Capítulo II: Presentación del sistema mecánico

2.1. Definición del mecanismo.....	12
2.2. Análisis de movimiento del mecanismo.....	19

## Capítulo III: Análisis teórico

3.1. Introducción .....	21
3.2. Análisis de posición.....	23
3.3. Análisis cinemático .....	29
3.4. Análisis de la trayectoria de la correa.....	32
3.2. Análisis con herramienta de cálculo informática.....	35

## Capítulo IV: Diseño y simulación del mecanismo de amasado

4.1. Diseño del mecanismo.....	40
4.2. Ensamblaje.....	55
4.3. Simulación Dinámica.....	62

## Capítulo V: Diseño y construcción de prototipo

5.1. Introducción.....	114
5.2. Adaptación del diseño de piezas.....	114
5.3. Impresión de las piezas del prototipo.....	128
5.4. Programación con Arduino para la motorización del prototipo.....	134
5.5. Montaje del prototipo.....	142

## Capítulo VI: Conclusiones

6.1. Conclusiones.....	148
------------------------	-----

## Bibliografía

Bibliografía .....	151
--------------------	-----

## Anexos

Anexo I: Planos.....	153
----------------------	-----







# Capítulo I: Introducción

## 1.1. Presentación

El principal mercado en el cual se emplean las amasadoras es en la industria del pan. A primera vista puede parecer que es un proceso simple, pero en realidad tiene una gran complejidad; ocurren en la masa una serie de cambios físicos y químicos que transcurren desde el amasado y la posterior fermentación hasta la cocción.

El amasado como primera etapa es clave en la calidad final del pan. Hay varios factores que influyen, como son: el tipo de amasadora, la duración del amasado, la velocidad de esta o la capacidad de ocupación. Durante el proceso de amasado los distintos componentes de la harina (proteínas, encimas, almidón, grasas o almidón) se aglutinan y junto con los demás ingredientes la masa va adquiriendo unas propiedades plásticas que inicialmente no tenía.

Durante el proceso de amasado se van formando microalveolos, que posteriormente serán las capsulas en las que el gas resultante del proceso de fermentación se almacenará.

La etapa de amasado confiere a la mezcla una oxidación durante el transcurso de esta, al estar la masa en contacto directo con el aire, pero variará en función de la intensidad del amasado, del volumen de la masa o del tipo de amasadora.

En la etapa del amasado, la velocidad y el tiempo juegan un papel muy importante, dado que hacen que varíe la temperatura de la mezcla, a mayor tiempo y mayor velocidad, mayor temperatura y por lo tanto menor tiempo posterior de reposo.[1]

Los principales tipos de amasadoras que se emplean en el sector de la alimentación son:

#### A. Amasadora Espiral

Como se puede observar en la Figura 1.1 la amasadora consta de un recipiente que gira respecto a un eje, mientras que el elemento de amasado formado por una barra en forma espiral que permanece rotando en un punto concreto sin la posibilidad de desplazarse.



Figura 1. 1. Amasadora espiral

Ventajas e inconvenientes:

Tabla 1.1. Ventajas e inconvenientes de las amasadoras tipo espiral

Ventajas	Inconvenientes
<p>Escaso volumen de la maquina</p> <p>Adecuada para el pan precocido</p> <p>Permite hacer masas grandes y pequeñas</p> <p>Amasa rápido</p> <p>Precisión en el tiempo de amasado</p> <p>Fácil descarga al invertir el sentido de la cazuela</p> <p>Adecuada para el entablado automático de barras</p>	<p>Poca fuerza</p> <p>Disponer siempre de agua fría o incluso de hielo</p> <p>Recalentamiento de la masa</p> <p>Baja oxidación</p> <p>No es adecuada para masas duras</p>

## B. Amasadora de brazos

En la Figura 1.2 se puede observar un modelo de amasador de brazos, la cual consta de cuatro barras simétricas dos a dos, las cuales son dos manivelas y dos bielas, y por otro lado el recipiente permanece estático.



Figura 1. 2. Amasadora de brazos

### Ventajas e inconvenientes:

Tabla 2.2 Ventajas e inconvenientes de las amasadoras de brazos

Ventajas	Inconvenientes
<p>Poco derrame de harina al inicio</p> <p>Apta para masas blandas y bollería</p> <p>Se adapta bien a masas duras</p> <p>No recalienta la masa</p> <p>Fácil manejo para trabajadores no iniciados</p> <p>Reduce el tiempo de fermentación</p>	<p>Demasiada fuerza de amasado</p> <p>Panes voluminosos</p> <p>Hay que incorporar la levadura al final</p> <p>Velocidad lenta</p> <p>Mucha oxidación</p> <p>En masas blandas hay que añadir parte del agua de poco en poco para reducir el tiempo de amasado</p>

### C. Amasadora de eje oblicuo:

Las amasadoras de eje oblicuo constan de un acoplador que forma un ángulo con la horizontal. En algunas de ellas dicho ángulo permanece constante y no se puede variar, sin embargo en algunos casos hay modelos que permiten pequeñas modificaciones de dicha inclinación. Por otro lado, al igual que el caso anterior, el recipiente permanece estático. El modelo se puede visualizar en la Figura 1.3.



Figura 1. 3. Amasadora de eje oblicuo

#### Ventajas e inconvenientes:

Tabla 3.3 Ventajas e inconvenientes de las amasadoras de eje oblicuo

Ventajas	Inconvenientes
<p>Flexibilidad de la corrección de las condiciones del amasado por la utilización del freno</p> <p>Se adapta bien a masas duras como blandas</p> <p>No recalienta la masa</p>	<p>No permite masas grandes porque derrama parte de la harina</p> <p>No apta para trabajadores en fase de iniciación</p> <p>Maquina muy voluminosa</p> <p>Hay que estar constantemente atendiendo el proceso de amasado</p>

Una amasadora con una configuración más compleja es la que se muestra en la Figura 2.1 que, frente a las otras, presenta la posibilidad de modificar las trayectorias al cambiar una de las longitudes de las barras.

Es un mecanismo que está formado por seis barras y que va a ofrecer, debido a la complejidad del trazado del extremo del acoplador, una gran versatilidad que puede presentar diferentes aplicaciones en el proceso de amasado.

Por un lado, no tiene la limitación de tener únicamente dos opciones de velocidad como la mayoría de los modelos del mercado, sino que cambiando la longitud de una de sus barras se pueden conseguir variaciones en la velocidad sin modificar la velocidad del motor.

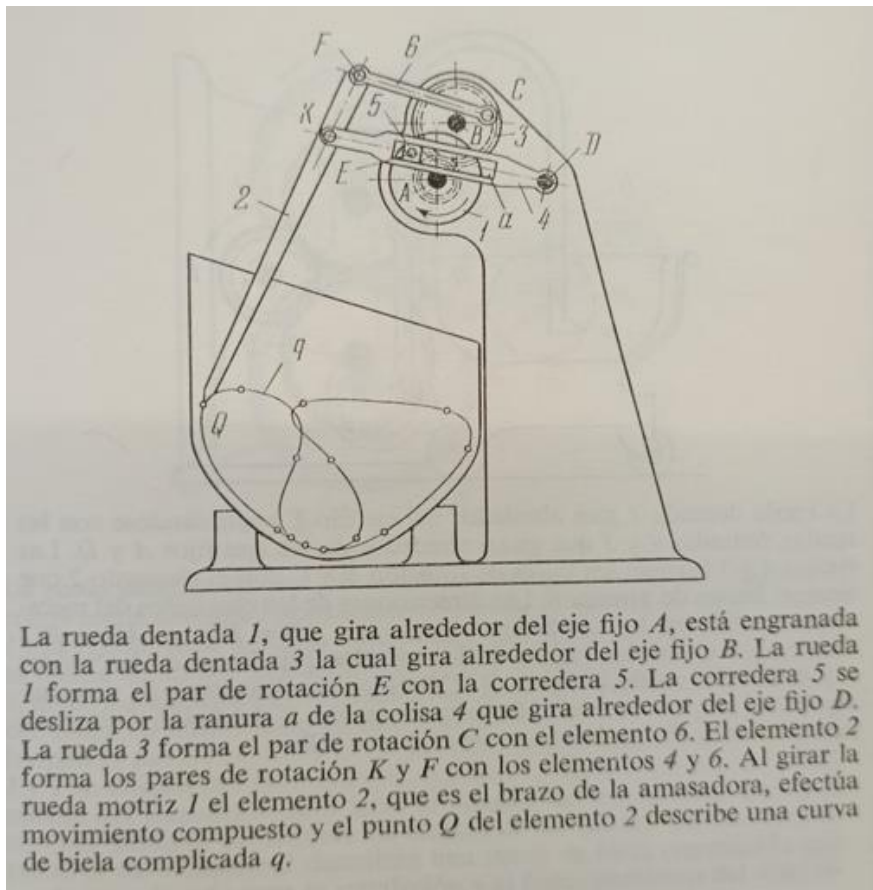


Figura 2. 1 Mecanismo de estudio

## 1.2. Objetivos

El objetivo principal será el estudio del sistema mecánico de una maquina amasadora formada por seis barras que permite realizar trayectorias complejas y determinar la influencia de la longitud de una de las barras en el funcionamiento y para eso se plantean tres vías de análisis: el análisis teórico del mecanismo, la simulación a partir de la creación de un modelo virtual en CAD/CAE y finalmente la creación de un prototipo siguiendo esa secuencia.

### 1. Análisis teórico:

1.1. Se obtendrán unas ecuaciones que darán solución al problema cinemático del mecanismo, siendo puntos centrales del estudio la posición y la velocidad.

1.2. Se desarrollará un programa mediante herramientas de cálculo informático (Excel) con el que se podrá automatizar la obtención de los resultados de las ecuaciones de objetivo 1.2 relativas a la posición y a la cinemática.

### 2. Análisis mediante una simulación:

2.1. Se diseñarán las piezas que conforman el mecanismo de una manera tal que puedan ser ensambladas para poder visualizar el movimiento de dicho conjunto.

2.2. Se obtendrán los datos relativos a la posición y a la cinemática para poder ser comparados con los datos conseguidos en el objetivo 1.

2.3. Diseño de varios modelos variando la longitud de una de las barras del ensamblaje para la posterior obtención de los datos y su comparación y poder conocer la influencia de dicha longitud sobre la posición y la velocidad.

### 3. Diseño de Prototipo:

3.1. Adaptar el diseño de las piezas obtenidas en el objetivo 2.1 para poder ser ensambladas de una forma sencilla.

3.2. Automatización del mecanismo mediante Arduino UNO.

3.3. Ajuste del mecanismo de tal forma que pueda reproducir el movimiento del ensamblaje del objetivo 2.1.

3.4. Adaptación del diseño para poder modificar la longitud de una barra y poder visualizar el cambio de tendencia de la curva trazada y la posterior comparación con el modelo simulado.

### 1.3. Planteamiento

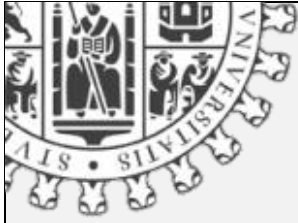
Se perseguirá cumplir los objetivos que se dividen en tres grandes bloques: el primero de los bloques será el análisis teórico, el segundo de los bloques será el entorno CAD/CAE y el último será el prototipado.

Dentro del objetivo teórico, la obtención de las ecuaciones de posición y cinemático será posible aplicando las ecuaciones de teoría de mecanismos, el método de Raven y la derivada del método de la ecuación de cierre para la velocidad. Para lograr el objetivo 1.2 se introducirán estas ecuaciones en una hoja Excel, la cual permite obtener los resultados de los problemas de posición y cinemáticos para los diferentes casos de estudio de forma automatizada

En los objetivos enmarcados en la simulación se diseñarán las piezas que conforman el mecanismo atendiendo a unas medidas obtenidas del mecanismo base obtenido de las fichas de Artobolevski, generando un modelo virtual y dotándolo de movimiento para poder facilitar la visualización del comportamiento del mecanismo y poder variar parámetros y obtener resultados. El segundo de los objetivos se podrá cumplir mediante las herramientas que brinda el programa “Autodesk Inventor”, generando un archivo con los datos deseados. El último de los objetivos de este bloque es el referente para poder variar una de las longitudes de las barras del mecanismo, de este modo variará la trayectoria y se podrá estudiar la influencia de esta variación, esto será posible generando varios modelos de los cuales se obtendrán archivos con los datos necesarios para su posterior comparación.

El último de los bloques generales es el relativo al prototipado. Para ello se adaptarán las piezas empleadas en el objetivo 2.1, así podrán ser impresas y montadas de una forma sencilla. También se dará respuesta a la motorización del mecanismo mediante un circuito electrónico dirigido por un microcontrolador, con el código necesario para que se active un motor paso a paso. A su vez se buscará una correspondencia entre el trazado de la simulación y el trazado del prototipo, generando piezas auxiliares que permitan modificar la longitud de una de las barras del mecanismo y de este modo poder comparar los diferentes casos generados al variar dicha dimensión con los obtenidos en la simulación.





## Capítulo II: Presentación del sistema mecánico

### 2.1. Definición del mecanismo

Un mecanismo es un sistema de elementos acomodados para transmitir movimiento de una forma determinada. En el mecanismo que se va a estudiar se encuentran tres cuerpos que realizan movimientos de rotación y tres cuerpos que realizan tanto rotación como traslación, es decir, realizan un movimiento complejo, como se puede observar en la figura 2.1, la cual se encuentra en la colección Artoboleveski. [2]

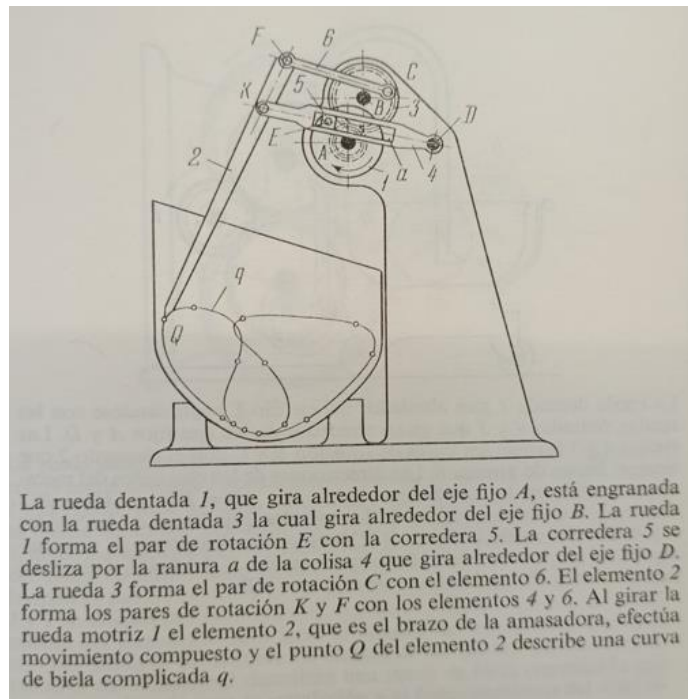


Figura 2. 2 Mecanismo de estudio

Se ha elegido este tipo de mecanismo de amasado, el cual no pertenece a ninguno de los grupos más empleados en el sector alimentario, debido a la versatilidad que tiene a la hora de generar un trazado diferente al variar una de las longitudes de sus barras.

Como inicio, se precisará “mecanismo” mediante la definición de Reuleaux:

Un mecanismo es una combinación de cuerpos resistentes conectados por medio de articulaciones móviles para formar una cadena cinemática cerrada con un eslabón fijo y cuyo propósito es transformar el movimiento. [3]

Los cuerpos resistentes que forman las diferentes partes de un mecanismo se denominan eslabones. De este modo los eslabones de un mecanismo deben estar conectados de tal forma que se transmita el movimiento de un primer eslabón impulsor a un eslabón seguidor, es decir, de un eslabón de entrada a uno de salida. Las uniones entre diferentes eslabones se definen como par cinemático. Esto quiere decir que el punto de unión entre dos eslabones mantiene una relación espacial constante. [3]

Dependiendo del número de nodos que se encuentren en un eslabón, se pueden encontrar diferentes denominaciones:

- Eslabón binario: El que tiene dos nodos
- Eslabón ternario: El que tiene tres nodos
- Eslabón cuaternario: El que tiene cuatro nodos

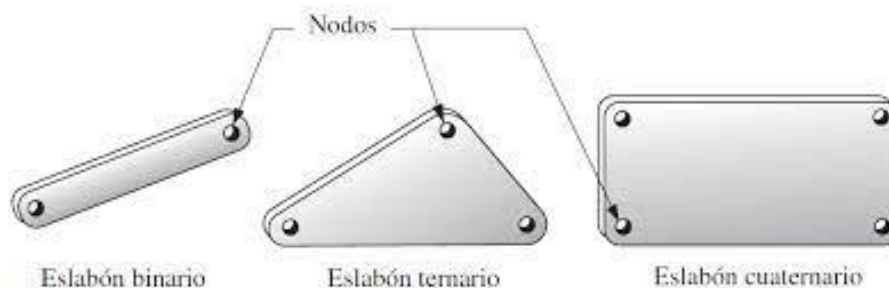


Figura 2. 3 Comparación de los diferentes tipos de eslabones

La unión de varios eslabones en un mismo punto por medio de una articulación se define como cadena cinemática. Las cadenas cinemáticas se pueden clasificar en dos tipos: [3]

- Cadena cinemática cerrada: Esto ocurre en los mecanismos formados por eslabones que están a su vez, cada uno de ellos, unido como mínimo a otros dos, formando uno o más circuitos. Se pueden distinguir dos clasificaciones:

- Cadena cinemática cerrada simple: Está formada por un único circuito cerrado
- Cadena cinemática cerrada compuesta: Está formado como mínimo por dos circuitos cerrados.
- Cadena cinemática abierta: Esto se localiza en los mecanismos cuyos eslabones no forman circuitos cerrados.

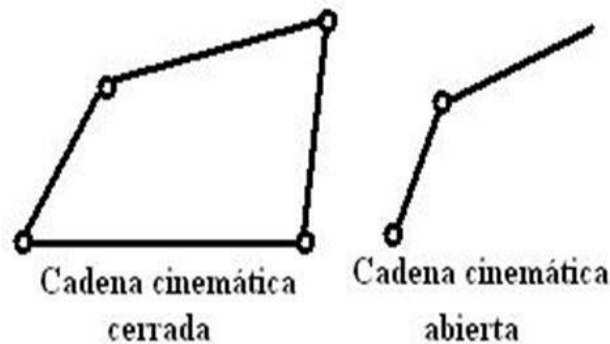


Figura 2. 4 Comparación de los diferentes tipos de cadenas cinemáticas

Un requisito necesario para que una cadena cinemática forme un mecanismo es que por lo menos uno de sus eslabones sea fijo o estacionario, esto permitirá tomarlo como referencia del sistema.

Una vez está definido cual es el eslabón fijo, se puede llevar a cabo el estudio cinemático y dinámico del mecanismo en cada una de las diferentes posiciones de dicho eslabón, dado que los demás eslabones que forman el mecanismo se desplazarán en función del eslabón fijo. [3]

A continuación, se deben denominar los diferentes eslabones y las uniones entre estos. Se comenzará explicando los diferentes tipos de movimientos que se pueden dar en los cuerpos solidos: [4]

- Rotación pura: El cuerpo posee un punto (centro de rotación) que nunca tiene movimiento con respecto al marco estacionario de referencia. Todos los demás puntos del cuerpo describen arcos o circunferencias respecto a ese centro. Una línea de referencia trazada en el cuerpo a través de su centro solo varía su posición angular.

- Traslación pura: Todos los puntos del cuerpo describen trayectorias paralelas curvilíneas o rectilíneas. Una línea de referencia trazada en el cuerpo cambia su posición lineal pero no su orientación angular.
- Movimiento complejo: Es una combinación simultánea de rotación y traslación. Cualquier línea de referencia trazada en el cuerpo cambiará tanto su orientación angular como su posición lineal. La mayoría de los puntos del cuerpo se moverán en trayectorias complejas y diferentes unas de otras, a su vez, habrá un centro de rotación que cambiará continuamente de ubicación.

A los dispositivos que llevan a cabo la tarea de transmitir o restringir el movimiento entre los diferentes eslabones que forman el mecanismo se les denomina pares o juntas. El par o la junta entre dos o más eslabones permite el movimiento. Existen diferentes tipos de pares:

- El primer tipo es por el tipo de contacto que se realiza entre los diferentes eslabones: de punto, de línea o de superficie.
- El segundo tipo es por el número de grados de libertad que se permiten en cada junta.
- El tercer tipo es por el tipo de cierre existente en cada junta: cerrada por la geometría (Forma) o por fuerza.

Cabe destacar una diferenciación entre los tipos de pares de una manera más genérica. Se localizan los pares inferiores, los cuales describen juntas con contacto superficial, y también se establecen los pares superiores, los cuales engloban las uniones mediante un punto o una línea.

En el mecanismo a estudiar todos los pares se clasifican dentro de los pares inferiores, ya que son uniones del tipo pasador en contacto con la superficie de un orificio.

Los pares inferiores son los siguientes:

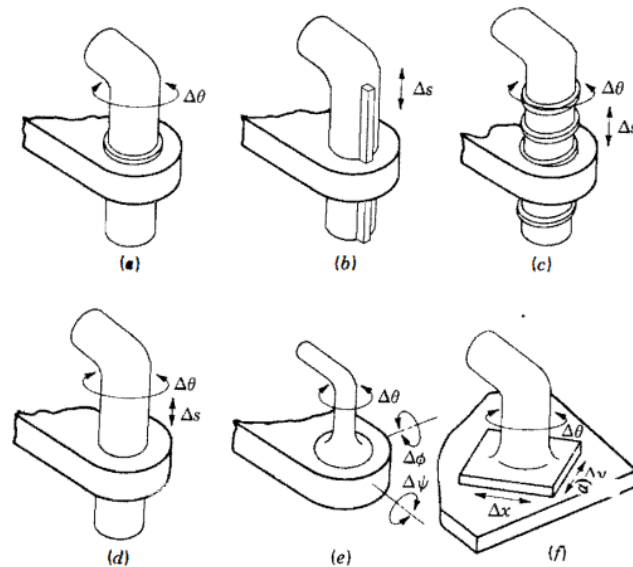


Figura 2. 5 tipos de Pares inferiores

- Revolución (R)
- Prismático (P)
- Helicoidal (H)
- Cilíndrico (C)
- Esférico (S)
- Plano (F)

Los pares de revolución (R) y prismáticos (P) son los pares elementales de un mecanismo plano, mientras que los pares helicoidal (H), cilíndrico (C), esférico (S) y plano (F) son combinaciones de los anteriormente nombrados y se emplean en mecanismos espaciales.

Para el segundo de los puntos es básico explicar el concepto de grado de libertad. El número de grados de libertad se entiende como el número mínimo de parámetros necesarios para determinar completamente la velocidad de un mecanismo.

Como se puede observar en la figura, los pares del tipo R poseen un único grado de libertad (GDL), determinado por una variación del ángulo; los pares del tipo P también poseen un único GDL, determinado por la variación de una longitud; los del tipo H y C constan de dos grados de libertad, determinados por una variación de un ángulo y una

variación de una longitud; los pares del tipo S constan de tres grados de libertad, determinados por tres variaciones de tres ángulos, uno en cada eje; finalmente los del tipo F constan también de tres grados de libertad, determinados por una variación angular y dos variaciones lineales.

Por último, es importante diferenciar entre cierre de fuerza y cierre de forma. El primero de los cierres, de fuerza, el contacto se consigue por medio de una fuerza que interviene, que es un claro ejemplo entre una leva y una válvula. Por otro lado, encontramos los cierres de forma, en los cuales interviene la geometría para garantizar la unión, esto se puede encontrar en la unión entre un cilindro y un embolo.

Como se puede visualizar en la siguiente imagen, se han nombrado los pares y las barras del mecanismo.

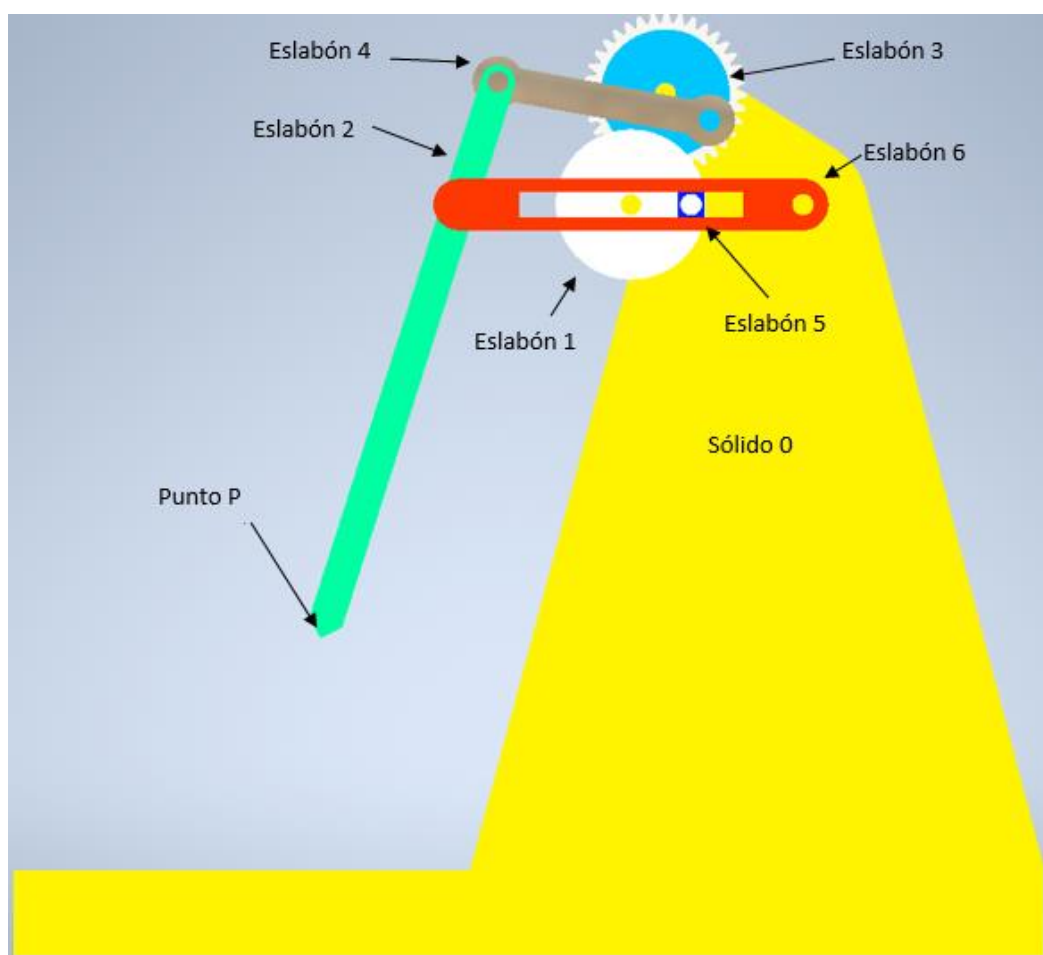


Figura 2. 6 Mecanismo realizado con la herramienta “Autodesk Inventor”

El primer dato que se puede obtener de la visualización de la imagen es el número de eslabones que forman el mecanismo, en este caso se tratan de seis. El sólido 0, coloreado de amarillo, es el bastidor del mecanismo, o lo que es lo mismo, el soporte fijo que sirve de apoyo al resto del mecanismo; el eslabón 1 (Manivela 1) está definido por el color gris; el eslabón 2 (Acoplador) es el principal eslabón de estudio, puesto que se analizara de una manera más detallada la trayectoria que describe la punta de este, por el color cian; el eslabón 3 (Manivela 2) está determinado por el color azul; el eslabón 6 (Balancín inferior) es el balancín de color rojo; el eslabón 5 (Dado de retorno rápido) es de color azul oscuro y finalmente el eslabón 4 (Balancín superior) es de color gris oscuro.

El siguiente paso es clasificar los eslabones según al tipo al que pertenezcan en función de sus nodos. Para ello se pueden clasificar todos como binarios a excepción del soporte o pieza 0, está consta de tres nodos, por lo que es un eslabón ternario.

La siguiente clasificación de la que se ha tratado anteriormente es en función del tipo de uniones existentes entre los diferentes eslabones, en este caso todas las uniones se clasifican en cierre de forma.

La clasificación que se va a tratar a continuación es el tipo de pares que se pueden observar en el mecanismo, se pueden clasificar entre dos tipos de pares: de revolución (R) y prismáticos (P). El par A, que une los eslabones 0 y 1, el cual se clasifica dentro de los pares tipo R, dado que únicamente tiene movimiento de rotación; el par B, que es la unión entre los eslabones 0 y 3, se clasifica en el tipo R; al igual que los pares F, entre 6 y 2; el par K, entre 4 y 2; el par C, entre 3 y 6; y el par D, entre 0 y 2; por otro lado, el par E, unión entre 5 y 2, se clasifica dentro de P, dado que actúa como una corredera, el eslabón 5 recorre una trayectoria rectilínea en una guía que posee el eslabón 2 en su interior.

El punto más relevante para el análisis es el punto P, el cual es el extremo inferior del eslabón 2. Este punto es el más representativo del mecanismo, dado que es el que va a estar en contacto con la masa y es interesante saber las diferentes trayectorias de este punto en función de los valores de entrada de las demás barras del mecanismo.

## 2.2. Análisis de movilidad del mecanismo

Para analizar la movilidad de un mecanismo es necesario conocer una serie de parámetros que son necesarios para determinar la posición del cuerpo en cualquier momento, esto se conoce como sus GDL.

Para el análisis de la movilidad de un mecanismo se emplea el criterio de Kutzbach, el cual dice que es necesario conocer el número de eslabones del mecanismo y por otro lado es necesario saber que juntas del mecanismo son de orden inferior y cuales son de orden superior.

Para ello se empleará la siguiente ecuación:

$$m = 3(n - 1) - 2j_1 - j_2 \quad (2.1)$$

Donde:

$m =$  *movilidad*

$n =$  *numero de barras*

$j_1 =$  *numero de pares que permiten 1 GDL en el movimiento relativo*

$j_2 =$  *numero de pares que permiten 2 GDL en el movimiento relativo*

Dependiendo del valor obtenido de la ecuación anterior se pueden obtener varias conclusiones:

- Si el valor de  $m$  es igual a 1, el mecanismo posee una movilidad determinada y se denomina mecanismo desmodrómico; para obtener el movimiento de las barras del mecanismo, solo se necesita un único valor del movimiento de la barra de entrada.
- Si el valor de  $m$  es mayor de 1, el mecanismo se denomina no desdrómico, es necesaria más de una variable de entrada para conocer los movimientos de las diferentes barras.
- Si el valor de  $m$  es igual a 0, el mecanismo es una estructura, esto quiere decir que el mecanismo no pese ningún tipo de movimiento.

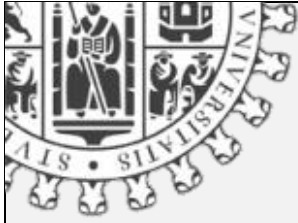


- 
- Si el valor de  $m$  es menor que 0, el mecanismo será considerado una estructura hiperestática.

$$m = 3(n - 1) - 2j_1 - j_2 \quad (2.2)$$

$$m = 3(6 - 1) - 2 \cdot 7 = 15 - 14 = 1 \quad (2.3)$$

De este resultado se deduce que el mecanismo entra dentro de la clasificación de mecanismos desdrómicos, es decir, con el valor del movimiento de una de las barras se puede conocer el movimiento de las demás barras que forman el mecanismo a estudiar.



## Capítulo III: Análisis Teórico

### 3.1. Introducción

A la hora de representar un vector se encuentran tres opciones: se pueden representar de forma cartesiana, esto es con sus coordenadas en el eje x y en el eje y, también se pueden representar mediante su módulo y su ángulo, y por último en forma polar. Del mismo modo que se encuentran en cada una de estas tres formas, también es sencillo transformar los vectores de una manera a otra gracias a las ecuaciones que se representan a continuación en las ecuaciones 3.1 y 3.2. Los vectores pueden ser representados de cualquiera de estas tres maneras [3].

$$R \angle \theta = r \cos \theta \hat{i} + r \sin \theta \hat{j} \quad (3.1)$$

$$r e^{i\theta} = r \cos \theta + i r \sin \theta \quad (3.2)$$

En las ecuaciones 3.1 y 3.2 se pueden observar los diferentes tipos de representar un vector de posición. Se pueden observar en el siguiente orden; la primera forma es un vector unitario, donde se representa el módulo y el ángulo, es decir, en su forma polar; se representa a continuación la forma cartesiana con las componentes en el eje X y en el eje Y, por ese orden; seguidamente se observa la forma imaginaria de dicho vector y su representación cartesiana con números complejos, con la componente real e imaginaria. Esta última se obtiene de la *ecuación de Euler de la trigonometría*, se puede visualizar en la figura 3.1 en la parte superior

Los números complejos constan de dos partes: por un lado se encuentra el término real y por otro lado el imaginario. A continuación se puede observar como el eje Y corresponde al término imaginario y el eje X corresponde al real. [4]

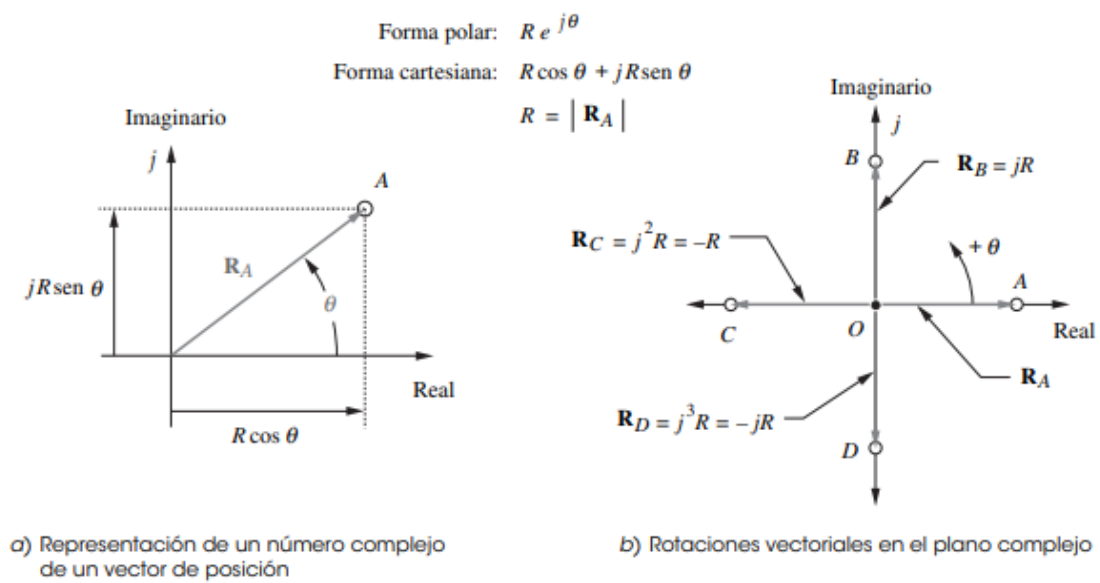


Figura 3. 1 Esquema representativo de los tipos de notación [4]

De la figura 3.1 se pueden obtener las siguientes igualdades:

$$e^{\pm i\theta} = \cos \theta \pm i \sin \theta \quad (3.3)$$

$$\vec{R} = r e^{i\theta} \quad (3.4)$$

Donde  $r$  es el valor del modulo y  $\theta$  es el valor del ángulo que forma el vector con el eje X.

### 3.2. Análisis de posición

En la Figura 3.2 se pueden visualizar los dos submecanismos que forman el mecanismo principal. Por un lado, se encuentra el submecanismo 1, formado por las barras  $r_1$ ,  $r_2$  y  $r_3$ . Por otra parte, se localiza el submecanismo 2, formado por las barras  $r_1$ ,  $r_3$ ,  $r_4$ ,  $r_5$ ,  $r_6$ .

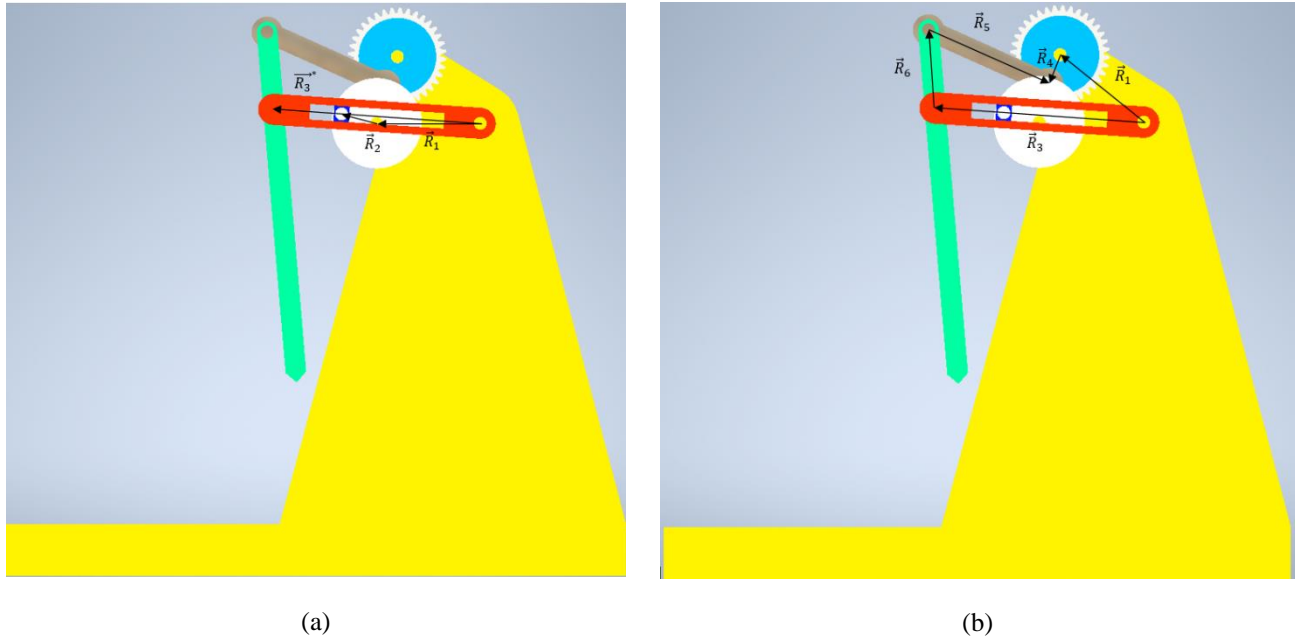


Figura 3.2. Submecanismo 1 (a) y submecanismo 2 (b)

#### Submecanismo 1

A continuación, se realiza un análisis para la obtención de la longitud de  $r_3$ , puesto que, al ser una corredera, tiene longitud variable y el ángulo que forma dicha barra con el eje X.

En la igualdad 3.5 se representa la ecuación de cierre del primer submecanismo con la nomenclatura adquirida del esquema que se muestra en la figura 3.2. Como se ha indicado anteriormente, las ecuaciones 3.5 y 3.6 son equivalentes y la segunda forma facilita el proceso de cálculo.

$$\vec{R}_1 + \vec{R}_3 = \vec{R}_2 \quad (3.5)$$

$$r_1 + r_3 e^{i\theta_3} = r_2 e^{i\theta_2} \quad (3.6)$$

En este caso las constantes serán  $r_1, r_2$

En este caso las variables serán  $r_3, \theta_2, \theta_3$

Se procede a despejar en la igualdad los términos que son incógnita, para ello se disponen de unas ecuaciones obtenidas del método de Raven, en la cual existen unos casos generales donde conociendo las variables se sabrá en que caso general está

localizada la ecuación de cierre y por tanto se podrán obtener los valores de las variables. En la ecuación 3.8 se observa el caso general, en la ecuación 3.7 se visualiza el caso particular adaptado al caso general.

$$r_3 e^{i\theta_3} = r_2 e^{i\theta_2} + r_1 e^{i\pi} \quad (3.7)$$

$$c e^{i\theta_c} = a e^{i\theta_A} + b e^{i\theta_B} \quad (3.8)$$

Las ecuaciones generales obtenidas para los valores de las variables que se dese conocer se muestran en las ecuaciones 3.9, cuyo valor corresponde al valor que toma la barra  $r_3$  en función de la posición de la corredera con respecto al punto D, el cual se puede visualizar en la figura 3.2; y la ecuación 3.10 muestra el valor del ángulo que forma dicha barra con el eje X en sentido positivo en valor antihorario.

$$r_3 = \sqrt{r_2^2 + r_1^2 + 2r_2 r_1 \cos(\pi - \theta_2)} \quad (3.9)$$

$$\theta_3 = \text{atan} \left( \frac{r_2 \sin \theta_2 + r_1 \sin \pi}{r_2 \cos \theta_2 + r_1 \cos \pi} \right) \quad (3.10)$$

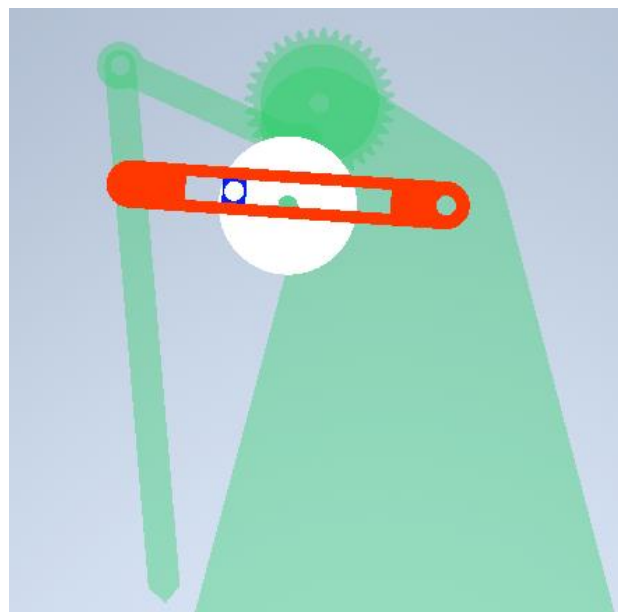


Figura 3. 3. Modelo con submecanismo 1 remarcado

### Submecanismo 2

A continuación, se realiza un análisis del submecanismo 2, del cual se obtiene la ecuación de cierre.

En la igualdad 3.11 se representa la ecuación de cierre del primer submecanismo, con la nomenclatura adquirida del esquema que se muestra en la figura 3.2. Como se ha

indicado anteriormente, las ecuaciones 3.11 y 3.12 son equivalentes y la segunda forma facilita el proceso de cálculo.

$$\vec{R}_1 + \vec{R}_4 = \vec{R}_3 + \vec{R}_5 + \vec{R}_6 \quad (3.11)$$

$$r_1 e^{i\theta_1} + r_4 e^{i\theta_4} = r_3 e^{i\theta_3} + r_5 e^{i\theta_5} + r_6 e^{i\theta_6} \quad (3.12)$$

En este caso las constantes serán  $r_1, \theta_1, r_4, r_5, r_6, r_3^*$

En este caso las variables serán  $\theta_3, \theta_4, \theta_5, \theta_6$

Dados  $\theta_3$  del submecanismo 1 y  $\theta_4$  de la ecuación  $-\lambda\theta_2 + \theta_4^0$  con lo que se obtienen  $\theta_5$  y  $\theta_6$  mediante las ecuaciones del Caso 2c.

A diferencia del submecanismo 1, donde  $r_3$  corresponde a la longitud variable a causa de la corredera, en este caso, en el submecanismo 2,  $r_3^*$  representa la longitud total de la barra entre las articulaciones D y K.

Se procede a despejar en la igualdad los términos que son incógnita.

$$r_1 e^{i\theta_1} + r_4 e^{i\theta_4} + r_3 e^{i(\theta_3+\pi)} = r_5 e^{i\theta_5} + r_6 e^{i\theta_6} \quad (3.13)$$

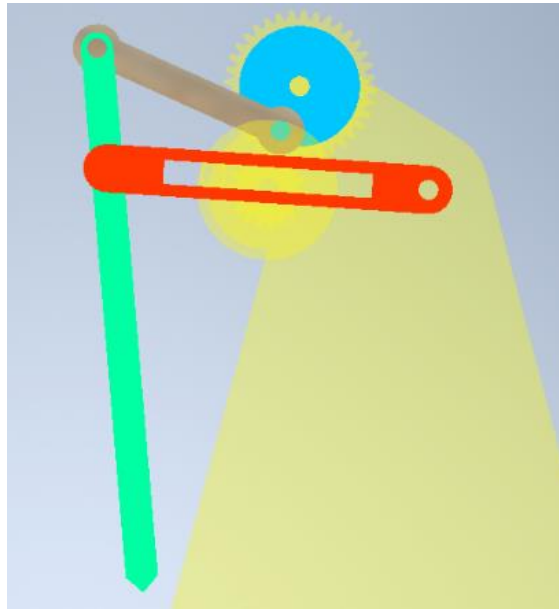


Figura 3. 4. Modelo con submecanismo 2 remarcado

## POSICIÓN

Para poder analizar la posición es necesario apoyarse en vectores auxiliares para resolver los sistemas con las incógnitas. El apoyo se realiza con los vectores  $\vec{S}$  y  $\vec{H}$ .

### Submecanismo 2.1

La primera de las ecuaciones de cierre que se estudiarán será la siguiente:

$$\vec{R}_1 + \vec{s} = \vec{R}_3^* \quad (3.14)$$

La ecuación 3.14 también puede expresarse como:

$$r_1 e^{i\theta_1} + s e^{i\phi} = r_3 e^{i\theta_3} \quad (3.15)$$

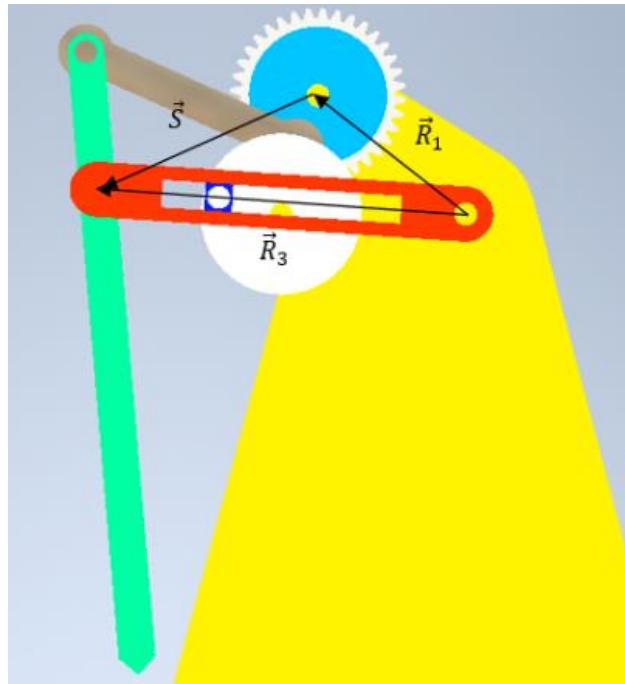


Figura 3. 2. Representación gráfica de la ecuación 3.14

En la ecuación 3.15 se conocen los valores de  $r_1$ ,  $r_3$ ,  $\theta_1$  y  $\theta_3$ ; por lo que se recoloca para poder despejar la incógnita, como se ve en la ecuación 3.16

$$s e^{i\phi} = r_3 e^{i\theta_3} - r_1 e^{i\theta_1} \quad (3.16)$$

La ecuación 3.16 también puede expresarse como se muestra en la ecuación 3.17:

$$s e^{i\phi} = r_3 e^{i\theta_3} + r_1 e^{i(\theta_1 + \pi)} \quad (3.17)$$

Se procede a despejar en la igualdad los términos que son incógnita, para ello se disponen de unas ecuaciones obtenidas del método de Raven, en los cuales existen unos casos generales donde conociendo las variables se sabrá en que caso general está localizada la ecuación de cierre y por tanto se podrán obtener los valores de las variables. En la ecuación 3.18 se observa el caso general, en la ecuación 3.17 se visualiza el caso particular adaptado al caso general.

#### Caso1

$$c e^{i\theta_C} = a e^{i\theta_A} + b e^{i\theta_B} \quad (3.18)$$

Las ecuaciones generales obtenidas para los valores de las variables que se dese conocer se muestran en las ecuaciones 3.19, cuyo valor corresponde al valor que toma el vector auxiliar  $r_s$  y la ecuación 3.20 muestra el valor del ángulo que forma dicho vector con el eje X en sentido positivo en valor antihorario.

$$r_s = \sqrt{r_3^2 + r_1^2 + 2r_3r_1 \cos((\pi + \theta_1) - \theta_3)} \quad (3.19)$$

$$\phi_s = \text{atan} \left( \frac{r_3 \sin \theta_3 + r_1 \sin(\pi + \theta_1)}{r_3 \cos \theta_3 + r_1 \cos(\pi + \theta_1)} \right) \quad (3.20)$$

### Submecanismo 2.2

La primera de las ecuaciones de cierre que se estudiarán será la siguiente:

$$\vec{R}_4 = \vec{S} + \vec{H} \quad (3.21)$$

Las ecuaciones 3.21 y 3.22 corresponden a la misma igualdad escrita de diferente modo, para facilitar la obtención de los valores incógnita en función de los valores conocidos.

$$\vec{H} = \vec{R}_4 - \vec{S} \quad (3.22)$$

La ecuación 3.23 también puede expresarse como:

$$he^{i\phi_h} = r_4 e^{i\theta_4} - se^{i\phi} \quad (3.23)$$

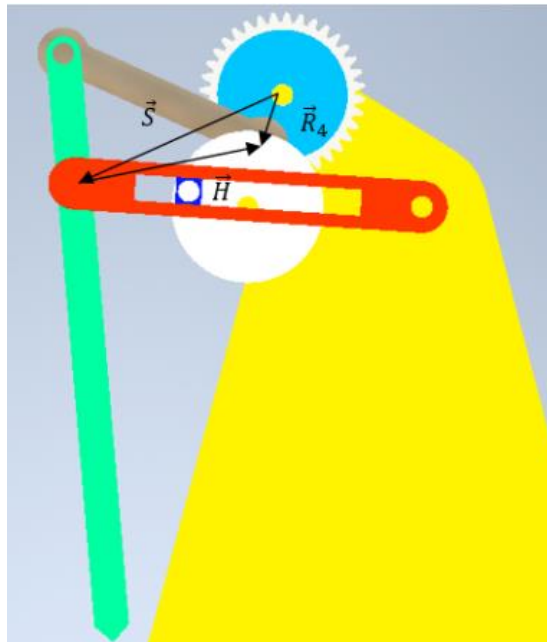


Figura 3. 5 Representación gráfica de la ecuación 3.22

Entre las ecuaciones 3.23 y 3.24 ocurre lo mismo que con las ecuaciones 3.21 y 3.22, es la misma ecuación descrita de diferente forma para facilitar la resolución.



$$he^{i\phi_h} = r_4 e^{i\theta_4} + s e^{i(\phi+\pi)} \quad (3.24)$$

Se procede a despejar en la igualdad los términos que son incógnita, para ello se disponen de unas ecuaciones obtenidas del método de Raven, en los cuales existen unos casos generales donde conociendo las variables se sabrá en que caso general está localizada la ecuación de cierre y por tanto se podrán obtener los valores de las variables. En la ecuación 3.25 se observa el caso general, en la ecuación 3.24 se visualiza el caso particular adaptado al caso general.

### Caso1

$$ce^{i\theta_c} = ae^{i\theta_A} + be^{i\theta_B} \quad (3.25)$$

Las ecuaciones generales obtenidas para los valores de las variables que se dese conocer se muestran en las ecuaciones 3.26, cuyo valor corresponde al valor que toma el vector auxiliar  $r_h$  y la ecuación 3.27 muestra el valor del ángulo que forma dicho vector con el eje X en sentido positivo en valor antihorario.

$$h = \sqrt{r_4^2 + s^2 + 2r_4s \cos((\pi + \phi) - \theta_4)} \quad (3.26)$$

$$\phi_h = \text{atan} \left( \frac{r_4 \sin \theta_4 + s \sin(\pi + \phi)}{r_4 \cos \theta_4 + s \cos(\pi + \phi)} \right) \quad (3.27)$$

### Submecanismo 2.3

La primera de las ecuaciones de cierre que se estudiarán será la siguiente:

$$\vec{H} = \vec{R}_6 - \vec{R}_5 \quad (3.28)$$

La ecuación 3.28 también puede expresarse como:

$$he^{i\phi_h} = r_6 e^{i\theta_6} - r_5 e^{i\theta_5} \quad (3.29)$$

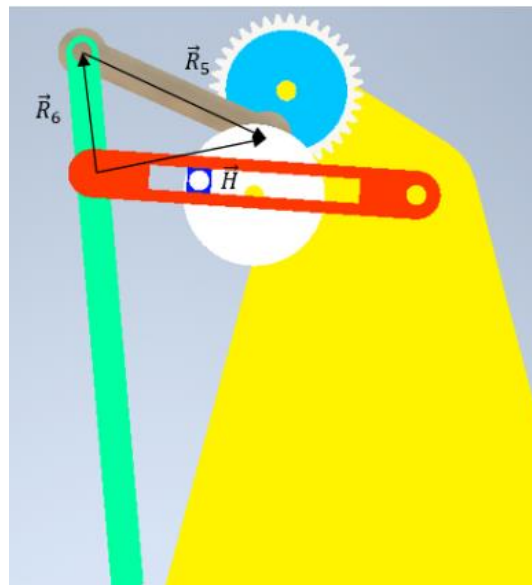


Figura 3. 6. Representación gráfica de la ecuación 3.28

Se multiplican ambos términos de la igualdad por  $e^{-i\phi_h}$  de esta manera se obtiene la siguiente ecuación, de la cual se obtienen los valores incógnita mediante las ecuaciones del caso 2c:

$$h = r_6 e^{i(\theta_6 - \phi_h)} - r_5 e^{i(\theta_5 - \phi_h)} \quad (3.30)$$

$$\theta_5 = \phi_h \pm \arccos\left(\frac{h^2 + r_5^2 - r_6^2}{2hr_5}\right) \quad (3.31)$$

$$\theta_6 = \phi_h \pm \arccos\left(\frac{h^2 + r_6^2 - r_5^2}{2hr_6}\right) \quad (3.32)$$

Una vez obtenidas las ecuaciones de los valores incógnita del mecanismo se procederá a analizar las velocidades y las aceleraciones partiendo de las ecuaciones que ya hay calculadas, derivando con respecto al tiempo una primera vez para obtener las ecuaciones de las velocidades y una segunda vez para obtener las ecuaciones de la aceleración.

### 3.3. Análisis cinemático

#### VELOCIDADES Y ACELERACIONES

A la hora de obtener las ecuaciones generales de las velocidades y aceleraciones también hay que diferenciar los dos submecanismos que se encuentran dentro del mecanismo principal.

##### Submecanismo 1

Derivando la ecuación 3.7 respecto al tiempo se obtiene la ecuación 3.33:

$$\dot{r}_3 e^{i\theta_3} + ir_3 \Omega_3 e^{i\theta_3} = ir_2 \Omega_2 e^{i\theta_2} \quad (3.33)$$

Multiplicando ambos lados de la igualdad por  $e^{-i\theta_3}$  se obtiene:

$$\dot{r}_3 + ir_3 \Omega_3 = ir_2 \Omega_2 e^{i(\theta_2 - \theta_3)} \quad (3.34)$$

Desglosando la parte imaginaria y la parte real se obtienen los valores de  $\dot{r}_3$  y  $\Omega_3$

$$\dot{r}_3 = -r_2 \Omega_2 \sin(\theta_2 - \theta_3) \quad (3.35)$$

$$r_3 \Omega_3 = r_2 \Omega_2 \cos(\theta_2 - \theta_3) \quad (3.36)$$

$$\Omega_3 = \frac{r_2}{r_3} \Omega_2 \cos(\theta_2 - \theta_3) \quad (3.37)$$

Derivando se obtienen las aceleraciones tanto lineal como angular.

$$\dot{r}_3 e^{i\theta_3} + ir_3 \Omega_3 e^{i\theta_3} = ir_2 \Omega_2 e^{i\theta_2} \quad (3.33)$$

Derivando la ecuación 3.33 se obtiene la ecuación 3.39:

$$\ddot{r}_3 e^{i\theta_3} + i\dot{r}_3 \Omega_3 e^{i\theta_3} + ir_3 \dot{\Omega}_3 e^{i\theta_3} + i\dot{r}_3 \Omega_3 e^{i\theta_3} + i^2 r_3 \Omega_3^2 e^{i\theta_3} = ir_2 \dot{\Omega}_2 e^{i\theta_2} + i\dot{r}_2 \Omega_2 e^{i\theta_2} + i^2 r_2 \Omega_2^2 e^{i\theta_2} \quad (3.39)$$

Simplificando la ecuación 3.39 se obtiene la igualdad 3.40:

$$\dot{r}_3 e^{i\theta_3} - r_3 \Omega_3^2 e^{i\theta_3} + 2i\Omega_3 e^{i\theta_3} \dot{r}_3 + ir_3 \alpha_3 e^{i\theta_3} = -r_2 \Omega_2^2 e^{i\theta_2} + ir_2 \alpha_2 e^{i\theta_2} \quad (3.40)$$

Multiplicando ambos términos de la igualdad por  $e^{-i\theta_3}$  se obtiene:

$$\dot{r}_3 - r_3 \Omega_3^2 + ir_3 \alpha_3 + 2i\Omega_3 \dot{r}_3 = -r_2 \Omega_2^2 e^{i(\theta_2 - \theta_3)} + ir_2 \alpha_2 e^{i(\theta_2 - \theta_3)} \quad (3.41)$$

Separando la parte real de la igualdad 3.41 se obtiene la ecuación 3.42

$$\dot{r}_3 = r_3 \Omega_3^2 - r_2 \alpha_2 \text{sen}(\theta_2 - \theta_3) - r_2 \Omega_2^2 \cos(\theta_2 - \theta_3) \quad (3.42)$$

Separando la parte imaginaria de la ecuación 3.41 la ecuación 3.43:

$$\alpha_3 = \frac{r_2 \alpha_2 \cos(\theta_2 - \theta_3) - 2\dot{r}_3 \Omega_3 - r_2 \Omega_2^2 \text{sen}(\theta_2 - \theta_3)}{r_3} \quad (3.43)$$

### Submecanismo 2

Para realizar una breve introducción se puede visualizar la ecuación de cierre del submecanismo 2 en dos de sus formas, en las ecuaciones 3.48.

$$\vec{R}_1 + \vec{R}_4 = \vec{R}_3 + \vec{R}_5 + \vec{R}_6 \quad (3.11)$$

$$r_1 e^{i\theta_1} + r_4 e^{i\theta_4} = r_3 e^{i\theta_3} + r_5 e^{i\theta_5} + r_6 e^{i\theta_6} \quad (3.12)$$

En este caso las constantes serán  $r_1, \theta_1, r_4, r_5, r_6, r_3^*$

En este caso las variables serán  $\theta_3, \theta_4, \theta_5, \theta_6$

Derivando la ecuación 3.12 respecto al tiempo se obtiene la igualdad 3.44:

$$\dot{r}_1 e^{i\theta_1} + ir_1 \Omega_1 e^{i\theta_1} + \dot{r}_4 e^{i\theta_4} + ir_4 \Omega_4 e^{i\theta_4} = \dot{r}_3 e^{i\theta_3} + ir_3 \Omega_3 e^{i\theta_3} + \dot{r}_5 e^{i\theta_5} + ir_5 \Omega_5 e^{i\theta_5} + \dot{r}_6 e^{i\theta_6} + ir_6 \Omega_6 e^{i\theta_6} \quad (3.44)$$

Simplificando se obtiene la ecuación 3.45:

$$ir_4 \Omega_4 e^{i\theta_4} = ir_3 \Omega_3 e^{i\theta_3} + ir_6 \Omega_6 e^{i\theta_6} + ir_5 \Omega_5 e^{i\theta_5} \quad (3.45)$$

Para obtener  $\Omega_5$  se multiplicará por  $e^{-i\theta_6}$ :

$$ir_4 \Omega_4 e^{i(\theta_4 - \theta_6)} = ir_3 \Omega_3 e^{i(\theta_3 - \theta_6)} + ir_6 \Omega_6 + ir_5 \Omega_5 e^{i(\theta_5 - \theta_6)} \quad (3.46)$$

Desglosando la igualdad 3.46 en parte real e imaginaria y centrándose en la parte imaginaria se obtiene la ecuación 3.47:

$$-r_4 \Omega_4 \text{sen}(\theta_4 - \theta_6) = -r_3 \Omega_3 \text{sen}(\theta_3 - \theta_6) - r_5 \Omega_5 \text{sen}(\theta_5 - \theta_6) \quad (3.47)$$

Despejando se obtiene la ecuación general del valor incógnita:

$$\Omega_5 = \frac{1}{r_5 \text{sen}(\theta_5 - \theta_6)} [r_4 \Omega_4 \text{sen}(\theta_4 - \theta_6) - r_3 \Omega_3 \text{sen}(\theta_3 - \theta_6)] \quad (3.48)$$

Para obtener  $\Omega_6$  se multiplicará por  $e^{-i\theta_5}$ :

$$ir_4 \Omega_4 e^{i(\theta_4 - \theta_5)} = ir_3 \Omega_3 e^{i(\theta_3 - \theta_5)} + ir_5 \Omega_5 + ir_6 \Omega_6 e^{i(\theta_6 - \theta_5)} \quad (3.49)$$

Desglosando la igualdad 3.49 en parte real e imaginaria y centrándose en la parte imaginaria se obtiene la ecuación 3.50:

$$-r_4\Omega_4 \sin(\theta_4 - \theta_5) = -r_3\Omega_3 \sin(\theta_3 - \theta_5) - r_6\Omega_6 \sin(\theta_6 - \theta_5) \quad (3.50)$$

Despejando se obtiene la ecuación general del valor incógnita:

$$\Omega_6 = \frac{1}{r_6 \sin(\theta_6 - \theta_5)} [r_4\Omega_4 \sin(\theta_4 - \theta_5) - r_3\Omega_3 \sin(\theta_3 - \theta_5)] \quad (3.51)$$

Derivando la ecuación 3.44 respecto al tiempo se obtiene la igualdad 3.52:

$$\begin{aligned} \ddot{r}_4 e^{i\theta_4} + i\dot{r}_4\Omega_4 e^{i\theta_4} + i\dot{r}_4\alpha_4 e^{i\theta_4} + i\dot{r}_4\Omega_4 e^{i\theta_4} + i^2 r_4\Omega_4^2 e^{i\theta_4} = \ddot{r}_3 e^{i\theta_3} + i\dot{r}_3\Omega_3 e^{i\theta_3} + i\dot{r}_3\alpha_3 e^{i\theta_3} + i\dot{r}_3\Omega_3 e^{i\theta_3} + \\ i^2 r_3\Omega_3^2 e^{i\theta_3} + \ddot{r}_6 e^{i\theta_6} + i\dot{r}_6\Omega_6 e^{i\theta_6} + i\dot{r}_6\alpha_6 e^{i\theta_6} + i\dot{r}_6\Omega_6 e^{i\theta_6} + i^2 r_6\Omega_6^2 e^{i\theta_6} + \ddot{r}_5 e^{i\theta_5} + i\dot{r}_5\Omega_5 e^{i\theta_5} + \\ i\dot{r}_5\alpha_5 e^{i\theta_5} + i\dot{r}_5\Omega_5 e^{i\theta_5} + i^2 r_5\Omega_5^2 e^{i\theta_5} \end{aligned} \quad (3.52)$$

Simplificando la ecuación 3.52 se obtiene la igualdad 3.53:

$$i\alpha_4 r_4 e^{i\theta_4} - r_4\Omega_4^2 e^{i\theta_4} + i\alpha_3 r_3 e^{i\theta_3} + r_3\Omega_3^2 e^{i\theta_3} = i\alpha_6 r_6 e^{i\theta_6} - r_6\Omega_6^2 e^{i\theta_6} + i\alpha_5 r_5 e^{i\theta_5} - r_5\Omega_5^2 e^{i\theta_5} \quad (3.53)$$

Para obtener  $\alpha_5$  se deberá multiplicar ambos términos de la igualdad 3.53 por  $e^{-i\theta_6}$ :

$$i\dot{r}_4\alpha_4 e^{i(\theta_4 - \theta_6)} - r_4\Omega_4^2 e^{i(\theta_4 - \theta_6)} + i\dot{r}_3\alpha_3 e^{i(\theta_3 - \theta_6)} + r_3\Omega_3^2 e^{i(\theta_3 - \theta_6)} = i\dot{r}_6\alpha_6 - r_6\Omega_6^2 + i\dot{r}_5\alpha_5 e^{i(\theta_5 - \theta_6)} - r_5\Omega_5^2 e^{i(\theta_5 - \theta_6)} \quad (3.54)$$

Desglosando la igualdad 3.54 en parte real e imaginaria y centrándose en la parte real se obtiene la ecuación 3.55:

$$-r_4\alpha_4 \sin(\theta_4 - \theta_6) - r_4\Omega_4^2 \cos(\theta_4 - \theta_6) - r_3\alpha_3 \sin(\theta_3 - \theta_6) + r_3\Omega_3^2 \cos(\theta_3 - \theta_6) = -r_5\alpha_5 \sin(\theta_5 - \theta_6) - r_5\Omega_5^2 \cos(\theta_5 - \theta_6) - r_6\Omega_6^2 \quad (3.55)$$

Despejando se obtiene la ecuación general del valor incógnita:

$$\alpha_5 = \frac{1}{r_5 \sin(\theta_5 - \theta_6)} [r_4\alpha_4 \sin(\theta_4 - \theta_6) + r_4\Omega_4^2 \cos(\theta_4 - \theta_6) - \alpha_3 r_3 \sin(\theta_3 - \theta_6) - r_3\Omega_3^2 \cos(\theta_3 - \theta_6) - r_6\Omega_6^2 - r_5\Omega_5^2 \cos(\theta_5 - \theta_6)] \quad (3.56)$$

Para obtener  $\alpha_6$  se deberá multiplicar ambos términos de la igualdad 3.53 por  $e^{-i\theta_5}$ :

$$i\dot{r}_4\alpha_4 e^{i(\theta_4 - \theta_5)} - r_4\Omega_4^2 e^{i(\theta_4 - \theta_5)} + i\dot{r}_3\alpha_3 e^{i(\theta_3 - \theta_5)} + r_3\Omega_3^2 e^{i(\theta_3 - \theta_5)} = i\dot{r}_6\alpha_6 e^{i(\theta_6 - \theta_5)} - r_6\Omega_6^2 e^{i(\theta_6 - \theta_5)} + i\dot{r}_5\alpha_5 - r_5\Omega_5^2 \quad (3.57)$$

Desglosando la igualdad 3.57 en parte real e imaginaria y centrándose en la parte real se obtiene la ecuación 3.58:

$$-r_4\alpha_4 \sin(\theta_4 - \theta_5) - r_4\Omega_4^2 \cos(\theta_4 - \theta_5) - r_3\alpha_3 \sin(\theta_3 - \theta_5) + r_3\Omega_3^2 \cos(\theta_3 - \theta_5) = -r_6\alpha_6 \sin(\theta_6 - \theta_5) - r_6\Omega_6^2 \cos(\theta_6 - \theta_5) - r_5\Omega_5^2 \quad (3.58)$$

Despejando se obtiene la ecuación general del valor incógnita:

$$\alpha_6 = \frac{1}{r_6 \sin(\theta_6 - \theta_5)} [r_4\alpha_4 \sin(\theta_4 - \theta_5) + r_4\Omega_4^2 \cos(\theta_4 - \theta_5) - \alpha_3 r_3 \sin(\theta_3 - \theta_5) - r_3\Omega_3^2 \cos(\theta_3 - \theta_5) - r_5\Omega_5^2 - r_6\Omega_6^2 \cos(\theta_6 - \theta_5)] \quad (3.59)$$

### 3.4. Análisis de la trayectoria del acoplador

El objetivo es el estudio de la posición de la punta del acoplador y así poder analizar y comparar los valores obtenidos con los resultados de la simulación.

Para poder obtener los valores se empleará la ecuación de cierre que forman la barra 2, 3 y 6. Las longitudes empleadas serán en el caso de la barra tres, la longitud total menos la que hay desde el punto de unión entre 2 y 3. Por otro lado la distancia de la barra 6 será la longitud total del acoplador menos la distancia existente entre las uniones de 5 y 3 con la barra 6.

La ecuación resultante será la siguiente:

$$r_p e^{i\theta_p} = r_2 e^{i\theta_2} + (r_3^* - r_3) e^{i\theta_3} + (136 - r_6) e^{i(\theta_6 + \pi)} \quad (3.83)$$

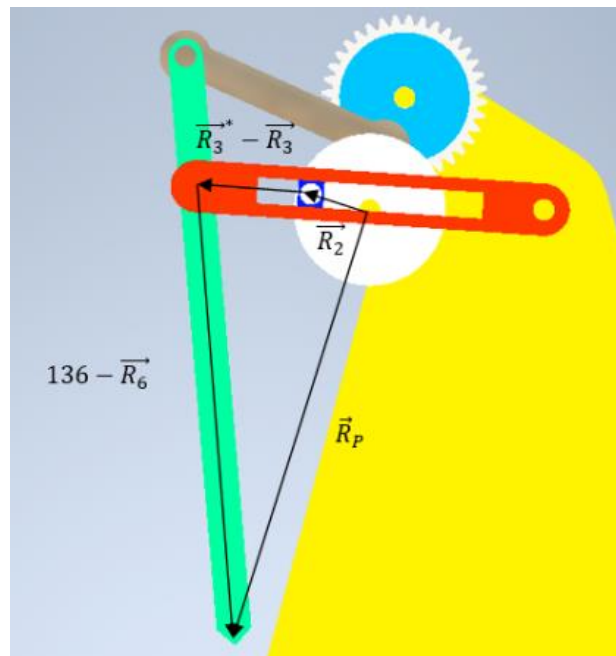


Figura 3. 7. Representación gráfica de la ecuación 3.83

Despejando en parte real e imaginaria la ecuación anterior obtenemos la igualdad de la posición del extremo del acoplador para cualquier ángulo de entrada de forma directa. Es decir, se obtienen las ecuaciones generales del punto P referentes a los ejes X e Y.

Ecuación para la posición en el eje X:

$$r_p = r_2 \cos \theta_2 + (r_3^* - r_3) \cos \theta_3 + (136 - r_6) \cos(\theta_6 + \pi) \quad (3.84)$$

Representando los valores obtenidos para un ciclo completo del acoplador se obtiene la siguiente gráfica:

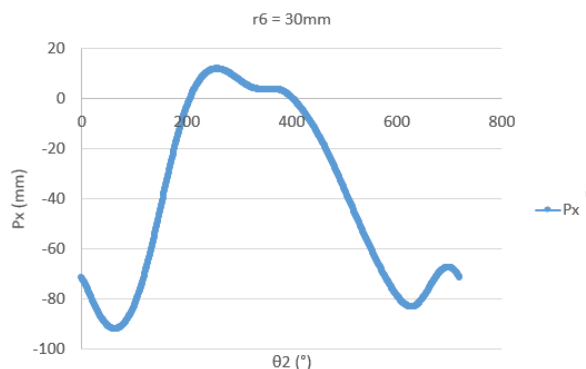


Figura 3. 8. Representación gráfica de la ecuación 3.84

Ecuación para la posición en el eje Y:

$$r_p = r_2 \sin \theta_2 + (r_3^* - r_3) \sin \theta_3 + (136 - r_6) \sin(\theta_6 + \pi) \quad (3.85)$$

Una vez introducida la ecuación en Excel y obteniendo los valores para los ángulos de  $\theta_2$  entre  $0^\circ$  y  $720^\circ$  se obtiene la siguiente grafica de  $P_y$ :

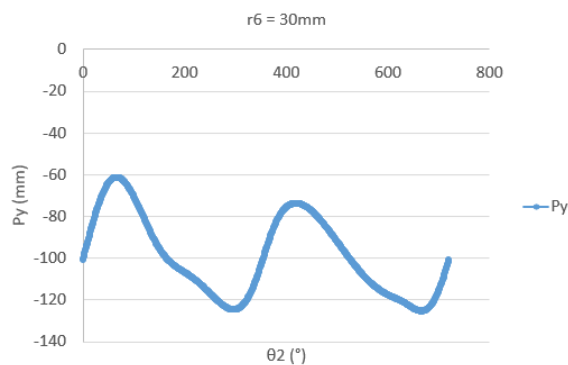


Figura 3. 9. Representación gráfica de la ecuación 3.85

Una vez se tienen los valores correspondientes del punto P respecto al eje X y al eje Y, combinándolos, se puede obtener una gráfica de la trayectoria como se puede visualizar en la siguiente gráfica.

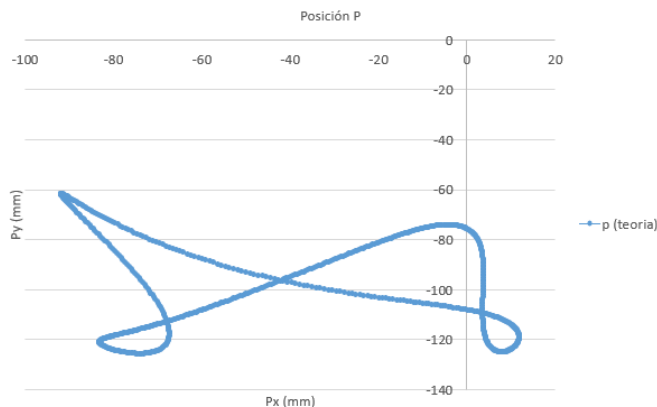


Figura 3. 10. Representación gráfica de la trayectoria del punto P

Tabla 3.1. Tabla resumen de ecuaciones teoricas

Parámetro	Ecuación
$r_3$	$\sqrt{r_2^2 + r_1^2 + 2r_2r_1 \cos(\pi - \theta_2)}$
$\theta_3$	$\text{atan}\left(\frac{r_2 \sin \theta_2 + r_1 \sin \pi}{r_2 \cos \theta_2 + r_1 \cos \pi}\right)$
$r_s$	$\sqrt{r_3^2 + r_1^2 + 2r_3r_1 \cos((\pi + \theta_1) - \theta_3)}$
$\phi_s$	$\text{atan}\left(\frac{r_3 \sin \theta_3 + r_1 \sin(\pi + \theta_1)}{r_3 \cos \theta_3 + r_1 \cos(\pi + \theta_1)}\right)$
$h$	$\sqrt{r_4^2 + s^2 + 2r_4s \cos((\pi + \phi) - \theta_4)}$
$\phi_h$	$\text{atan}\left(\frac{r_4 \sin \theta_4 + s \sin(\pi + \phi)}{r_4 \cos \theta_4 + s \cos(\pi + \phi)}\right)$
$\theta_5$	$\phi_h \pm \arccos\left(\frac{h^2 + r_5^2 - r_6^2}{2hr_5}\right)$
$\theta_6$	$\phi_h \pm \arccos\left(\frac{h^2 + r_6^2 - r_5^2}{2hr_6}\right)$
$\Omega_3$	$\frac{r_2}{r_3} \Omega_2 \cos(\theta_2 - \theta_3)$
$\alpha_3$	$\frac{r_2 \alpha_2 \cos(\theta_2 - \theta_3) - 2\dot{r}_3 \Omega_3 - r_2 \Omega_2^2 \text{sen}(\theta_2 - \theta_3)}{r_3}$
$\Omega_5$	$\frac{1}{r_5 \sin(\theta_5 - \theta_6)} [r_4 \Omega_4 \sin(\theta_4 - \theta_6) - r_3 \Omega_3 \sin(\theta_3 - \theta_6)]$
$\alpha_5$	$\frac{1}{r_5 \sin(\theta_5 - \theta_6)} [r_4 \alpha_4 \sin(\theta_4 - \theta_6) + r_4 \Omega_4^2 \cos(\theta_4 - \theta_6) - \alpha_3 r_3 \sin(\theta_3 - \theta_6) - r_3 \Omega_3^2 \cos(\theta_3 - \theta_6) - r_5 \Omega_5^2 \cos(\theta_5 - \theta_6) - r_6 \Omega_6^2]$
$\Omega_6$	$\frac{1}{r_6 \sin(\theta_6 - \theta_5)} [r_4 \Omega_4 \sin(\theta_4 - \theta_5) - r_3 \Omega_3 \sin(\theta_3 - \theta_5)]$
$\alpha_6$	$\frac{1}{r_6 \sin(\theta_6 - \theta_5)} [r_4 \alpha_4 \sin(\theta_4 - \theta_5) + r_4 \Omega_4^2 \cos(\theta_4 - \theta_5) - \alpha_3 r_3 \sin(\theta_3 - \theta_5) - r_3 \Omega_3^2 \cos(\theta_3 - \theta_5) - r_6 \Omega_6^2 \cos(\theta_6 - \theta_5) - r_5 \Omega_5^2]$
$r_p(x)$	$r_2 \cos \theta_2 + (r_3^* - r_3) \cos \theta_3 + (136 - r_6) \cos(\theta_6 + \pi)$
$r_p(y)$	$r_2 \text{sen} \theta_2 + (r_3^* - r_3) \text{sen} \theta_3 + (136 - r_6) \text{sen}(\theta_6 + \pi)$

### 3.5. Análisis con herramienta de cálculo informático

A continuación, se hará una breve descripción de los archivos que se han creado para automatizar el cálculo de las posiciones y las velocidades del mecanismo teniendo las ecuaciones necesarias, desarrolladas en el apartado anterior, y con los datos exportados de la simulación, posteriormente se detallará como obtenerlos.

Inicialmente se han situado en la zona superior izquierda los datos de partida que son constantes.

	A	B	C	D
1	r1	40	$\omega_2$	6,2832
2	r2	14	$\alpha_2$	0
3	r3	80	v2	87,965
4	r4	12	v4	37,699
5	r5	50		
6	r6	30		
7	r1'	41,097		
8	$\theta_1'$	141,69		

Figura 3. 11. Parámetros de entrada de la herramienta de cálculo

Donde los valores  $r_1, r_2, r_3, r_4, r_5$  y  $r_6$  son las longitudes de las barras;  $r_1'$  es la distancia entre los puntos de unión de los eslabones 3 y 6 con el soporte y  $\theta_1'$  es el ángulo de dicho vector con la horizontal. En la columna C se representan la velocidad angular del eslabón de entrada con su aceleración angular, así como su velocidad lineal y la correspondiente al eslabón 3; en la columna D se localizan los valores de dichas constantes.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z	AA
1	r1	40	$\omega_2$	6,2832																							
2	r2	14	$\alpha_2$	0	TECNICO																						
3	r3	80	v2	87,965	0																						
4	r4	12	v4	37,699	0																						
5	r5	50																									
6	r6	30																									
7	r1'	41,097																									
8	$\theta_1'$	141,69																									
9	r1	328,15																									
10	r2	322,85																									
11	r3	326,65																									
12	r4	326,15																									
13	r5	325,85																									
14	r6	324,85																									
15	r7	324,15																									
16	r8	323,85																									
17	r9	323,15																									
18	r10	322,85																									
19	r11	322,15																									
20	r12	321,85																									
21	r13	321,15																									
22	r14	320,85																									
23	r15	320,15																									
24	r16	319,85																									
25	r17	319,15																									
26	r18	318,85																									
27	r19	318,15																									
28	r20	317,85																									
29	r21	317,15																									
30	r22	316,85																									
31	r23	316,15																									
32	r24	315,85																									
33	r25	315,15																									
34	r26	314,85																									
35	r27	314,15																									
36	r28	313,85																									
37	r29	313,15																									
38	r30	312,85																									
39	r31	312,15																									
40	r32	311,85																									
41	r33	311,15																									
42	r34	310,85																									
43	r35	310,15																									
44	r36	309,85																									
45	r37	309,15																									
46	r38	308,85																									
47	r39	308,15																									
48	r40	307,85																									

Figura 3. 12. Vaista de hoja excel que permite realizar el cálculo automatizado de las variables ( $\theta_4, r_3, \theta_3, r_5, \phi_s, r_h, \phi_h, \theta_5$  y  $\theta_6$ )



En las columnas E y F se localiza en ángulo  $\theta_2$  que necesita dos ciclos para poder obtener los datos de un ciclo completo del acoplador. En las columnas A y B se encuentra el ángulo  $\theta_4$ , el cual está asociado al eslabón 3. En las columnas que van desde la H hasta la AA se localizan los valores que se obtienen de las ecuaciones relativas a la posición del mecanismo, como se observa en la Figura 3.12.

En las columnas AD hasta la AK, se localizan los valores relativos a la velocidad y aceleración de las diferentes barras del mecanismo, siendo estas la velocidad y la aceleración lineales de  $r_3$ , la velocidad y la aceleración angulares de  $r_3$ ,  $r_5$  y  $r_6$ .

v3	A3	$\alpha_3$	$\alpha_3$	$\alpha_5$	$\alpha_5$	$\alpha_6$	$\alpha_6$	$\theta_2$
1,0777E-14	850,30438	-3,3833	5,4091E-15	-5,94	0,0944	-1,2573	25,546	0
2,36153876	849,85316	-3,3816	1,18483438	-5,9375	-1,9582	-1,3271	25,418	1
4,72057236	848,50125	-3,3767	2,36572596	-5,9306	-3,9943	-1,3951	25,184	2
7,07460533	846,25386	-3,3685	3,53876454	-5,9192	-6,0077	-1,461	24,845	3
9,42116146	843,11964	-3,357	4,70010458	-5,9034	-7,9924	-1,5247	24,403	4
11,7577932	839,11058	-3,3424	5,84599629	-5,8832	-9,9423	-1,5859	23,861	5
14,0820909	834,2419	-3,3246	6,97281532	-5,8585	-11,852	-1,6446	23,22	6
16,3916913	828,53189	-3,3037	8,07709041	-5,8295	-13,716	-1,7005	22,486	7
18,6842864	822,00181	-3,2797	9,155529	-5,7961	-15,529	-1,7535	21,662	8
20,9576308	814,67562	-3,2528	10,20504	-5,7585	-17,287	-1,8034	20,753	9
23,2095494	806,5798	-3,2231	11,2227538	-5,7168	-18,985	-1,8501	19,766	10
25,4379437	797,74316	-3,1905	12,2060393	-5,6709	-20,62	-1,8936	18,705	11
27,6407984	788,19652	-3,1553	13,1525175	-5,6211	-22,187	-1,9336	17,578	12
29,816186	777,97253	-3,1175	14,0600721	-5,5674	-23,684	-1,9701	16,391	13
31,9622724	767,10537	-3,0772	14,9268563	-5,5099	-25,108	-2,0029	15,152	14
34,0773198	755,63052	-3,0346	15,751297	-5,4489	-26,458	-2,0321	13,867	15
36,1596908	743,58444	-2,9897	16,5320951	-5,3844	-27,731	-2,0575	12,545	16
38,2078501	731,0044	-2,9428	17,268224	-5,3165	-28,926	-2,0791	11,191	17
40,2203668	717,92814	-2,8938	17,9589238	-5,2455	-30,042	-2,0969	9,8152	18
42,1959155	704,39367	-2,843	18,6036942	-5,1715	-31,079	-2,1109	8,4232	19
44,133276	690,43905	-2,7905	19,2022845	-5,0947	-32,038	-2,121	7,0227	20
46,031334	676,10213	-2,7364	19,7546822	-5,0152	-32,918	-2,1273	5,6205	21
47,8890797	661,4204	-2,6808	20,2610992	-4,9332	-33,72	-2,1298	4,2234	22
49,7056066	646,43074	-2,6239	20,7219571	-4,8489	-34,445	-2,1284	2,8378	23
51,4801099	631,1693	-2,5657	21,1378715	-4,7624	-35,095	-2,1234	1,4695	24
53,2118837	615,67132	-2,5065	21,5096353	-4,674	-35,671	-2,1146	0,1243	25
54,9003188	599,971	-2,4463	21,8382016	-4,5838	-36,175	-2,1022	-1,1928	26
56,5448993	584,1014	-2,3852	22,1246666	-4,4919	-36,61	-2,0863	-2,4769	27
58,1451993	568,0943	-2,3234	22,3702517	-4,3986	-36,977	-2,067	-3,7239	28
59,7008796	551,98017	-2,261	22,5762873	-4,304	-37,279	-2,0443	-4,9299	29
61,2116836	535,78806	-2,198	22,7441954	-4,2083	-37,519	-2,0183	-6,0916	30
62,6774334	519,54556	-2,1347	22,8754738	-4,1116	-37,699	-1,9892	-7,2063	31

Figura 3. 13. Vista de la hoja excel que permite realizar el cálculo automatizado de las variables ( $v_3$ ,  $\alpha_3$ ,  $\Omega_3$ ,  $\alpha_3$ ,  $\Omega_5$ ,  $\alpha_5$ ,  $\Omega_6$  y  $\alpha_6$ )

También se localizan los valores relativos a la posición del punto P y a su velocidad. Por un lado, en las columnas AB y AC se localizan los valores de  $P_x$  y de  $P_y$ , mientras que su módulo se encuentra en la columna AL. Por otro lado, en las columnas AM, AN y AO se encuentran los valores de  $v_x$ ,  $v_y$  y el módulo de la velocidad respectivamente.

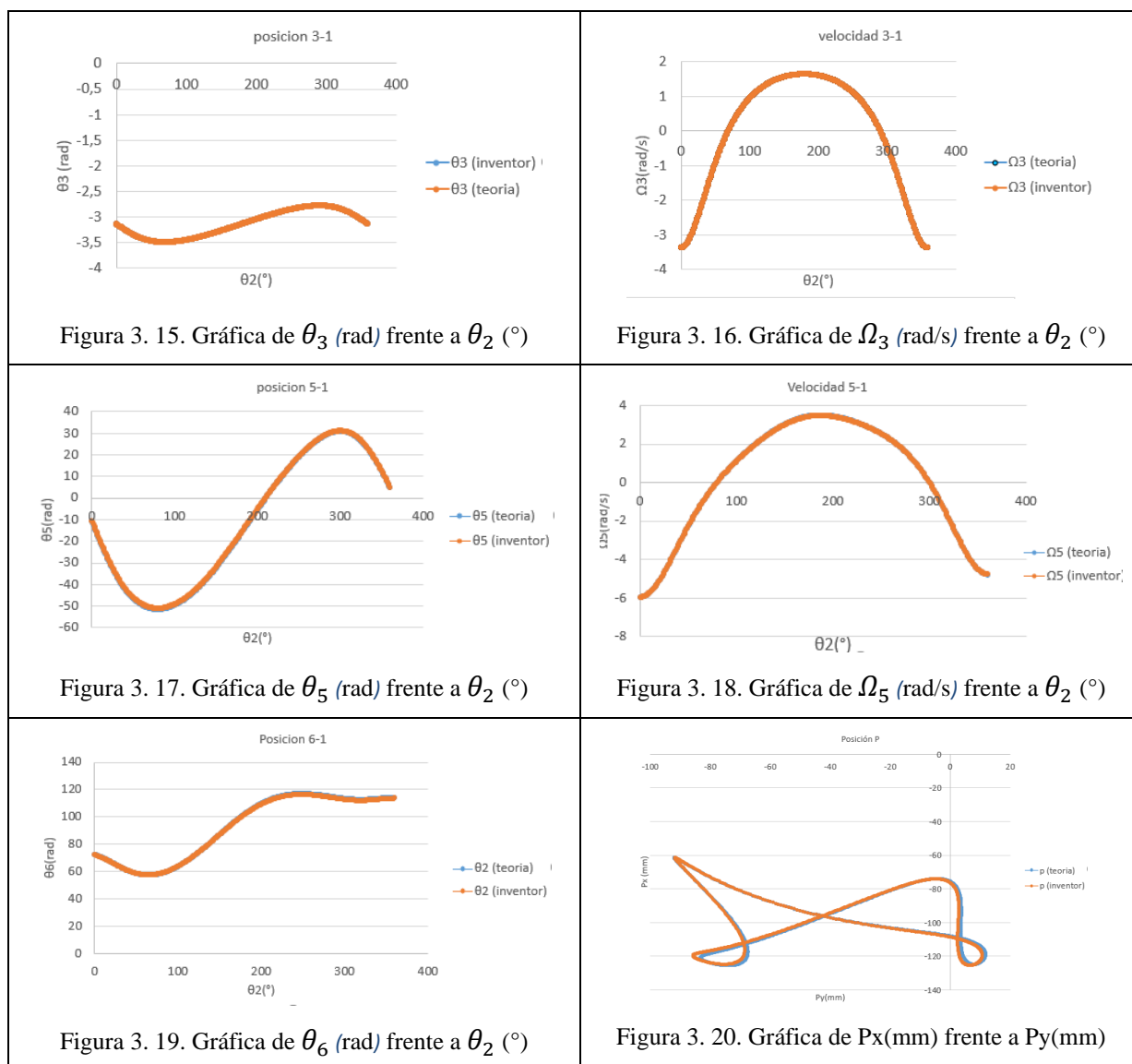
$\theta_2$	$P_x$	$P_y$	$p$	$V_x$	$V_y$	$V_p$
0	-71,55417	-101,19	123,94	310,33	127,23	335,4
1	-71,913715	-100,33	123,44	312,9	133,97	340,37
2	-72,285128	-99,457	122,95	315,24	140,5	345,13
3	-72,667825	-98,578	122,47	317,34	146,8	349,65
4	-73,061196	-97,695	121,99	319,22	152,87	353,94
5	-73,464605	-96,807	121,53	320,86	158,7	357,96
6	-73,877394	-95,916	121,07	322,26	164,27	361,71
7	-74,298881	-95,021	120,62	323,41	169,57	365,17
8	-74,728367	-94,125	120,18	324,32	174,6	368,34
9	-75,165132	-93,228	119,75	324,99	179,34	371,19
10	-75,608443	-92,33	119,34	325,4	183,79	373,72
11	-76,057552	-91,432	118,93	325,56	187,94	375,91
12	-76,511701	-90,536	118,54	325,47	191,78	377,77
13	-76,970121	-89,641	118,15	325,12	195,31	379,28
14	-77,432039	-88,749	117,78	324,52	198,53	380,43
15	-77,896679	-87,861	117,42	323,66	201,43	381,22
16	-78,363261	-86,977	117,07	322,54	204,01	381,64
17	-78,831011	-86,098	116,74	321,16	206,27	381,7
18	-79,299155	-85,225	116,41	319,53	208,21	381,38
19	-79,766928	-84,359	116,1	317,64	209,84	380,69
20	-80,233576	-83,5	115,8	315,5	211,15	379,63
21	-80,698355	-82,65	115,51	313,1	212,15	378,2
22	-81,160534	-81,808	115,24	310,45	212,84	376,4
23	-81,619402	-80,976	114,97	307,54	213,24	374,24
24	-82,074262	-80,154	114,72	304,39	213,34	371,71
25	-82,524441	-79,344	114,48	301	213,15	368,83
26	-82,969287	-78,545	114,25	297,36	212,68	365,59
27	-83,408169	-77,759	114,03	293,49	211,95	362,02
28	-83,840484	-76,985	113,82	289,39	210,95	358,11
29	-84,265653	-76,226	113,63	285,05	209,7	353,88
30	-84,683124	-75,481	113,44	280,5	208,21	349,33
31	-85,092372	-74,75	113,26	275,73	206,49	344,48

Figura 3. 14. Valores de  $P_x$ ,  $P_y$ ,  $P$ ,  $v_x$ ,  $v_y$  y  $v_p$

También se han generado una serie de archivos en los que se comparan los valores obtenidos mediante las ecuaciones matemáticas con los valores que exporte el programa de simulación. Se han comparado la posición y la velocidad de todos los eslabones de la cadena cinemática, así como la posición y la velocidad del punto P, que es el extremo del acoplador.

Como se puede observar en la siguiente tabla se exponen algunas de estas gráficas que muestran como coinciden los valores obtenidos a través de las ecuaciones y de la simulación, por lo que se verifica de este modo la precisión de los datos generados por ambos métodos.

Tabla 3.2. Gráficas comparativas de los diferentes valores obtenidos a través de las ecuaciones y de la simulación



Por un lado, se ha generado un archivo con los datos exportados de la simulación, el cual consta de diferentes apartados. Por otro lado, se ubican los datos referentes a la posición; además se hallan los datos referentes a la velocidad y también se encuentran distintas zonas con gráficos que se muestran a lo largo del documento. El archivo generado con estos datos muestra los valores de los mecanismos con las diferentes longitudes de  $r_6$ , por lo que sirven para poder ser comparados con los archivos de teoría en el caso de  $r_6$  igual a 30mm y por otro lado para poder comparar los diferentes ensamblajes entre sí, pudiendo comparar datos relevantes como las posiciones máximas

o mínimas y las velocidades máximas o mínimas. Algunas de las zonas que se pueden localizar en este archivo son :

- Zona de posición: En esta zona se localizan los diferentes valores de  $P_x$  y de  $P_y$  para los distintos valores de  $r_6$ , además, en esta zona se remarcan unos valores concretos, estos punto son los que poseen las máximas y las mínimas velocidades tomando sectores de  $90^\circ$  de diferencia, es decir, se marcan las velocidades máximas y mínimas de  $0^\circ$  a  $89^\circ$ , de  $90^\circ$  a  $179^\circ$  y así sucesivamente hasta llegar a  $720^\circ$ . Estos valores son muy importantes, puesto que se pueden trazar las trayectorias de la punta del acoplador para los diferentes valores de  $r_6$  y de este modo poder ver las tendencias y los cambios que sufren las curvas.
- Zona de velocidades: En esta región se localizan los diferentes valores de  $v_x$  y de  $v_y$ , de la punta del acoplador, así como su módulo. Esto es muy útil y está relacionado con el punto anterior, puesto que es de esta zona donde se obtienen los puntos de velocidad máxima y mínima para cada tramo.
- Zonas de gráficas: Se pueden localizar diferentes ubicaciones con gráficas, las cuales se explicarán más detalladamente a lo largo del documento. Son graficas relativas a las distancias más alejadas o cercanas a los ejes de referencia, a velocidades, trayectorias y comparativas entre todos los valores de  $r_6$ .

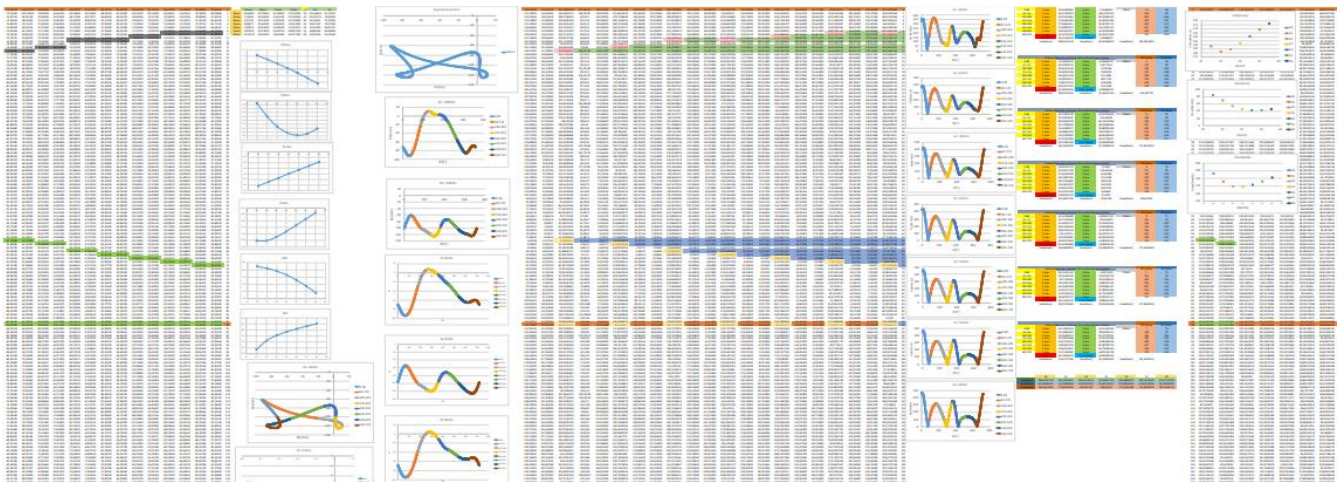
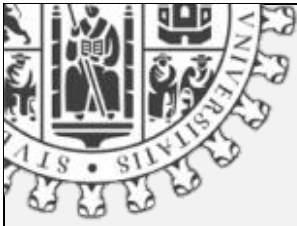


Figura 3. 15. Visualización de las diferentes zonas en las que se calculan las variables y gráficas correspondientes

Las imágenes de la hoja de calculo se muestran con carácter orientativo.



## Capítulo IV:

# Diseño y simulación del mecanismo de amasado

### 4.1. Diseño del mecanismo

A continuación, se procederá a la explicación de los pasos que se han seguido para el desarrollo de las piezas que forman el ensamblaje, desde los bocetos hasta las extrusiones realizadas. Para finalizar con la explicación del procedimiento que se ha seguido para el ensamblaje de dichas piezas individuales para formar el mecanismo de estudio.

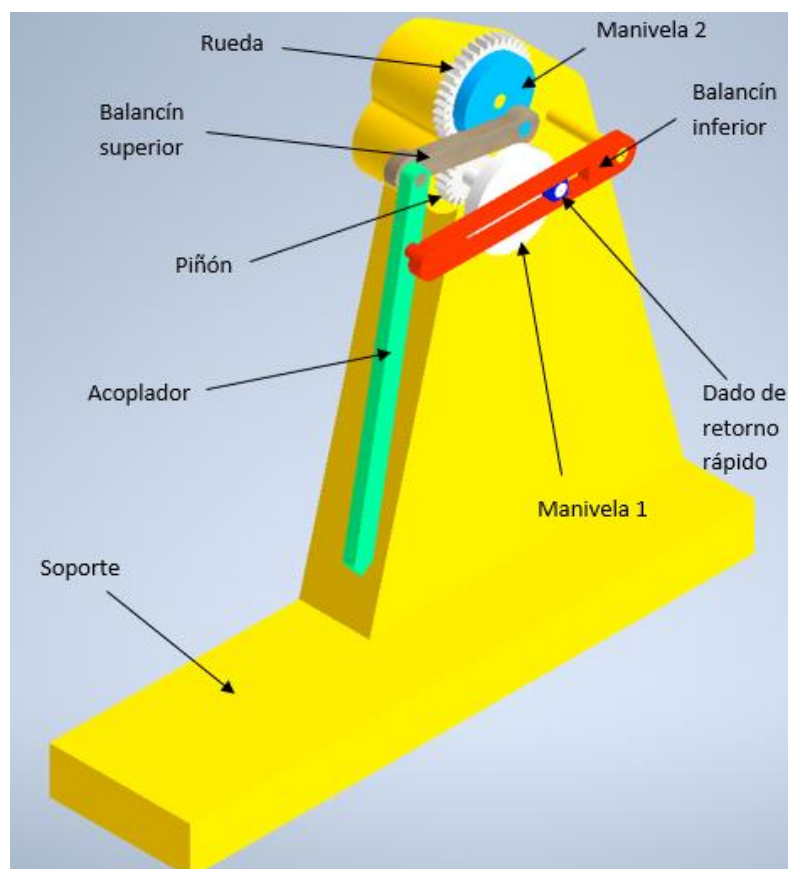


Figura 4. 1 Modelo virtual ensamblado

#### 4.1.1 Soporte:

Se comenzará realizando un primer boceto a partir del cual se realizarán las extrusiones necesarias para conseguir el cuerpo principal del soporte.

Para la realización del soporte se han tenido en cuenta las distancias entre los ejes como la principal restricción, para ello debe haber una separación entre ellos de 8mm entre los ejes 1 y 2 (teniendo en cuenta el orden de extrusión) y de 40mm entre el eje 1 y 3, a su vez debe haber una separación de 25.787mm entre los ejes 1 y 3, los cuales están en la misma recta horizontal, y el eje 2.

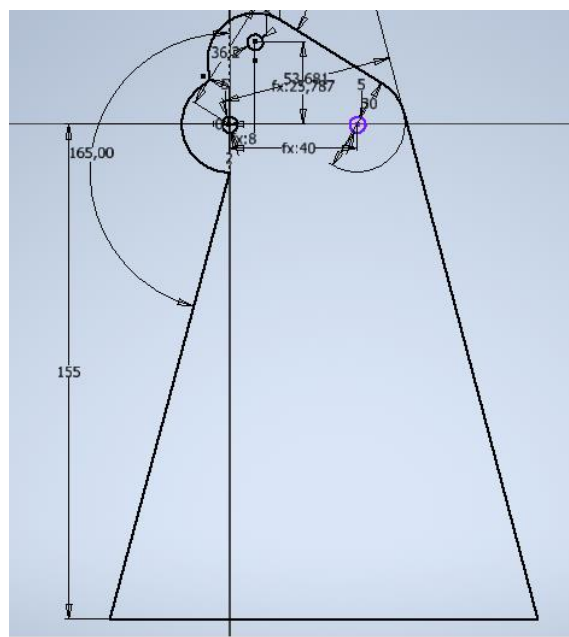


Figura 4. 2 Boceto del soporte

Se realizarán cuatro extrusiones, las tres primeras corresponden a las extrusiones de los ejes sobre los cuales se asentarán los engranajes que forman parte del mecanismo principal y la última al cuerpo principal de la pieza soporte.

La primera de las extrusiones se realizará sobre el eje que anteriormente se ha denominado “eje 2”. La opción de extrusión elegida es la asimétrica; por un lado, se ha realizado una extrusión en el eje +Y de 10mm y en el eje -Y de 30mm, teniendo en cuenta la extrusión que se va a realizar a continuación del cuerpo principal del soporte.



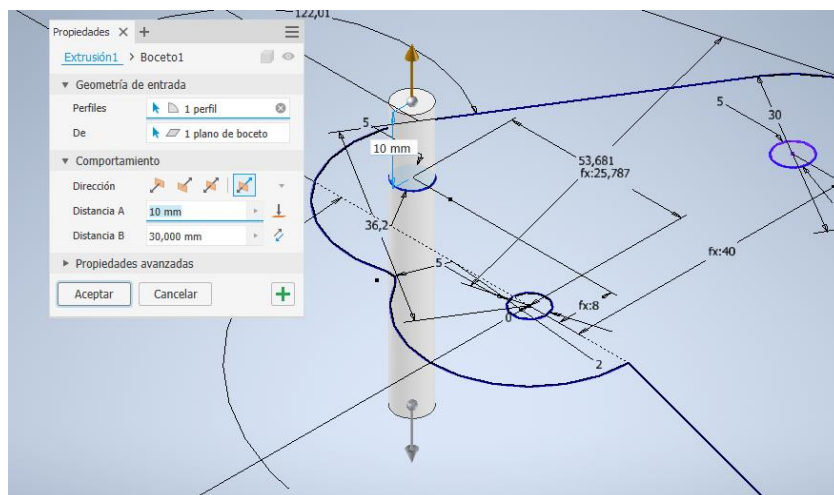


Figura 4. 3. Extrusión eje 2

La segunda de las extrusiones se realizará sobre el eje que anteriormente se ha denominado “eje 1” al igual que en el caso anterior de extrusión elegida es la asimétrica. Se ha realizado una extrusión en el eje +Y de 25mm y en el eje -Y de 30mm.

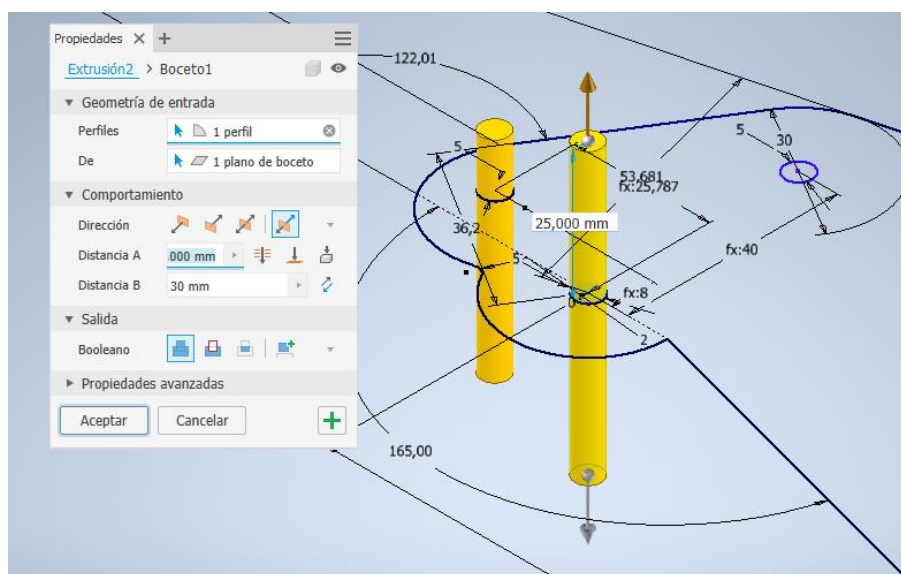


Figura 4. 4. Extrusión eje 1

La tercera de las extrusiones se realizará sobre “eje 3”. Al igual que en los dos casos anteriores la extrusión elegida es la asimétrica. Por un lado, se ha realizado una extrusión en el eje +Y de 30mm y en el eje -Y de 30mm.

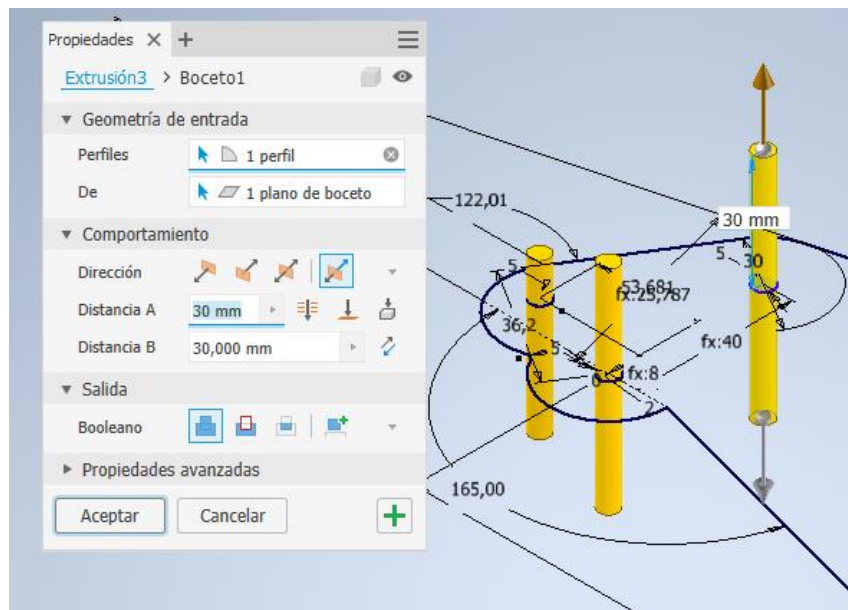


Figura 4. 5. Extrusión eje 3

La cuarta de las extrusiones se realizará sobre el cuerpo principal del soporte. Se aplicará la opción de extrusión invertida, la cual traza como eje de referencia el eje -Y, para tener una coherencia con las extrusiones anteriormente realizadas se llevará a cabo una extrusión de valor 30mm.

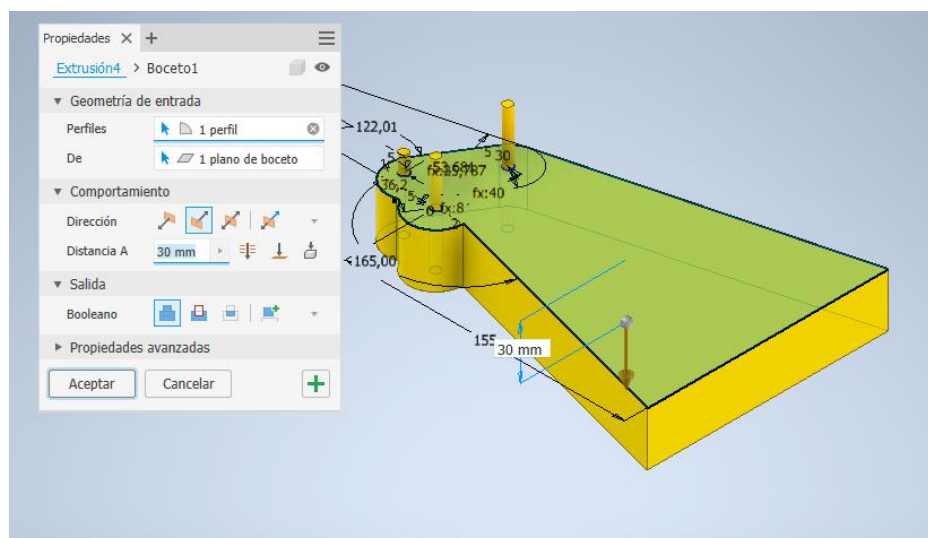


Figura 4. 6 Extrusión cuerpo principal del soporte o pieza 0

El cuerpo secundario del soporte corresponde a la base de este, el cual se ha realizado llevando a cabo la operación boceto sobre la base del cuerpo principal, para seguidamente llevar a cabo una extrusión de dicho boceto.



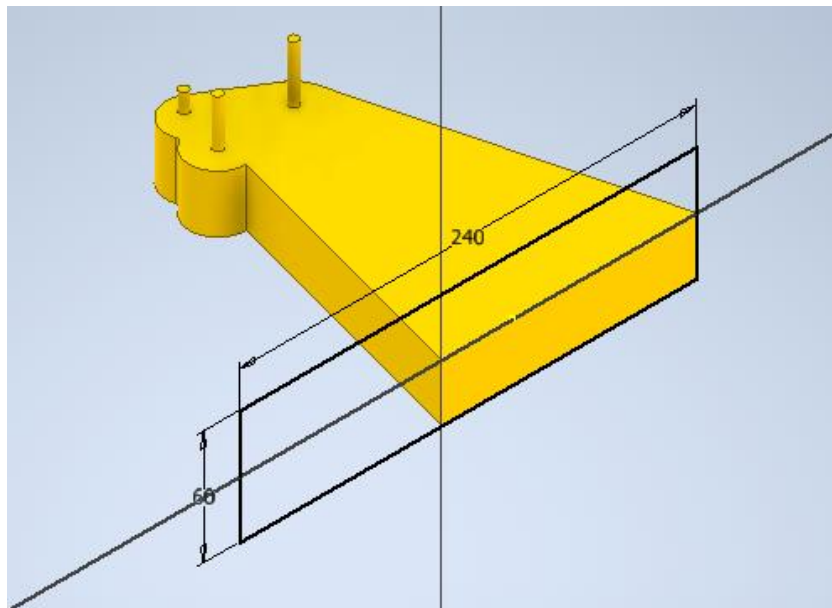


Figura 4. 7. Boceto para la base del soporte

Para la realización de la extrusión de la base del soporte se ha escogido la opción por defecto, aplicando un valor de 20mm.

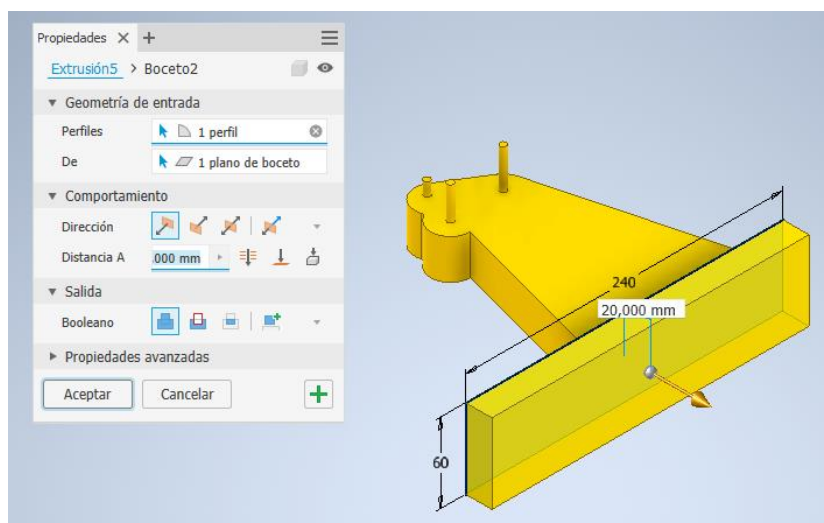


Figura 4. 8 Extrusión de la base del soporte

#### 4.1.2 Manivela 1:

Para el diseño de la pieza se ha realizado un boceto inicial que será el soporte de los demás bocetos secundarios y las extrusiones a realizar. Para ello se ha tenido en cuenta como valor más restrictivo la distancia entre el eje principal y el eje que pasa por el bulón y el valor del diámetro de este, que servirá de apoyo para la pieza que realizará el movimiento de retorno rápido. A su vez, también se han tenido en

cuenta en los bocetos secundarios los valores de los diámetros de los ejes del soporte y de las extrusiones de estos.

Se ha determinado que el valor de la separación entre estos dos ejes debe ser de 14mm, a su vez el diámetro de bulón será de 5mm y el diámetro del disco que forma el cuerpo principal será de 35mm.

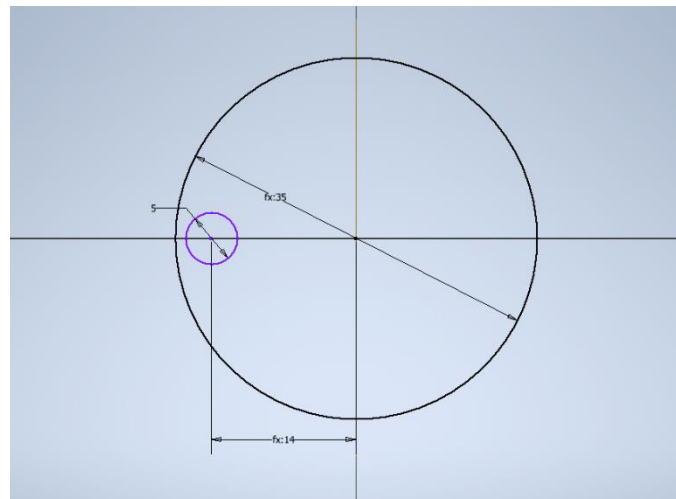


Figura 4. 9. Boceto manivela 1

La primera de las extrusiones será la del bulón, para ello se ha elegido la opción de extrusión asimétrica, por un lado, se ha realizado una extrusión en el eje +Y de 5mm y en el eje -Y de 5mm, teniendo en cuenta la extrusión que se va a realizar a continuación del cuerpo principal de la manivela.

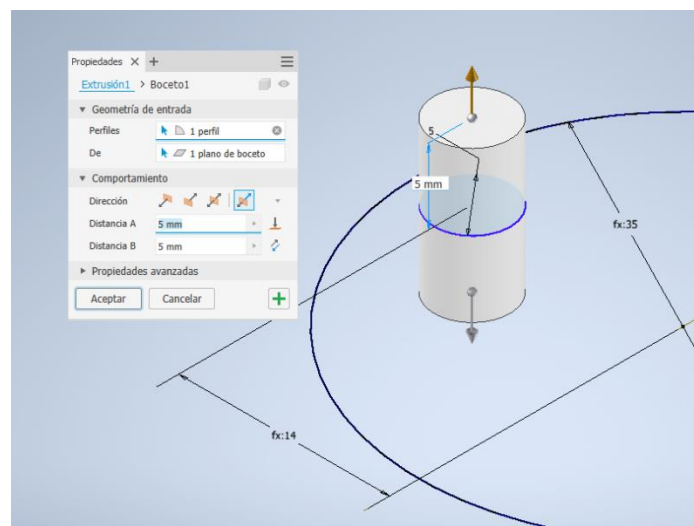


Figura 4. 10. Extrusión del bulón de la manivela 1

La segunda de las extrusiones se realizará sobre el cuerpo principal de la manivela. Se aplicará la opción de extrusión invertida, la cual traza como eje de referencia el eje -Y, para tener una coherencia con la extrusión anteriormente realizada se llevará a cabo una extrusión de valor 5mm.

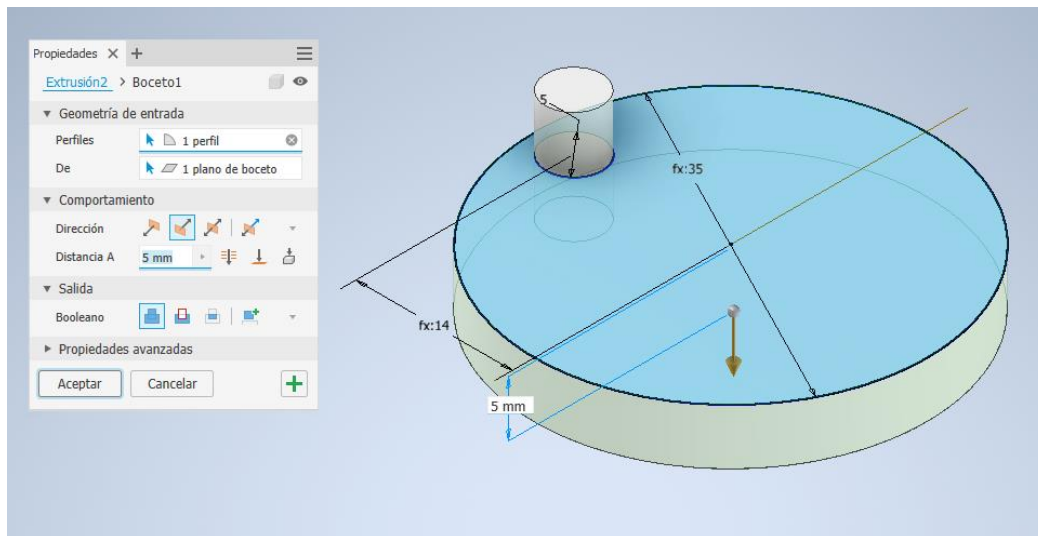


Figura 4. 11. Extrusión cuerpo principal manivela 1

Seguidamente se ha realizado un boceto en la cara inferior del disco que forma el cuerpo principal de la manivela. El boceto realizado será una circunferencia concéntrica con el disco principal, seguidamente se ha realizado una extrusión eligiendo la opción por defecto de valor 20mm.

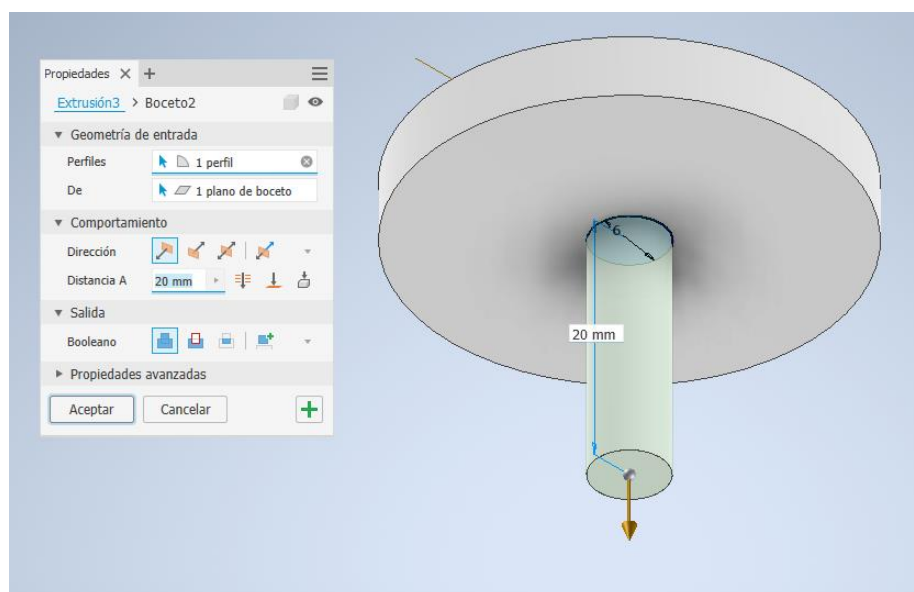


Figura 4. 12. Extrusión eje de la manivela 1

Para finalizar la pieza, se realiza un boceto en la base de la última extrusión realizada para seguidamente realizar una extrusión eligiendo la opción cortar, con una longitud de 30mm para que sea totalmente pasante, en este hueco generado irá alojado el eje 1 del soporte.

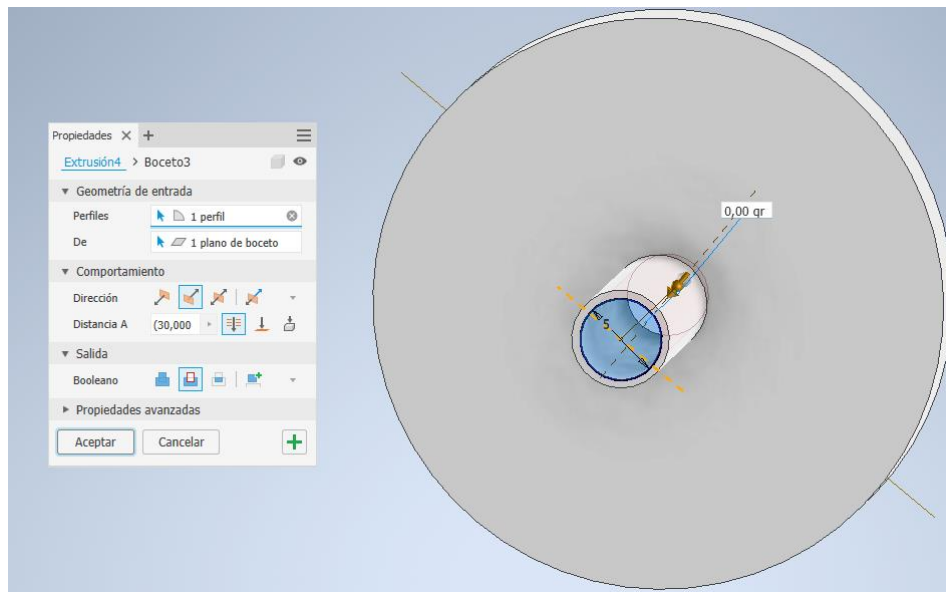


Figura 4. 13. Vaciado del eje de la manivela para poder ser encajada en el eje 1 del soporte

#### 4.1.3 Manivela 2:

Para el diseño de la pieza se han seguido los mismos pasos que en la pieza anteriormente descrita. Para ello se han tenido en cuenta como valores más restrictivos la distancia entre el eje principal y el eje que pasa por el bulón y el valor del diámetro de este, que servirá de apoyo para la pieza que realizará el movimiento de biela.

La separación entre los dos ejes que aparecen en la pieza debe ser de 12mm, del mismo modo el diámetro de bulón será de 5mm y el diámetro del disco que forma el cuerpo principal será de 30mm.

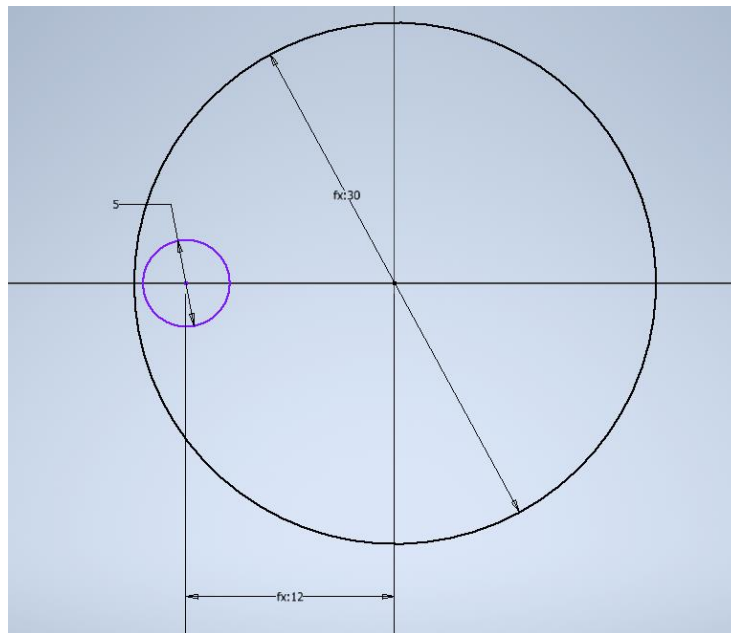


Figura 4. 14. Boceto de la manivela 2

La primera de las extrusiones será la del bulón. Para ello se ha elegido la opción de extrusión asimétrica, por un lado, se ha realizado una extrusión en el eje +Y de 5mm y en el eje -Y de 5mm, teniendo en cuenta la extrusión que se va a realizar a continuación del cuerpo principal de la pieza.

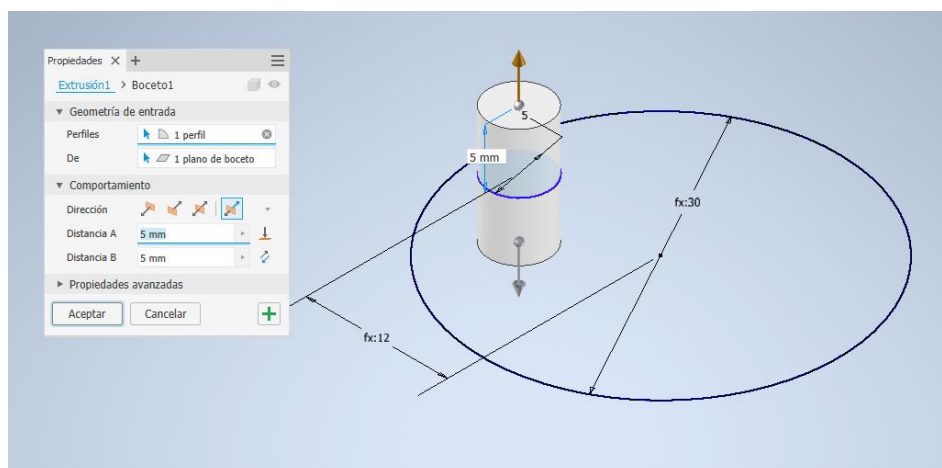


Figura 4. 15. Extrusión del bulón de la manivela 2

La segunda de las extrusiones se realizará sobre el cuerpo principal de la pieza. Se aplicará la opción de extrusión invertida, la cual traza como eje de referencia el eje -Y, para mantener una relación con el proceso anteriormente descrito se procederá con extrusión de valor 5mm.

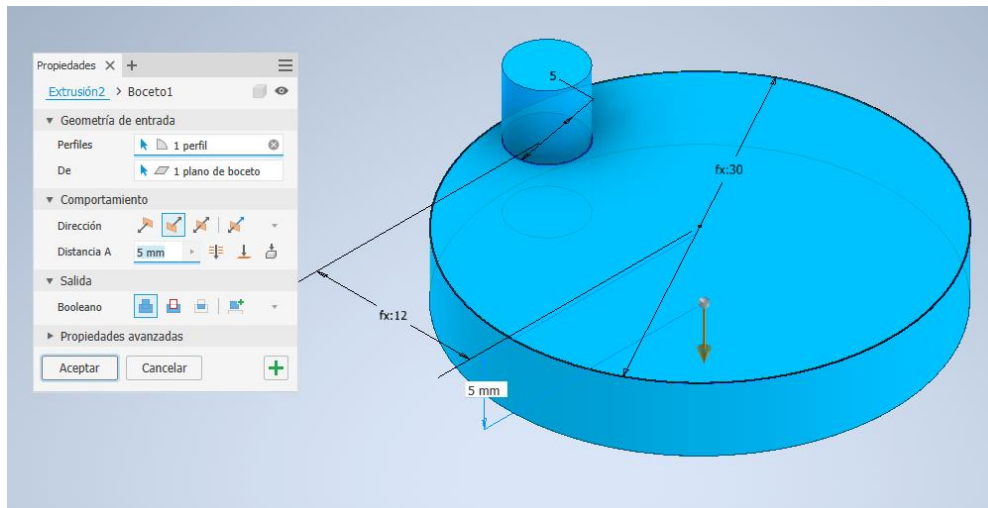


Figura 4. 16 Extrusión del cuerpo principal de la manivela 2

A continuación, se ha realizado un boceto en la cara inferior del cuerpo principal. El boceto constará de una circunferencia concéntrica con el disco principal, seguidamente se ha realizado una extrusión marcando la opción por defecto de valor 5mm.

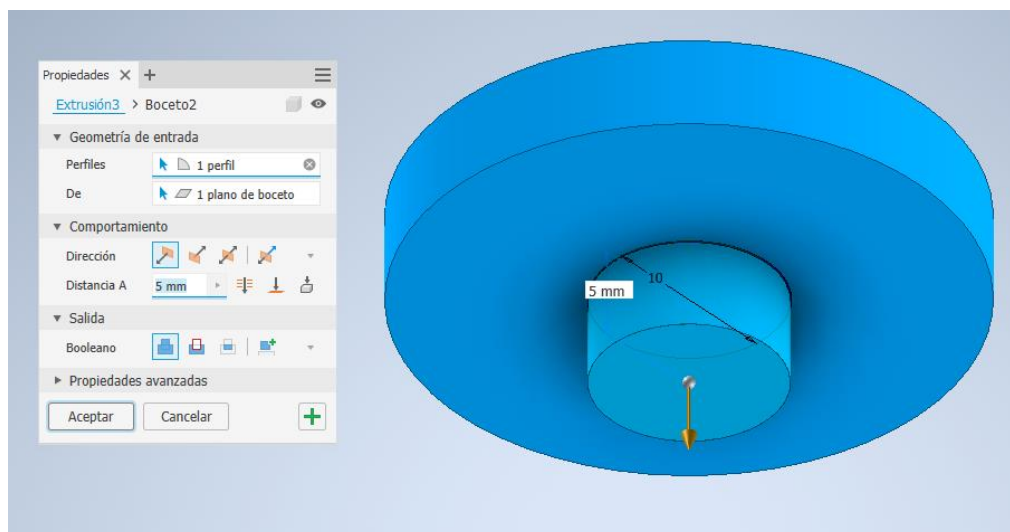


Figura 4. 17. Extrusión del eje de la manivela 2

Para concluir la pieza, se realiza un boceto en la base de la última extrusión realizada para seguidamente ejecutar una extrusión eligiendo la opción cortar con una longitud de 15mm para que sea totalmente pasante, en este hueco generado, ira alojado el “eje 1” del soporte.

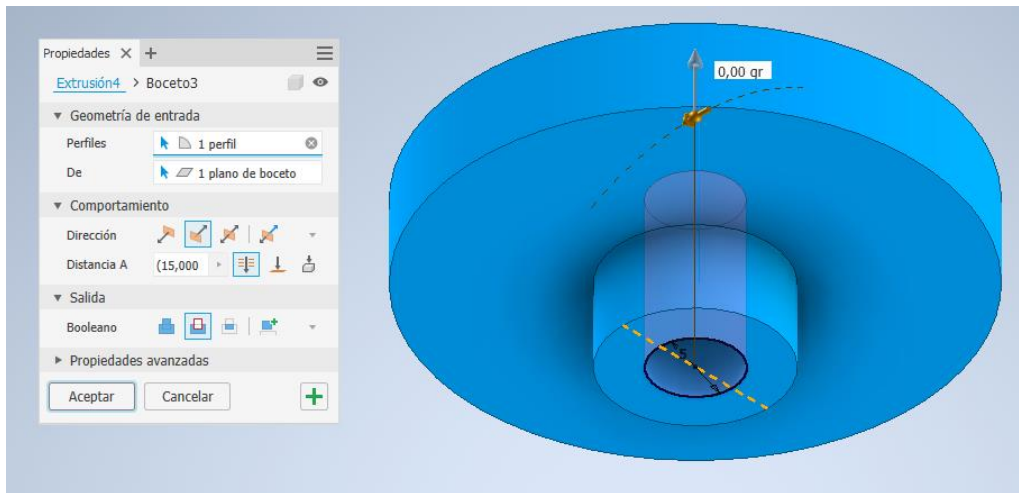


Figura 4. 18. Vaciado del eje de la manivela para poder ser encajada en el eje 2 del soporte

#### 4.1.4. Dado de retorno rápido:

Se comenzará con un boceto formado por un cuadrado de 6mm de lado con un círculo concéntrico de 5mm de diámetro.

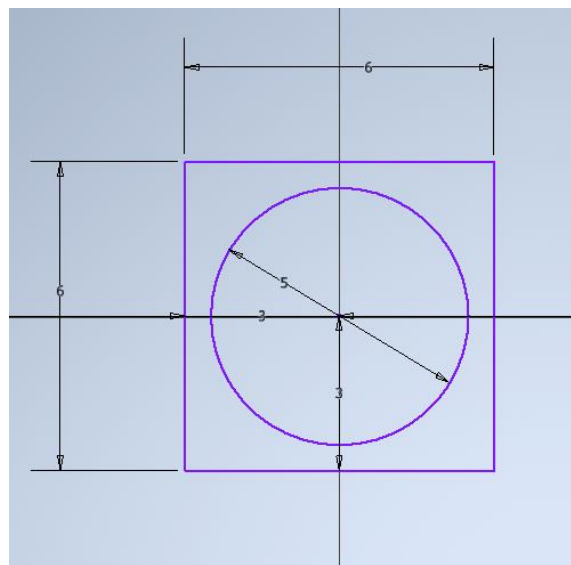


Figura 4. 19. Boceto del dado de retorno rápido

A continuación, se llevará a cabo una extrusión marcando la opción por defecto con un valor de 5mm en dirección del eje +Y.



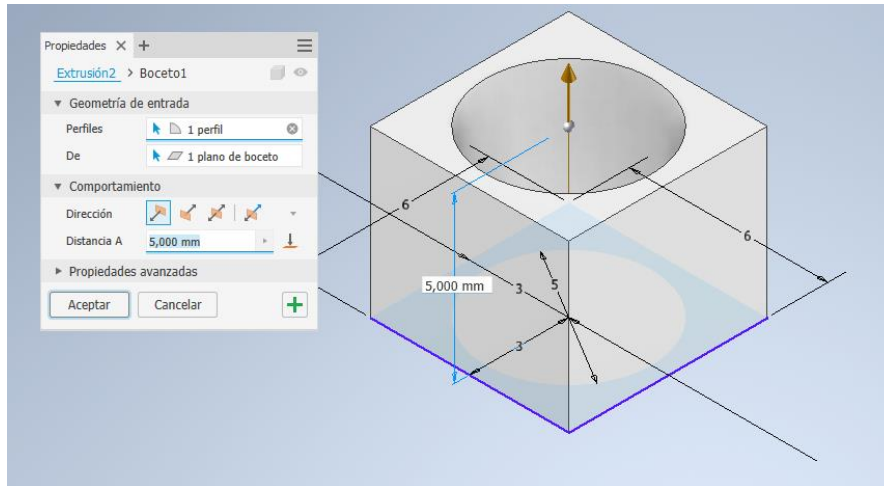


Figura 4. 20. Extrusión del cuerpo principal del dado de retorno rápido

Esta pieza está unida por su agujero pasante a la manivela, realizando el movimiento de retorno rápido.

#### 4.1.5. Balancín superior:

Para el diseño del balancín superior, se comenzará con un boceto en el cual se deben respetar las siguientes características, debe tener una distancia entre los apoyos de 50mm, debe estar formada por dos apoyos que servirán de uniones en las articulaciones del mecanismo, por lo que deben ser agujeros pasantes, bulones o una combinación de ambos casos.



Figura 4. 21. Boceto del balancín superior



El siguiente paso en el proceso de modelado de la pieza es realizar una extrusión de la circunferencia inferior, dotándola de la característica de un bulón, la medida será de 10mm y se seleccionará la opción de extrusión por defecto. Se debe tener en cuenta en esta extrusión el ancho que se le otorgará al cuerpo principal de la pieza y a las dimensiones de la pieza que se unirá a esta en este punto.

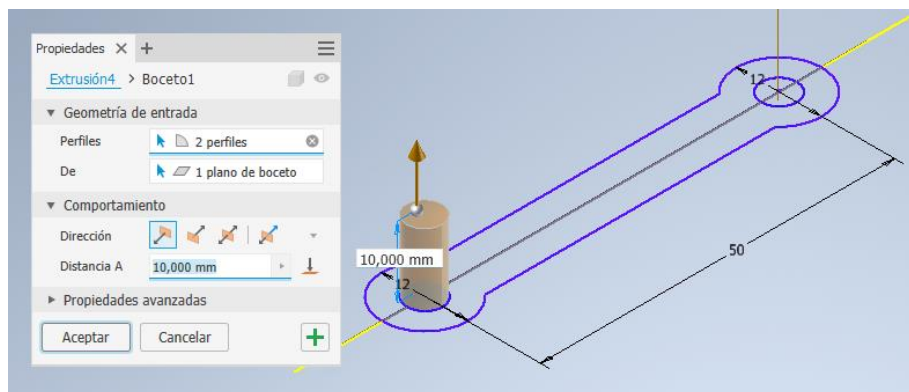


Figura 4. 22. Extrusión del bulón del balancín superior

La última de las extrusiones a realizar será la del cuerpo principal, dejando la circunferencia superior como agujero pasante. El valor de extrusión será de 5mm mediante la opción por defecto en la dirección positiva del eje Y.

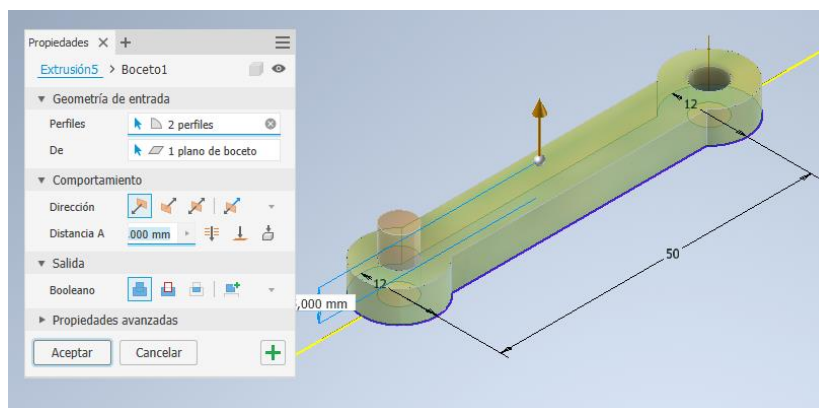


Figura 4. 23. Extrusión del cuerpo principal del balancín superior

#### 4.1.6. Balancín inferior:

La característica principal de este segundo balancín es que le aporta un movimiento de retorno rápido. Esta biela está unida al dado de retorno rápido y al soporte. De la misma forma que estas dos características limitan el diseño, la otra característica restrictiva es que la distancia entre apoyos debe ser de 80mm.

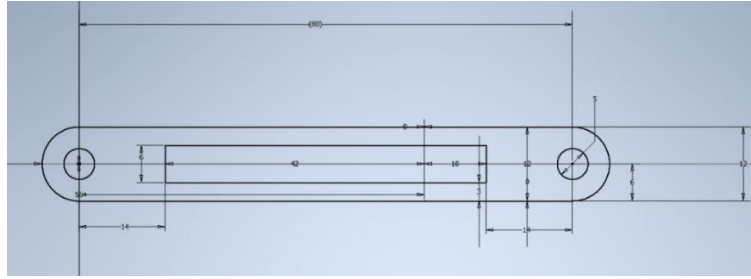


Figura 4. 24. Boceto del balancín inferior

La primera de las extrusiones a realizar será de la circunferencia situada mas a la izquierda. Se marcará la opción de extrusión asimétrica, seleccionando una distancia de 5mm en la dirección del eje +Y y un valor de 10mm en la dirección del eje -Y.

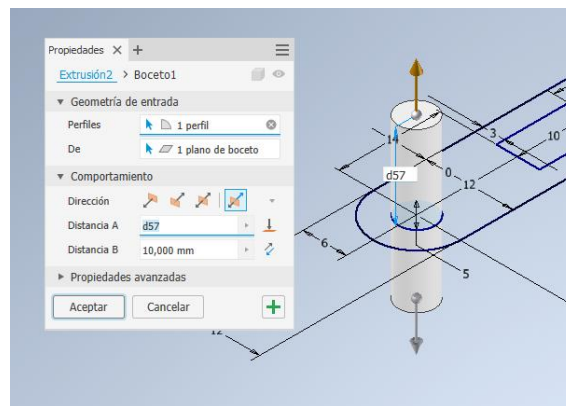


Figura 4. 25. Extrusión bulón del balancín inferior

La última de las extrusiones se aplicará sobre el cuerpo principal de la pieza, dejando el hueco central y la circunferencia de la derecha como pasantes. En estos huecos irán alojados el eje del soporte y el dado de retorno rápido.

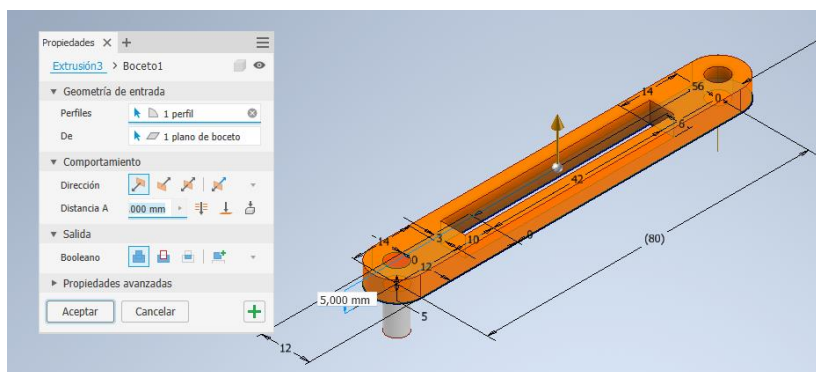


Figura 4. 26. Extrusión cuerpo principal del balancín inferior

#### 4.1.7. Acoplador:

Esta pieza es la que determinara la trayectoria principal del mecanismo. Se comenzará trazando un boceto en el cual las cuatro características restrictivas serán que debe poseer dos circunferencias pasantes en las cuales se alojaran los bulones de las dos bielas del mecanismo, otra de las características será que la distancia entre estos dos huecos pasantes debe ser de 24mm y la ultima debe ser que su longitud desde el eje que pasa por la circunferencia situada en uno de los extremos y el extremo opuesto debe ser de 136mm.

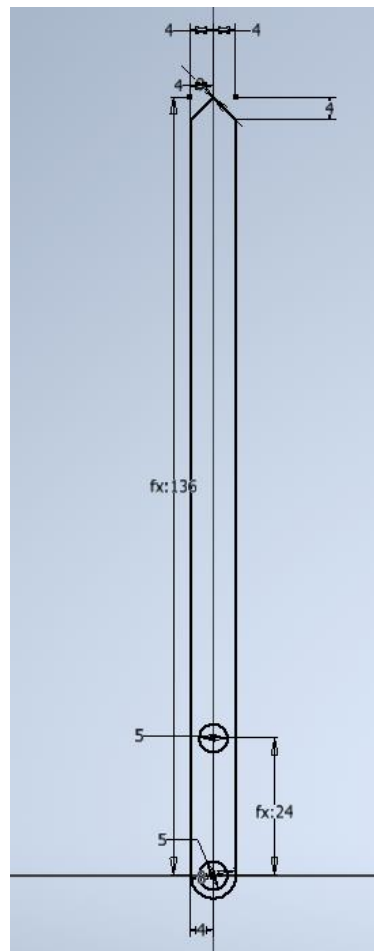


Figura 4. 27. Boceto del acoplador

La pieza se finalizará realizando una extrusión de valor 5mm en la dirección positiva del eje Y, marcando la opción por defecto en el panel de propiedades de la extrusión.

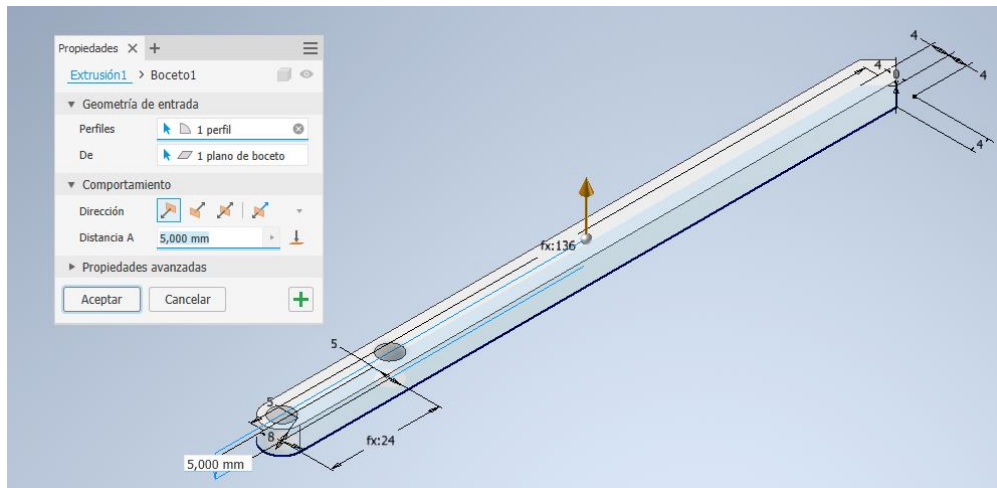


Figura 4. 28. Extrusión cuerpo principal del acoplador

## 4.2. Ensamblaje

Para llevar a cabo el ensamblaje se aplicarán las opciones que se visualizan en la barra superior, se procederá a la explicación de cuales de estas opciones se aplicaran para el correcto funcionamiento del ensamblaje y su unión.

Para comenzar se clicará sobre la opción “insertar”, mediante la cual se seleccionarán las piezas que forman el mecanismo.

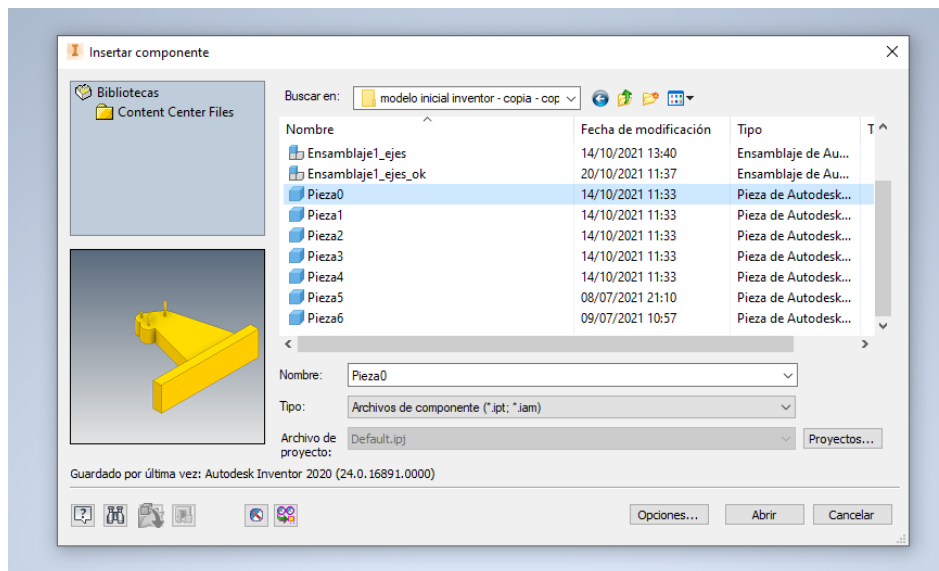


Figura 4. 29 Ventana emergente “Insertar componente”

Una vez insertada la primera pieza, que en este caso es el soporte. Se debe colocar fijo en el origen para poder obtener unos datos con una referencia directa.

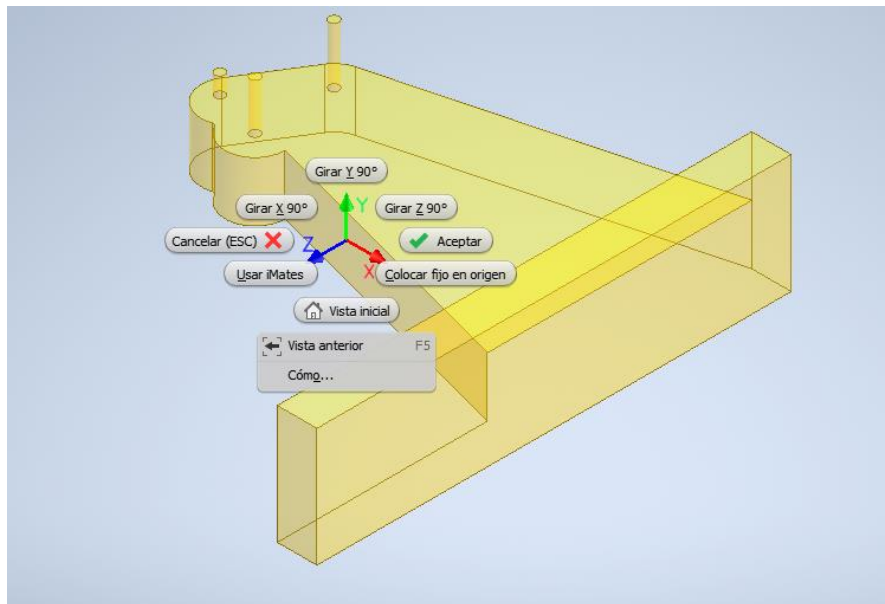


Figura 4. 30. Colocación del soporte en el origen

Seguidamente se procederá a insertar las demás piezas en la pantalla.

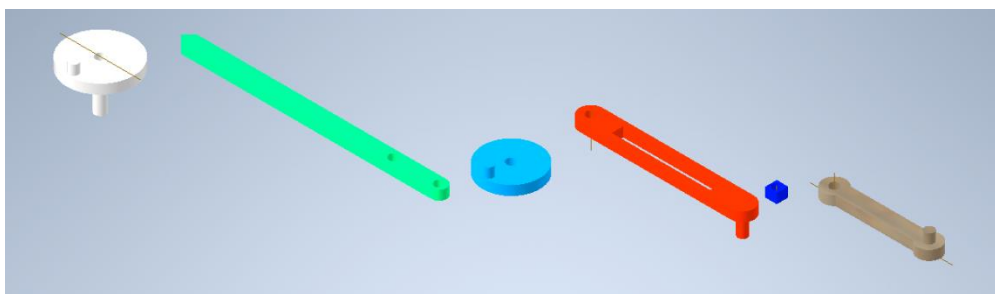


Figura 4. 31. Piezas del ensamblaje sin el soporte

El siguiente paso será comenzar a realizar las restricciones pertinentes para ensamblar las diferentes piezas que forman el mecanismo.

La primera de las restricciones se hará entre la pieza 0 y la pieza 1. Se lleva a cabo seleccionando la opción de “Insertar” en el panel de restricciones y haciendo coincidir los ejes de ambas piezas. A su vez se debe seleccionar la opción de “Alineada”, de este modo se consigue que las piezas se sitúen en la posición adecuada.

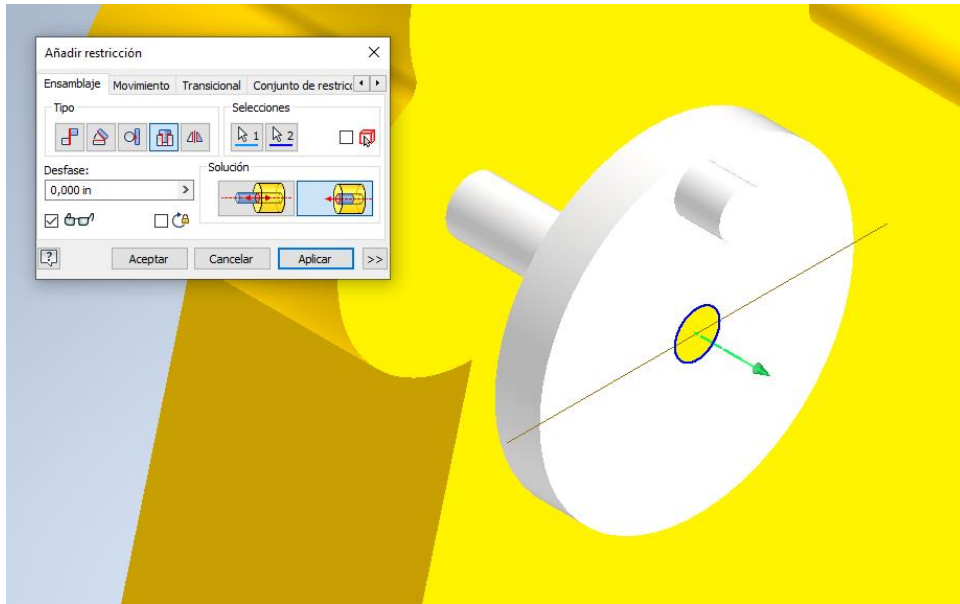


Figura 4. 32. Restricción entre el soporte y la manivela 1

La segunda restricción para aplicar será entre la pieza 0 y la pieza 3. De igual modo que el caso anterior se procede mediante la opción “Insertar” con la selección de “Alineada”, marcando los ejes de ambas piezas.

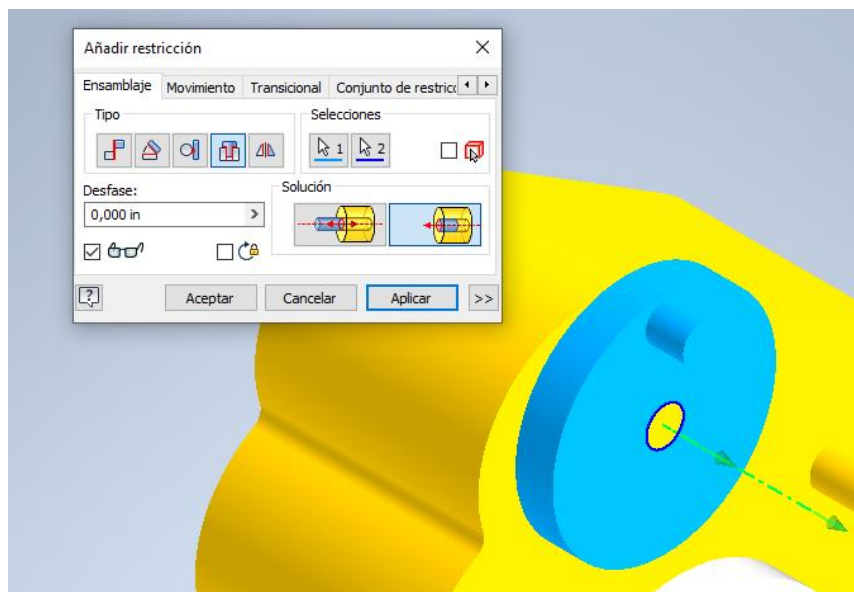


Figura 4. 33. Restricción entre el soporte y la manivela 2

La tercera de las restricciones será entre la pieza 1 y la pieza 5. Se procederá del mismo modo que las restricciones anteriores.

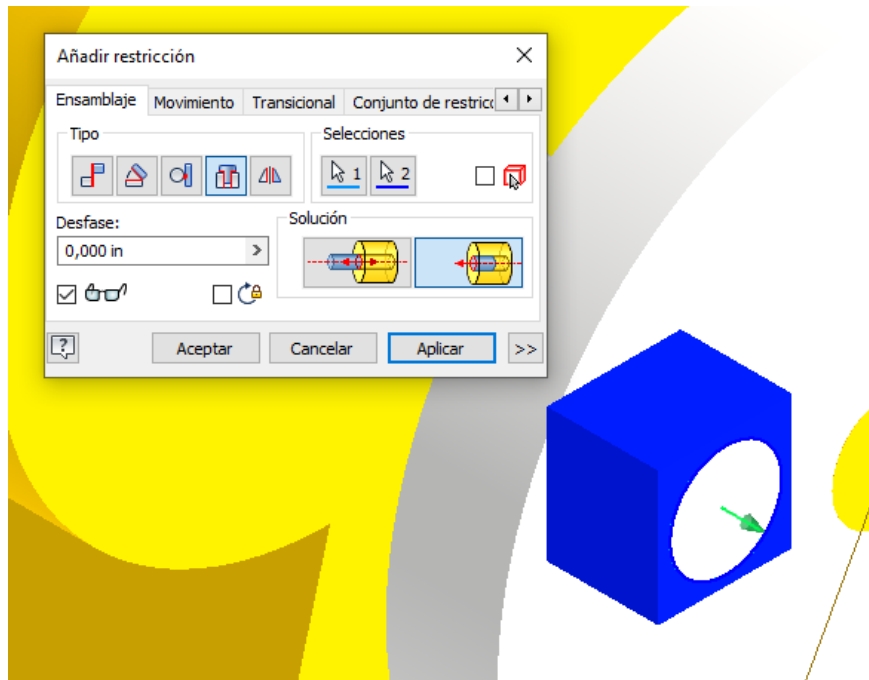


Figura 4. 34. Restricción entre la manivela 1 y el dado de retorno rápido

La cuarta restricción se llevará a cabo entre la piezas 3 y la pieza 5. Se elegirá la opción “Coincidencia” de esta forma se restringirán las caras seleccionadas, en esta restricción se obtiene el retorno rápido del mecanismo.

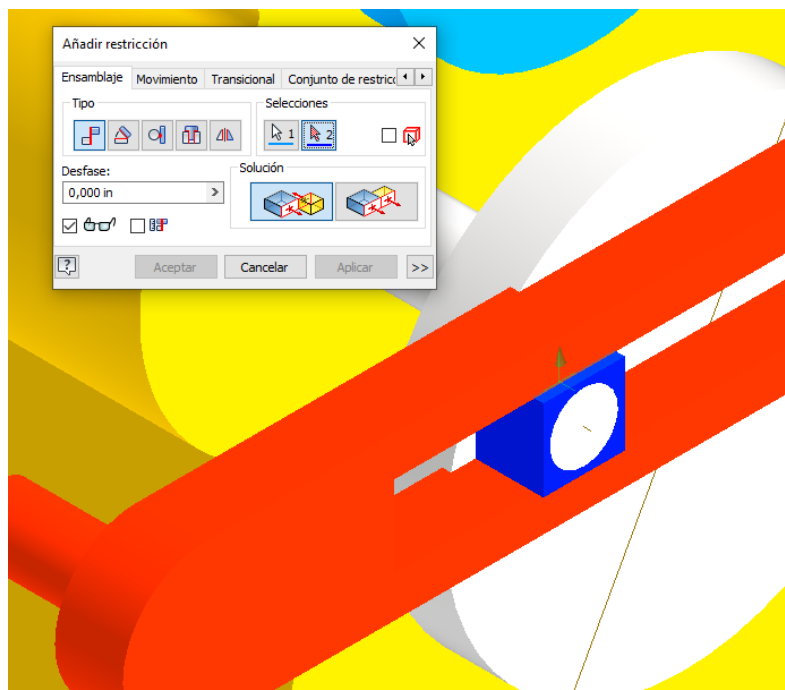


Figura 4. 35. Restricción entre el balancín inferior y el dado de retorno rápido



La quinta restricción se realizará sobre la pieza 4 y el soporte. Al realizarla se corregirá el pequeño desvío de la anterior restricción. Se seleccionará la opción de “Insertar”, al igual que en las primeras restricciones realizadas.

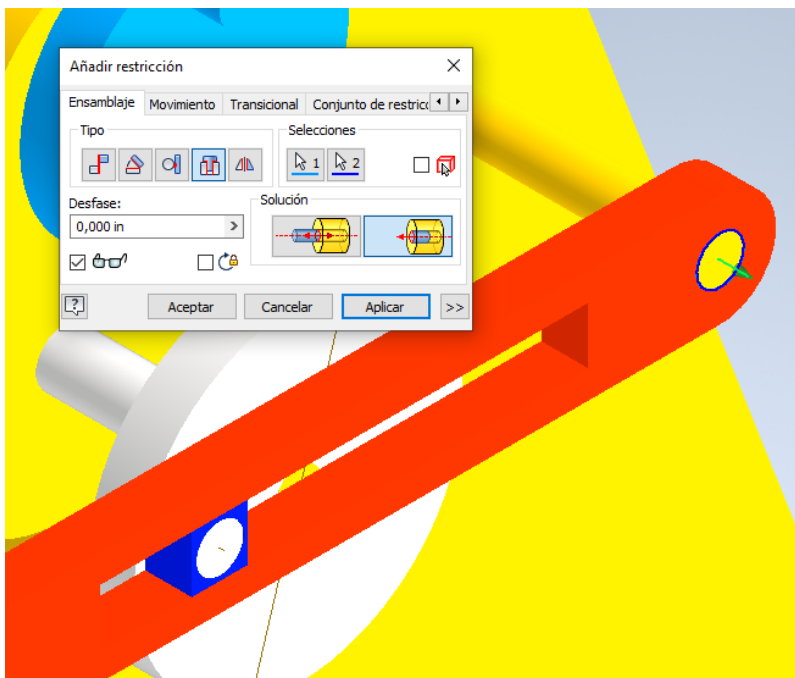


Figura 4. 36. Restricción entre el soporte y el balancín inferior

La sexta restricción será entre la pieza 3 y la pieza 6. Se llevará a cabo de la misma forma que la anterior.

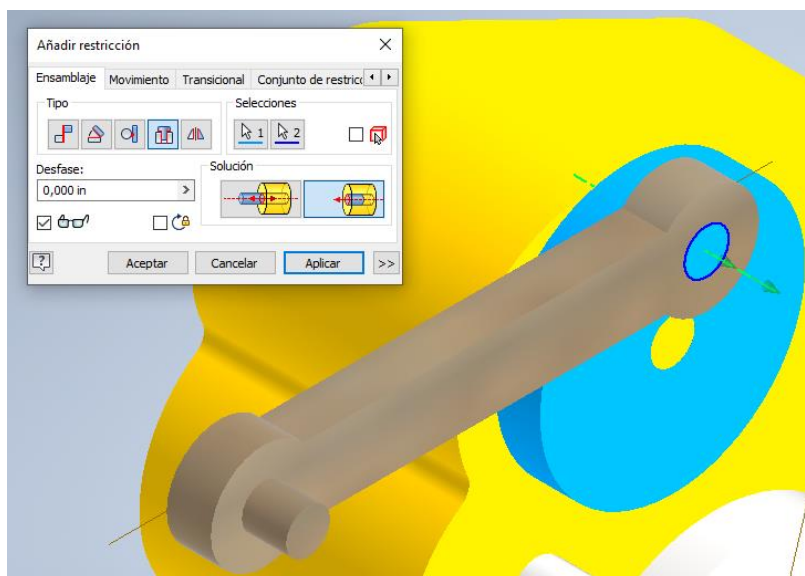


Figura 4. 37. Restricción entre el balancín superior y la manivela 2



Las dos últimas restricciones se realizan de la misma manera que las anteriores y sirven para unir las piezas 4, 2 y 6.

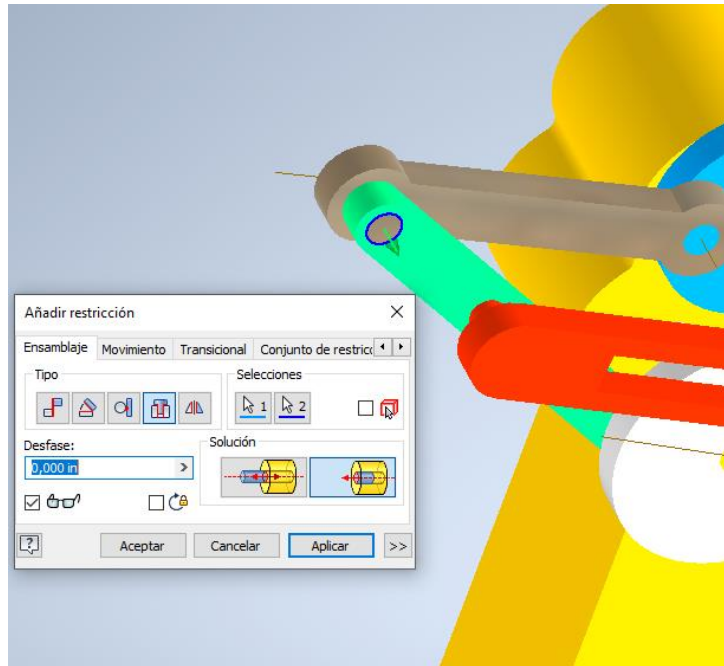


Figura 4. 38. Restricción entre el balancín superior y el acoplador

Una vez ensambladas las piezas, se dotará al mecanismo de una de sus características principales. Se unirán las dos manivelas mediante el módulo desing accelerator, creando un tren de engranajes que restringirá el movimiento de una con respecto a la otra, de este modo se logra tener una relación de transmisión entre las manivelas y facilitando los cálculos al dotar al mecanismo con un único motor en una de las manivelas.

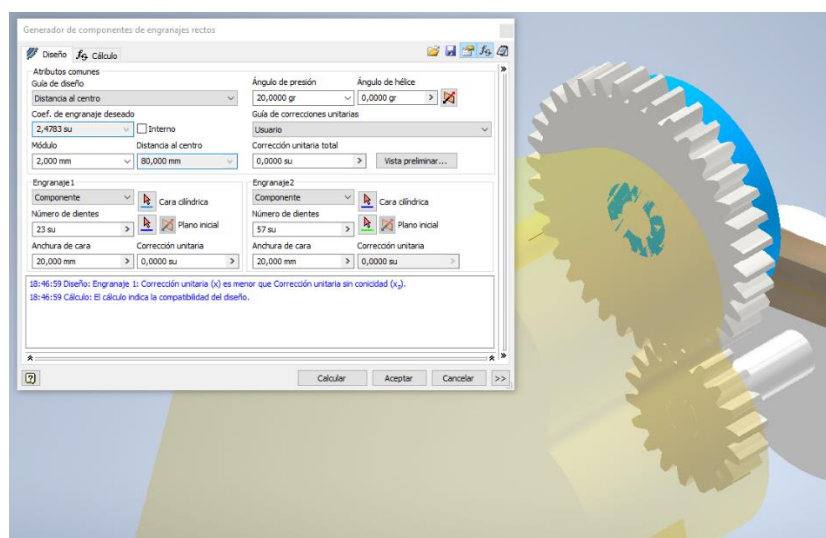


Figura 4. 39. Diseño de tren de engranajes

Una vez se tienen los engranajes, se deben restringir con los ejes de las manivelas, para que giren de forma solidaria. Para esto, se activa la visualización de los planos XY de la pieza 1 y el engranaje que esta asociado a dicha pieza. Se lleva a cabo una restricción entre estos dos planos logrando que giren de forma solidaria.

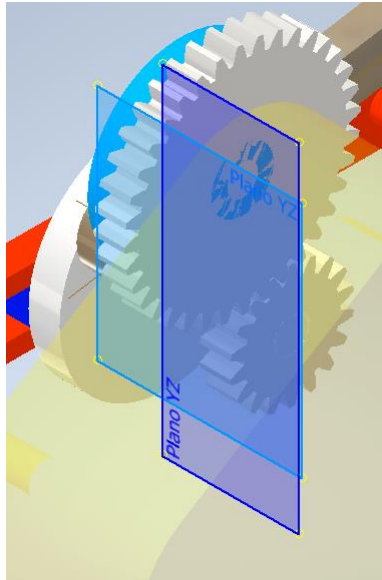


Figura 4. 40. Coincidencia entre los planos de la manivela 2 y el engranaje superior

De la misma forma que el caso anterior, se hacen visibles los planos YZ tanto de la pieza 3 como del engranaje asociado a esta. Una vez están visibles, se deben restringir. De este modo se consigue que moviendo la manivela 1, la manivela 2 tenga un movimiento adquirido a través de dichos engranajes.

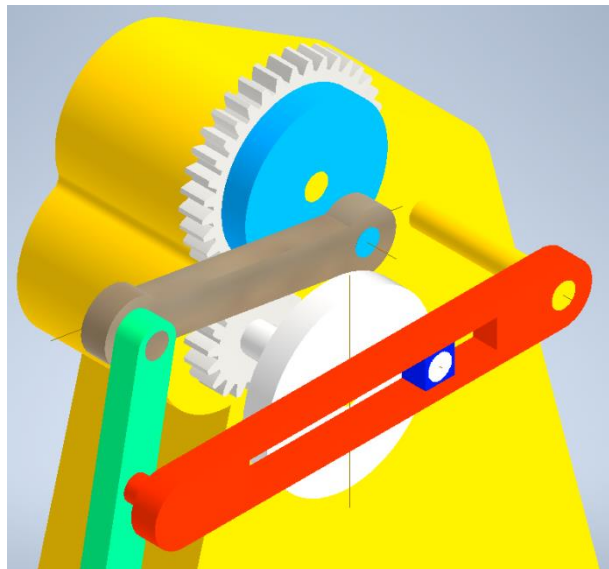


Figura 4. 41. Engranajes restringidos con los planos de las manivelas 1 y 2

El modelo de estudio diseñado para la obtención de los datos relativos a su trayectoria será el siguiente:

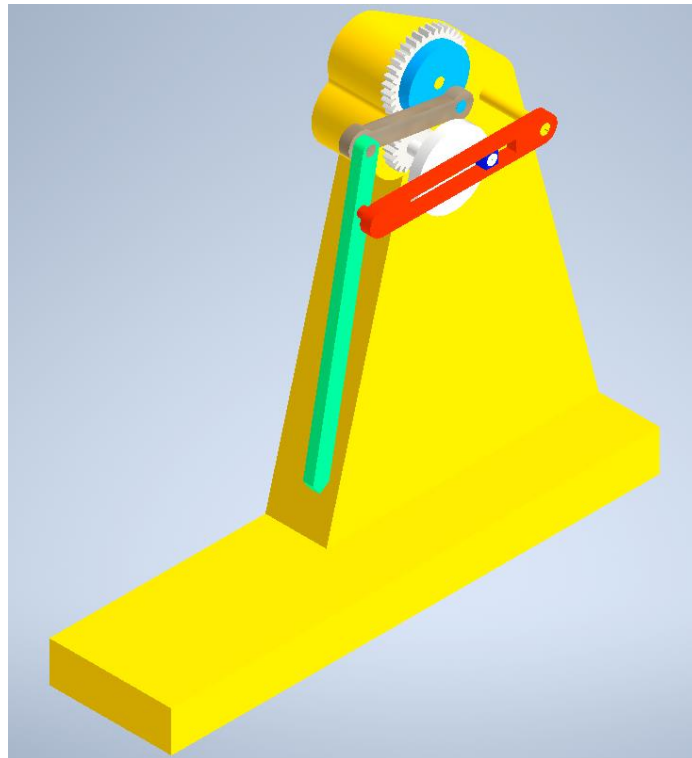


Figura 4. 42. Modelo diseñado en “Autodesk Inventor”

## 4.3. Simulación dinámica

### 4.3.1. Introducción

El programa empleado para el modelado del mecanismo, Autodesk Inventor, ofrece la posibilidad de otorgar un movimiento controlado para poder estudiar diversos parámetros como son la posición, la velocidad o la aceleración del punto del sólido que se desee en función del tiempo.

A su vez el programa permite obtener los valores de una forma visual, esto quiere decir que realiza un gráfico con los datos que se desean conocer; de este modo se puede ver el valor que toma dicho parámetro y en qué momento toma dicho valor. Este proceso de obtención de datos se realiza de forma simultánea a una simulación con el mecanismo en 3D, esto facilita la visualización del movimiento y se vuelve más intuitivo el proceso de entender el funcionamiento del mecanismo y como es su comportamiento.

Se dispone de una herramienta mediante la cual dichos valores se pueden exportar a un libro Excel, esto es sumamente útil para poder comparar los valores

de la posición, la velocidad o la aceleración entre las ecuaciones teóricas obtenidas anteriormente y los valores que se exportan de Autodesk Inventor. Del mismo modo es útil para poder comparar diferentes mecanismos resultantes de la variación de alguna de las longitudes de las barras que los forman, así se pueden conocer las variaciones entre estos de velocidades máximas y mínimas, aceleraciones máximas y mínimas, número de bucles que realiza la trayectoria de la punta del acoplador en función de las variaciones de dichas distancias, etc.

#### 4.3.2. Sistemas de referencia de los eslabones

Para el correcto funcionamiento del ensamblaje y para la existencia de una relación lógica con los valores de los datos obtenidos a través de las ecuaciones teóricas, se debe respetar la dirección de cada uno de los vectores que se han empleado en dichas ecuaciones teóricas. Esos vectores pasan a ser los ejes de las piezas del modelo de Autodesk Inventor, por lo que se deben adaptar las orientaciones y los orígenes de cada una de las piezas.

Se comenzará abriendo la pestaña “Entornos”, clicando sobre la opción “Simulación Dinámica”.

Seguidamente se abrirá un desplegable con cada una de las uniones, grupos móviles y cargas externas.

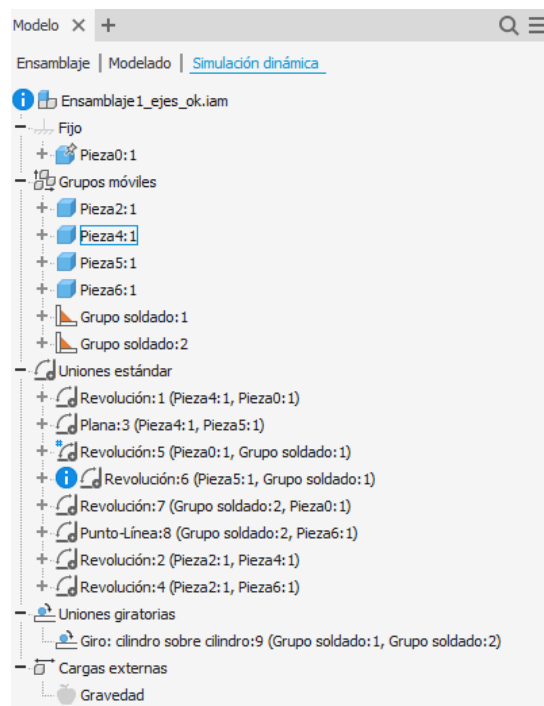
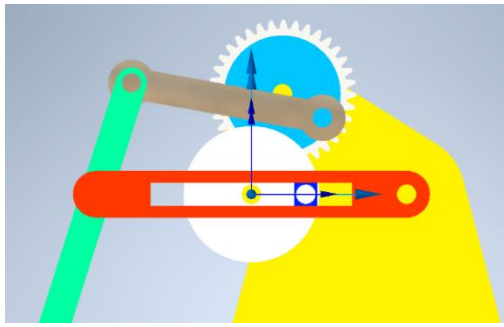
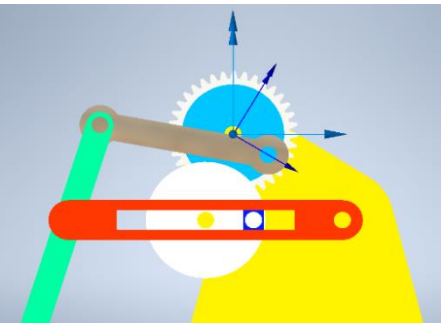
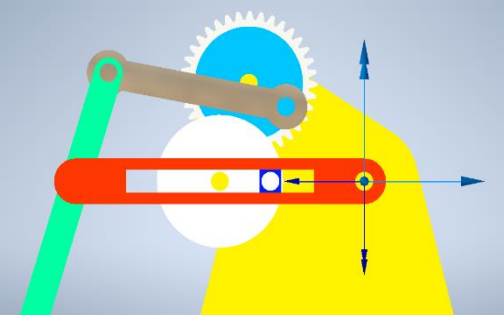
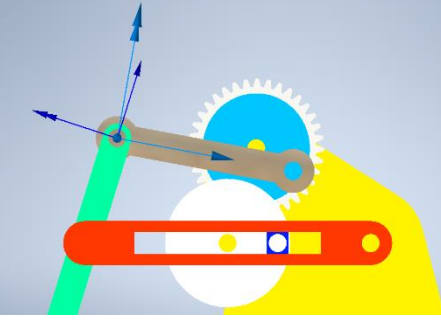
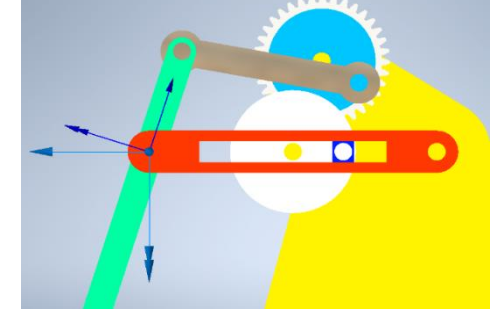
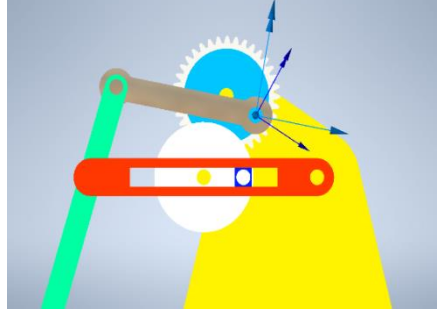


Figura 4. 43. Ventana con las diferentes uniones, grupos móviles y cargas externas del ensamblaje

Clicando con el botón derecho del ratón sobre cada una de las opciones, se seleccionará la opción “Editar”, facilitándose una ventana para la edición de la orientación de los ejes, en este caso, el eje X se marca con una flecha, el eje Y con dos flechas y el eje Z con tres flechas.

Se abrirán las uniones una por una orientando de forma correcta los diferentes ejes para que haya una relación con las ecuaciones teóricas.

Tabla 4.1. Visualización de ejes de los pares cinemáticos

 <p>Figura 4. 44. Soporte-Manivela 1</p>	 <p>Figura 4. 45. Soporte-Manivela 2</p>
 <p>Figura 4. 46. Soporte-Balancín inferior</p>	 <p>Figura 4. 47. Balancín superior-Acoplador</p>
 <p>Figura 4. 48. Balancín inferior-Acoplador</p>	 <p>Figura 4. 49. Manivela 2-Balancín superior</p>

### 4.3.3. Simulación dinámica del mecanismo de amasado

Se comenzará abriendo el entorno de simulación dinámica al igual que en el apartado anterior.

Como aclaración y recordatorio teórico, cada pieza posee seis grados de libertad, tres son referentes al movimiento a lo largo de cada uno de los ejes y los otros tres corresponden a movimientos rotatorios alrededor de cada uno de dichos ejes.

Al realizar el ensamblaje dichos grados de libertad se limitan al realizar restricciones entre las diferentes piezas.

Al abrir el entorno de “Simulación Dinámica” se pueden visualizar varias carpetas en el lateral de la ventana.

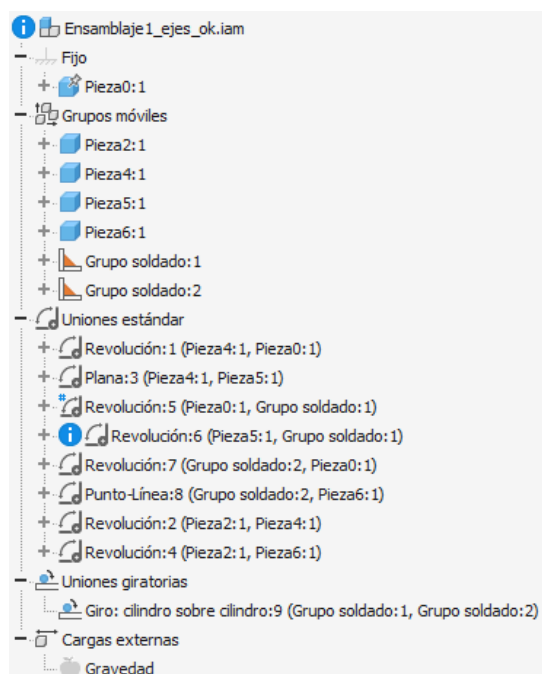


Figura 4. 50. Clasificación de uniones y piezas en desplegable lateral

Como se puede observar aparecen cinco grandes grupos:

- Fijo: En esta sección solo se encuentra el soporte, el cual se visualiza anclado con una chincheta para poder deducir de forma intuitiva que es una pieza que está fijada. Además, al insertar el soporte, se referencia al origen de coordenadas, de este modo se pueden obtener los valores para su posterior estudio de forma directa.

- Grupos móviles: En este estrato se pueden encontrar las demás piezas móviles que forman el ensamblaje, las cuales realizan diferentes movimientos entorno a la pieza fija.
- Uniones estándar: son uniones que “Autodesk Inventor” genera automáticamente de forma relacionada con las restricciones que se han llevado a cabo a la hora de hacer el ensamblaje. En este apartado se pueden dotar a las uniones de velocidades, en este caso se ha dotado a unión del grupo soldado 1 con la pieza 0, de este modo se otorga al mecanismo de movimiento.
- Uniones Giratorias: en esta apartado se encuentra la unión entre el grupo soldado 1 y el grupo soldado 2, los cuales corresponden a las uniones entre las piezas 1, 3 y los engranajes, al realizar un giro entre ambos engranajes, poseen una cualidad que permite encasillar esta unión en uniones giratorias y es que poseen un movimiento relativo entre los cuerpos que componen la unión.
- Cargas externas: en esta categoría se incluyen las diversas fuerzas que se pueden aplicar en los diferentes cuerpos que conforman el mecanismo, esto son fuerzas como la gravitatoria, puntuales, distribuidas, etc.

Para poder conocer el estado inicial del mecanismo y poder comprobar que existe una coherencia con la teoría se puede acceder al comando “Estado del mecanismo”, de esta forma se abrirá una ventana en la cual “Autodesk Inventor” mostrará diferentes datos.

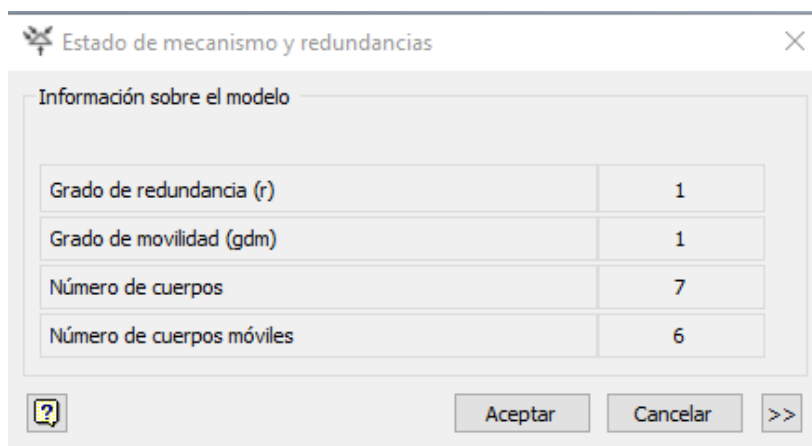


Figura 4. 51. Estado del mecanismo



En apartados anteriores se demostró mediante un análisis teórico, con el criterio de Kutzbach, como el mecanismo poseía seis eslabones, cinco de ellos móviles, poseyendo un único grado de libertad. En el caso del mecanismo creado en “Autodesk Inventor” para la viabilidad del ensamblaje, se ha incluido un séptimo cuerpo, el cual es un dado que realiza el movimiento de retorno rápido. Como puede observarse en la imagen anterior, el número de cuerpos es de siete, el número de cuerpos móviles es igual a seis, por lo que se respeta la ecuación de Kutzbach y el grado de movilidad del mecanismo sigue siendo de uno.

Por lo que se puede concluir que ambos métodos avalan que es un mecanismo desmodrómico.

El programa “Autodesk Inventor” también realiza un chequeo del número de cadenas cinemáticas que existen en el mecanismo, informando de los componentes que estas tienen, así como de sus restricciones o sus grados de libertad. Estos datos se pueden visualizar en un desplegable que se abre al clicar sobre el comando “Estado del mecanismo” dentro de la pestaña “Entorno”.

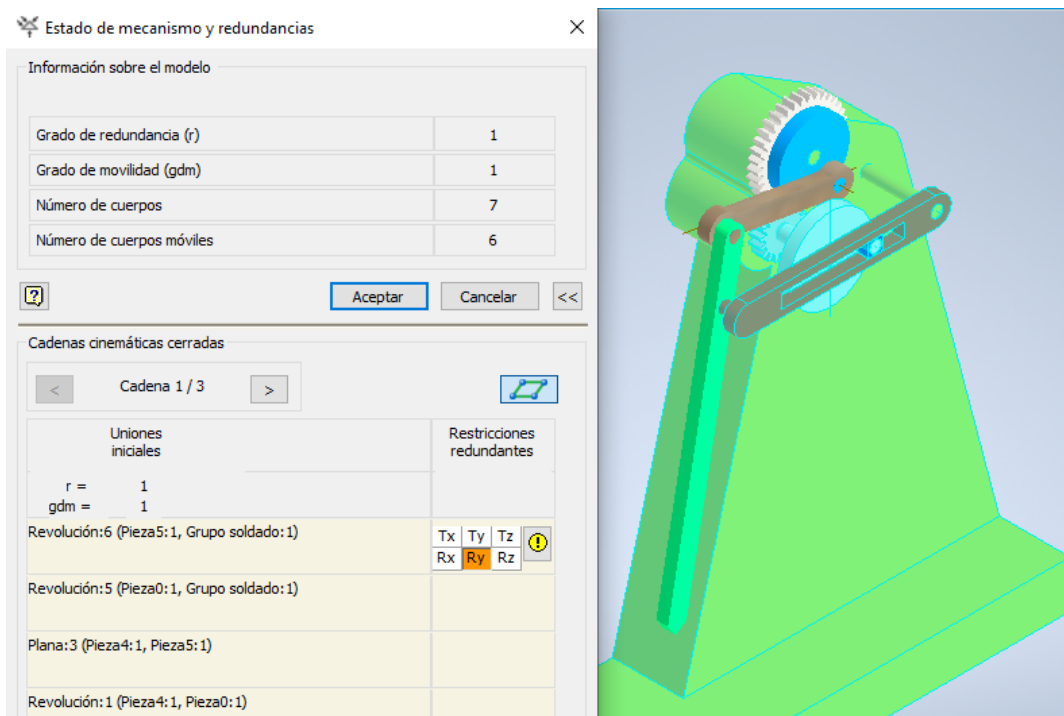


Figura 4. 52. Cadena cinemática 1 (submecanismo 1)

En la imagen superior se puede observar el primero de los submecanismos analizados en el apartado teórico, esta cadena cinemática está formada por el soporte y el mecanismo de retorno rápido.



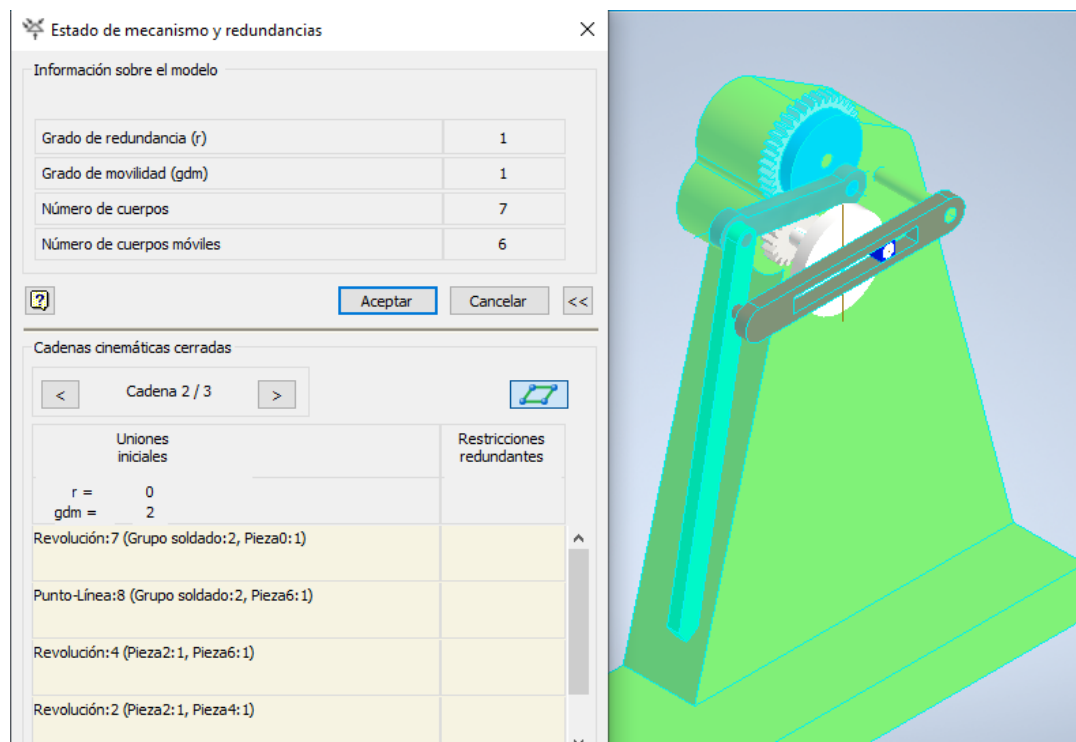


Figura 4. 53. Cadena cinemática 2 (submecanismo 2)

La segunda cadena cinemática marcada corresponde al segundo de los submecanismo analizados en el apartado teórico. Este está formado por la bancada, dos bielas, una manivela y el acoplador.

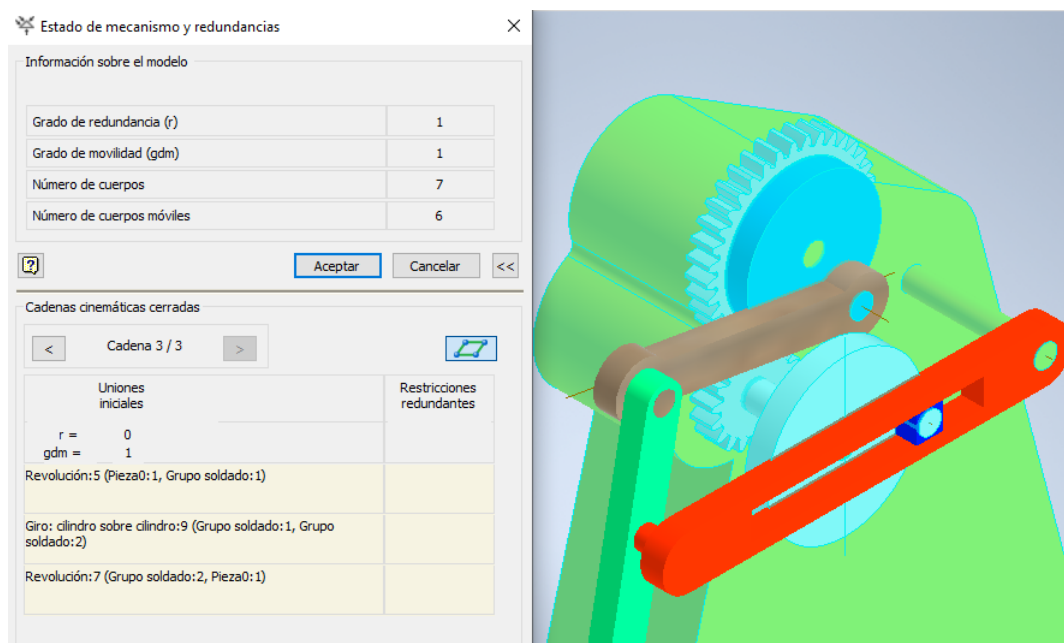


Figura 4. 54. Cadena cinemática 3 (relación de transmisión entre los engranajes)

La tercera cadena cinemática corresponde al tren de engranajes que se ha modelado para relacionar el movimiento de las dos manivelas.

Para comenzar con la simulación, se deben respetar los parámetros iniciales del cálculo teórico. Para ello el ángulo  $\theta_2$  debe ser igual a cero, para colocar el mecanismo en esta posición inicial, se debe abrir en el cuadro de dialogo en el que aparecen cada una de las uniones del ensamblaje la “Unión estándar” y dentro de esta, seleccionar “Revolución: 5(Pieza0: 1, Grupo soldado: 1)”, esta unión corresponde a la existente entre el soporte y la manivela que realiza el movimiento de entrada.

Se abrirá una ventana en la cual se seleccionará la pestaña “Grado de libertad 1(R)”.

Una vez abierta la pestaña correspondiente, se podrá marcar la posición deseada. En este caso son  $0^\circ$  para la manivela en el cuadro “Posición”.

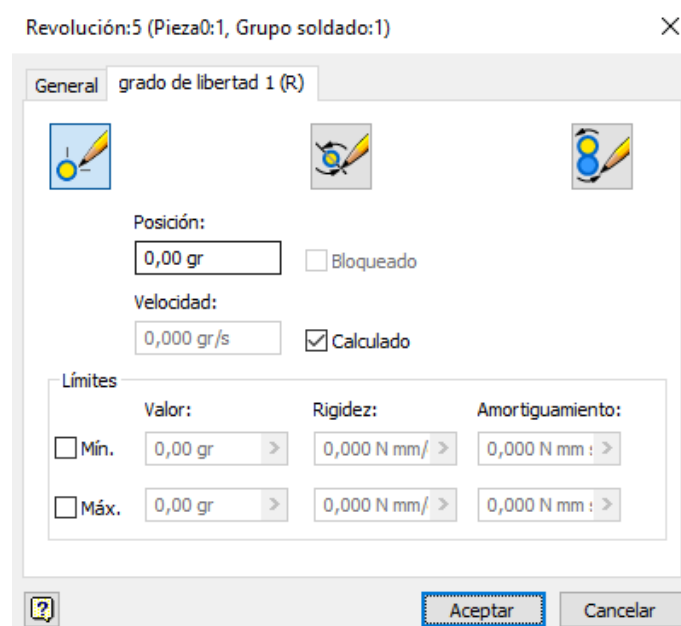


Figura 4. 55. Colocación de la manivela 1 en  $0^\circ$

Dentro de las tres opciones que nos permite modificar “Autodesk Inventor” se abrirá la opción “Editar movimiento impuesto”, la cual corresponde a la última de las opciones que se pueden observar en la imagen anterior.

En este caso se impondrá una velocidad continua para la posterior obtención de los datos de la trayectoria del acoplador.

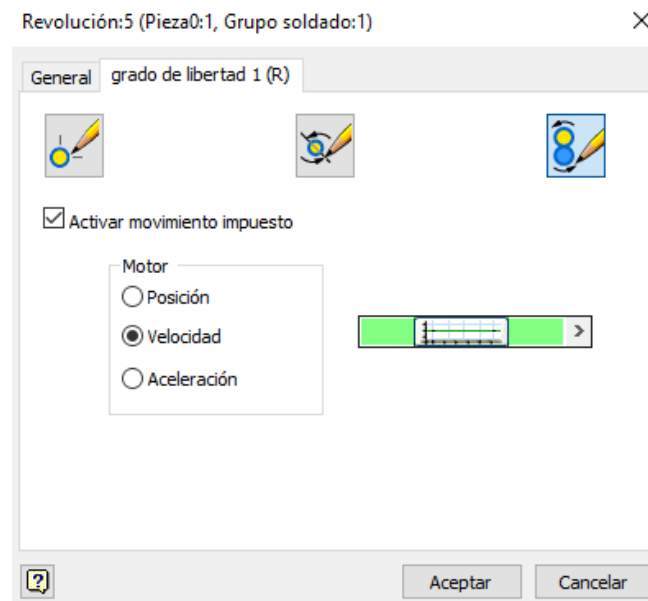


Figura 4. 56. Activación del movimiento por medio de la opción de velocidad

Entrando en dicha opción, se pueden imponer los valores deseados. En este caso el giro completo se realizará a una velocidad angular constante de 360 gr/s, siendo la diferencia de tiempo entre el punto inicial y el punto final de 2s, para que el mecanismo pueda realizar el giro completo.

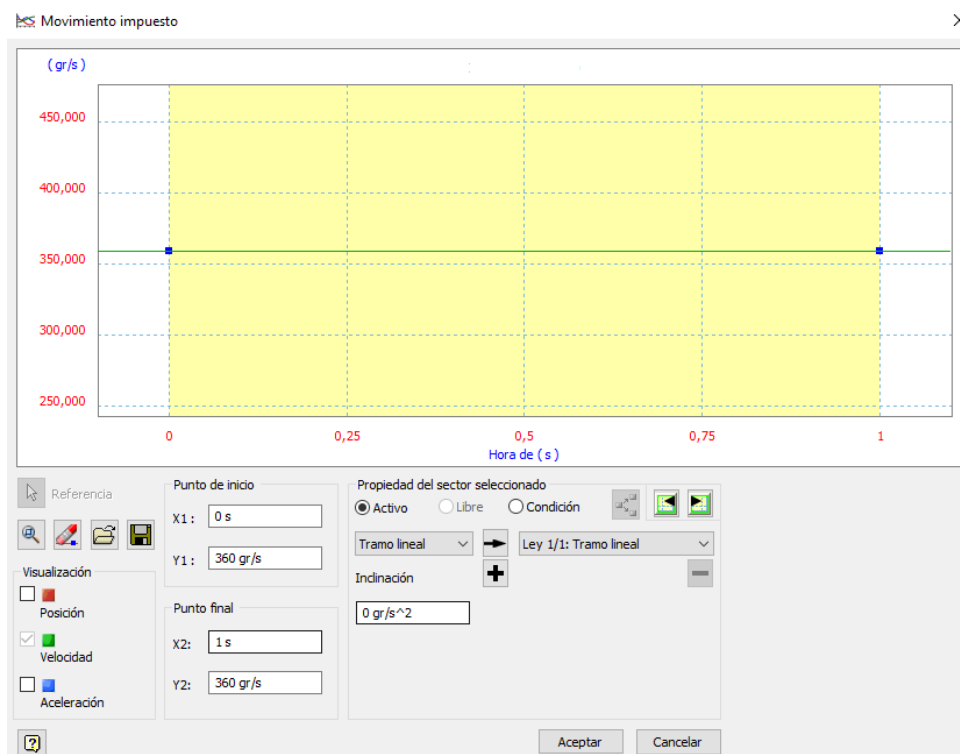


Figura 4. 57. Imposición de una velocidad de 360 gr/s

El siguiente paso para seguir, una vez se han introducido los valores, será abrir la ventana del simulador, la cual se abre tras clicar en la pestaña “Entorno”, dentro de “Simulación dinámica” tras abrir la opción “Simulador”.

Seguidamente se abrirá una ventana en la cual aparece un símbolo de “play”, con dicho símbolo se iniciará la simulación del mecanismo.

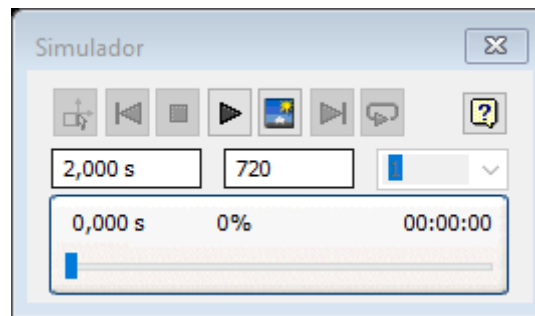


Figura 4. 58. Imposición de un ciclo de 2s y una toma de 720 datos

Como se puede ver en la figura, se ha seleccionado un tiempo de 2s para que el mecanismo pueda realizar una trayectoria completa, a su vez, se ha marcado un valor de 720 para la toma de datos, esto quiere decir que “Autodesk Inventor” tomara el dato deseado con intervalos de una centésima de segundo hasta completar los 2s de tiempo de la simulación.

Para la obtención de los datos que se generan durante la simulación del movimiento que realiza el mecanismo, en este caso la trayectoria que realiza el acoplador, relativos a su posición, su velocidad o su aceleración se debe abrir el comando “Grafico de salida”.

Para que “Autodesk Inventor” pueda generar una tabla ordenada de los datos que se desean de la trayectoria del acoplador, el programa brinda la opción de “Trazo”, este se puede colocar de forma sencilla en la punta de dicha pieza y de esa manera tan sencilla poder obtener los datos para su análisis.

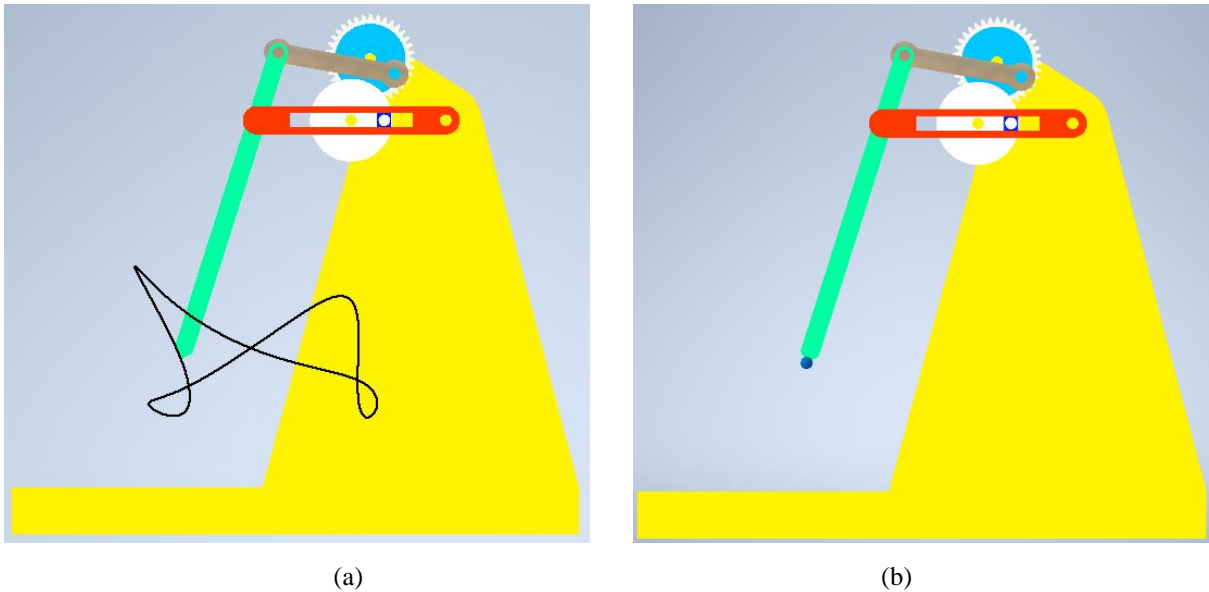


Figura 4. 59. Trazo (a) y posicionamiento (b) del punto P

Al clicar sobre dicha opción se abrirá una ventana emergente que permitirá seleccionar el punto del mecanismo del cual se desean conocer los datos y en dicha ventana, también se podrán seleccionar los valores que se quieren obtener.

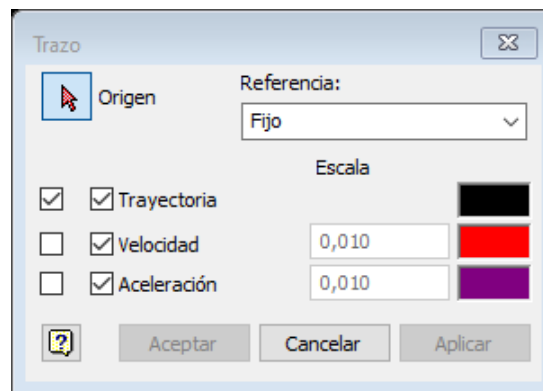


Figura 4. 60. Selección de los datos que se obtendrán en el grafico de salida

Para poder procesar los datos en una hoja "Excel", al abrir la ventana de "Grafico de salida", en la parte superior se puede visualizar un logotipo de dicho programa, de esta forma tan sencilla "Autodesk Inventor" permite el procesamiento de los datos.

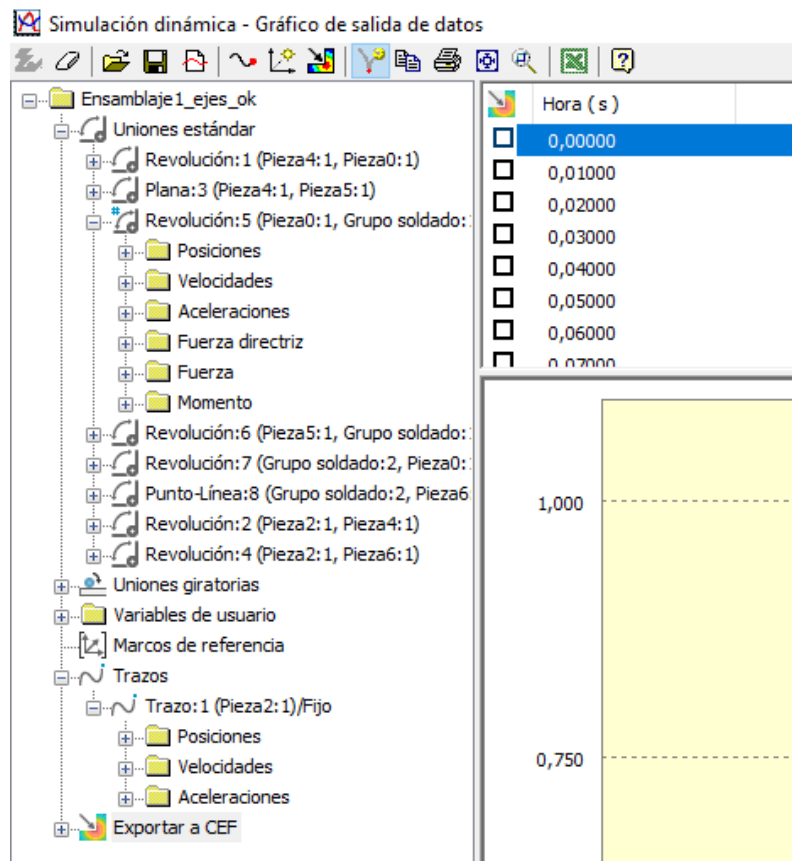


Figura 4. 61. Desplegable lateral en el que se pueden seleccionar los diferentes datos que se desean conocer

Una vez se marcan las opciones de posición, velocidad y aceleración que se pueden visualizar en el desplegable de la imagen anterior, aparecerán diferentes graficas en la ventana, cada una de estas curvas pertenezca a cada uno de los valores que se han marcado en dicho desplegable. A su vez, clicando con el botón derecho y seleccionando la opción “Propiedades de curva” se pueden conocer los valores máximos, mínimos o medios entre otros. Esta herramienta resulta muy útil a la hora de realizar trabajos sobre las diferentes trayectorias que puede realizar el acoplador al variar ciertas longitudes buscando una optimización del recorrido de dicho trazo.

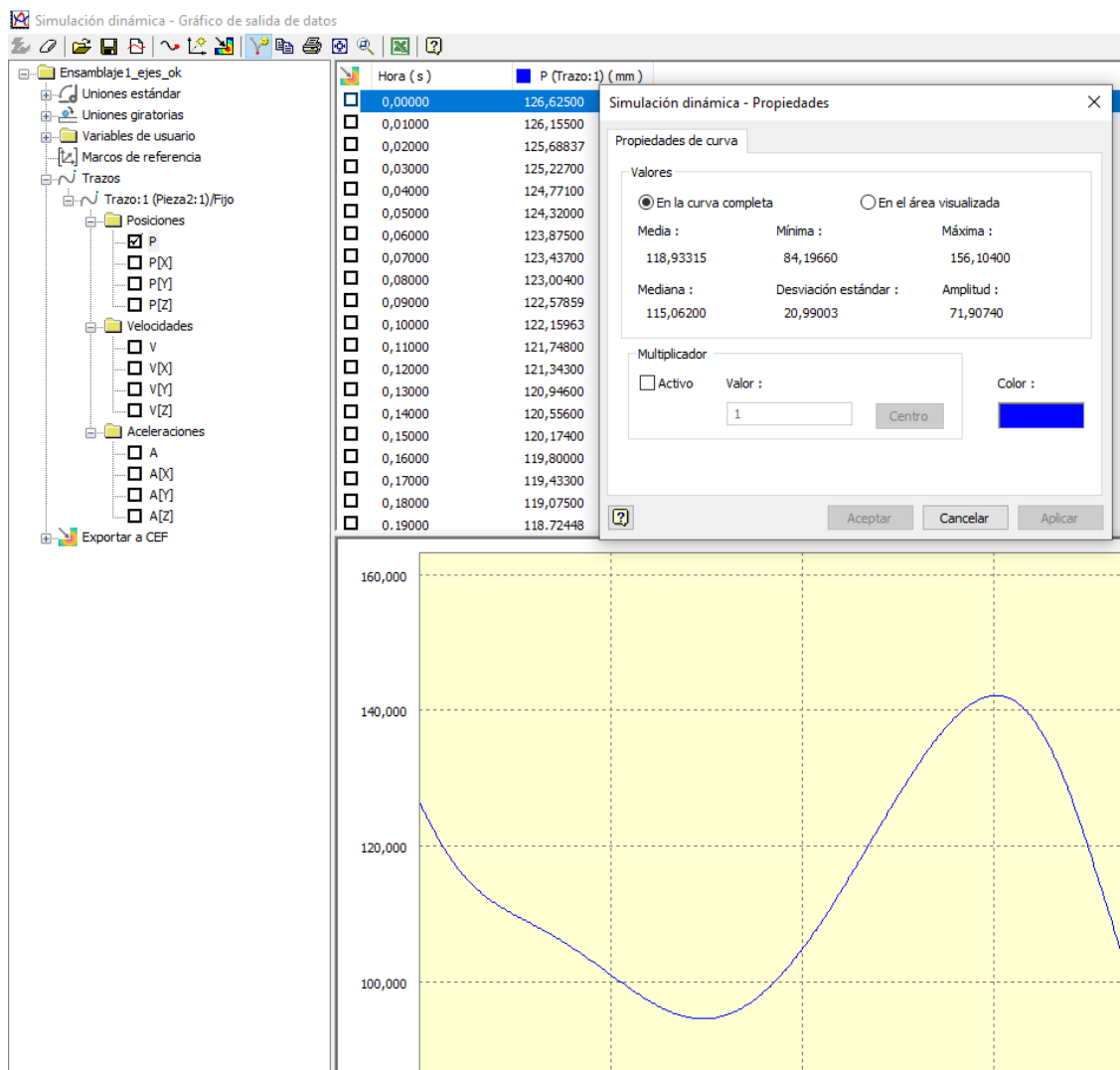


Figura 4. 62. Ventana emergente con las propiedades de la curva

#### 4.3.4. Análisis posición

Como se ha explicado anteriormente, mediante la herramienta de “trazo” se pueden obtener las posiciones, velocidades y aceleraciones del punto deseado, en este caso es la punta del acoplador.

Exportando los valores de la posición respecto a los ejes de coordenadas y realizando una gráfica con dichos datos se obtiene la siguiente curva.

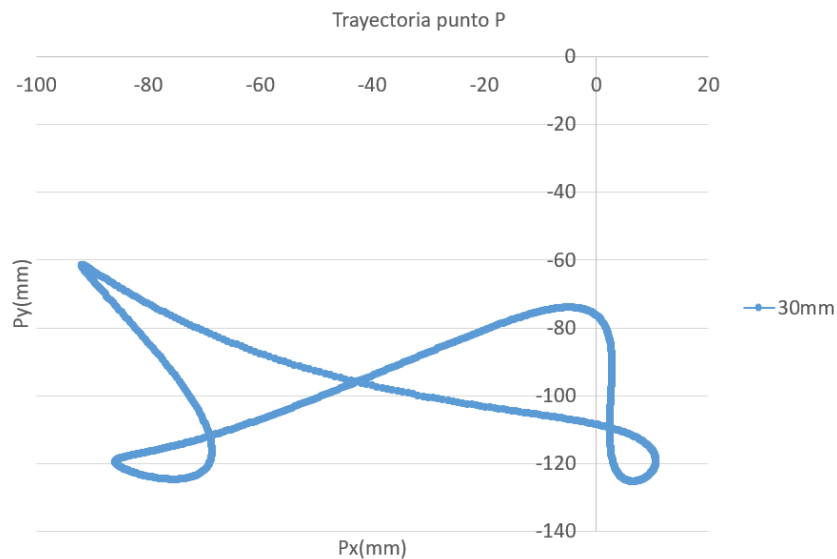


Figura 4. 63. Trayectoria del punto P

Desglosando los datos por separado se pueden observar las curvas que realizan los valores de  $P_x$  y  $P_y$  respectivamente tomando como valor de referencia el ángulo de entrada  $\theta_2$ .

Como se ha explicado anteriormente, debido a la relación de transmisión de los engranajes, es necesario que la barra 2 realice dos rotaciones completas para que el mecanismo complete una trayectoria.

Teniendo esto en cuenta se puede llevar a cabo un estudio más detallado de las gráficas que se obtienen del programa “Autodesk Inventor”.

Las gráficas de los valores de  $P_x$  y  $P_y$  son las siguientes respectivamente.

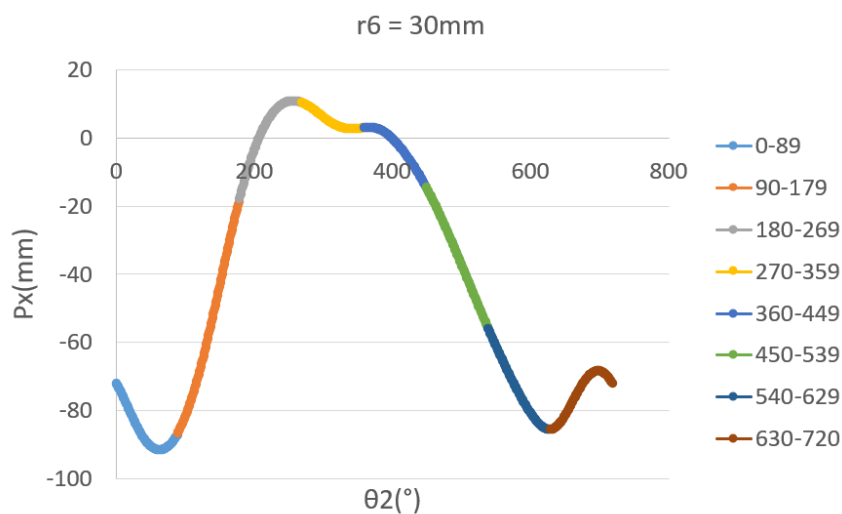


Figura 4. 64. Grafica de la posición  $P_x$  respecto a  $\theta_2$



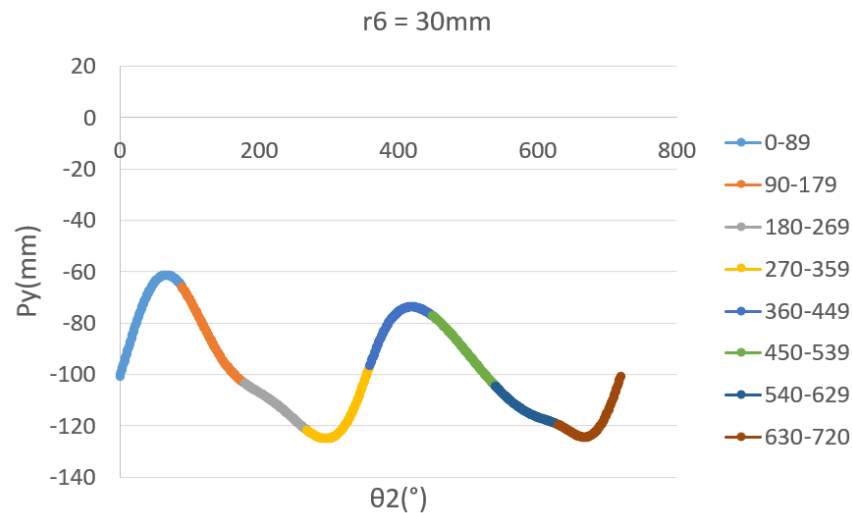


Figura 4. 65. Grafica de la posición  $P_y$  respecto a  $\theta_2$

Realizando esta partición con la trayectoria que se ha visualizado anteriormente se obtiene el siguiente gráfico.

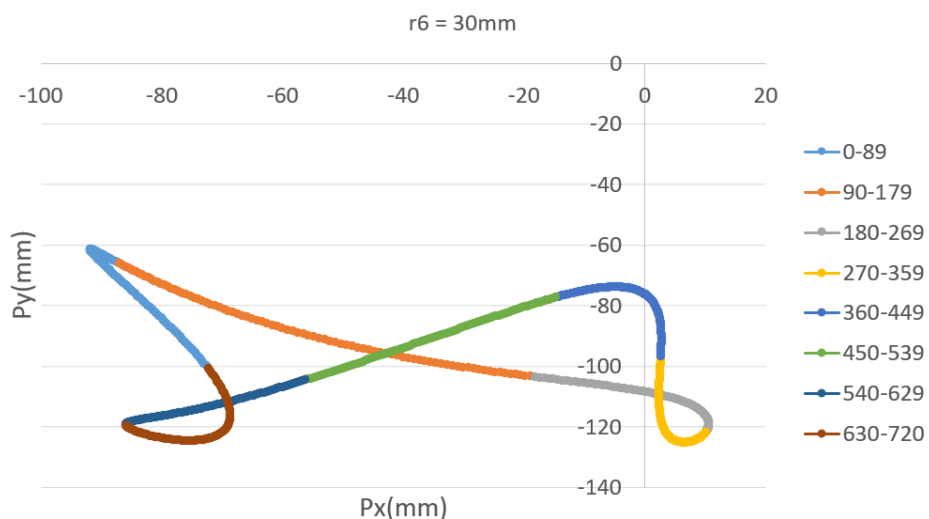

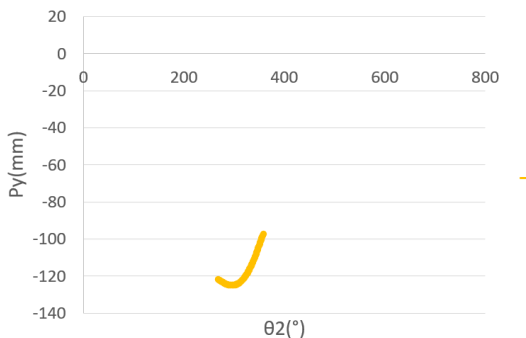
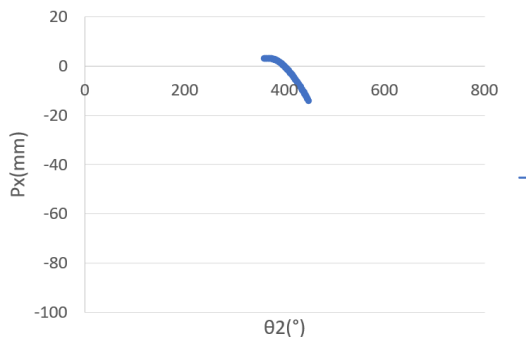
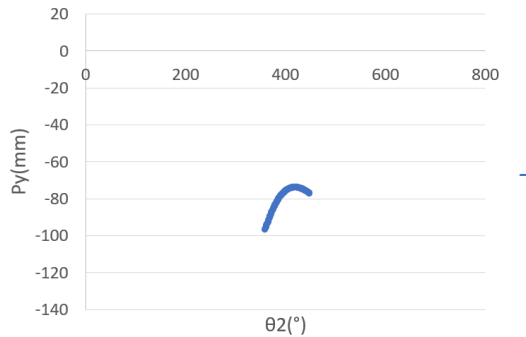

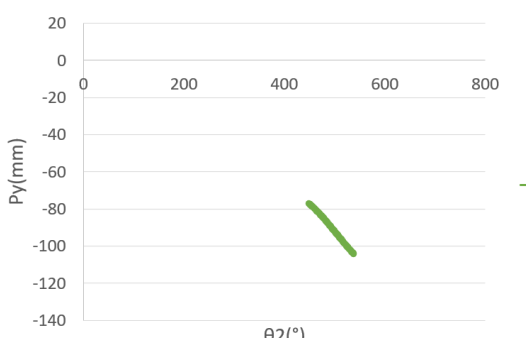


Figura 4. 66. Trayectoria del punto P dividida en función de  $\theta_2$

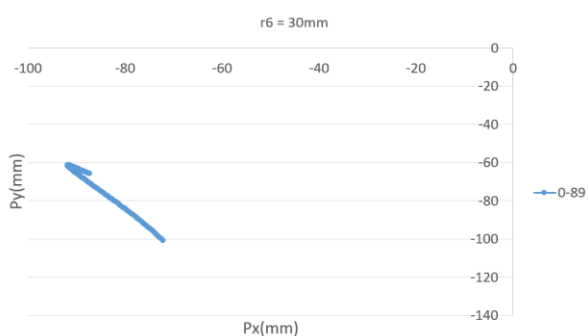
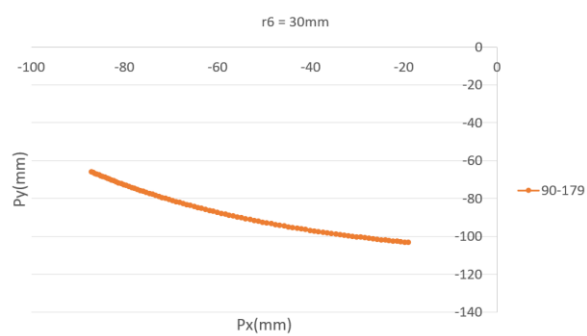
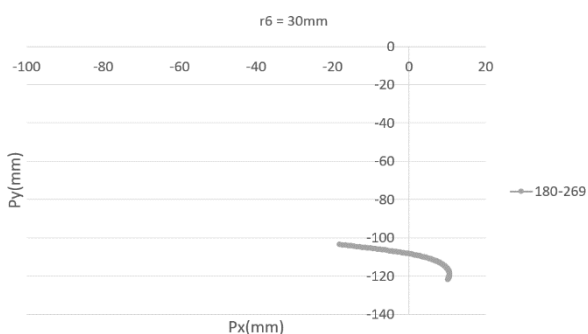
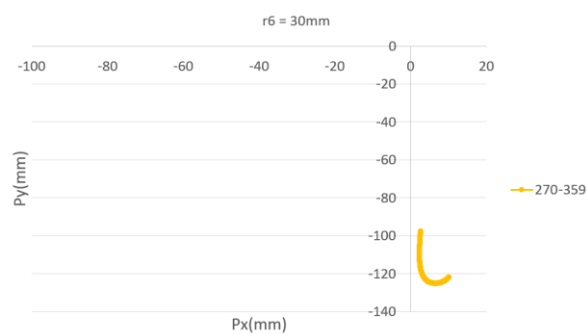
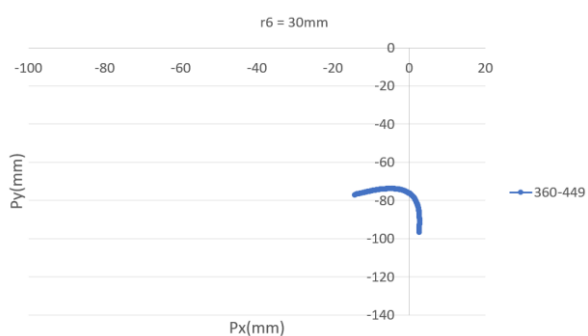
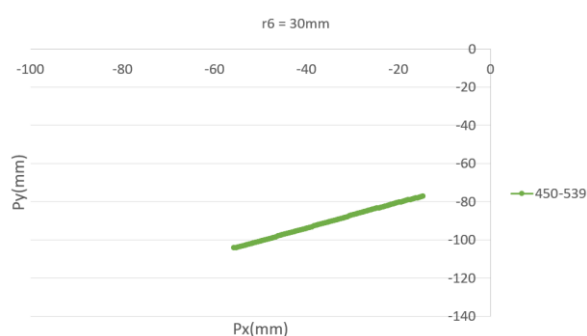
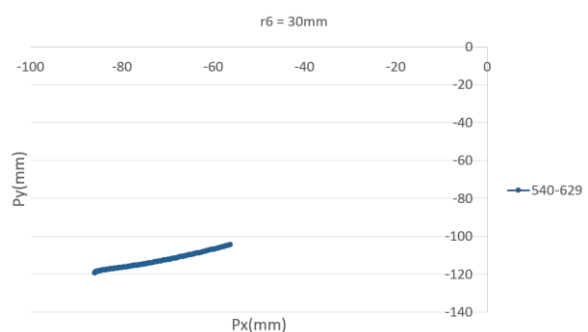
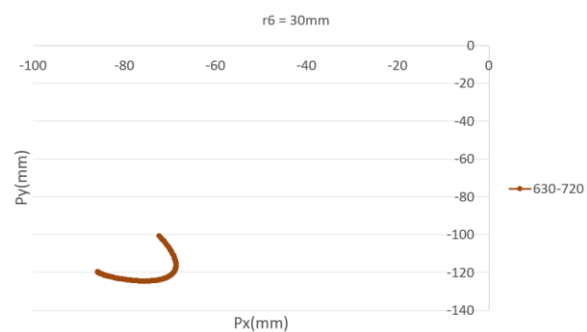
A continuación, se llevará a cabo un análisis detallado de la relación existente entre ambas curvas con la trayectoria. Realizando una fragmentación de dichas graficas según el ángulo de  $\theta_2$ .

Tabla 4.2. Diferentes trazos de  $P_x$  y  $P_y$  en función de  $\theta_2$ 

Grados(°)	$P_x$ (mm)	$P_y$ (mm)
0-89	<p>Figura 4. 67. Trazo de <math>P_x</math> para valores de <math>\theta_2</math> entre <math>0^\circ</math> y <math>89^\circ</math></p>	<p>Figura 4. 68. Trazo de <math>P_y</math> para valores de <math>\theta_2</math> entre <math>0^\circ</math> y <math>89^\circ</math></p>
90-179	<p>Figura 4. 69. Trazo de <math>P_x</math> para valores de <math>\theta_2</math> entre <math>90^\circ</math> y <math>179^\circ</math></p>	<p>Figura 4. 70. Trazo de <math>P_y</math> para valores de <math>\theta_2</math> entre <math>90^\circ</math> y <math>179^\circ</math></p>
180-269	<p>Figura 4. 71. Trazo de <math>P_x</math> para valores de <math>\theta_2</math> entre <math>180^\circ</math> y <math>269^\circ</math></p>	<p>Figura 4. 72. Trazo de <math>P_y</math> para valores de <math>\theta_2</math> entre <math>180^\circ</math> y <math>269^\circ</math></p>

Grados(°)	Px(mm)	Py(mm)
270-359	<p style="text-align: center;"><math>r_6 = 30\text{mm}</math></p>  <p style="text-align: right;"><math>\theta_2(^{\circ})</math></p> <p style="text-align: right;">—●— 270-359</p> <p>Figura 4. 73. Trazo de <math>P_x</math> para valores de <math>\theta_2</math> entre <math>270^{\circ}</math> y <math>359^{\circ}</math></p>	<p style="text-align: center;"><math>r_6 = 30\text{mm}</math></p>  <p style="text-align: right;"><math>\theta_2(^{\circ})</math></p> <p style="text-align: right;">—●— 270-359</p> <p>Figura 4. 74. Trazo de <math>P_y</math> para valores de <math>\theta_2</math> entre <math>270^{\circ}</math> y <math>359^{\circ}</math></p>
360-449	<p style="text-align: center;"><math>r_6 = 30\text{mm}</math></p>  <p style="text-align: right;"><math>\theta_2(^{\circ})</math></p> <p style="text-align: right;">—●— 360-449</p> <p>Figura 4. 75. Trazo de <math>P_x</math> para valores de <math>\theta_2</math> entre <math>360^{\circ}</math> y <math>449^{\circ}</math></p>	<p style="text-align: center;"><math>r_6 = 30\text{mm}</math></p>  <p style="text-align: right;"><math>\theta_2(^{\circ})</math></p> <p style="text-align: right;">—●— 360-449</p> <p>Figura 4. 76. Trazo de <math>P_y</math> para valores de <math>\theta_2</math> entre <math>360^{\circ}</math> y <math>449^{\circ}</math></p>
450-539	<p style="text-align: center;"><math>r_6 = 30\text{mm}</math></p>  <p style="text-align: right;"><math>\theta_2(^{\circ})</math></p> <p style="text-align: right;">—●— 450-539</p> <p>Figura 4. 77. Trazo de <math>P_x</math> para valores de <math>\theta_2</math> entre <math>450^{\circ}</math> y <math>539^{\circ}</math></p>	<p style="text-align: center;"><math>r_6 = 30\text{mm}</math></p>  <p style="text-align: right;"><math>\theta_2(^{\circ})</math></p> <p style="text-align: right;">—●— 450-539</p> <p>Figura 4. 78. Trazo de <math>P_y</math> para valores de <math>\theta_2</math> entre <math>450^{\circ}</math> y <math>539^{\circ}</math></p>

Grados(°)	Px(mm)	Py(mm)
540-629	<p style="text-align: center;"><math>r_6 = 30\text{mm}</math></p> <p style="text-align: center;"><math>\theta_2(^{\circ})</math></p> <p>Figura 4. 79. Trazo de <math>P_x</math> para valores de <math>\theta_2</math> entre <math>540^{\circ}</math> y <math>629^{\circ}</math></p>	<p style="text-align: center;"><math>r_6 = 30\text{mm}</math></p> <p style="text-align: center;"><math>\theta_2(^{\circ})</math></p> <p>Figura 4. 80. Trazo de <math>P_y</math> para valores de <math>\theta_2</math> entre <math>540^{\circ}</math> y <math>629^{\circ}</math></p>
630-720	<p style="text-align: center;"><math>r_6 = 30\text{mm}</math></p> <p style="text-align: center;"><math>\theta_2(^{\circ})</math></p> <p>Figura 4. 81. Trazo de <math>P_x</math> para valores de <math>\theta_2</math> entre <math>630^{\circ}</math> y <math>720^{\circ}</math></p>	<p style="text-align: center;"><math>r_6 = 30\text{mm}</math></p> <p style="text-align: center;"><math>\theta_2(^{\circ})</math></p> <p>Figura 4. 82. Trazo de <math>P_y</math> para valores de <math>\theta_2</math> entre <math>360^{\circ}</math> y <math>720^{\circ}</math></p>

Tabla 4.3. Diferentes tramos de la trayectoria en función de  $\theta_2$ Figura 4. 83. Trayectoria para valores de  $\theta_2$  entre  $0^\circ$  y  $89^\circ$ Figura 4. 84. Trayectoria para valores de  $\theta_2$  entre  $90^\circ$  y  $179^\circ$ Figura 4. 85. Trayectoria para valores de  $\theta_2$  entre  $180^\circ$  y  $269^\circ$ Figura 4. 86. Trayectoria para valores de  $\theta_2$  entre  $270^\circ$  y  $359^\circ$ Figura 4. 87. Trayectoria para valores de  $\theta_2$  entre  $360^\circ$  y  $449^\circ$ Figura 4. 88. Trayectoria para valores de  $\theta_2$  entre  $450^\circ$  y  $539^\circ$ Figura 4. 89. Trayectoria para valores de  $\theta_2$  entre  $540^\circ$  y  $629^\circ$ Figura 4. 90. Trayectoria para valores de  $\theta_2$  entre  $630^\circ$  y  $720^\circ$

A continuación, se procederá a una explicación detallada de la relación entre  $P_x$ ,  $P_y$  y la trayectoria.

Como se puede observar en el gráfico denominado Figura 4.66, situada en la Tabla 4.2, hace referencia a  $P_x$  respecto a  $\theta_2$  para un ángulo entre  $0^\circ$  y  $89^\circ$ . En dicha figura se puede observar como los valores decrecen hasta alcanzar un valor mínimo, para comenzar a crecer.

A diferencia del caso anterior, la Figura 4.67, de la Tabla 4.2, es la gráfica del valor de  $P_y$  respecto a  $\theta_2$  para la misma variación del ángulo. En este caso, los valores de  $P_y$  crecen hasta alcanzar un máximo tras el cual comienzan a reducir su valor. La consecuencia de estas tendencias se ve reflejada en la Figura 4.82 de la Tabla 4.3, en la cual se puede ver la gráfica resultante del desplazamiento de la punta del acoplador para la variación de  $\theta_2$  entre  $0^\circ$  y  $89^\circ$ . Esto quiere decir que está compuesta por los valores que toman  $P_x$  y  $P_y$  en este sector. Como se puede ver, la trayectoria decrece en los valores del eje  $P_x$  y crece en los valores del eje  $P_y$ , hasta que los valores comienzan a crecer el eje  $P_x$  y decrecer en el eje  $P_y$ . Este cambio de dirección se puede explicar por alcanzar las posiciones de mínimo y máximo en las gráficas de la Figura 4.66 y Figura 4.67.

En el caso de las gráficas que representan los valores de  $P_x$ ,  $P_y$  y la trayectoria para los valores de  $\theta_2$  situados entre  $90^\circ$  y  $179^\circ$  ocurre lo siguiente. Por un lado, se puede observar cómo los valores de  $P_x$ , representados en la Figura 4.68, crecen en todo el intervalo. Por otro lado, los valores de  $P_y$  decrecen en dicho intervalo, como se muestra en la Figura 4.69. La consecuencia de estas gráficas se ve reflejada en la Figura 4.83 de la Tabla 4.3 en la cual se ve como es una curva descendente de sentido de izquierda a derecha. El siguiente caso es cuando  $\theta_2$  toma valores entre  $180^\circ$  y  $269^\circ$ . En este caso, la gráfica que se muestra en la Figura 4.70 referente a los valores de  $P_x$  toma un sentido ascendente hasta que alcanza un máximo, tras este, los valores comienzan a decrecer. En la Figura 4.71 se localiza la gráfica de  $P_y$  para estos valores de  $\theta_2$ ; siendo una curva descendente. Estas influencias se pueden observar en la Figura 4.84 de la Tabla 4.3, la curva se traza de izquierda a derecha. Como se puede ver, en el eje que toma los valores de  $P_x$ , crecen hasta que se localiza un cambio de dirección, coincidiendo con el máximo de la gráfica de la Figura 4.70. Por otro lado, se

puede ver la influencia de la curva de la Figura 4.71, tomando valores cada vez menores en el eje referente a  $P_y$ .

Cuando  $\theta_2$  toma valores entre  $270^\circ$  y  $359^\circ$ . Se puede ver como la curva de la Figura 4.72, situada en la Tabla 4.2 decrece hasta un mínimo, para comenzar a tomar valores cada vez mayores. Sin embargo, en la Figura 4.73 se puede ver como la tendencia es la misma, es decir, los valores decrecen hasta un mínimo para, tras este, comenzar a crecer. La influencia de estas graficas se puede ver en la Figura 4.85, tomando el sentido de derecha a izquierda. Se puede ver como los valores del eje horizontal decrecen hasta alcanzar el mínimo de la Figura 4.72, respecto al eje vertical, se puede observar cómo los valores comienzan decreciendo hasta un mínimo, para comenzar a crecer, esta tendencia es consecuencia de la Figura 4.73.

Para valores de  $\theta_2$  situados entre  $360^\circ$  y  $449^\circ$  la trayectoria dibuja la curva que se ve representada en la Figura 4.86 de la Tabla 4.3. Esta trayectoria es el resultado de las curvas representadas en la Figura 4.74 y en la Figura 4.75, las cuales representan los valores de  $P_x$  y  $P_y$  respectivamente. La tendencia que se refleja en el eje  $P_x$  de la Figura 4.86 se explica en la Figura 4.74; en esta gráfica se puede ver como los valores crecen levemente hasta un máximo, para comenzar a decrecer tras este; esto explica la dirección de la curva de la trayectoria y porque hace ese cambio de dirección. Por otro lado, en el eje vertical, se puede ver la influencia de la Figura 4.75 la cual crece hasta un máximo para comenzar a decrecer tras este. Sucede lo mismo que con el eje horizontal. Además, se puede deducir que el sentido de la trayectoria es de derecha a izquierda gracias al apoyo de estas dos gráficas.

Cuando  $\theta_2$  toma valores entre  $450^\circ$  y  $539^\circ$  la trayectoria resultante se puede ver en la Figura 4.87 de la Tabla 4.3, mientras que los valores que toman  $P_x$  y  $P_y$  respecto a  $\theta_2$  se pueden observar en la Figura 4.76 y Figura 4.77 de la Tabla 4.2. Los valores de  $P_x$  que se muestran en la Figura 4.76 trazan una curva descendente sin máximos ni mínimos. Ocurre lo mismo con los valores de  $P_y$  y su representación en la Figura 4.77. Como consecuencia, la gráfica resultante de los valores de  $P_x$  y  $P_y$  que se muestra en la Figura 4.87 traza una curva descendente de con sentido de derecha a izquierda.

En el caso de  $\theta_2$  situado entre  $540^\circ$  y  $629^\circ$  la gráfica que representa este fragmento de la trayectoria se muestra en la Figura 4.88 de la Tabla 4.3, mientras que los valores de sus ejes respecto a  $\theta_2$  se representan en las graficas de la Figura 4.78 y Figura 4.79 de la Tabla 4.2. Al igual que en el caso anterior, los valores de  $P_x$  y de  $P_y$  respecto a  $\theta_2$  se pueden ver como dos líneas con una pequeña curvatura y sentido descendente. Esto hace que la gráfica resultante, sea una línea descendente con sentido de derecha a izquierda.

Finalmente, para valores de  $\theta_2$  situados entre  $630^\circ$  y  $720^\circ$  se ven reflejados, los valores de  $P_x$  y de  $P_y$ , en la Figura 4.89 de la Tabla 4.3 y los valores de los ejes de dicha gráfica, respecto a  $\theta_2$  en la Figura 4.80 ( $P_x$ ) y en la Figura 4.81 ( $P_y$ ) de la Tabla 4.2. La gráfica que representa los valores de  $P_x$  con  $\theta_2$  muestra una parábola en la que se alcanza un máximo. Esto se muestra en la trayectoria como valores crecientes en un sentido, hasta que se alcanza dicho máximo, para realizar un giro y comenzar a decrecer. Por otro lado, los valores de  $P_x$  toman un sentido decreciente en su gráfica, hasta que alcanzan un mínimo, para tras este, comenzar a crecer. Esto se refleja en la trayectoria como una curva que decrece en este eje hasta un valor mínimo para comenzar a crecer tras este, como se puede observar en la Figura 4.89. El sentido de la trayectoria en este gráfico es de izquierda a derecha.

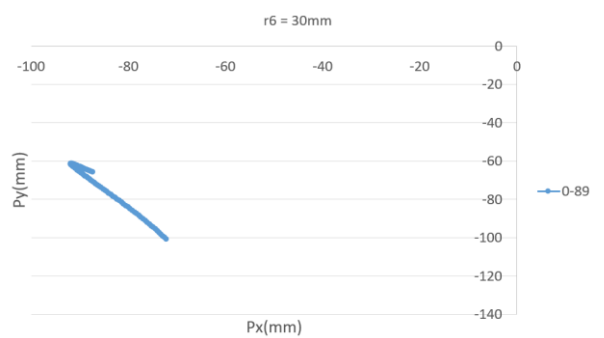
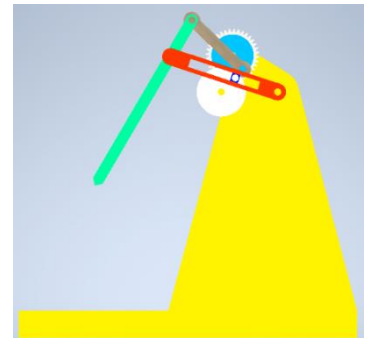
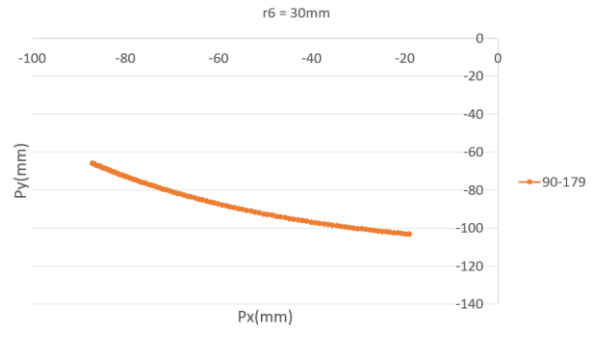
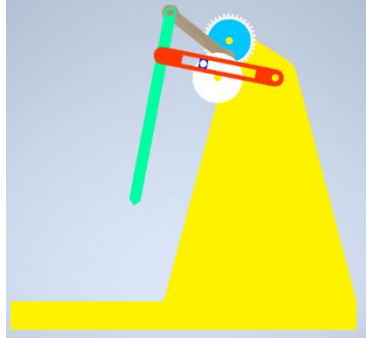
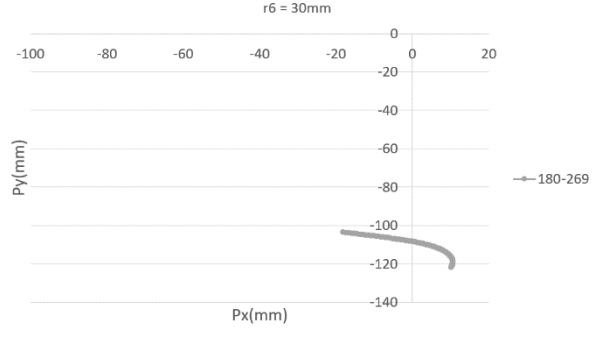
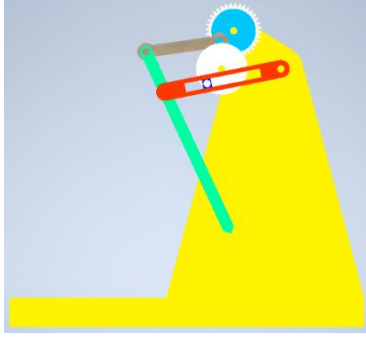
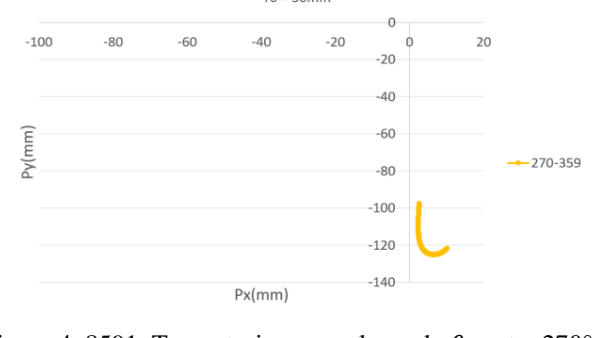
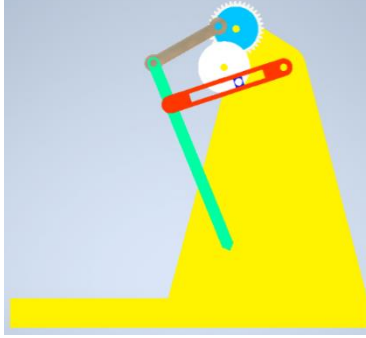
Por otro lado, en la Tabla 4.4, se ha capturado una posición intermedia del mecanismo en cada uno de los tramos de la trayectoria.

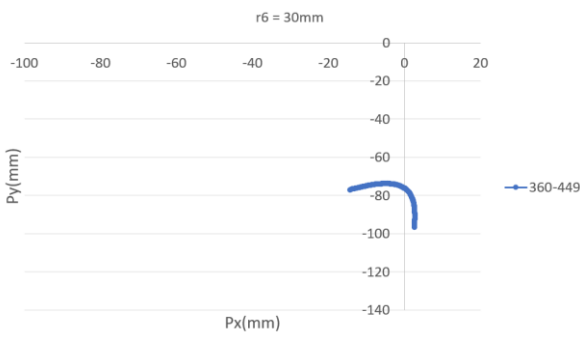
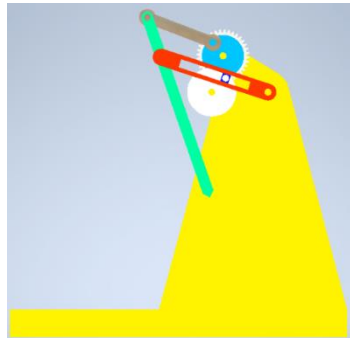
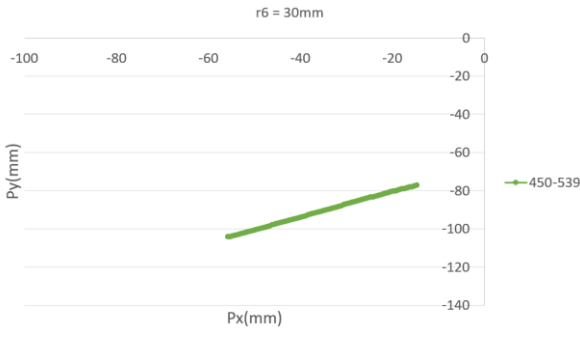
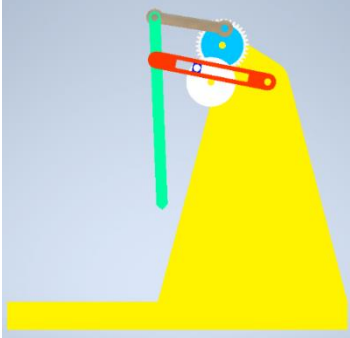
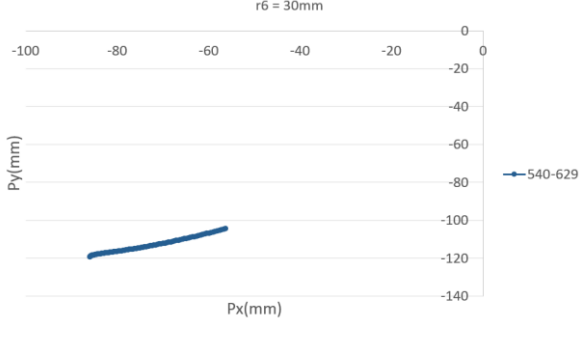
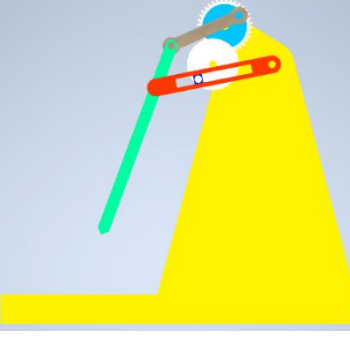
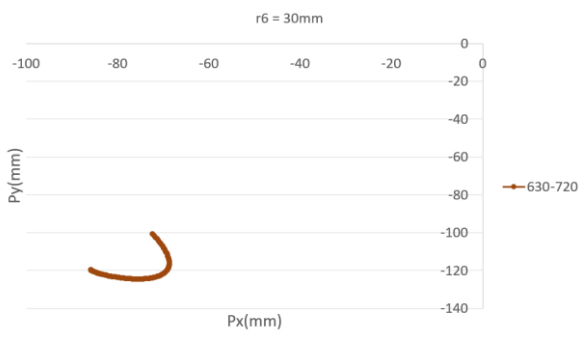
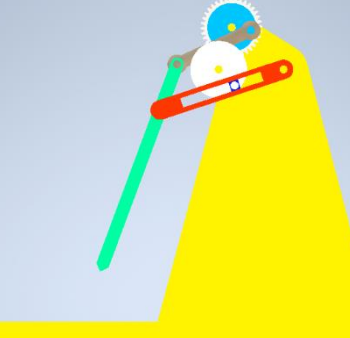
Esto quiere decir que para un ángulo de  $\theta_2$  entre  $0^\circ$  y  $89^\circ$  el mecanismo recorre una trayectoria como se muestra en la Figura 4.82, mientras que la posición del ensamblaje a un ángulo  $\theta_2$  de  $45^\circ$  será la mostrada en la Figura 4.90, en este tramo el mecanismo se mueve de derecha a izquierda según la imagen de dicho tramo. Además, en este tramo se realiza la cúspide de la trayectoria.

El segundo de los casos es para el tramo de  $\theta_2$  para ángulos de  $90^\circ$  a  $179^\circ$ , en este caso, la trayectoria que se recorre entre estos ángulos es la mostrada en la Figura 4.83 de la Tabla 4.4, por otro lado, la posición del mecanismo para un ángulo intermedio, en este caso  $135^\circ$ , se puede observar en la Figura 4.91, en este segundo tramo, el mecanismo realiza un movimiento descendente de forma oblicua de izquierda a derecha.



Tabla 4.4. Tramos de la trayectoria con imágenes del mecanismo en posiciones intermedias

$\theta_2$ (°)	Gráfica Trayectoria	Posición Intermedia
45°	 <p>Figura 4.82. Trayectoria para valores de <math>\theta_2</math> entre 0° y 89°</p>	 <p>Figura 4.90. Modelo para <math>\theta_2 = 45^\circ</math></p>
135°	 <p>Figura 4.83. Trayectoria para valores de <math>\theta_2</math> entre 90° y 179°</p>	 <p>Figura 4.91. Modelo para <math>\theta_2 = 135^\circ</math></p>
225°	 <p>Figura 4.84. Trayectoria para valores de <math>\theta_2</math> entre 180° y 269°</p>	 <p>Figura 4.92. Modelo para <math>\theta_2 = 225^\circ</math></p>
315°	 <p>Figura 4.8591. Trayectoria para valores de <math>\theta_2</math> entre 270° y 359°</p>	 <p>Figura 4.93. Modelo para <math>\theta_2 = 315^\circ</math></p>

$\theta_2$ (°)	Gráfica Trayectoria	Posición Intermedia
405°	 <p>Figura 4.86. Trayectoria para valores de <math>\theta_2</math> entre 360° y 449°</p>	 <p>Figura 4.94. Modelo para <math>\theta_2 = 405^\circ</math></p>
495°	 <p>Figura 4.87. Trayectoria para valores de <math>\theta_2</math> entre 450° y 539°</p>	 <p>Figura 4.95. Modelo para <math>\theta_2 = 495^\circ</math></p>
585°	 <p>Figura 4.88. Trayectoria para valores de <math>\theta_2</math> entre 540° y 629°</p>	 <p>Figura 4.96. Modelo para <math>\theta_2 = 585^\circ</math></p>
675°	 <p>Figura 4.89. Trayectoria para valores de <math>\theta_2</math> entre 630° y 720°</p>	 <p>Figura 4.97. Modelo para <math>\theta_2 = 675^\circ</math></p>

El caso del tramo para ángulos de  $\theta_2$  entre  $180^\circ$  y  $269^\circ$ , la trayectoria se muestra en la Figura 4.84, por otro lado, se ha elegido una posición intermedia, para un ángulo de  $225^\circ$ , en el ensamblaje para poder visualizar la ordenación de las barras, como se muestra en la Figura 4.92 de la Tabla 4.4. En este tramo de la trayectoria se recorre en el mismo sentido que en el caso anterior, es decir, de izquierda a derecha, además en este tramo se produce la mitad del primero de los bucles.

El cuarto de los tramos se representa en la Figura 4.85 de la Tabla 4.4, correspondiente a la posición de ángulos de  $\theta_2$  entre  $270^\circ$  y  $359^\circ$ . La posición intermedia, para un ángulo de  $315^\circ$ , se muestra en la Figura 4.93 de la Tabla 4.4. En este caso, la trayectoria termina de hacer el primero de los dos bucles que realiza. Además, en este tramo se realiza la primera de las tres crúnodos, la cual consiste en un cruce en la trayectoria. La trayectoria, en este caso, se realiza de derecha a izquierda.

Para ángulos de  $\theta_2$  situados entre  $360^\circ$  y  $449^\circ$  la trayectoria descrita se muestra en la Figura 4.86 de la Tabla 4.4, mientras que la posición intermedia de  $405^\circ$  se puede ver en la Figura 4.94. En este tramo el sentido es de derecha a izquierda.

Cuando el ángulo  $\theta_2$  se posiciona entre  $450^\circ$  y  $539^\circ$  realiza la trayectoria que se muestra en la Figura 4.87, mientras que la posición de las barras se puede visualizar en la Figura 4.95 de la Tabla 4.4 para un ángulo  $\theta_2$  de  $495^\circ$ . En este caso la trayectoria se realiza de derecha a izquierda. Por otro lado, se localiza en este fragmento de la trayectoria la segunda de las crúnodos la cual se realiza al cruzarse con el tramo mostrado en la Figura 4.83.

El séptimo tramo que se muestra en la Figura 4.88 corresponde a los valores de  $\theta_2$  situados entre  $540^\circ$  y  $629^\circ$ , mientras que la posición seleccionada en ensamblaje de “Autodesk Inventor”, se puede ver en la Figura 4.96 en la cual se ha posicionado el ángulo  $\theta_2$  en  $585^\circ$ . Este tramo tiene un sentido descendente, por lo que se realiza de derecha a izquierda, del mismo modo que el tramo anterior. Además, en este tramo se realiza la primera mitad del segundo de los bucles que realiza la trayectoria.

El último de los tramos es el que describe la trayectoria que se visualiza en la Figura 4.89, la cual toma valores de  $\theta_2$  situados entre  $630^\circ$  y  $720^\circ$ , mientras que la Figura 4.97 muestra la posición del mecanismo con un valor intermedio para este intervalo, en este caso  $675^\circ$ . En este tramo se puede localizar la tercera de las crúnodes, en la cual la trayectoria se cruza con la correspondiente a la Figura 4.88. Por otro lado, en este tramo se realiza la segunda parte del segundo de los bucles. Para finalizar, el sentido de este tramo es de izquierda a derecha según se muestra en la Figura 4.89.

#### 4.3.5. Análisis cinemático

A continuación, se va a llevar a cabo un análisis de los datos obtenidos mediante el programa “Autodesk Inventor” concernientes a la velocidad del extremo del acoplador. Se analizará la gráfica de la velocidad en módulo y la relación que tiene con la trayectoria, analizando los valores máximos y mínimos.

Se comparará en una tabla, para hacer un análisis más visual, los tramos de la trayectoria como se ha mostrado anteriormente con los tramos correspondientes de la gráfica de la velocidad, la cual se muestra en la siguiente imagen, junto a una tabla con los valores de las velocidades máximas y mínimas en función del tramo de  $\theta_2$  respectivo, junto con el ángulo que posee  $\theta_2$  en el momento de alcanzar dichas velocidades.

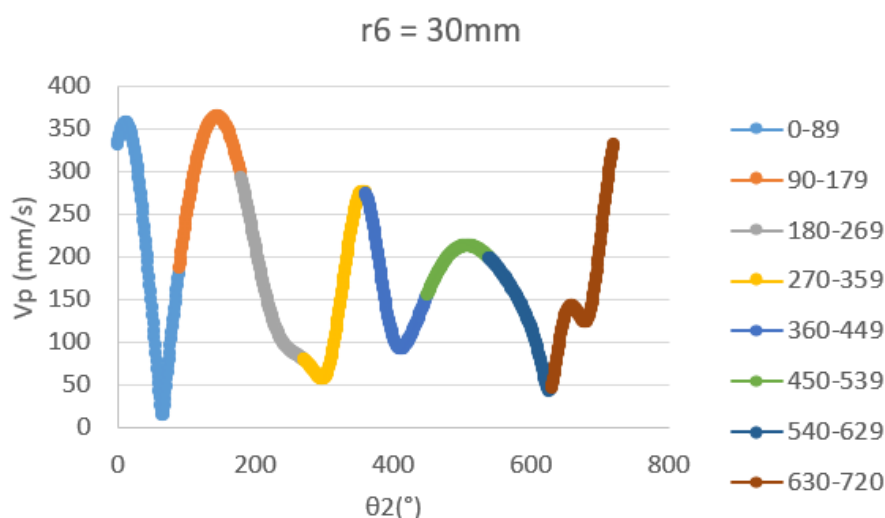
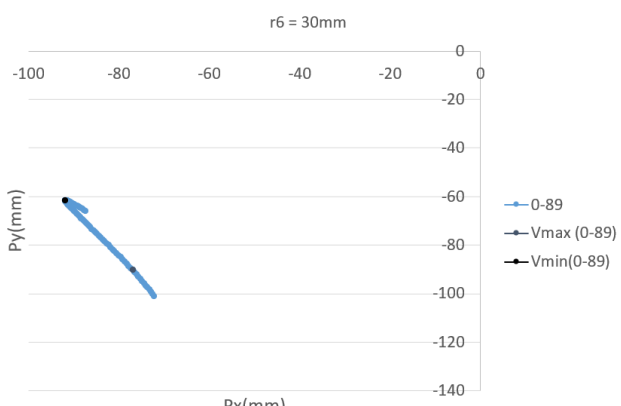
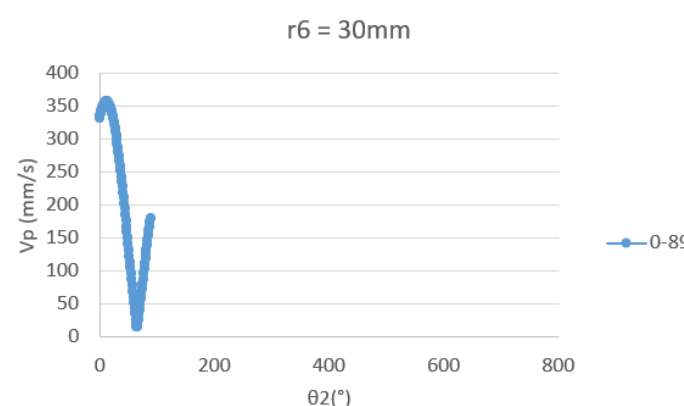
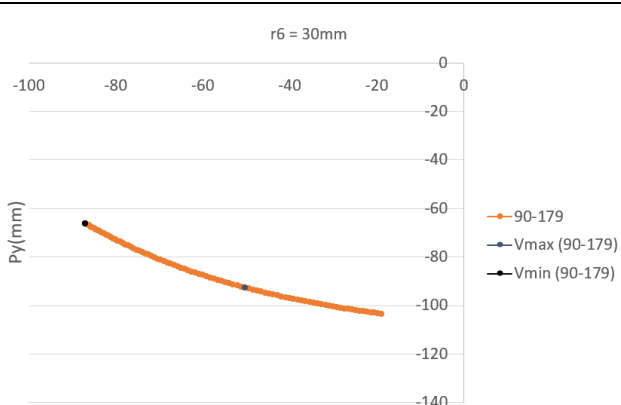
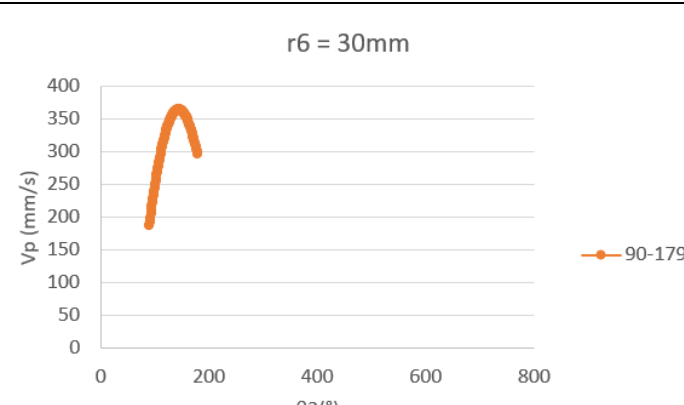


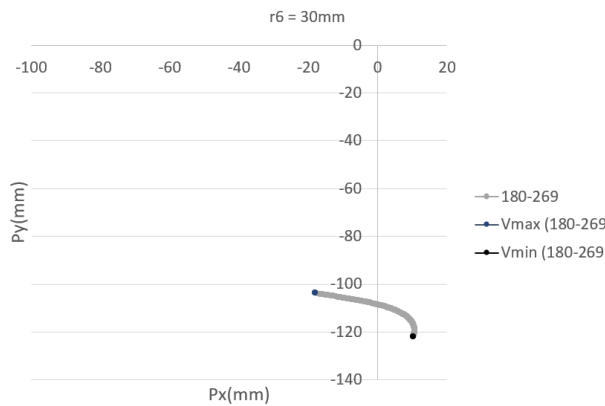
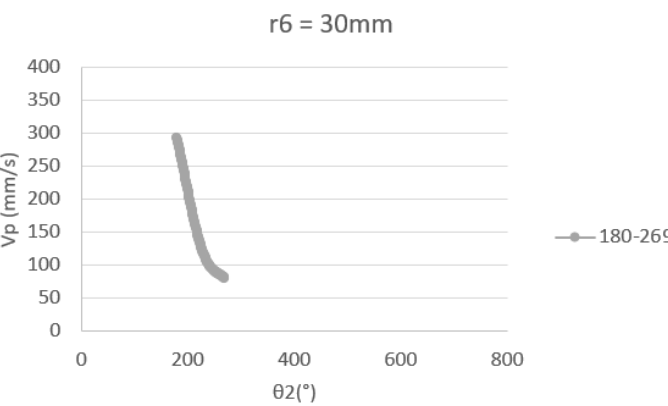
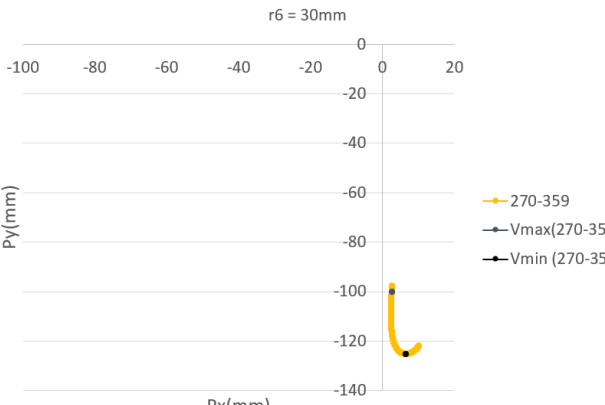
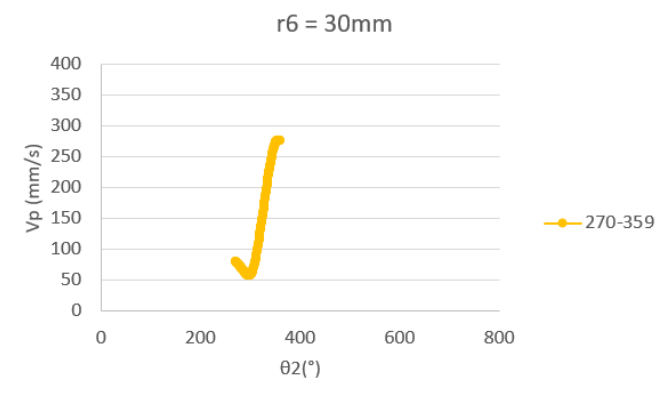
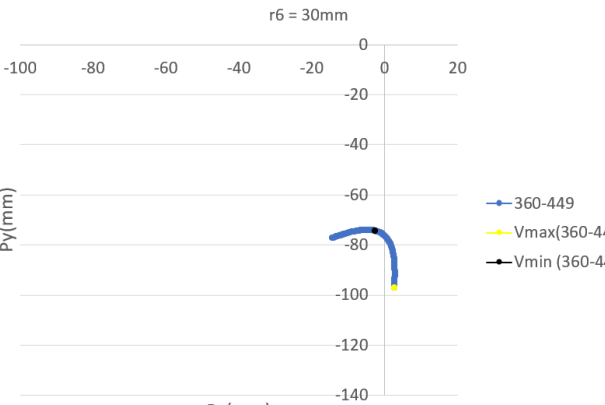
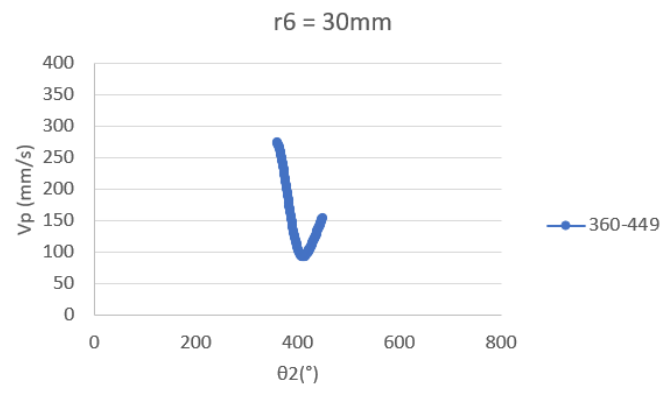
Figura 4. 98. Gráfica de la velocidad del punto P

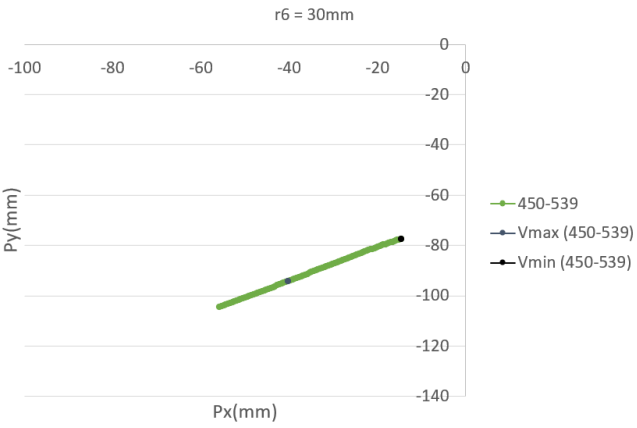
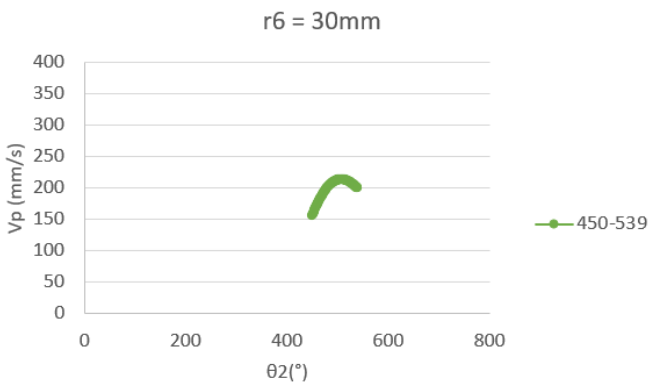
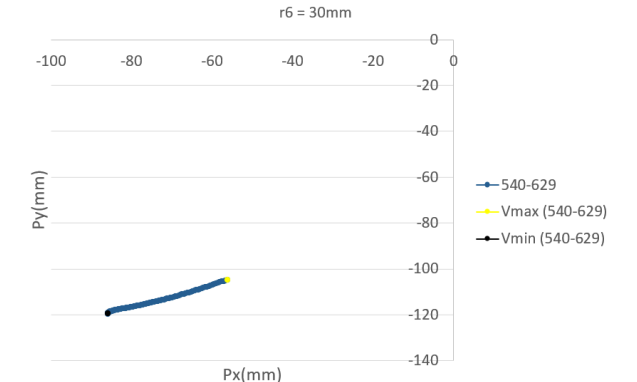
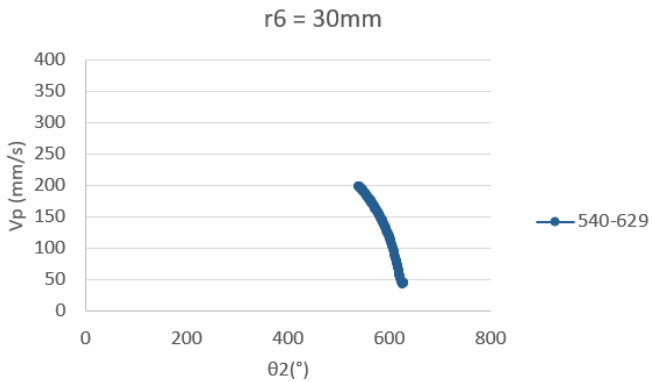
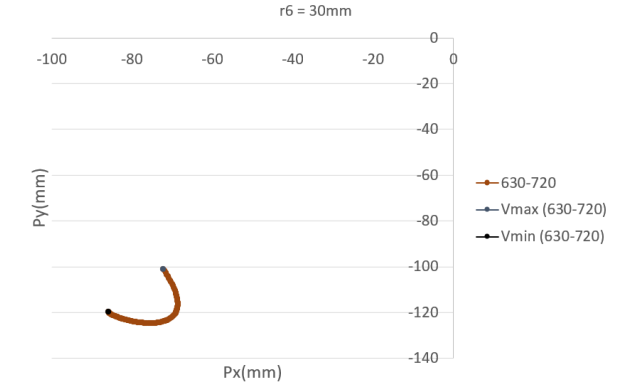
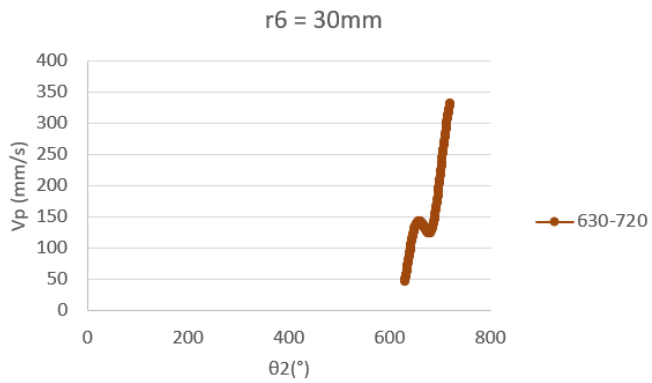
Tabla 4.5. Valores máximos y mínimos de la velocidad en cada tramo con su posición correspondiente

Valores Máximos y mínimos de la velocidad por sectores				$\theta_2$ (Vmax)	$\theta_2$ (Vmin)	
0-89	V max	356,9008605	V min	14,9688437	12	66
90-179	V max	364,1336578	V min	186,2357455	144	90
180-269	V max	292,9106585	V min	80,26409102	180	269
270-359	V max	276,5806499	V min	56,69401366	356	297
360-449	V max	273,9804311	V min	92,65705779	360	411
450-539	V max	212,8000579	V min	154,7852237	507	450
540-629	V max	198,3501527	V min	42,92232888	540	627
630-720	V max	331,0732269	V min	46,91017596	720	630
	V max (total)	364,1336578	V min (total)	14,9688437		

Tabla 4.6. Posición de los valores máximos y mínimos en la trayectoria y grafica de la velocidad por tramos

$\theta_2$ (°)	Trayectoria	Velocidad
0-89	 <p>Figura 4. 99. Trayectoria para valores de <math>\theta_2</math> entre <math>0^\circ</math> y <math>89^\circ</math> con velocidades máxima y mínima</p>	 <p>Figura 4. 100. Velocidad para valores de <math>\theta_2</math> entre <math>0^\circ</math> y <math>89^\circ</math></p>
90-179	 <p>Figura 4. 101. Trayectoria para valores de <math>\theta_2</math> entre <math>90^\circ</math> y <math>179^\circ</math> con velocidades máxima y mínima</p>	 <p>Figura 4. 102. Velocidad para valores de <math>\theta_2</math> entre <math>90^\circ</math> y <math>179^\circ</math></p>

$\theta_2$ ( $^\circ$ )	Trayectoria	Velocidad
180-269	 <p>Figura 4. 103. Trayectoria para valores de <math>\theta_2</math> entre <math>180^\circ</math> y <math>269^\circ</math> con velocidades máxima y mínima</p>	 <p>Figura 4. 104. Velocidad para valores de <math>\theta_2</math> entre <math>180^\circ</math> y <math>269^\circ</math></p>
270-359	 <p>Figura 4. 105. Trayectoria para valores de <math>\theta_2</math> entre <math>270^\circ</math> y <math>359^\circ</math> con velocidades máxima y mínima</p>	 <p>Figura 4. 106. Velocidad para valores de <math>\theta_2</math> entre <math>270^\circ</math> y <math>359^\circ</math></p>
360-449	 <p>Figura 4. 107. Trayectoria para valores de <math>\theta_2</math> entre <math>360^\circ</math> y <math>449^\circ</math> con velocidades máxima y mínima</p>	 <p>Figura 4. 108. Velocidad para valores de <math>\theta_2</math> entre <math>360^\circ</math> y <math>449^\circ</math></p>

$\theta_2$ ( $^\circ$ )	Trayectoria	Velocidad
450-539	 <p>Figura 4. 109. Trayectoria para valores de <math>\theta_2</math> entre 450° y 539° con velocidades máxima y mínima</p>	 <p>Figura 4. 110. Velocidad para valores de <math>\theta_2</math> entre 450° y 539°</p>
540-629	 <p>Figura 4. 111. Trayectoria para valores de <math>\theta_2</math> entre 540° y 629° con velocidades máxima y mínima</p>	 <p>Figura 4. 112. Velocidad para valores de <math>\theta_2</math> entre 540° y 629°</p>
630-720	 <p>Figura 4. 113. Trayectoria para valores de <math>\theta_2</math> entre 630° y 720° con velocidades máxima y mínima</p>	 <p>Figura 4. 114. Velocidad para valores de <math>\theta_2</math> entre 630° y 720°</p>

La Tabla 4.6 recoge datos de forma visual muy útiles para comprender las velocidades a lo largo de la trayectoria.

La primera columna recoge los tramos de  $\theta_2$  en los que se ha dividido la trayectoria; la segunda columna muestra la trayectoria de dicho tramo, con los valores máximos y mínimos de la velocidad de cada tramo; la última de las columnas recoge la gráfica de la velocidad para dichos valores de  $\theta_2$ , con esto se facilita la comprensión de cual es la velocidad a lo largo de la trayectoria.

Como se puede ver en la Figura 4.99, la trayectoria comienza aumentando su velocidad, hasta alcanzar el máximo valor de este tramo, el módulo de dicha velocidad es de 356.9 mm/s como se muestra en la Tabla 4.5, para comenzar a reducir este modulo tras alcanzar dicho valor, para llegar a un valor de 14.969 mm/s como se muestra en la misma imagen, estos valores se ven respaldados por la Figura 4.100, donde se puede ver como el modulo de la velocidad comienza creciendo hasta un máximo, para comenzar a decrecer de una forma abrupta hasta un mínimo, este máximo y este mínimo se sitúan cuando el ángulo  $\theta_2$  tiene un valor de  $12^\circ$  y  $66^\circ$  respectivamente.

Para un intervalo de  $\theta_2$  entre  $90^\circ$  y  $179^\circ$ , la trayectoria que se muestra en la Figura 4.101 sitúa el punto de mínima velocidad en su extremo situado mas a la izquierda, mientras que sitúa su velocidad máxima en un punto intermedio. Siendo sus valores de 186.236 mm/s y 364.134 mm/s respectivamente, como se muestra en la Tabla 4.5, además estas velocidades se sitúan en posiciones donde el ángulo  $\theta_2$  tiene un valor de  $90^\circ$  y  $144^\circ$ . Para terminar un análisis preliminar hay que destacar como en la Figura 4.102 la velocidad describe una parábola. Con todos estos datos se puede deducir que el tramo anterior influye de forma notable en este segundo tramo, puesto que su velocidad mínima se sitúa en el primero de los puntos que forman este tramo de la trayectoria, por otro lado, teniendo en cuenta que su velocidad máxima se sitúa en un ángulo de  $\theta_2$  de valor  $144^\circ$ , se puede deducir que la punta del acoplador aumenta su velocidad hasta este punto para comenzar a reducir dicho modulo, es presumible pensar que esto también afectara al siguiente tramo de valores para  $\theta_2$ .



Al igual que en el caso anterior; como se puede ver en la Figura 4.103, que representa el tramo de la trayectoria correspondiente a ángulos  $\theta_2$  situados entre  $180^\circ$  y  $269^\circ$ ; la velocidad máxima de este tramo se alcanza cuando  $\theta_2$  tiene un valor de  $180^\circ$ , siendo su módulo  $292.911$  mm/s, mientras que su valor mínimo se alcanza para un valor de  $\theta_2$  de  $269^\circ$ , estos valores respaldan que el mecanismo frena al realizar el primero de los bucles de la trayectoria. Además, esta deducción se respalda con la Figura 4.104 donde se muestra la gráfica del módulo de la velocidad, se puede observar como el valor decrece casi de forma lineal, realizando una pequeña variación coincidiendo con el pico del tramo de la trayectoria.

Para valores de  $\theta_2$  situados entre  $270^\circ$  y  $359^\circ$ , el módulo de la velocidad continúa reduciéndose hasta alcanzar un valor de  $56.694$  mm/s como se muestra en la Tabla 4.5, coincidiendo con el mínimo que se puede observar en la Figura 4.106, para comenzar a crecer de forma muy agresiva hasta alcanzar un valor de  $276.58$  mm/s, coincidiendo con el máximo de la gráfica anteriormente mostrada, comenzando a decrecer su valor de nuevo. Esto mantiene una coherencia con la trayectoria que se muestra en la Figura 4.105 donde la velocidad mínima se alcanza en el punto mas bajo de la trayectoria, donde hay un cambio de dirección acentuado, y la velocidad máxima casi en el extremo de dicha trayectoria, coincidiendo con el máximo de la grafica del módulo de la velocidad.

Como se ha mencionado anteriormente, en el caso que se muestra en la Figura 4.107, la trayectoria se traza de derecha a izquierda, es un tramo correspondiente a los ángulos situados entre  $360^\circ$  y  $449^\circ$  de  $\theta_2$ . Como se muestra en esa gráfica, el valor máximo se sitúa al inicio de este tramo, con un módulo de  $273.98$  mm/s para un ángulo de  $\theta_2$  igual a  $360^\circ$ , esto quiere decir que la velocidad esta reduciendo su modulo y el punto en el que se encuentra el inicio de esa reducción esta en el tramo anterior. Comenzando a frenar tras alcanzar este punto, para alcanzar el punto de cambio de dirección con una velocidad mínima. Por otro lado, el punto que sitúa en la trayectoria la velocidad mínima, de modulo  $92.657$  mm/s para un ángulo  $\theta_2$  de  $411^\circ$ . También estas conclusiones se respaldan con la Figura 4.108 en la cual la gráfica del módulo de la velocidad comienza con un valor máximo, tras este punto reduce su valor hasta un mínimo, punto en el cual

se sitúa la velocidad mínima y el cambio de dirección para comenzar a tomar valores cada vez mayores.

Para unos valores de  $\theta_2$  situados entre  $450^\circ$  y  $539^\circ$  la trayectoria es prácticamente lineal, como se muestra en la Figura 4.109. En la Figura 4.110 se puede observar la parábola que realiza el módulo de la velocidad respecto a  $\theta_2$ . Esto quiere decir que el valor mínimo se toma cuando  $\theta_2$  es igual a  $450^\circ$  con un valor de 154.785 mm/s, esto quiere decir que, en esta primera parte del tramo, la velocidad cada vez será mayor, y que esta influida por el tramo anterior. Por otro lado, la grafica de la velocidad del extremo del acoplador localiza el máximo cuando  $\theta_2$  toma un valor de  $507^\circ$  con un módulo de 212.8 mm/s tras el cual comienza a frenar, influido por los tramos de la trayectoria futuros.

El siguiente tramo para analizar es para valores de  $\theta_2$  entre  $540^\circ$  y  $629^\circ$ . En este caso, la Figura 4.112 muestra como la velocidad es decreciente a lo largo de todo el tramo hasta alcanzar un mínimo cuando  $\theta_2$  toma un valor de  $627^\circ$  como se muestra en la Tabla 4.5. Esto se ve reflejado en la Figura 4.111, donde la trayectoria realiza una curva prácticamente recta hasta alcanzar un cambio de sentido para realizar el segundo bucle del trazado de la trayectoria. Esta deceleración se aprecia en el valor máximo y mínimo de esta, los cuales son 198.35 mm/s y 42.922 mm/s respectivamente. El valor máximo de este tramo respalda la deducción del tramo anterior en el que se describía como a partir de su valor máximo comenzaba a decelerar.

El último tramo para cerrar la trayectoria de la punta del acoplador se describe cuando  $\theta_2$  toma valores entre  $630^\circ$  y  $720^\circ$ . En este tramo, como se ve en la Figura 4.113 la trayectoria termina de realizar el segundo de los bucles del trazo. A su vez, es este tramo, se puede ver como el valor mínimo de la velocidad coincide cuando  $\theta_2$  toma un valor de 630, esto es en el inicio del tramo, mientras que el valor máximo se alcanza para un valor de  $\theta_2$  de 720, esto se ve respaldado por la grafica de la velocidad frente a  $\theta_2$  que se muestra en la Figura 4.114. Estos valores de la velocidad se deben a las características de la curva, es decir, el valor mínimo viene influido por el tramo anterior, en el cual se ha realizado un cambio de dirección abrupta, por lo que el mecanismo ha llevado a cabo una reducción de la velocidad considerable. Por otro lado, es coherente que la velocidad

máxima se alcance en el ultimo punto del tramo, puesto que en el tramo siguiente la velocidad continúa creciendo como se ha dicho anteriormente.

Como conclusión, en la Tabla 4.5 se pueden observar varios datos relevantes. El valor máximo de la velocidad es de 364.134 mm/s, cuando  $\theta_2$  toma un valor de  $144^\circ$ , esto es coherente con el trazo de la trayectoria del acoplador, puesto que este punto se encuentra en el tramo mas largo del trazo, es decir, de  $90^\circ$  a  $179^\circ$ , además el mínimo se alcanza en el tramo anterior, de 0 a  $89^\circ$ , donde se localiza la cúspide donde la velocidad alcanza un valor de 14.969 mm/s.

#### 4.3.6. Influencia de la variación de la longitud de $r_6$ en la trayectoria del acoplador

A continuación, se realizará una comparativa de la trayectoria que recorre la punta del acoplador al variar la longitud de la barra 6. Se realizarán variaciones de 5mm, esto quiere decir que las longitudes de estudio serán de 30 mm, 35 mm, 40 mm, 45 mm, 50 mm, 55 mm y 60 mm.

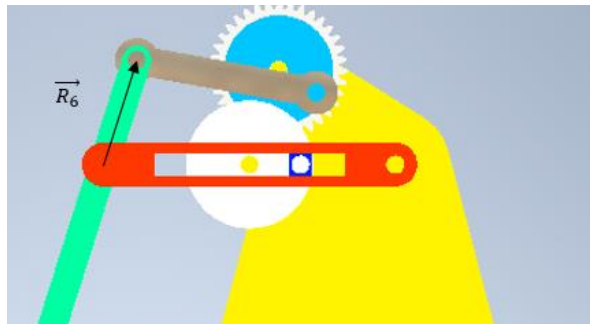


Figura 4. 115. Barra del mecanismo que va a tomar diversos valores para el posterior estudio de su influencia en la posición y cinemática

También se realizará un estudio comparando valores de los diferentes trazados, relativos a su ancho y alto. Es decir, se compararán los valores máximos y mínimos respecto a los ejes, por otro lado, también se compararán los incrementos de los anchos y los altos de cada curva.

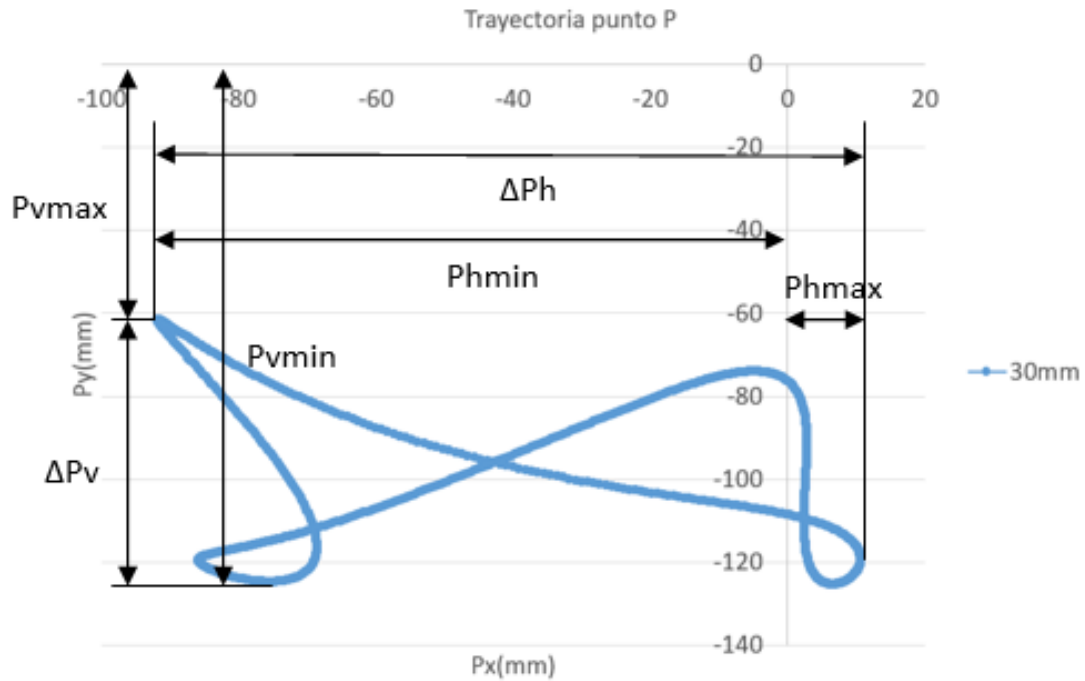


Figura 4. 116. Parámetros de estudio de la trayectoria

De este modo se dispondrá de datos suficientes como para poder seleccionar el trazado más óptimo en función de la necesidad que se deba cubrir. Si la necesidad es que la diferencia de cotas sea mayor debido a que de este modo se puede estirar más la masa que esté en el bol y de este modo mejorar las propiedades del amasado se podrá seleccionar la configuración más óptima. También en función del espacio disponible o de las características del recipiente donde se encuentren los elementos que se deban amasar.

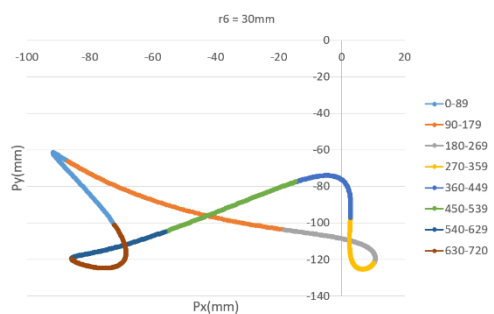
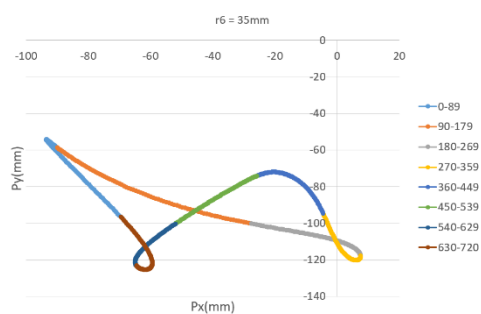
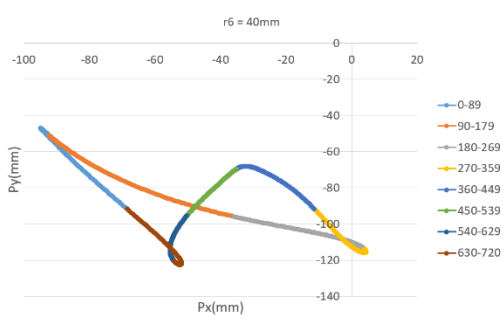
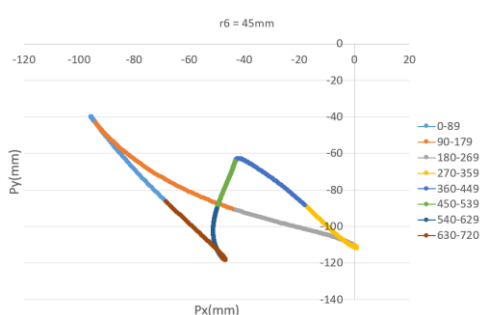
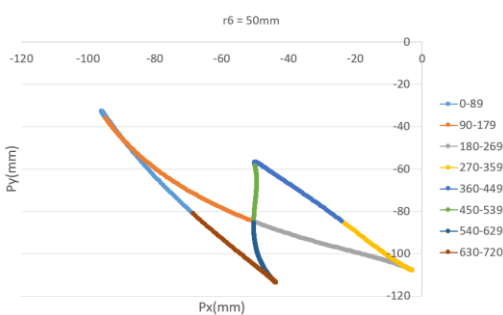
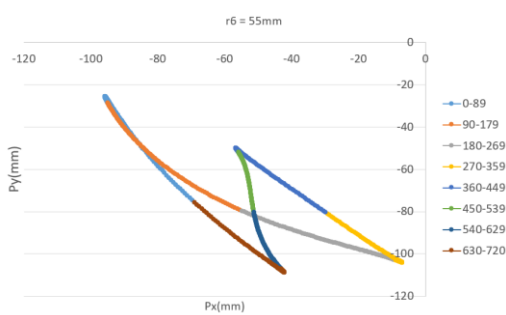
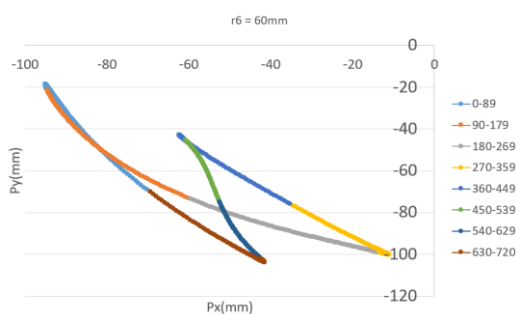
Tabla 4.7. Trayectorias para diferentes valores de  $r_6$ Figura 4. 117. Trayectoria  $r_6= 30\text{mm}$ Figura 4. 118. Trayectoria  $r_6= 35\text{mm}$ Figura 4. 119. Trayectoria  $r_6= 40\text{mm}$ Figura 4. 120. Trayectoria  $r_6= 45\text{mm}$ Figura 4. 121. Trayectoria  $r_6= 50\text{mm}$ Figura 4. 122. Trayectoria  $r_6= 55\text{mm}$ Figura 4. 123. Trayectoria  $r_6= 60\text{mm}$

Tabla 4.8. Valores de  $P_x$  respecto a  $\theta_2$  para distintos valores de  $r_6$

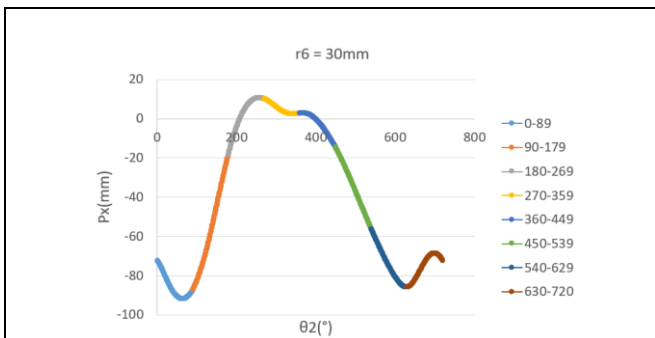


Figura 4. 124. Valores de  $P_x$  respecto a  $\theta_2$  para  $r_6= 30\text{mm}$

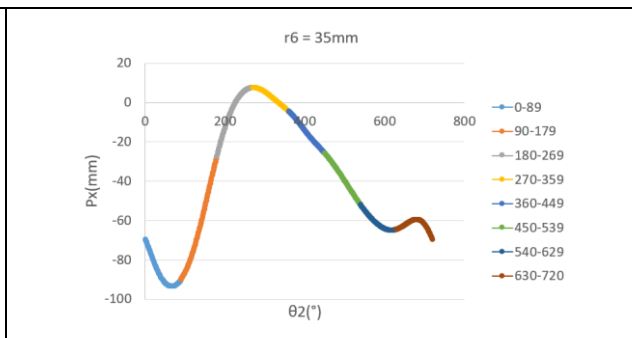


Figura 4. 125. Valores de  $P_x$  respecto a  $\theta_2$  para  $r_6= 35\text{mm}$

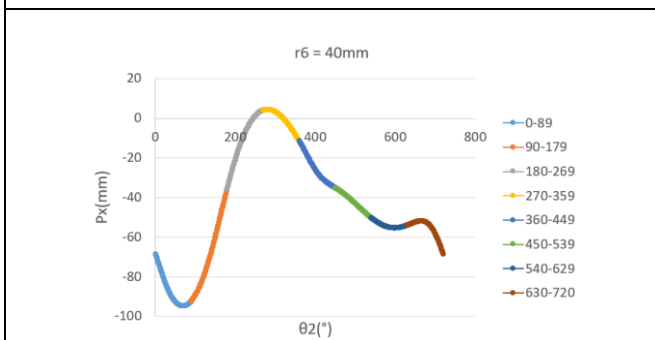


Figura 4. 126. Valores de  $P_x$  respecto a  $\theta_2$  para  $r_6= 40\text{mm}$

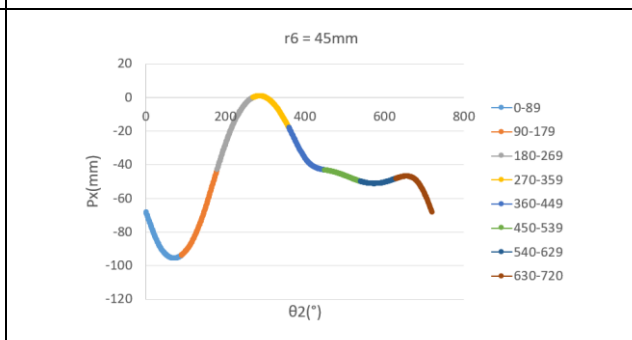


Figura 4. 127. Valores de  $P_x$  respecto a  $\theta_2$  para  $r_6= 45\text{mm}$

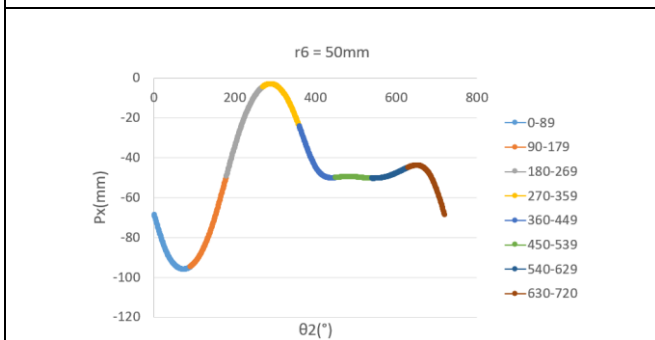


Figura 4. 128. Valores de  $P_x$  respecto a  $\theta_2$  para  $r_6= 50\text{mm}$

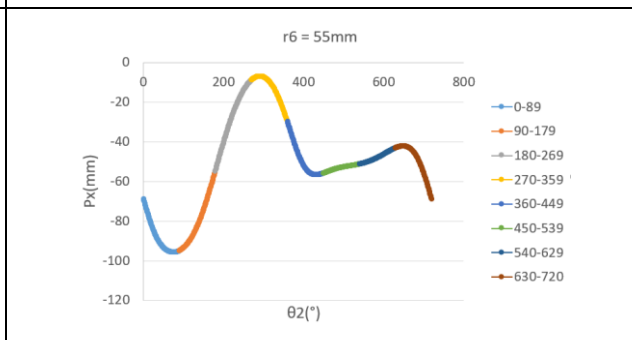


Figura 4. 129. Valores de  $P_x$  respecto a  $\theta_2$  para  $r_6= 55\text{mm}$

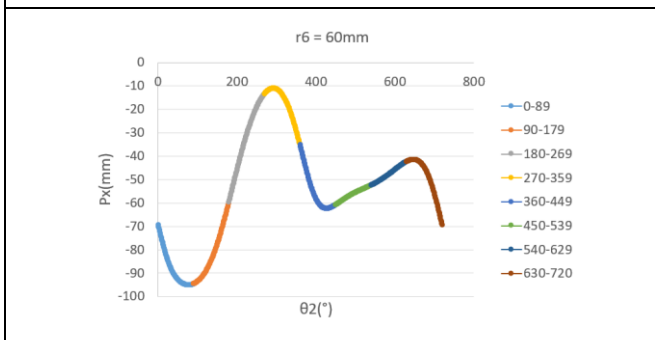


Figura 4. 130. Valores de  $P_x$  respecto a  $\theta_2$  para  $r_6= 60\text{mm}$

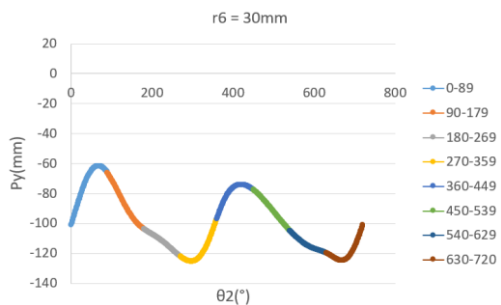
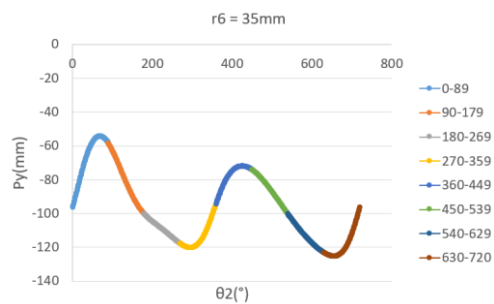
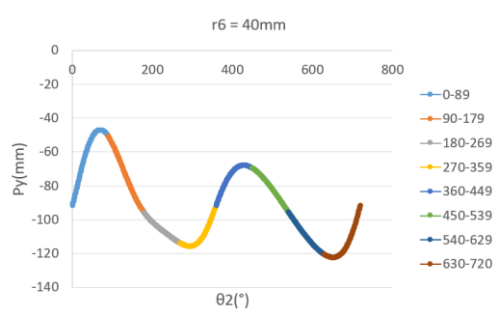
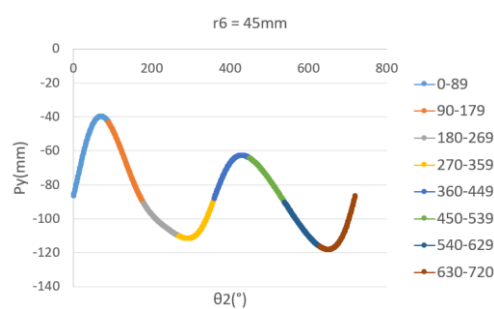
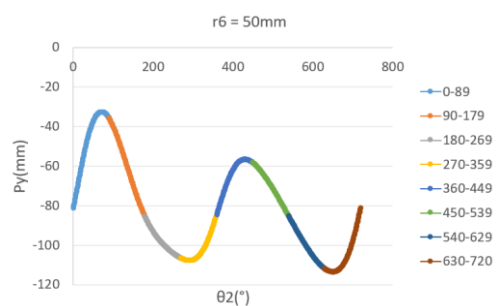
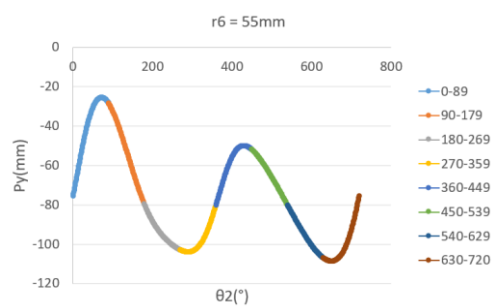
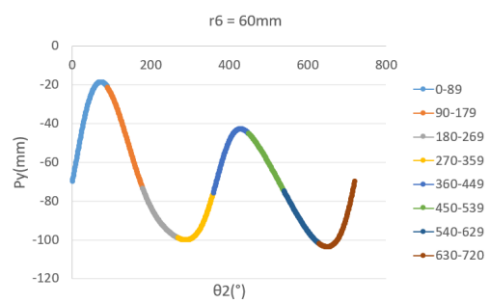
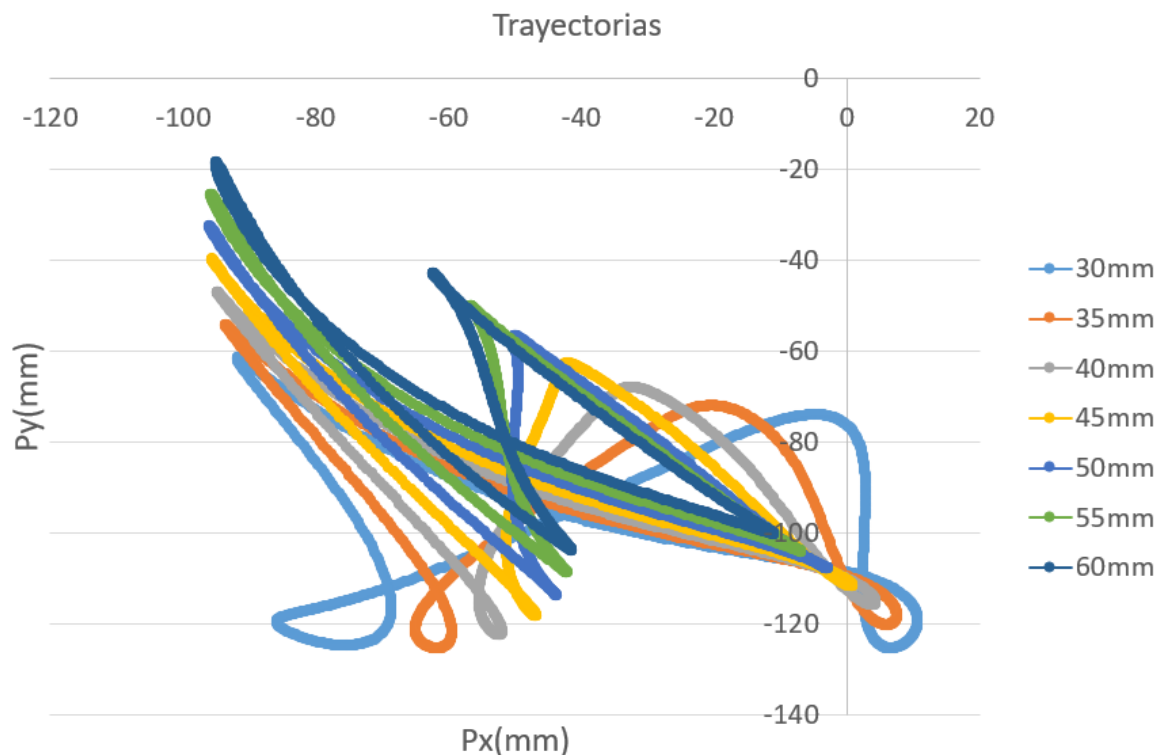
Tabla 4.9. Valores de  $P_y$  respecto a  $\theta_2$  para distintos valores de  $r_6$ Figura 4. 131. Valores de  $P_y$  respecto a  $\theta_2$  para  $r_6=30\text{mm}$ Figura 4. 132. Valores de  $P_y$  respecto a  $\theta_2$  para  $r_6=35\text{mm}$ Figura 4. 133. Valores de  $P_y$  respecto a  $\theta_2$  para  $r_6=40\text{mm}$ Figura 4. 134. Valores de  $P_y$  respecto a  $\theta_2$  para  $r_6=45\text{mm}$ Figura 4. 135. Valores de  $P_y$  respecto a  $\theta_2$  para  $r_6=50\text{mm}$ Figura 4. 136. Valores de  $P_y$  respecto a  $\theta_2$  para  $r_6=55\text{mm}$ Figura 4. 137. Valores de  $P_y$  respecto a  $\theta_2$  para  $r_6=60\text{mm}$

Tabla 4.10. Diferentes parametros del trazado del punto P

	Posiciones maximas y minimas				r6	$\Delta P_h$	$\Delta P_v$
	Phmax	Phmin	Pvmax	Pvmin			
30mm	10,68390	-91,78460	-61,56990	-125,30300	30	102,46850	63,73310
35mm	7,55305	-93,50420	-54,31740	-125,30100	35	101,05725	70,98360
40mm	4,37762	-94,79190	-47,06100	-122,39600	40	99,16952	75,33500
45mm	0,86872	-95,60320	-39,83420	-118,21000	45	96,47192	78,37580
50mm	-2,93972	-95,91950	-32,66700	-113,54274	50	92,97978	80,87574
55mm	-6,93534	-95,73870	-25,58710	-108,67700	55	88,80336	83,08990
60mm	-11,01370	-95,06470	-18,61460	-103,71700	60	84,05100	85,10240

Figura 4. 138. Diferentes trayectorias del punto P en función del valor de  $r_6$ 

Uno de los objetivos del estudio es conocer los cambios en la posición de la trayectoria a lo largo de su trazado.

Como se muestra en la Tabla 4.7, la trayectoria que describe la punta del acoplador varía de forma cualitativa. Para tener una visión de una grafica con todas las trayectorias y apreciar mejor estas variaciones se han superpuesto todas las trayectorias de dicha tabla en la Figura 4.138, en la cual se pueden apreciar dichos cambios de una forma mas genérica. La trayectoria varía la posición de sus bucles, de sus curvas y de sus cúspides, es notorio como la posición además



varía, trazando la trayectoria cada vez que se modifica el valor de la barra, a una posición más elevada.

También se puede observar en la Tabla 4.7 como los dos bucles cambian su tamaño cada vez que se varia la longitud de la barra a un valor mayor, los bucles que forma en su zona inferior van reduciendo su tamaño, hasta tomar una forma de cúspide. Por otro lado, se puede observar como la curva que realiza en su parte superior modifica su trazado, siendo una curva cuando la barra toma un valor de 30 mm hasta formar un bucle, muy cercano a la forma de una cúspide, cuando posee un valor de 60 mm. Se puede ver como la cúspide que se forma en la parte superior izquierda del trazado, a lo largo de estas variaciones de la longitud, va cambiando su forma hasta formar un bucle con forma de lágrima. También es visible como se forma una cúspide en la parte inferior izquierda, donde en la longitud de menor valor forma un bucle.

En la Tabla 4.8 se muestran los valores de  $P_x$  y en la Tabla 4.9 de  $P_y$  de la trayectoria a lo largo de la variación del ángulo  $\theta_2$ . Estas gráficas son útiles para comprender como se desplaza y como varían las posiciones máximas y mínimas de dichos trazos, siendo abalados de forma cuantitativa por los valores que se muestran en la Tabla 4.10.

Analizando individualmente cada trayectoria, se puede observar las siguientes relaciones.

Para el caso en el que  $r_6$  toma un valor de 30 mm, la Figura 4.124 muestra los valores de  $P_x$  frente a  $\theta_2$ , como se puede observar, esta gráfica posee un valor mínimo que se alcanza al inicio del ciclo, en el tramo azul, siendo su máximo valor alcanzado en el tercer tramo, designado con el color gris. Los valores de  $P_x$  en estos puntos se muestran en la Tabla 4.10, siendo -91.785 mm y 10.684 mm respectivamente. Por otro lado, en la Figura 4.131 se pueden observar dos puntos los cuales deben ser mencionados, un máximo absoluto, el cual se alcanza en el primer tramo, coloreado de azul; y un mínimo situado en el cuarto tramo, de color amarillo. En este caso, la Tabla 4.10 añade el valor de estos dos puntos, siendo de -61.57 mm y -125.303 mm respectivamente. Estos datos se ven reflejados en la Figura 4.117 donde estos puntos se localizan en la cúspide y en el bucle situado en la zona inferior derecha.

Cuando  $r_6$  es igual a 35 mm. Los valores de  $P_x$  se muestran en la Figura 4.125, siendo su valor mínimo de -93.504 mm y su valor máximo de 7.553 mm, a diferencia del caso anterior donde el máximo se encontraba en el tramo de  $\theta_2$  entre  $180^\circ$  y  $269^\circ$ , en este caso, este punto máximo se desplaza al tramo de  $\theta_2$  entre  $270^\circ$  y  $359^\circ$ . Esto se ve reflejado en la Figura 4.118 donde se muestra la trayectoria de la punta del acoplador; se puede ver como el valor mínimo está situado en el primer tramo, es decir, para valores de  $\theta_2$  situados entre  $0^\circ$  y  $89^\circ$ , mientras que su valor máximo está situado en el cuarto tramo, coloreado de amarillo, para valores de  $\theta_2$  de  $270^\circ$  a  $359^\circ$ . Por otro lado, la Figura 4.132 muestra los valores de  $P_y$  respecto a  $\theta_2$ , en este caso, el máximo se localiza en el primer tramo, con un valor de -54.317 mm, y su valor mínimo en el último tramo, siendo el valor de este punto de -125.301 mm. Estos valores se representan en la Figura 4.118 en el lazo correspondiente al tramo  $630^\circ$  a  $720^\circ$  y en la cúspide del primer tramo.

Para el valor de  $r_6$  de 40 mm, la Figura 4.126 muestra un mínimo en el primer tramo, la Tabla 4.10 determina un valor de -94.792 mm para este punto, apreciando un ligero desplazamiento de este mínimo en comparación con el caso anterior; por otro lado, se localiza un máximo más claro en el cuarto tramo de la gráfica en comparación con el caso anterior de valor 4.378 mm. Por otro lado, en la Figura 4.133 el valor máximo se localiza en el primer tramo, con un valor de -47.061 mm, mientras que el valor mínimo se encuentra en el último tramo, cuyo valor es de -122.396 mm como se muestra en la Tabla 4.10. Estos puntos se localizan en la gráfica que se muestra en la Figura 4.119; el valor máximo de  $P_x$  se encuentra en el lazo situado más a la derecha en la parte inferior del trazo, el valor mínimo de  $P_x$  se encuentra en la punta de la cúspide. Por otro lado, el valor máximo de  $P_y$  se puede localizar en la misma posición que el mínimo valor de  $P_x$ , mientras que el valor mínimo de  $P_y$  se encuentra en el último tramo, trazado de color marrón, donde se encuentra el segundo de los bucles, localizado en la zona central en la mitad inferior de la trayectoria.

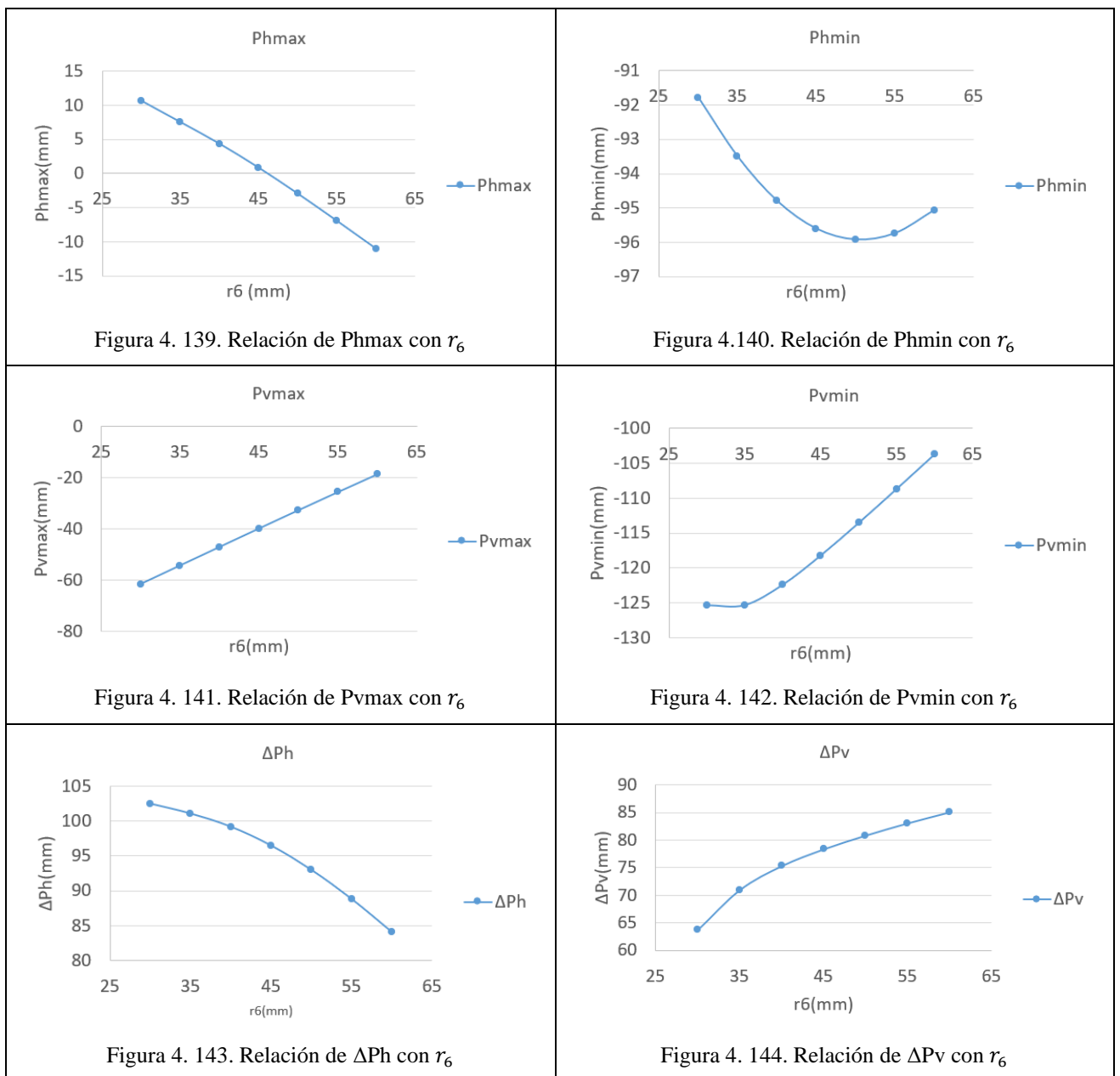
Cuando  $r_6$  toma un valor de 45 mm, la trayectoria que traza la punta de la amasadora corresponde con la mostrada en la Figura 4.120, en la cual se pueden marcar dos valores máximos y dos valores mínimos en referencia a la posición;

por un lado, en el eje horizontal se localiza una posición máxima, la cual se encuentra en la cúspide situada a la izquierda de la gráfica, por otro lado, la posición mínima respecto a este eje se encuentra en el bucle que forman el tercer y cuarto tramo, coloreados en la Figura 4.120 de gris y amarillo. En el eje vertical de la gráfica, se localiza una posición máxima, que coincide con la mínima del eje horizontal, en la punta de la cúspide del primer tramo, de color azul. Por otro lado, se localiza el valor mínimo en el ultimo tramo, el cual corresponde con valores de  $\theta_2$  entre 360 y 720, de color marrón. Los valores que corresponden al máximo y al mínimo del eje horizontal son de 0.869 mm y -95.6 mm respectivamente; por otro lado, el máximo del eje vertical tiene un valor de -39.834 mm y un mínimo de -118.21 mm; como se puede observar en la Tabla 4.10.

Para el valor de  $r_c$  igual a 50 mm las graficas correspondientes se recogen en la Figura 4.128, Figura 4.135 y Figura 4.121, mientras que los valores característicos relativos a estas graficas se encuentran en la Tabla 4.10. Cabe mencionar la variación que sufren las graficas relativas a  $P_x$  y  $P_y$  respecto a  $\theta_2$ , como se puede observar en la Tabla 4.8 y en la Tabla 4.9, las curvas que se describen van suavizando su tendencia en la zona final, esto se debe a la reducción del tamaño de los bucles, los cuales eran los que producían pequeñas perturbaciones en las curvas. En estas gráficas se localizan un máximo y un mínimo absolutos, los cuales coinciden con las posiciones situadas más en los extremos, tanto verticales como horizontales, de la trayectoria de la punta del acoplador. Como se ha dicho, en el gráfico relativo a la trayectoria, en el eje horizontal se encuentra un punto de valor máximo, en este caso -2.94 mm, situado en el extremo del bucle situado mas a la derecha con forma de lágrima; por otro lado, se localiza un valor mínimo, el modulo relativo a este punto es de -95.92 mm, situado en el extremo de la cúspide que se sitúa más a la izquierda en la zona superior. Por otro lado, en el eje vertical se localiza un valor mínimo de -113.543 mm, correspondiente al vértice del segundo de los bucles con forma de lagrima, el cual se sitúa en la zona inferior central del trazo; el máximo de este eje se encuentra en el vértice de la cúspide del trazado con un valor de -32.667 mm.

El penúltimo de los casos corresponde cuando  $r_6$  toma un valor de 55 mm. En este caso, se puede ver en la Figura 4.122 como los bucles inferiores se han cerrado prácticamente por completo, esto se refleja en la Figura 4.129 y en la Figura 4.136 suavizando las tendencias intermedias y marcando máximos cada vez más acentuados. Los valores máximos corresponden a -6.935 mm para el eje horizontal y -25.587 mm para el eje vertical; por otro lado, los valores mínimos son de -95.739 mm para el eje horizontal y -108.677 mm para el eje vertical.

El último de los casos de estudio es cuando  $r_6$  toma un valor de 60 mm. En este caso, los bucles inferiores que existían con forma de lágrima, desaparecen para dar lugar a dos cúspides inferiores, por el contrario, la cúspide superior toma forma de bucle con clasificación de lagrima y aparece un nuevo bucle que forman los tramos correspondientes a los valores de  $\theta_2$  entre  $360^\circ$  y  $449^\circ$  y los valores de  $\theta_2$  entre  $450^\circ$  y  $539^\circ$  como se muestra en la Figura 4.123. Por otro lado, se puede ver como los valores máximos y mínimos de esta gráfica corresponden con los valores máximos y mínimos de la Figura 4.130 relativa a  $P_x$  respecto  $\theta_2$  y a los de la Figura 4.137 correspondientes a  $P_y$  tomando como referencia  $\theta_2$ . El mínimo absoluto de  $P_x$  toma un valor de -95.06 mm, coincidiendo con el valor que se alcanza en el bucle superior en la zona de la izquierda de la Figura 4.123, tomando como referencia el eje horizontal. El máximo absoluto de  $P_x$  se encuentra en el extremo de la cúspide que se ha formado en el tramo de  $\theta_2$  para valores entre 270 y 359, con un valor de -11.013 mm. Por otro lado, la posición máxima de  $P_y$  que se alcanza en el eje vertical posee un valor de -18.62 mm, coincidiendo con el extremo superior del bucle situado mas a la izquierda en la Figura 4.123; mientras que el valor mínimo de este eje, situado en la cúspide que forma la trayectoria para valores de  $\theta_2$  entre  $630^\circ$  y  $720^\circ$ , que a su vez coincide con el mínimo absoluto que se localiza en la grafica de  $P_y$  y que toma un valor de -103.717 mm.

Tabla 4.11. Graficas con diferentes parámetros relacionados con la variación de  $r_6$ 

Tomando los valores de la tabla que se muestra en la Tabla 4.10 se han generado las gráficas de la Tabla 4.11. En ellas se busca encontrar una relación o tendencia entre los valores clave de las diferentes trayectorias, estos valores corresponden a la altura máximo y mínima tomada desde el eje horizontal. También se encuentran las distancias horizontales máximas y mínimas respecto al eje vertical. Estos datos se asignan a cada uno de los valores correspondientes de  $r_6$ .

Teniendo en cuenta como se han generado las diferentes gráficas se pueden deducir las siguientes conclusiones.

En la Figura 4.139 se puede ver la relación existente entre los diferentes valores de  $r_6$  y las posiciones más cercanas al eje vertical. Si se traza una línea que una estos puntos se obtiene dicha curva. En este caso, se puede observar como aumentando la longitud de la barra, los valores de esta distancia respecto al eje vertical de referencia son cada vez mas negativas, por lo que cada vez la curva se aleja más, esto puede ser útil si se busca una distancia concreta del recipiente que contenga la mezcla respecto a dicho eje.

La Figura 4.140 en cambio muestra la posición mas alejada del eje vertical, como se puede ver se realiza una parábola con un mínimo, aunque en este caso los valores toman unos valores muy similares, marcando una diferencia máxima aproximada de 4 mm. Por lo que estos valores serán mas determinantes para la obtención del incremento de la distancia horizontal del lazo mas que por sí sola, a diferencia del caso anterior.

En la Figura 4.141 se localizan las posiciones verticales de cada trayectoria más cercanas al eje horizontal, este dato es muy útil para poder elegir un recipiente que se adapte a esta altura máximo o por el contrario, poder elegir la medida de  $r_6$  que mejor se amolde a un recipiente ya seleccionado.

La Figura 4.142 recoge la altura mínima de cada curva, esto es la distancia del eje al punto mas bajo del trazado. Como se puede observar, las distancias cada vez son menores respecto al eje horizontal, esto puede resultar útil a la hora de seleccionar una curva por necesidades de amasado y conocer a que altura debe colocarse el recipiente para optimizar el efecto de acoplador sobre la mezcla. Por otro lado, también resulta útil para el proceso opuesto, teniendo la restricción de una altura ya determinada, poder seleccionar la curva que se adapte a esta disposición. También el dato de la altura mínima unida a una imagen del trazo puede ser decisivo en la elección del trazado más optimo. Si se desea amasar una mezcla de una manera más óptima, cuanto más cerca pase el trazado del punto más bajo del recipiente, la mezcla obtendrá mejor consistencia, puesto que no quedarán en este punto elementos sin mezclar.

En la Figura 4.143 se muestra el incremento que existe entre los valores máximos y mínimos de cada una de las curvas respecto al eje vertical. Como se puede observar el ancho de los trazos se reduce notablemente al variar la longitud de  $r_6$  a longitudes cada vez mayores. Al igual que en los casos anteriores, este dato es muy útil para poder elegir la curva que se desea trazar teniendo el espacio de amasado como restricción.

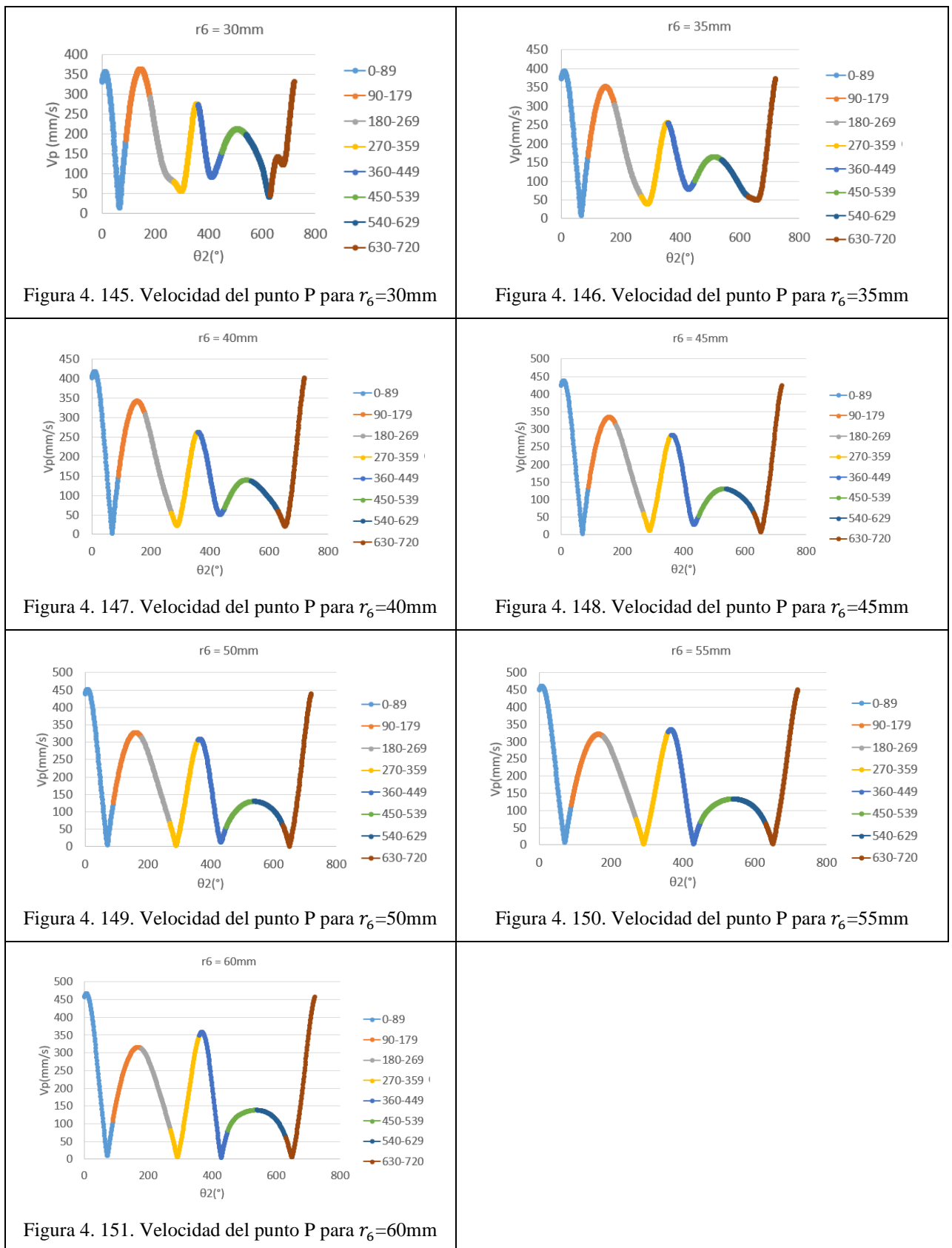
La Figura 4.144 muestra el incremento para cada posición de  $r_6$  relativa a la altura máxima menos la mínima. Se puede observar en la tendencia que a mayor longitud de  $r_6$ , la diferencia entre el punto más alto de la trayectoria y el punto más bajo aumenta, aunque se puede apreciar como esa diferencia se va estabilizando cuanto mayor es el valor de  $r_6$ . Como en casos anteriores este dato es relevante si se dispone de un recipiente concreto con una altura determinada. También es útil si se desea seleccionar un trazado por las características de la curva y así poder determinar que recipiente se adapta mejor a dicho trazado.

#### 4.3.7. Influencia de la variación de la longitud de $r_6$ en la velocidad del acoplador

Seguidamente se llevará a cabo un análisis de las velocidades que tiene el punto inferior del acoplador a lo largo de la trayectoria.

Para ello, se mostrarán las gráficas correspondientes a dichas velocidades para cada uno de los valores que toma  $r_6$ , es decir, cuando toma el valor de 30 mm, 35 mm, 40 mm, 45 mm, 50 mm, 55 mm y 60mm.

Como el objetivo es poder observar una tendencia y unas características determinadas, se tomará como factor cualitativo cada una de las gráficas de la velocidad, por otro lado, para respaldar estos trazados se aportarán los valores de las velocidades máximas y mínimas de cada uno de los tramos que realiza la trayectoria, cuando  $\theta_2$  toma intervalos determinados de noventa grados, es decir, el primer caso será cuando  $\theta_2$  tome valores entre  $0^\circ$  y  $89^\circ$ . Pudiendo determinar en que valor de  $\theta_2$  se producen estos máximos y mínimos de cada intervalo.

Tabla 4.12. Graficas de la velocidad del punto P para diferentes longitudes de  $r_6$ 



A continuación, se mostrará una serie de imágenes en las que se pueden visualizar los datos relativos a las gráficas de la Tabla 4.12. Estos valores son el tramo de  $\theta_2$ , seguidamente se sitúan en cada fila de dicho tramo la velocidad máxima, la velocidad mínima, con sus valores correspondientes y los ángulos de  $\theta_2$  en los cuales se alcanzan esas velocidades.

Tabla 4.13. Velocidades del punto P para  $r_6=30\text{mm}$ 

Valores Maximos y minimos de la velocidad por sectores					$\theta_2$ (Vmax)	$\theta_2$ (Vmin)	
0-89	V max	356,9008605	V min	14,9688437	30mm	12	66
90-179	V max	364,1336578	V min	186,2357455		144	90
180-269	V max	292,9106585	V min	80,26409102		180	269
270-359	V max	276,5806499	V min	56,69401366		356	297
360-449	V max	273,9804311	V min	92,65705779		360	411
450-539	V max	212,8000579	V min	154,7852237		507	450
540-629	V max	198,3501527	V min	42,92232888		540	627
630-720	V max	331,0732269	V min	46,91017596		720	630
	V max (total)	364,1336578	V min (total)	14,9688437			

Tabla 4.14. Velocidades del punto P para  $r_6=35\text{mm}$ 

Valores Maximos y minimos de la velocidad por sectores					$\theta_2$ (Vmax)	$\theta_2$ (Vmin)	
0-89	V max	392,7805548	V min	8,193338369	35mm	11	67
90-179	V max	351,6910501	V min	165,68288		149	90
180-269	V max	303,5600229	V min	60,13547806		180	269
270-359	V max	255,7898605	V min	38,92898409		357	290
360-449	V max	254,4389377	V min	78,88095508		360	428
450-539	V max	164,8895356	V min	102,0392677		515	450
540-629	V max	156,2209852	V min	58,81599643		540	629
630-720	V max	372,2321908	V min	49,22778971		720	657
	V max (total)	392,7805548	V min (total)	8,193338369			

Tabla 4.15. Velocidades del punto P para  $r_6=40\text{mm}$ 

Valores Maximos y minimos de la velocidad por sectores					$\theta_2$ (Vmax)	$\theta_2$ (Vmin)	
0-89	V max	419,0039559	V min	2,028884201	40mm	9	69
90-179	V max	342,2095155	V min	149,77335		153	90
180-269	V max	309,6254433	V min	57,09346		180	269
270-359	V max	262,8491038	V min	22,89919		359	288
360-449	V max	262,8912128	V min	51,12881		360	434
450-539	V max	139,8545917	V min	68,77116		523	450
540-629	V max	136,8174734	V min	61,89826		540	629
630-720	V max	402,0371155	V min	21,32306		720	649
	V max (total)	419,0039559	V min (total)	2,028884201			

Tabla 4.16. Velocidades del punto P para  $r_6=45\text{mm}$ 

Valores Maximos y minimos de la velocidad por sectores					$\theta_2$ (Vmax)	$\theta_2$ (Vmin)	
0-89	V max	438,0102724	V min	2,14297	45mm	9	70
90-179	V max	334,4507799	V min	136,93296		157	90
180-269	V max	312,6329498	V min	62,56980		180	269
270-359	V max	281,9081595	V min	11,53188		359	289
360-449	V max	283,7569881	V min	28,92425		363	434
450-539	V max	130,5812037	V min	54,24255		532	450
540-629	V max	130,0547262	V min	63,02535		540	629
630-720	V max	423,5231538	V min	8,60830		720	652
	<b>V max (total)</b>	438,0102724	<b>V min (total)</b>	2,14297			

Tabla 4.17. Velocidades del punto P para  $r_6=30\text{mm}$ 

Valores Maximos y minimos de la velocidad por sectores					$\theta_2$ (Vmax)	$\theta_2$ (Vmin)	
0-89	V max	451,6786688	V min	4,984621362	50mm	8	71
90-179	V max	327,7243363	V min	126,206875		161	90
180-269	V max	313,4952737	V min	70,43319105		180	269
270-359	V max	304,1560462	V min	3,639560832		359	290
360-449	V max	309,2164153	V min	13,62787347		366	432
450-539	V max	130,124715	V min	56,67053121		538	450
540-629	V max	130,1036095	V min	63,50653694		540	629
630-720	V max	438,9473458	V min	1,638814536		720	651
	<b>V max (total)</b>	451,6786688	<b>V min (total)</b>	1,638814536			

Tabla 4.18. Velocidades del punto P para  $r_6=30\text{mm}$ 

Valores Maximos y minimos de la velocidad por sectores					$\theta_2$ (Vmax)	$\theta_2$ (Vmin)	
0-89	V max	461,1565145	V min	7,28725343	55mm	7	72
90-179	V max	321,6349226	V min	116,9745129		165	90
180-269	V max	312,796328	V min	78,19358012		180	269
270-359	V max	326,2401258	V min	2,088331439		359	291
360-449	V max	334,5065858	V min	3,329685547		367	430
450-539	V max	133,5317121	V min	67,98055385		539	450
540-629	V max	133,5349159	V min	63,71678987		540	629
630-720	V max	449,8329717	V min	3,032221517		720	650
	<b>V max (total)</b>	461,1565145	<b>V min (total)</b>	2,088331439			

Tabla 4.19. Velocidades del punto P para  $r_6=30\text{mm}$ 

Valores Maximos y minimos de la velocidad por sectores					$\theta_2$ (Vmax)	$\theta_2$ (Vmin)	
0-89	V max	467,4696318	V min	9,415106349	60mm	7	73
90-179	V max	315,9882852	V min	108,8043471		168	90
180-269	V max	310,9408272	V min	85,10770933		180	269
270-359	V max	347,0005668	V min	6,250257696		359	292
360-449	V max	358,1214047	V min	4,990960558		368	429
450-539	V max	138,5067535	V min	81,88799759		537	450
540-629	V max	138,4557857	V min	63,79480164		540	629
630-720	V max	457,2185865	V min	5,832764128		720	649
	<b>V max (total)</b>	467,4696318	<b>V min (total)</b>	4,990960558			

De los valores de todas estas imágenes, también se han obtenido los valores medios de las velocidades máximas y mínimas, con los cuales se han realizado dos gráficas, que se muestran a continuación junto con los valores que las generan.

Tabla 4.20. Velocidad del punto P para las diferentes longitudes de  $r_6$

	30	35	40	45	50	55	60
Vmed(max)	288,3412119	281,4503922	284,4110515	291,8647792	300,6808013	309,1542596	316,7127302
Vmed(min)	84,42968503	70,23808618	54,36452259	45,99725637	42,58850054	42,82536608	45,76049305
Vmed(total)	186,3854485	175,8442392	169,387787	168,93102	171,6346509	175,9898128	181,2366116

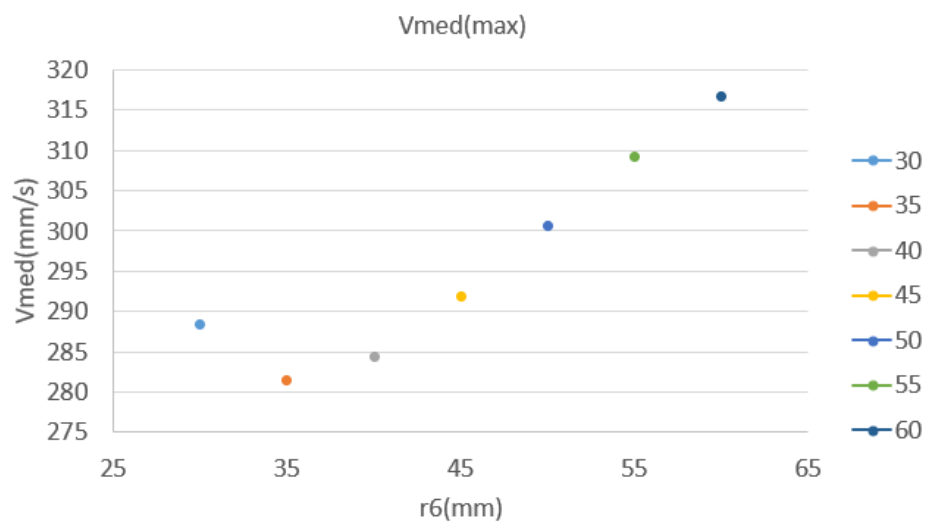


Figura 4. 152. Velocidades medias máximas para diferentes longitudes de  $r_6$

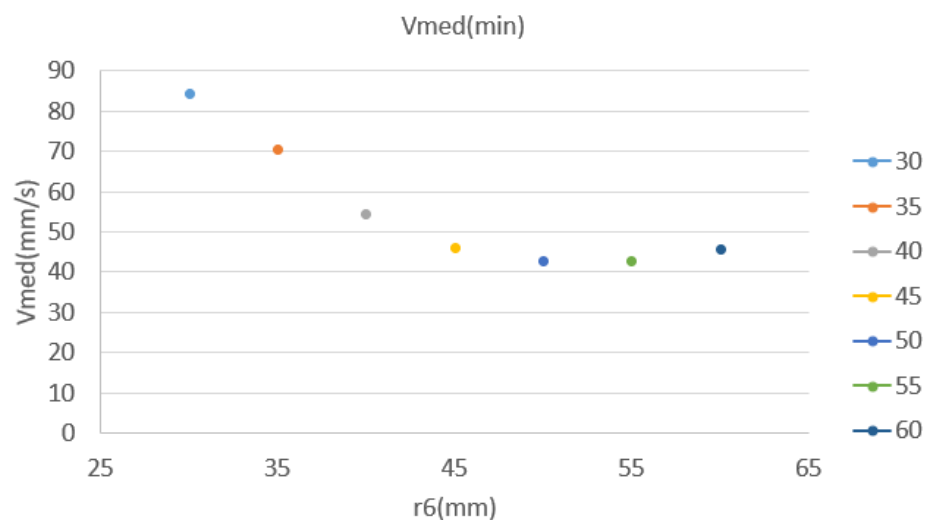


Figura 4. 153. Velocidades medias mínimas para diferentes longitudes de  $r_6$

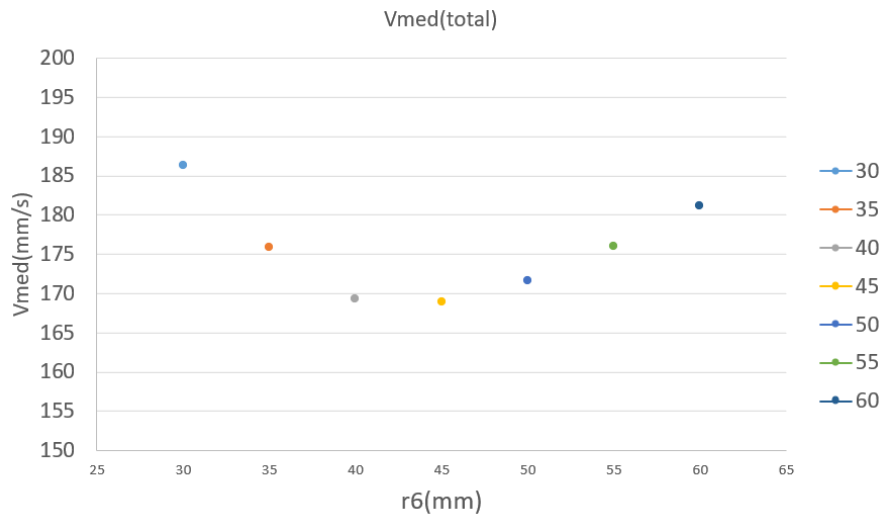


Figura 4. 154. Velocidades medias para diferentes longitudes de  $r_6$

Como se puede observar en la Tabla 4.12 existe una progresión en la tendencia de la curva. Por un lado, los valores máximos crecen, tomando en la Figura 4.145 en el primer tramo de  $\theta_2$  entre  $0^\circ$  y  $89^\circ$  un valor de 356.9 mm/s como se muestra en la Tabla 4.13; mientras que en la 4.146 este mismo punto tiene una velocidad de 392.78 mm/s. Esta tendencia se repite a lo largo de todos los casos de longitud diferente para  $r_6$ .

Estas alteraciones se deben a los cambios en las trayectorias, como se puede observar, en este primer tramo de valores de  $\theta_2$  entre 0 y 89, al aumentar el tamaño de la cúspide el efecto directo es un aumento del pico de la velocidad para este tramo. En esta situación también se encuadran los intervalos de  $180^\circ$  a  $269^\circ$ ,  $270^\circ$  a  $359^\circ$  y  $630^\circ$  a  $720^\circ$ ; en estos tramos se produce un incremento del valor máximo de la velocidad, es decir, como se ha visto anteriormente, la cúspide superior remarca su vértice elevándolo, afectando este cambio al valor máximo de la velocidad máxima. En el caso de estos otros intervalos, por orden, el bucle inferior situado mas a la derecha a lo largo de las diferentes trayectorias que traza la punta del acoplador, al variar la longitud de  $r_6$ , cambia su geometría para terminar realizando un bucle con forma de lagrima, siendo prácticamente una cúspide; el segundo de los intervalos, varia su forma de parábola a una cúspide, aumentando la distancia al eje principal de rotación situado en el engranaje de menor tamaño, la cual hace que aumente la velocidad máxima de este tramo; el ultimo de los intervalos, realiza un bucle que también modifica su

trazado a un bucle que toma una geometría muy similar a una cúspide, aumentando su velocidad máxima.

Este mismo proceso de variación en el trazado de la trayectoria, del mismo modo que afecta a la velocidad máxima de cada tramo, también afecta a la velocidad mínima. Al realizar movimientos más bruscos y alejados del centro anteriormente nombrado, según va aumentando el valor de  $r_6$ , al tornar los bucles en bucles más angostos tomando similitud a una cúspide, hace que las reducciones de velocidad sean más marcadas debido a un cambio de la dirección de la trayectoria más drástico. Estos cambios se producen en las cúspides y en los bucles al igual que en los casos anteriores.

Estas deducciones se ven respaldadas por las ilustraciones de la Tabla 4.12 y los valores de la Tabla 4.13 a la Tabla 4.19

Para tener una visión más completa de estas variaciones también se han calculado las velocidades máximas medias y las velocidades mínimas medias de cada ensamblaje, como se muestra en la Tabla 4.20. Estos datos se han empleado para diseñar las gráficas de la Figura 4.152 y de la Figura 4.153, estas gráficas muestran las tendencias anteriormente descritas, sobre como las velocidades máximas cada vez son mayores y sobre como las velocidades mínimas cada vez son menores.

Se pueden observar dos situaciones en estas dos gráficas. Por un lado, en la Figura 4.152 se localiza un mínimo, este se debe a como afecta la nueva longitud a las velocidades máximas de cada tramo, como se puede visualizar en la Figura 4.146 de la Tabla 4.12, la velocidad máxima es muy similar a las velocidades máximas del primer y último tramo de la Figura 4.145, mientras que las velocidades máximas de los tramos intermedios son menores. Esto responde meramente a las características del nuevo trazado, por ejemplo en los intervalos de  $\theta_2$  entre  $360^\circ$  a  $449^\circ$ , de  $450^\circ$  a  $539^\circ$  y de  $540^\circ$  a  $629^\circ$  cuando  $r_6$  toma un valor de 30 mm, estos tramos realizan una curva en la que sus puntos se encuentran más lejanos del centro de rotación principal del sistema, en contraposición al caso en que  $r_6$  toma una longitud de 35 mm. Para longitudes mayores se sigue observando esta tendencia de valores de velocidad máxima media en los tramos de  $0^\circ$  a  $89^\circ$  y de  $630^\circ$  a  $720^\circ$  mayores respecto al caso de 30

mm de longitud, mientras que los valores intermedios siguen siendo menores; a diferencia del caso de 35 mm, en casos de longitudes superiores, estos dos valores, del primer y último tramo, han sufrido un incremento tan elevado que compensa lo decrementos de los tramos intermedios, por lo que la velocidad media máxima total es superior en los caso de  $r_6$  de 40 mm, 45 mm, 50 mm, 55 mm y 60 mm.

En el caso de los valores medios mínimos de la velocidad se puede observar en la Figura 4.153 como la distancia al centro tiene una componente muy decisiva para valores de 30 mm a 50 mm, se puede observar como a partir de este valor, es decir, para un valor de  $r_6$  de 55 mm y 60 mm, las velocidades medias mínimas son superiores a los casos anteriormente nombrados. Esto se debe a las características propias del trazo, donde el estrechamiento de los bucles y de las cúspides juegan un papel importante en los valores de estas velocidades.

Para finalizar con el análisis, se han calculado los valores de las velocidades medias de cada una de las trayectorias, como se puede ver en la Tabla 4.20. Estos valores se han plasmado en una gráfica para facilitar el análisis de los datos, mostrada en la Figura 4.154. Como se puede observar, los valores de la velocidad media forman una gráfica con forma de U, esta gráfica es la más útil a la hora de seleccionar una distribución u otra en función de la finalidad para la que se vaya a emplear el mecanismo. Para el amasado de masas de pan, galletas o productos poco aireados, se emplearán velocidades medias más bajas, debido a que de este modo no se desarrollara el gluten de la harina. Por otro lado para mezclas más aireadas, se emplearan velocidades medias más elevadas, como es el caso del merengue.



# Capítulo V: Diseño y construcción de un prototipo

## 5.1. Introducción

En este capítulo se procederá a la explicación de los pasos que se han seguido para la obtención de un prototipo funcional.

Se comenzará explicando las diferentes adaptaciones que han sufrido las piezas que forman el mecanismo y de las diversas piezas auxiliares que se han empleado para el correcto funcionamiento.

Seguidamente se explicará de manera más detallada el proceso de impresión para obtener las piezas definitivas que conforman el prototipo y el procedimiento para su ensamblaje.

Para finalizar se realizará una pequeña explicación de la parte de automatización con “Arduino UNO”, con la explicación del código y de los diferentes materiales que se han utilizado para poder motorizar dicho prototipo.

## 5.2. Adaptación del diseño de piezas

En este episodio se describirán las transformaciones que se le han aplicado a las diferentes piezas del ensamblaje del que se han obtenido los datos de “Autodesk Inventor” para poder realizar un prototipo funcional sin variar los datos imprescindibles para que se correspondan las curvas que realiza el acoplador.

A su vez se han generado varias piezas auxiliares que permiten modificar la trayectoria del acoplador de forma sencilla para poder visualizar las trayectorias analizadas en el entorno CAE.



Se ha llevado a cabo el montaje de varios prototipos, dando solución a pequeños problemas que surgían en el proceso de montaje o a mejoras necesarias para su optimización tras dicho proceso.

#### 5.2.1. Prototipo 1:

En este primer prototipo se han realizado varias modificaciones en piezas del ensamblaje CAE y se han diseñado diversas piezas auxiliares.

La primera de las modificaciones ha sido en la “manivela 1”, la cual se ha realizado un agujero pasante con forma de “D”, el eje de la pieza CAE se ha sustituido por una barra de acero con esa misma forma a lo largo de su eje para unir al motor a través de una serie de piezas auxiliares.

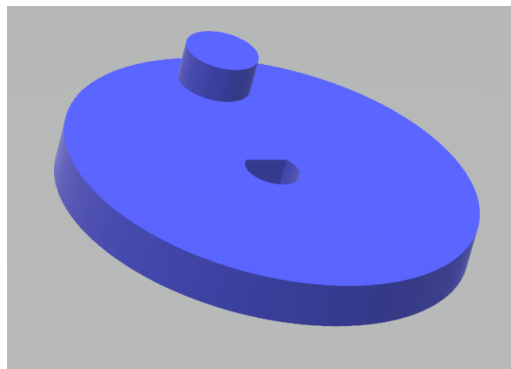


Figura 5. 1. Manivela 1

La segunda de las modificaciones de las piezas del ensamblaje CAE ha sido la segunda de las manivelas, la cual se ha unido al engranaje y modificado el agujero pasante para poder insertar un rodamiento a través del cual se ha introducido un eje que se ha adaptado a dicha medida.

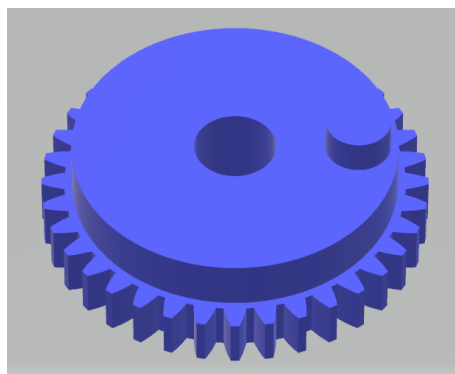


Figura 5. 2. Manivela 2 y rueda



El engranaje que estaba unido a la “manivela 1” y a su eje en el ensamblaje se ha diseñado como una pieza individual, realizando un agujero pasante al igual que a la “manivela 1” con forma de “D” para poder insertar el mismo eje que a la pieza anteriormente nombrada.

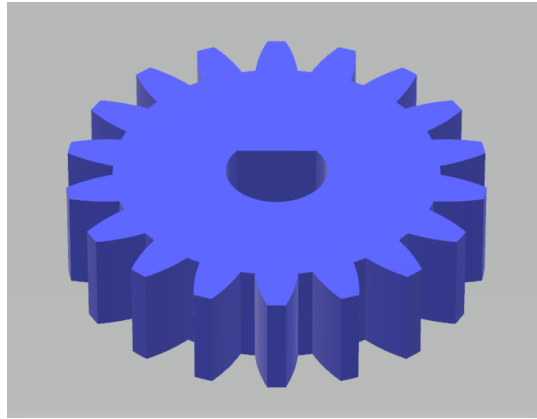


Figura 5. 3. Piñón

El “balancín inferior” se ha modificado en sus extremos. Por un lado, el agujero pasante se ha eliminado para dar paso a un hueco que se adapta a la colocación de un rodamiento, por otro lado, se ha prolongado la distancia de la extrusión del bulón del extremo opuesto, además se ha modificado su diámetro para poder alojar dicho bulón en el interior de un rodamiento que facilitara el movimiento.

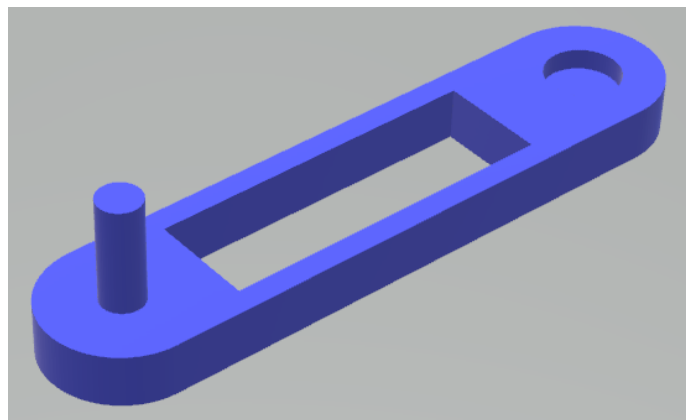


Figura 5. 4. Balancín inferior

Al igual que en la pieza anterior, en el “balancín superior”, se han realizado varias modificaciones. Por un lado, la modificación más obvia ha sido otorgar a esta pieza de una curvatura para evitar cualquier posible

contacto indeseado, respetando las distancias entre los ejes que pasan por las articulaciones sobre las que se sitúa dicha pieza, por lo que no afecta a la cinemática de la pieza. También el agujero pasante de uno de sus extremos se ha sustituido por un hueco en el que se va a alojar un rodamiento para facilitar el movimiento de la articulación. En el extremo opuesto, se ha modificado el diámetro del bulón para poder insertarlo en el interior de otro rodamiento que facilitará el movimiento.

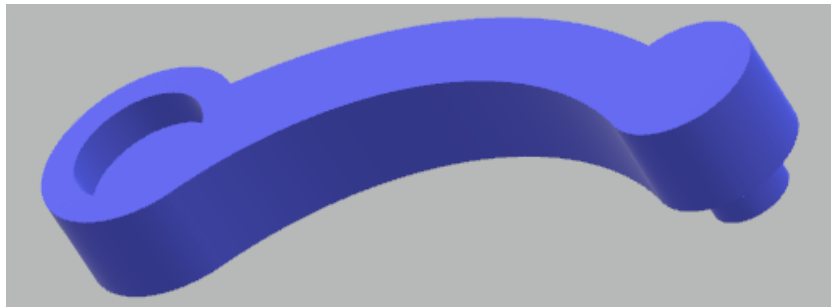


Figura 5. 5. Balancín superior

El acoplador también ha sufrido modificaciones sustanciales en su diseño. El nuevo diseño, respetando las medidas, consta de dos agujeros en sus extremos; uno de los agujeros no es pasante, para poder alojar un rodamiento, el cual es compartido con el balancín superior. El otro de los extremos consta de un orificio pasante, en el cual ira alojado un elemento que pueda facilitar la visualización de la trayectoria de la punta de dicha pieza.

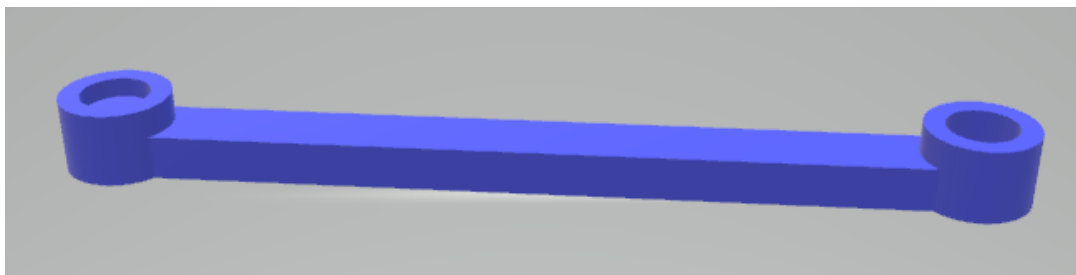


Figura 5. 6. Acoplador

El dado de retorno rápido, no ha sufrido ninguna modificación, como se puede ver en la siguiente figura.

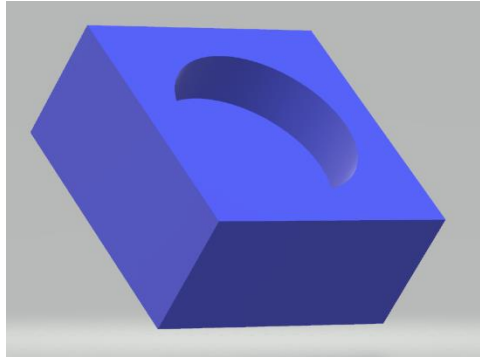


Figura 5. 7. Dado de retorno rápido

A continuación, se explicará la utilidad de cada una de las piezas auxiliares que se han empleado en esta primera maqueta.

Se debe atender a la necesidad de poder variar la distancia existente entre la unión del balancín superior y del balancín inferior con el acoplador; pero que permanezca constante una vez se determine la nueva distancia deseada. Se ha optado por realizar una fijación por presión para poder dotar al mecanismo de esta nueva característica.

La primera de las piezas auxiliares corresponde a la una mitad del conjunto que por medio de presión fija la pieza “Balancín inferior” al “Acoplador”. Para ello se han realizado dos orificios pasantes para poder unirlos a través de dos tornillos M3, a su vez se ha hecho un rebaje con forma de hexágono en cada uno de los orificios para poder alojar una tuerca correspondiente al tornillo empleado. Del mismo modo que en otras articulaciones se ha realizado un orificio para poder alojar un rodamiento que facilite el movimiento.

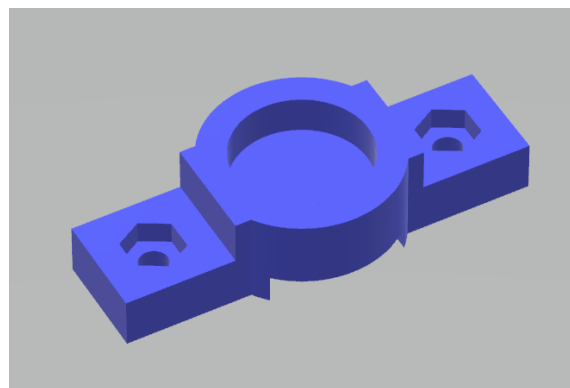


Figura 5. 8. Pieza auxiliar 1

La segunda de las piezas auxiliares corresponde con la segunda de las mitades del conjunto que garantiza la fijación de la articulación del “Balancín inferior” con el “Acoplador” en la posición deseada por medio de presión. Para el correcto funcionamiento se han realizado dos agujeros pasantes que coinciden en posición con los de la primera de las piezas auxiliares para una correcta colocación. Además, la pieza consta de un rebaje en su zona central que facilita el movimiento del conjunto de fijación a lo largo del “Acoplador” pero restringe un posible movimiento lateral.



Figura 5. 9. Pieza auxiliar 2

La tercera de las piezas auxiliares solventa la problemática existente a la hora de transmitir el par que genera el motor de una forma más eficiente.

Esta pieza consta de dos partes bien diferenciadas. Por un lado, un cilindro el cual consta de un orificio central con un diseño que coincide con la forma que posee el motor. Por otro lado, una cruz que consta de cuatro orificios pasantes, estos orificios sirven para poder unir el conjunto y que este pueda realizar su función con unos tornillos.

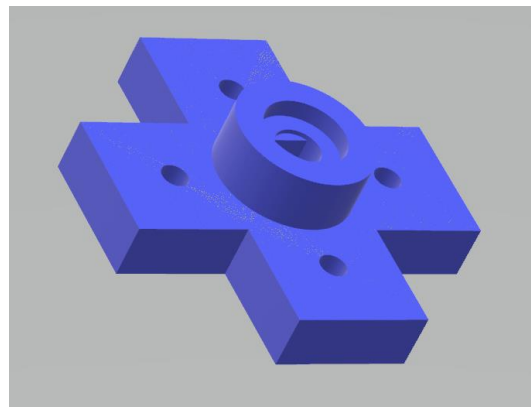


Figura 5. 10. Pieza auxiliar 3

La cuarta de las piezas auxiliares forma un conjunto con la pieza anterior, esta pieza consta en su diseño de cuatro orificios pasantes y unos rebajes con forma hexagonal para poder alojar a las tuercas correspondientes a los tornillos empleados. A su vez esta pieza consta de un orificio en su centro con forma de “D”, este orificio sirve para unir el conjunto con el eje que pasa por el menor de los engranajes y por la “manivela 1” y así poder transmitir el movimiento del motor al mecanismo.

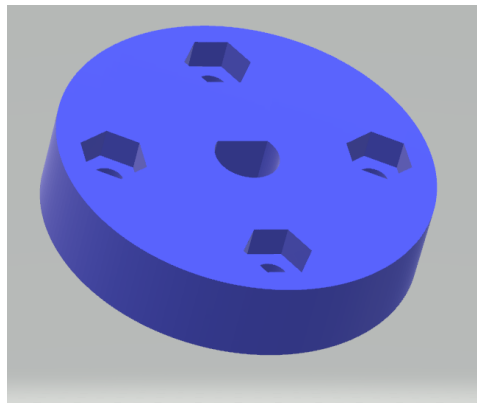


Figura 5. 11. Pieza auxiliar 4

La pieza “Balancín inferior” consta de un orificio en el cual va alojado un rodamiento, el cual facilita el movimiento de oscilación con un eje de acero que coincide con el diámetro interior de dicho rodamiento. Para facilitar la sujeción del eje con el soporte vertical, se ha optado por realizar en dicho soporte un orificio pasante y atornillar por su cara opuesta una pieza que restrinja el movimiento del eje, dejando que este simplemente rote. Para ello se ha diseñado una pieza la cual consta de dos orificios pasantes para dos tornillos, los cuales fijaran la pieza al soporte, y un orificio en su centro para alojar a un rodamiento cuyo diámetro interior coincide con el diámetro del eje de acero.

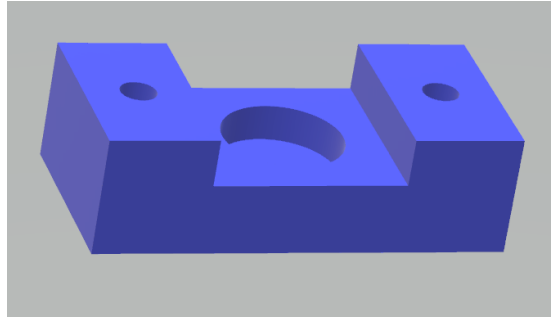


Figura 5. 12. Pieza auxiliar 5

La pieza “Manivela 2” produce el mismo problema que “Balancín inferior” por lo que se ha optado por llevar a cabo la misma solución que en el caso anterior.



Figura 5. 13. Pieza auxiliar 6

### 5.2.2. Prototipo 2:

A continuación, se describirán los cambios que se han realizado en el diseño de las piezas anteriores o el diseño de piezas nuevas que sustituirán a algunas de las piezas empleadas en el primer prototipo.

La primera de las piezas que se ha modificado ha sido la “manivela 1”, en la cual se han realizado una serie de vaciados en su cuerpo principal para reducir el material empleado en esta pieza, en este caso se emplea PLA para la fabricación de la pieza. No obstante en un material mas pesado, este tipo de vaciados juega un papel muy importante al reducir el peso de la pieza.

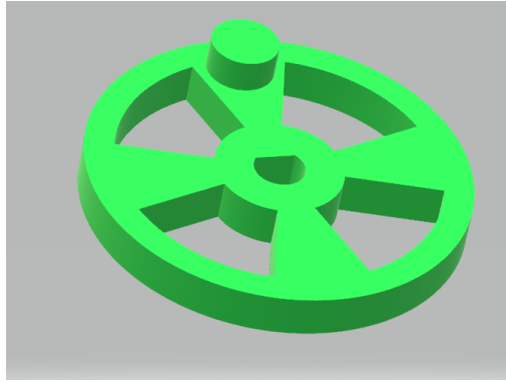


Figura 5. 14. Manivela 1

La segunda manivela, también ha sufrido una serie de modificaciones frente a la diseñada en el primer prototipo. En este caso, al igual que en la “manivela 1”, se ha reducido el material empleado en su cuerpo principal de dos formas. Por un lado, la pieza correspondiente al prototipo anterior tenía un cuerpo macizo formado por dos discos, uno de ellos dentado y del segundo sobresalía un bulón que se insertaba en el rodamiento que unía esta pieza al dado de retorno rápido. En este caso, uno de esos dos discos se ha eliminado y por otro lado el disco correspondiente a la rueda dentada ha sido modificado mediante un vaciado del cuerpo, del mismo modo que la “manivela 1”. Además, el bulón de esta pieza ha sido alargado para facilitar el movimiento entre las piezas que forman el prototipo.

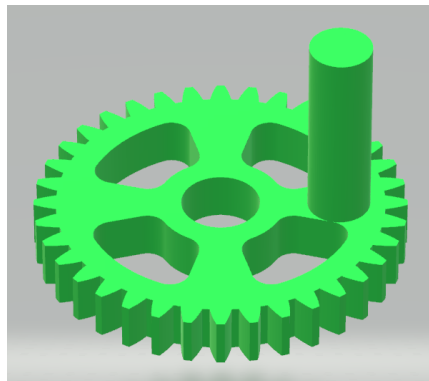


Figura 5. 15. Manivela 2 y rueda

La tercera de las piezas que ha sido modificada ha sido la otra rueda dentada que forma parte del tren de engranajes del mecanismo, esta pieza será unida a la “manivela 1” mediante un eje metálico con un rebaje para poder ser insertado en estas piezas. Esta pieza ha aligerado su peso

mediante el mismo método empleado en las piezas anteriores, es decir, mediante un vaciado de su cuerpo principal.

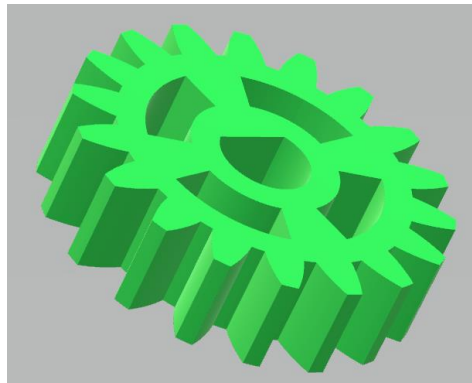


Figura 5. 16. Piñón

El “balancín inferior” ha visto modificada por un lado la longitud de su bulón, para facilitar el movimiento entre las piezas, por otro lado el orificio que alojaba el rodamiento se ha hecho pasante para facilitar su movimiento y por último el vaciado que tiene a lo largo de su cuerpo principal ha aumentado su tamaño longitudinal.

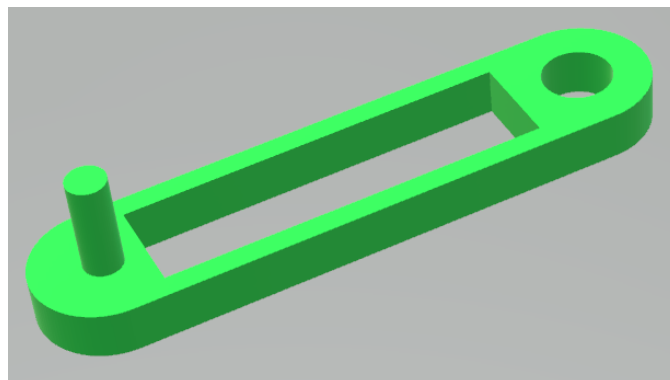


Figura 5. 17. Balancín inferior

El “balancín superior”, como puede observarse en la imagen, el orificio que alojaba el rodamiento, al igual que en el caso anterior, se ha hecho pasante para poder facilitar el giro entre las diferentes piezas. Por otro lado la longitud del bulón se ha modificado, aumentándola, por el mismo motivo.



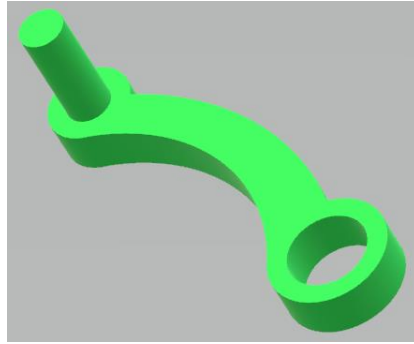


Figura 5. 18. Balancín superior

El “acoplador”, como se puede observar a simple vista, se le ha practicado un vaciado a lo largo de su cuerpo principal para aligerar el peso de la pieza, además se ha aligerado de este modo para que el bulón del “balancín inferior” pueda introducir su bulón para facilitar el movimiento entre estas dos piezas. El orificio que en prototipo anterior no era pasante, en este caso si lo es, para facilitar el giro y evitar tensiones en el movimiento entre las piezas. Además se ha realizado, como se puede ver en la parte superior de la imagen, un orificio lateral para introducir un tornillo para sujetar un objeto que pueda reproducir la trayectoria de la punta del acoplador.

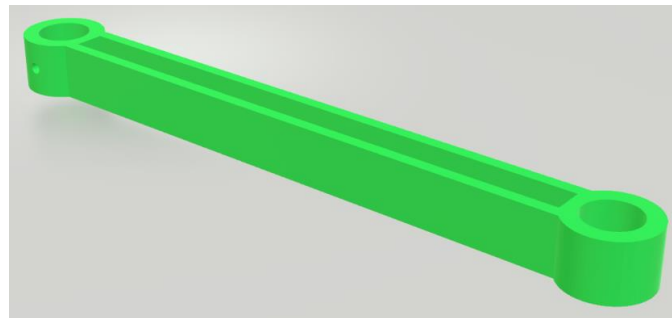


Figura 5. 19. Acoplador

Igual que en el prototipo anterior, el dado de retorno rapido no ha sufrido ninguna adaptacion.

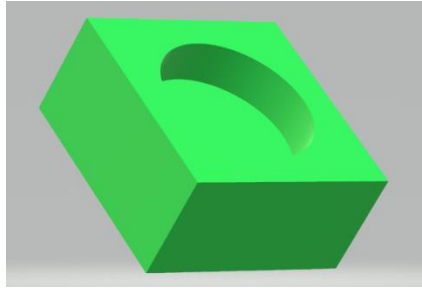


Figura 5. 20. Dado de retorno rápido

Las dos primeras piezas auxiliares simplemente han reducido su espesor, buscando la reducción del peso propio de las piezas para facilitar la rotación del motor paso a paso que va a ser empleado para motorizar el mecanismo.

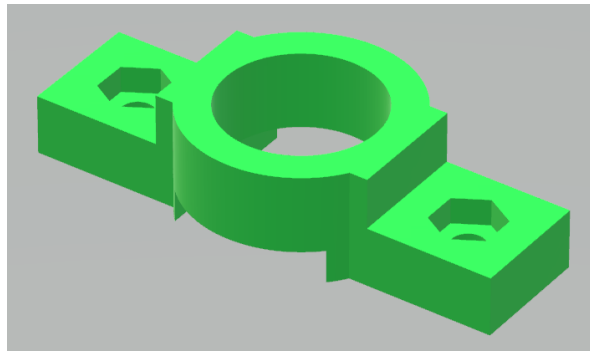


Figura 5. 21. Pieza auxiliar 1

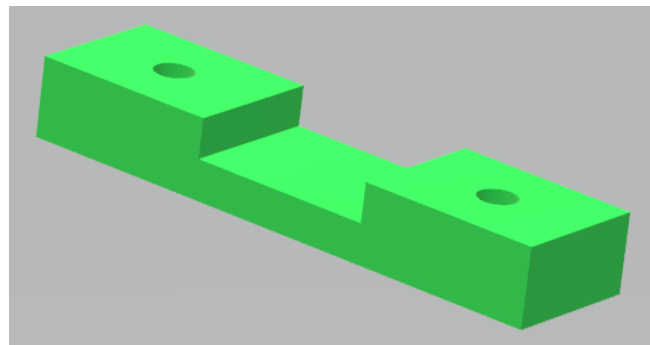


Figura 5. 22. Pieza auxiliar 2

La tercera pieza auxiliar, a diferencia del prototipo anterior, en este caso ha visto modificados los extremos de su cruceta, los cuales se han redondeado para eliminar material y tratar de reducir el peso.

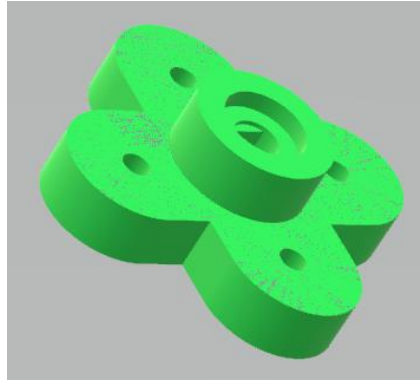


Figura 5. 23. Pieza auxiliar 3

La cuarta pieza auxiliar, ha sufrido un cambio bastante relevante en comparación con la misma pieza del primer prototipo, en este caso, es una cruz con sus vértices redondeados. Esto reduce cuantiosamente la cantidad de material empleado y una reduce notablemente el peso de la pieza.

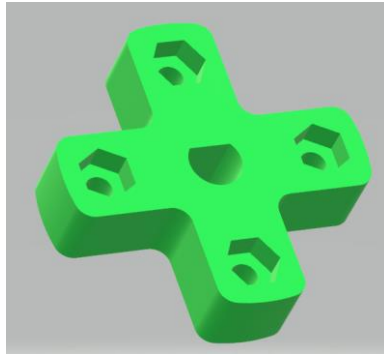


Figura 5. 24. Pieza auxiliar 4

En este segundo prototipo, para evitar un posible balanceo de los ejes del mecanismo, se ha diseñado una pieza auxiliar con este objetivo, esta pieza se une mediante tornillería al soporte y fuerza a los ejes a no sufrir un movimiento oscilante.

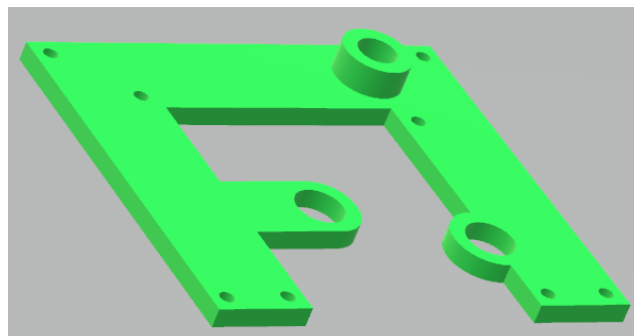


Figura 5. 25. Pieza auxiliar 5

La última pieza auxiliar de este prototipo sustituye a los apoyos que iban unidos al soporte en el prototipo anterior. En este caso, se ha diseñado una pieza que aprisione todos los ejes y el motor a la vez, como se puede observar en las siguientes imágenes, coincidiendo en las medidas con la pieza auxiliar anterior. A su vez, se ha diseñado la unión de esta pieza con el soporte mediante tornillería, se ha tenido en cuenta la pieza auxiliar anteriormente descrita para evitar que los tornillos de una de las piezas coincidan con la pieza situada en la cara opuesta del soporte.

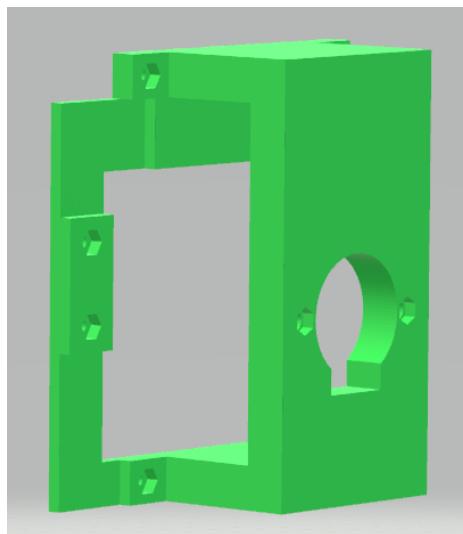


Figura 5. 26. Pieza auxiliar 6 vista lateral 1

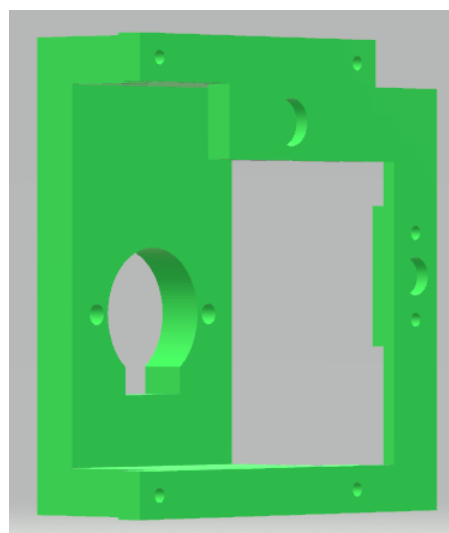


Figura 5. 27. Pieza auxiliar 6 con vista lateral 2

### 5.3. Impresión de las piezas del prototipo

En este apartado se detallará el proceso que se ha seguido para la impresión de las diferentes piezas que conforman el mecanismo, así como las impresoras y los programas empleados.

Inicialmente se ha generado un archivo “.stl”, este se adquiere de la siguiente forma. El primer paso será abrir la pieza que se desea imprimir en “Autodesk Inventor”, seguidamente se abrirá el desplegable de “Archivo” y se seleccionará la opción “Imprimir”; dentro de esta aparecen diversas opciones, se elegirá la opción “Enviar a servicio de impresión en 3D”. Aparecerá una ventana en la cual se pueden modificar ciertos valores como la escala de la pieza o la longitud, el ancho o la altura. Al clicar en aceptar se generará un archivo “.stl”, el cual será necesario para poder continuar con el proceso.

El segundo paso será abrir el programa Prusa Slicer, el cual genera un entorno similar a un plano de trabajo de forma automática, como se muestra en la siguiente figura.

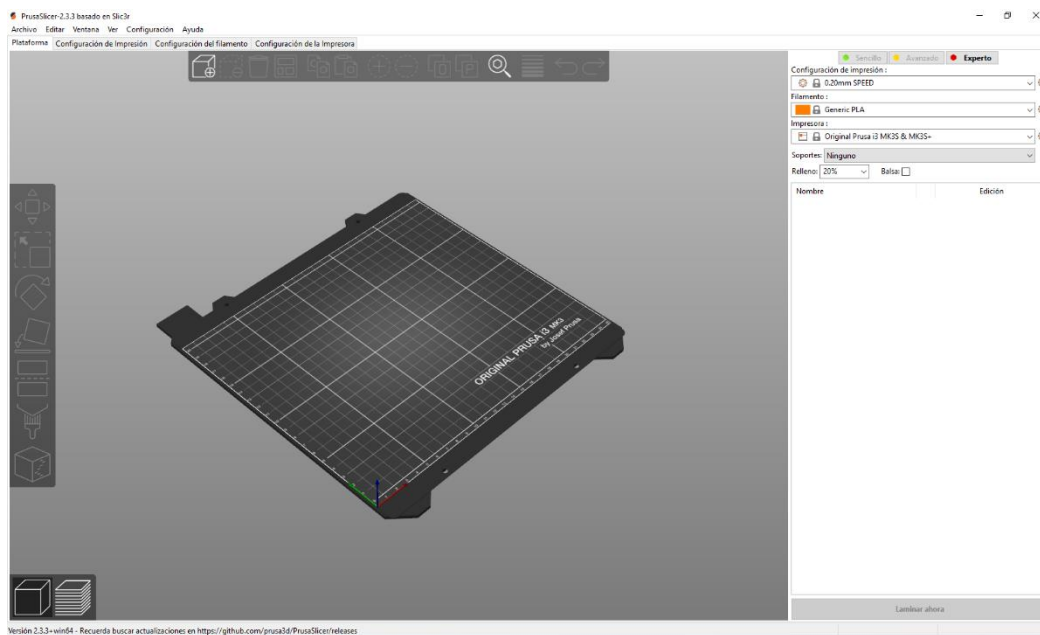


Figura 5. 28. Entorno del programa Prusa Slicer

Los parámetros que se han seleccionado, antes de importar el archivo “.stl” anteriormente generado, son:

- Configuración de impresión: 0.20mm SPEED
- Filamento: Generic PLA
- Impresora: Original Prusa i3 MK3S&MK3S+

- Soporte: Se adaptará de manera concreta a cada pieza
- Relleno: 20%

Seguidamente, se clicará sobre la opción de “Añadir”, situada en la barra de opciones superior dentro del entorno de trabajo. A continuación, se abrirá una ventana con los archivos generados, pudiendo seleccionar uno o varios.

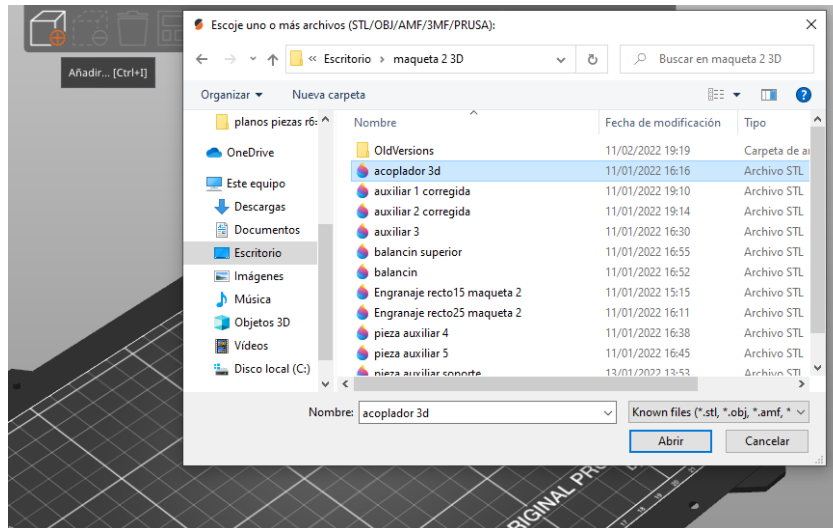


Figura 5. 29. Ventana con los diferentes archivos .stl

En este caso se abrirá el archivo “Acoplador 3D”, creando automáticamente una pieza que se podrá situar dentro de la plataforma en la posición y en el lugar que se desee.

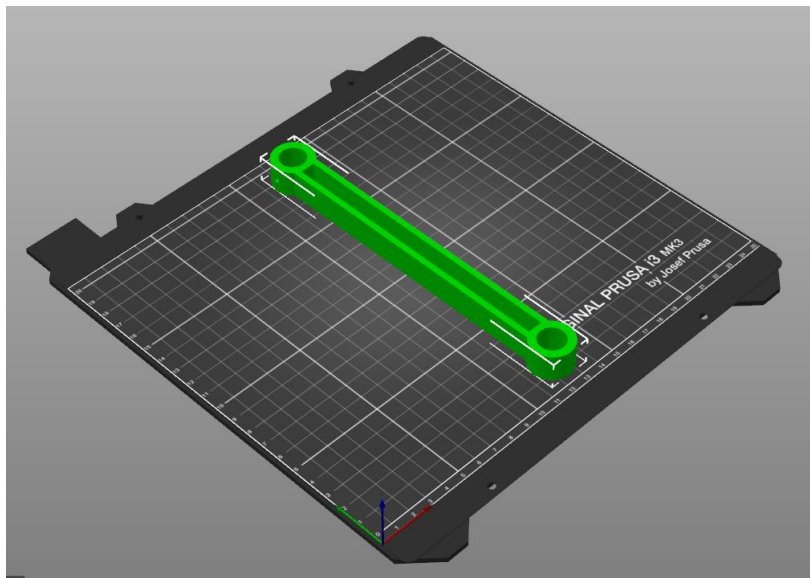


Figura 5. 30. Pieza acoplador 3D

Clicando sobre la opción “Laminar ahora”, el programa generara un archivo que mostrara las diferentes capas que conformaran la pieza en función de los parámetros que anteriormente se han marcado. El programa da mucha información como el número de capas que serán necesarias para poder generar la pieza en la impresora, el tiempo de impresión, las diferentes zonas que en las que el programa divide a la pieza y el tiempo de impresión con el porcentaje correspondiente para cada división, como se muestra en la siguiente imagen.

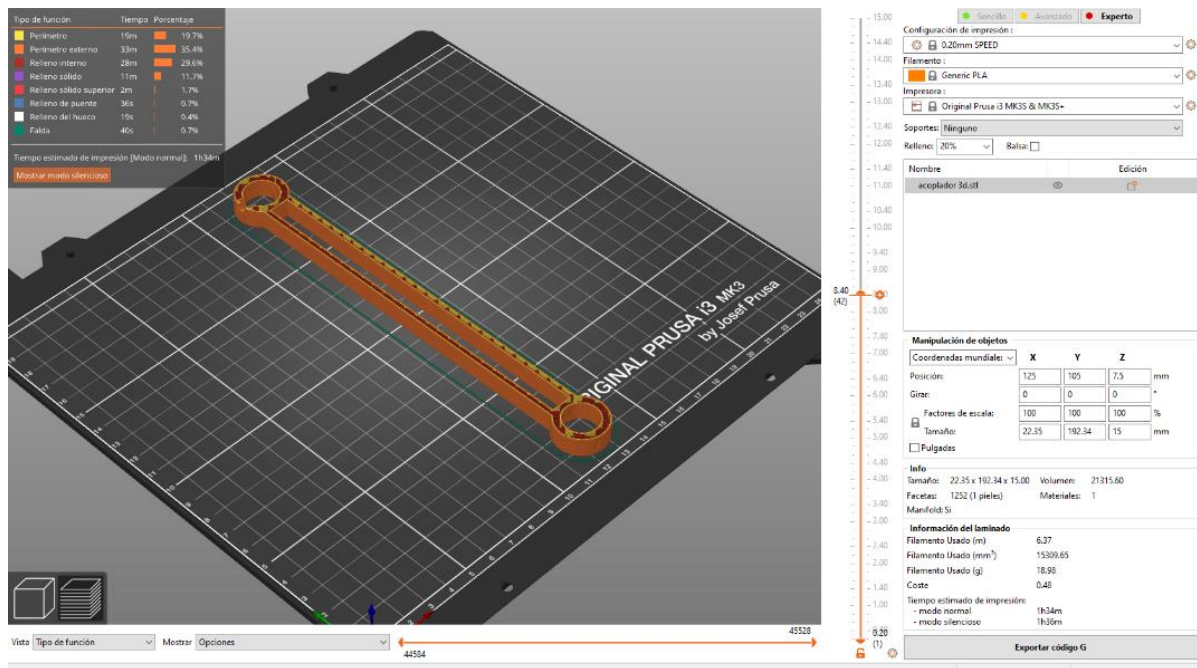


Figura 5. 31. Pieza acoplador 3D después de seleccionar la opción de "Laminar"

Para terminar el proceso informático, clicará en “Exportar código G” generando un archivo del tipo “.gcode”, “.gco”, “.g”, “.ngc”, cargándolo en una tarjeta de memoria que tiene la impresora 3D.

Para finalizar el proceso, se introducirá la tarjeta en la impresora y se seleccionará el archivo correspondiente.

Como se ha visto al inicio de la explicación, en el apartado de soportes se seleccionará en función de la pieza, esto es si tiene un voladizo o un diseño que hace imposible que la propia impresión sirva de soporte. A continuación, se muestra una imagen en la cual se ha necesitado la creación de un soporte en la impresión por el diseño de la pieza, en este caso ha sido la pieza auxiliar 6.



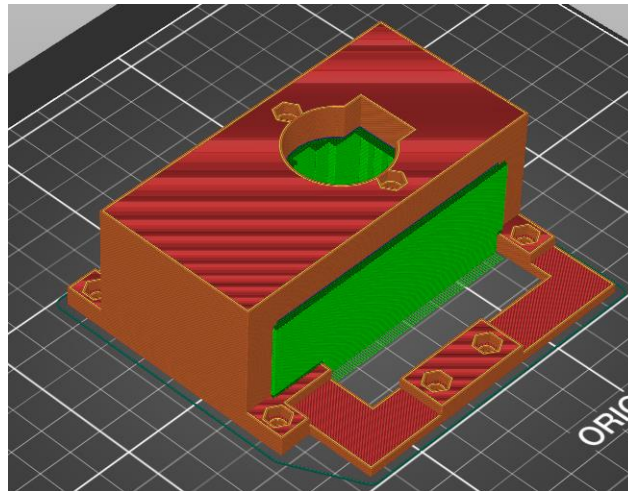


Figura 5. 32. Pieza auxiliar 6 con soporte

Para la impresión de todas las piezas que forman el prototipo, se ha utilizado una impresora PRUSA i3 MK3S como la que se muestra en la siguiente imagen.



Figura 5. 1. Impresora PRUSA i3 MK3S empleada para la producción de las piezas del prototipo

A continuación, se muestran unas imágenes de las diferentes piezas impresas que forman el mecanismo, incluidas las piezas auxiliares.





Figura 5. 33. Manivela 1



Figura 5. 34. Manivela 2



Figura 5. 35. Engranaje menor



Figura 5. 36. Balancín inferior



Figura 5. 37. Balancín superior



Figura 5. 38. Acoplador



Figura 5. 39. Pieza auxiliar 1

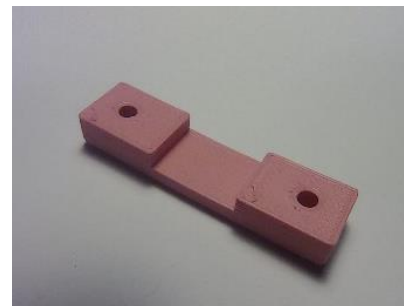


Figura 5. 40. Pieza auxiliar 2

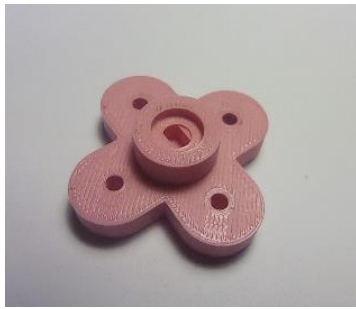


Figura 5. 41. Pieza auxiliar 3



Figura 5. 42. Pieza auxiliar 4



Figura 5. 43. Dado de retorno rápido

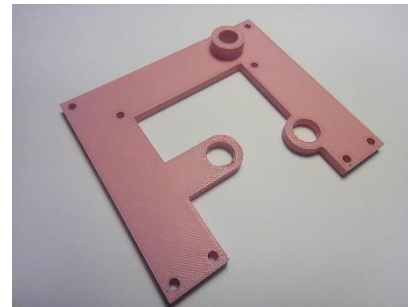


Figura 5. 44. Pieza auxiliar 5

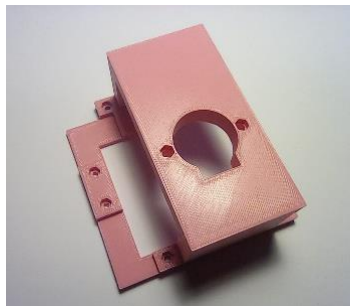


Figura 5. 45. Pieza auxiliar 6 vista lateral 1

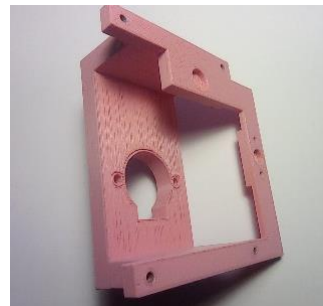


Figura 5. 46. Pieza auxiliar 6 vista lateral 2

## 5.4. Programación con Arduino para la motorización del prototipo

En este apartado se describirá el proceso mediante el cual se dotará al mecanismo de movimiento. Se verán los tipos de motores paso a paso que hay y los elementos necesarios para su correcto funcionamiento, en este caso, un driver y un Arduino UNO.

Para comenzar se empleará un motor paso a paso debido a que una de sus principales características es su precisión en ángulos muy reducidos; este tipo de motores se emplean en impresoras 3D, CNC o fotocopiadoras, entre los diversos mecanismos en los que se encuentran.

Se pueden encontrar tanto motores bipolares como unipolares dependiendo de la configuración que tengan las bobinas que se encuentran en su interior.

Los motores bipolares se diferencian a simple vista, puesto que constan de una salida de cuatro cables, dos para cada una de las dos bobinas que hay en su interior, como se puede observar en la siguiente figura [5].

### Motor paso a paso bipolar

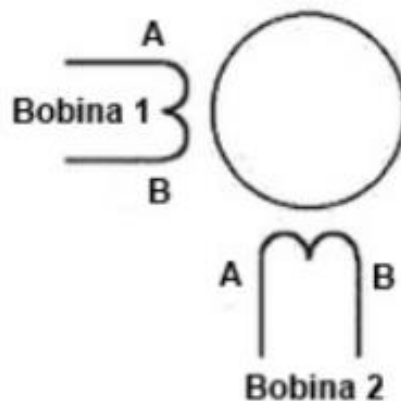


Figura 5. 47. Motor paso a paso bipolar

Por otro lado, los motores unipolares más comunes constan de una salida de cinco, seis u ocho cables. En este caso se empleará un motor 28BYJ-48 el cual consta de cinco cables, cuatro corresponden a sus cuatro bobinas y un quinto que es común entre estas.

El esquema general de un motor paso a paso unipolar de cinco cables es el que se muestra en la siguiente figura [5].

### Motor paso a paso unipolar

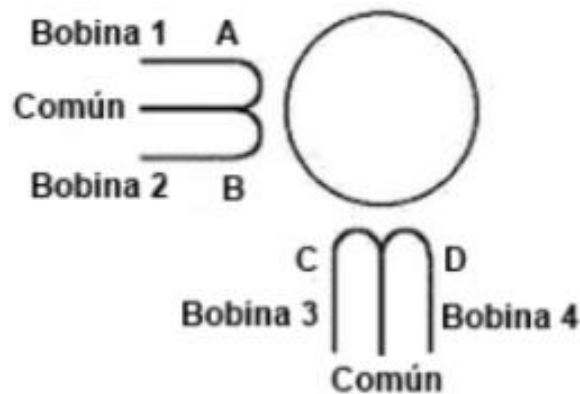


Figura 5. 48. Motor paso a paso unipolar

En el caso del motor que se va a emplear para dotar al mecanismo de movimiento, cada cable tiene asignado un color, atendiendo a la notación de la figura anterior, el cable de la Bobina 1 es el rosa, el de la Bobina 2 es el naranja, el de la Bobina 3 es el amarillo, el de la Bobina 4 corresponde al cable azul y, por último, el cable que es común entre las bobinas Bobina 1 - Bobina 2 y Bobina 3 - Bobina 4 es el rojo; como se muestra en la siguiente figura [6]

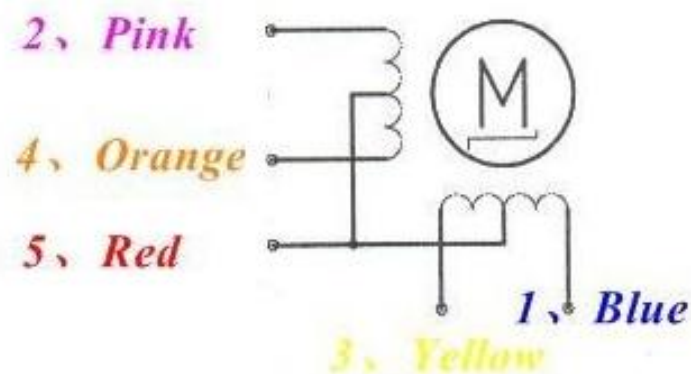


Figura 5. 49. Colores del cableado del motor

Según las especificaciones del producto, el motor posee en su interior una reductora de relación 1/64, por lo que hay que tener en cuenta la secuencia que se le va a otorgar al motor para conocer el número de pasos que precisa para realizar una rotación completa.

A continuación, se mostrará una tabla de verdad donde se especifica que bobina debe recibir corriente y en que secuencia. De esta manera, sabiendo la relación de la

reductora, se podrán calcular el número de pasos necesarios para realizar la rotación completa dependiendo del caso en el que se encuentre.

Secuencia para 1 paso:

Tabla 5.1. Secuencia para 1 paso

	Bobina 1	Bobina 2	Bobina 3	Bobina 4
1	Encendido	Apagado	Apagado	Apagado
2	Apagado	Encendido	Apagado	Apagado
3	Apagado	Apagado	Encendido	Apagado
4	Apagado	Apagado	Apagado	Encendido

Secuencia para 2 pasos:

Tabla 5.2. Secuencia para 2 pasos

	Bobina 1	Bobina 2	Bobina 3	Bobina 4
1	Encendido	Encendido	Apagado	Apagado
2	Apagado	Encendido	Encendido	Apagado
3	Apagado	Apagado	Encendido	Encendido
4	Encendido	Apagado	Apagado	Encendido

Secuencia para 1/2 paso:

Tabla 5.3. Secuencia para 1/2 paso

	Bobina 1	Bobina 2	Bobina 3	Bobina 4
1	Encendido	Apagado	Apagado	Apagado
2	Encendido	Encendido	Apagado	Apagado
3	Apagado	Encendido	Apagado	Apagado
4	Apagado	Encendido	Encendido	Apagado
5	Apagado	Apagado	Encendido	Apagado
6	Apagado	Apagado	Encendido	Encendido
7	Apagado	Apagado	Apagado	Encendido
8	Encendido	Apagado	Apagado	Encendido

Conociendo estos datos, se puede calcular lo siguiente. En el caso de las tablas relativas a un paso y a dos pasos, se produce una sucesión de cuatro impulsos; mientras que en el caso de medio paso son necesarios ocho impulsos. De esta manera y conociendo el valor de la reductora se conocer el número de impulsos necesarios para realizar una rotación completa.

Para el caso de 1 paso:

$$4 \cdot 64 = 256 \text{ impulsos por vuelta}$$

Para el caso de 2 pasos:

$$4 \cdot 64 = 256 \text{ impulsos por vuelta}$$

Para el caso de 1/2 paso:

$$8 \cdot 64 = 512 \text{ impulsos por vuelta}$$

En este caso se necesitará el driver UNL2003 para hacer funcionar el motor con Arduino.

El esquema del circuito se realizará mediante Fritzing, el cual es un programa informático que facilita la creación de esquemas de manera visual con Arduino [7].

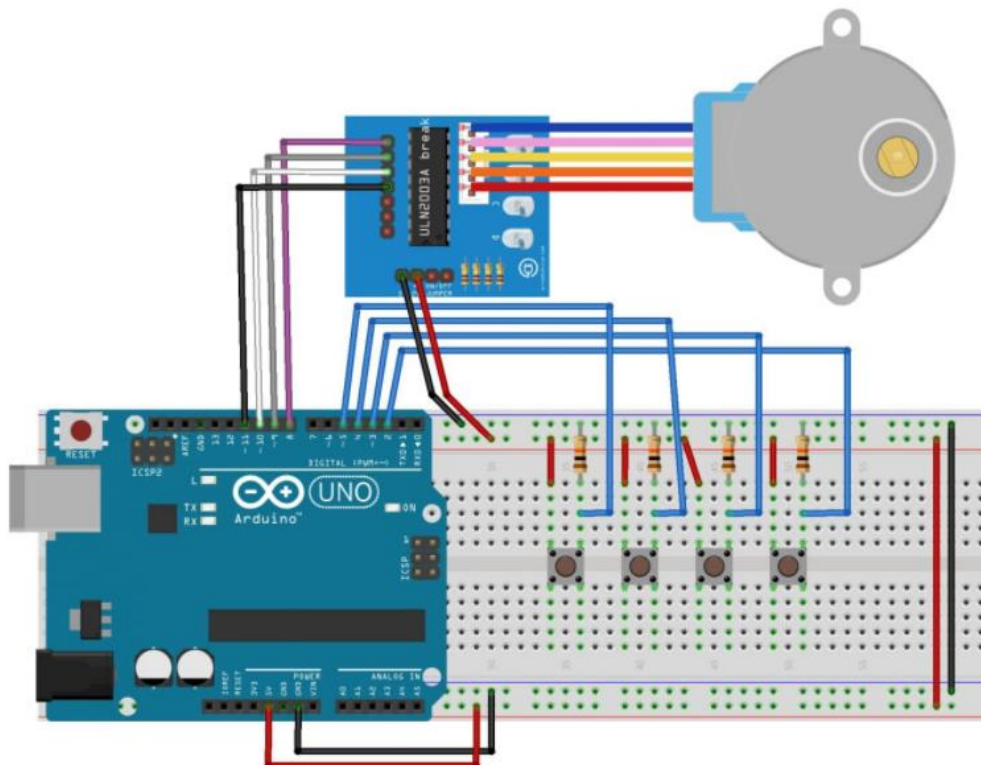


Figura 5. 50. Esquema explicativo del circuito

Para la realización del circuito se necesitarán los siguientes elementos:

- 1 Arduino
- 1 Motor 28BYJ-48
- 1 Driver UNL2003
- 4 Pulsadores
- 4 Resistencias de 10k
- Cables Jumper
- Cables Dupont
- 1 Breadboard
- 1 Pila de 9V
- 1 Conector de pila

Las conexiones para realizar serán las siguientes.

El circuito consta de cuatro pulsadores, los cuales controlan el sentido de giro, los pasos y la velocidad del motor; estos pulsadores están unidos en serie a una resistencia de 10k, estas resistencias se unen al polo negativo y a su vez a los pines 2,3,4 y 5 del Arduino (pines digitales). A su vez, los pines 8, 9, 10 y 11 conectan el Arduino al driver ULN2003 en sus pines integrados 1,2, 3 y 4. El driver, se conecta mediante un bus al motor 28BYJ-48.

A continuación, se explicarán de forma detallada los pasos que se han seguido a la hora de programar el motor.

El primer paso será nombrar que se encuentra conectado a los pines del Arduino. En este caso el pin 2 se llamará pulsador horario, el pin 3 se llamará pulsador antihorario, el pin 4 se llamará pulsador de pasos y el pin cinco se llamará pulsador de velocidad. A su vez también se nombrará el pin 8 como IN1, el pin 9 será IN2, el pin 10 será IN3 y el pin 11 será IN4. También se determinará que, si el valor de la variable global es igual a 1, el motor girara en sentido horario; por el contrario, si esta variable es igual a 0 el sentido de giro será el antihorario.



```

//Declaración de los PULSADORES
byte PHorario = 2; //Pulsador sentido horario
byte PAntiHorario = 3; //Pulsador sentido anti horario
byte PPasos = 4; //Pulsador numero de pasos
byte PVel = 5; //Pulsador velocidad
//Declaración de los PINES del Driver
byte IN1=8; // 28BYJ48 In1
byte IN2=9; // 28BYJ48 In2
byte IN3=10; // 28BYJ48 In3
byte IN4=11; // 28BYJ48 In4
int horario=1;

```

Figura 5. 51. Conexiones de los pines de Arduino

El segundo paso será crear las matrices de pasos del motor, estas se desarrollarán atendiendo a las tablas lógicas anteriormente descritas. Se comenzará nombrando cinco variables globales, las cuales serán “paso=4” que atiende al número de pasos que forman la secuencia, “Cpaso=0” es un contador del número de pasos, “Vel[5]={5,10,30,100,500}” (esto nos marcara las diferentes velocidades siendo 500 la más lenta y 5 la más rápida) ,“Cvel=0” será un contador de la velocidad y por ultimo “Conf=1”

```

int paso=4; //Variable que indica el numero de pasos de las matrices
int Cpaso=0; //Contador de pasos
int vel[5]={5,10,30,100,500}; //Vector de velocidad
int Cvel=0; //Contador de Velocidad
int conf=1; //Variable que configura la secuencia de pasos
//secuencia 1 paso
const int UnPaso[4] = {
    B1000,
    B0100,
    B0010,
    B0001 };

//secuencia 2 pasos
const int DosPasos[4] = {
    B1100,
    B0110,
    B0011,
    B1001 };

// Secuencia a medio paso
byte const MedioPaso[8] = { B1000,
    B1100,
    B0100,
    B0110,
    B0010,
    B0011,
    B0001,
    B1001 };

```

Figura 5. 52.Matrices de los pasos del motor

El tercer paso será nombrar la función principal con la que se alimentaran los puertos de salida. Seguidamente se deben nombrar los puertos de entrada y los puertos de



salida, en este caso los puertos 2, 3, 4 y 5 corresponden a las entradas y los puertos IN1, IN2, IN3 e IN4 serán los puertos de salida.

```

void puerto(int bits,int ini,int fin){
  for(int i=ini;i<=fin;i++){
    {
      digitalWrite(i,bitRead(bits,i-ini));
    }
  }
}
void setup() {

  //Configura los 4 Pines de Pulsadores como ENTRADAS
  for(int i=2;i<=5;i++){
    pinMode(i,INPUT);
  }
  //Configura los 4 Pines digitales como SALIDAS
  for(int i=IN1;i<=IN4;i++){
    pinMode(i,OUTPUT);
  }
}

```

Figura 5. 53. Funciones de alimentación

El siguiente paso será programar los pulsadores. Para ello se comienza preguntando con el comando “if” que sucedería si se pulsa el primero de los pulsadores, el del sentido horario, se esperaran 100mseg. para evitar el revote de la señal. En el caso del segundo pulsador, será la misma explicación. En el caso del tercer pulsador se determinará en que secuencia de pasos se encuentra, si está en la secuencia de medio paso, de un paso o de dos paso y en el caso de haber estado ya en las tres secuencias, debe reiniciar. El cuarto pulsador ira de cero a cuatro, atendiendo a que la posición cero corresponde a 5 y el cuatro corresponde a 500, según la lógica de programación, a su vez, igual que en el caso anterior, si ha estado situado en todas las posiciones, debe reiniciarse.

```

// Giro en Sentido Horario
if(digitalRead(PHorario)) // Pregunta si pulsador horario fue presionado
{
    delay(100); //Anti-Rebote
    horario=1;
    Cpaso=-1;
}
// Giro en Sentido Anti-Horario
if(digitalRead(PAntiHorario)) // Pregunta si pulsador horario fue presionado
{
    delay(100); //Anti-Rebote
    horario=0;
    Cpaso=paso;
}
// Cambio de la secuencia de pasos
if(digitalRead(PPasos)) // Pregunta si pulsador horario fue presionado
{
    delay(100); //Anti-Rebote
    while(digitalRead(PPasos)); //Espera hasta soltar el boton
    delay(100); //Anti-Rebote
    conf++;
    //Si ya paso por las 3 configuraciones reinicie
    if(conf>3)
        conf=1;
    if(horario==1)
        Cpaso=-1;
    else
        Cpaso=paso;
    puerto(B0000, IN1, IN4);
}
// Velocidad del Motor
if(digitalRead(PVel)) // Pregunta si pulsador horario fue presionado
{
    delay(100); //Anti-Rebote
    while(digitalRead(PVel)); //Espera hasta soltar el boton
    delay(100); //Anti-Rebote
    Cvel++;
    //Si ya paso por las 5 velocidades reinicie
    if(Cvel>4)
        Cvel=0;
}
}

```

Figura 5. 54. Programacion de los distintos pulsadores

El siguiente paso en la programación del motor será determinar la lógica de los contadores. En este caso se determina que el valor de paso no puede ser superado por el valor del contador, esto quiere decir que en el momento en el que el contador haya pasado por todas las opciones programadas debe reiniciarse automáticamente. En este caso el contador ira en sentido ascendente, al estar en el caso de sentido horario (el primero de los casos). Si la programación se encuentra en el sentido antihorario, el contador ira en sentido decreciente, esto quiere decir que cuando el contador este en uno, volverá a situarse en la posición más elevada si se vuelve a presionar.

```

if(horario==1)
{
    Cpaso++; //Incremente la variable cont
    if(Cpaso>=paso)
        Cpaso=0; //Se pone Contador de pasos en cero
}
else{
    Cpaso--; //Decremente la variable cont
    if(Cpaso<0)
        Cpaso=paso-1; //Se pone Contador igual al paso
}
}

```

Figura 5. 55. Programacion del contador

Para terminar la programación del motor paso a paso, se deben decir los casos en los que se puede encontrar el motor. En este caso existen tres posibilidades, la primera será en el caso de estar en la secuencia por un paso, la segunda opción será con el avance por dos pasos y la tercera opción será con el avance por cuatro pasos. Para ello se hace referencia a la programación explicada en el segundo paso.

```

switch(conf){
case 1:
    puerto(UnPaso[Cpaso],IN1,IN4); //Envíe al puerto la información de la tabla
    paso=4;
    break;
case 2:
    puerto(DosPasos[Cpaso],IN1,IN4); //Envíe al puerto la información de la tabla
    paso=4;
    break;
case 3:
    puerto(MedioPaso[Cpaso],IN1,IN4); //Envíe al puerto la información de la tabla
    paso=8;
    break;
}
delay(vel[Cvel]); //Retardo de 100 milisegundos
}

```

Figura 5. 56. Logica para el avance de la secuencia de pasos

## 5.5. Montaje del prototipo

A continuación, se procederá a una explicación del proceso de montaje del prototipo.

El material empleado además del anteriormente descrito, es decir, de las piezas impresas y del circuito electrónico es:

- 2 tablas de pino de 580x300x18 mm
- 5 rodamientos de 8x14x4 mm
- 3 rodamientos de 6x10x3 mm
- Barra de acero de  $\varnothing 7 \times 185$  mm
- Barra de acero de  $\varnothing 6 \times 13$  mm
- Barra de acero con rebaje longitudinal
- 17 tuercas M3
- 17 tornillos M3 de diferentes medidas
- Tirador de madera con dos tornillos
- 2 escuadras de madera
- 14 tirafondos de diferentes medidas

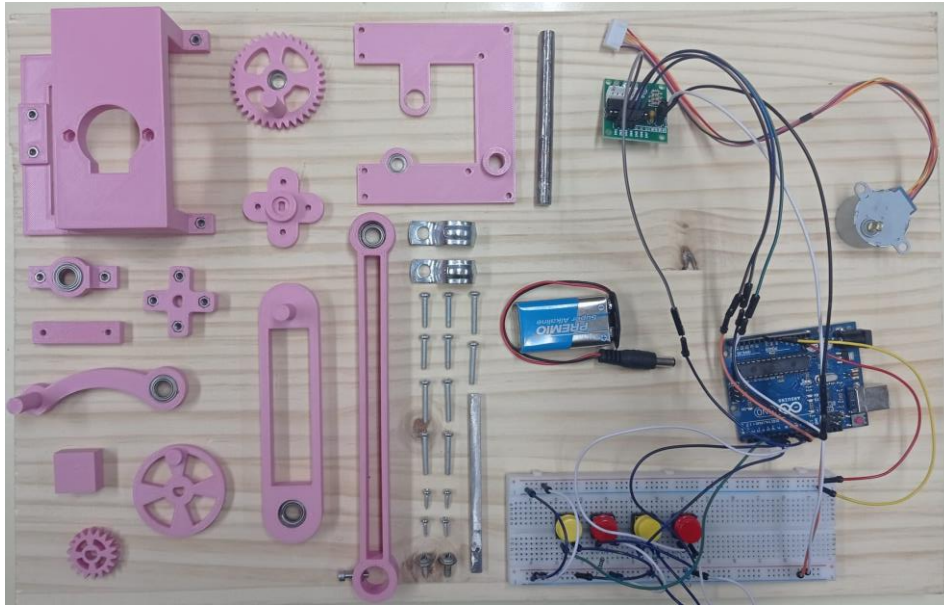


Figura 5. 57. Despiece del prototipo

El primer paso será el montaje de un soporte estable, para ello se unirán las dos tablas con las dos escuadras de madera mediante cuatro tirafondos, dos en cada cateto de la escuadra, como se muestra en las siguientes figuras.



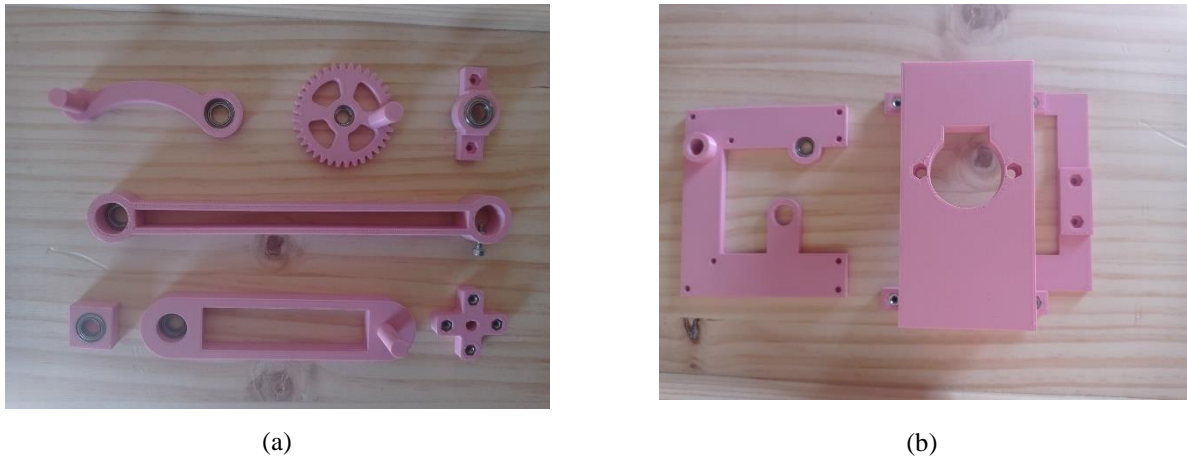
(a)



(b)

Figura 5. 58. Unión de piezas que forman el soporte

Posteriormente en el proceso de montaje será colocar los rodamientos y las tuercas en los lugares diseñados para ello.



(a)

(b)

Figura 5. 59. Piezas con rodamientos y tuercas insertadas

Ulteriormente en el montaje del prototipo será unir las piezas que forman el acople del motor para mejorar el agarre del eje.

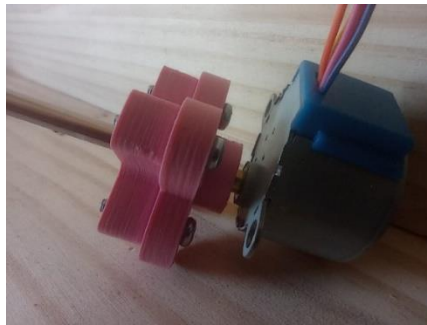


Figura 5. 60. Union de piezas auxiliares para facilitar la trasmision del par del motor al eje

Seguidamente pasamos a unir por medio de tirafondos el circuito electronico al soporte, es este caso se ha aprovechado el espacio que generan las escuadras en la parte trasera de este.

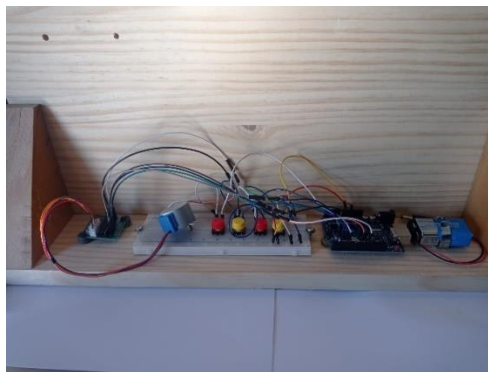


Figura 5.58. Instalacion del circuito electronico en la parte trasera del soporte



A continuación, se insertará el motor en la pieza auxiliar que sirve para mantener el paralelismo entre los ejes y que va situada en la parte trasera del soporte.

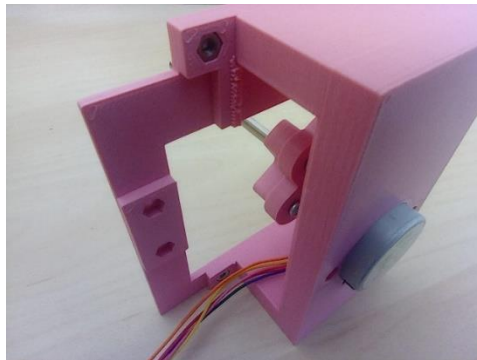


Figura 5. 59. Pieza auxiliar unida al motor

El siguiente paso será hacer unos orificios en el soporte usando las medidas del modelo de la simulación.



Figura 5. 60. Orificios pasantes para la sujeción de las piezas con el soporte.

El proceso de montaje continúa uniendo las dos piezas que garantizan el paralelismo entre los ejes al soporte.

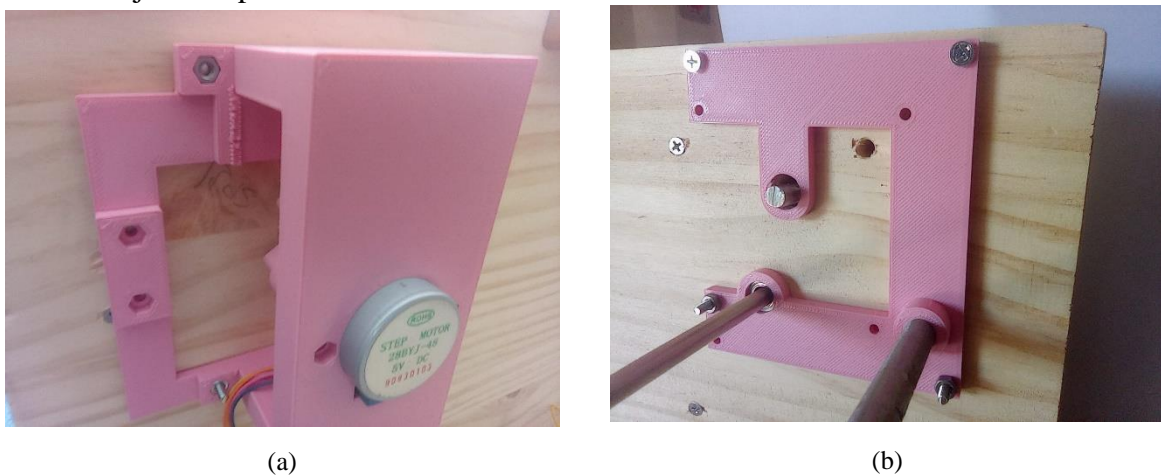


Figura 5. 61. Piezas auxiliares que garantizan el paralelismo entre los ejes61

Luego se insertaran los engranajes en los ejes correspondientes, previamente cortados a la medida.

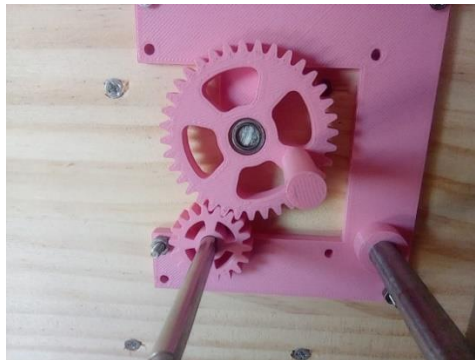


Figura 5.62. Ejes insertados en los engranajes

Se unirán las piezas que forman el mecanismo de fijación en el acoplador, esto garantizara que se pueda variar la distancia entre las dos articulaciones del mecanismo en esta barra y a su vez, pueda permanecer inmóvil mientras realiza su ciclo.



Figura 5.63. Mecanismo de sujeción en el acoplador

Además habría que insertar las piezas en los ejes y los bulones en los rodamientos, obteniendo el mecanismo que se ve a continuación.



Figura 5.64. Mecanismo en soporte

Con el fin de facilitar el transporte del prototipo, se ha instalado un asa en la parte superior del soporte, de este modo se facilita el agarre de este.



Figura 5. 65. Asa para transporte ergonómico del prototipo

Para finalizar la explicación del proceso de montaje del prototipo, se muestran dos imágenes de este.

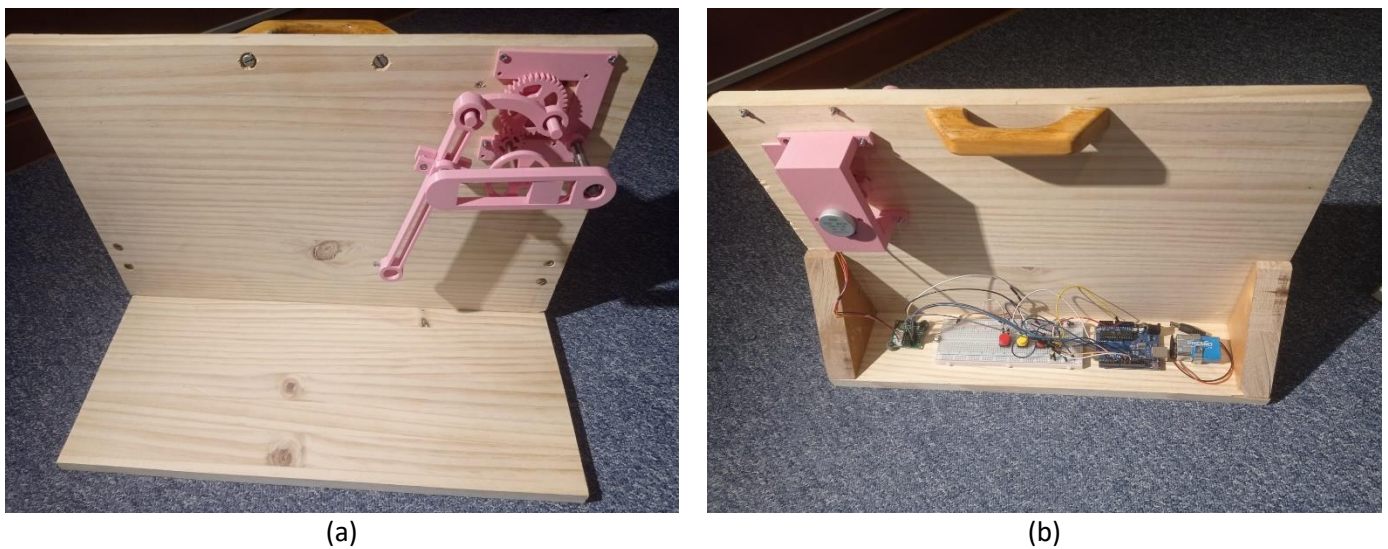


Figura 5. 66. Prototipo finalizado, vista frontal (a) y vista trasera (b)





## Capítulo VI: Conclusiones

### 6.1. Conclusiones

Las conclusiones del análisis del mecanismo se incluyen a continuación.

En cuanto al marco teórico, se ha realizado el análisis teórico obteniendo las ecuaciones generales que permiten conocer la posición y la cinemática de todas las barras del mecanismo. Para conseguir el cálculo automatizado, se ha programado una hoja Excel con dichas ecuaciones para obtener los valores de estas variables en cada instante del ciclo de trabajo de mecanismo.

En el marco de análisis CAD/CAE, el mecanismo diseñado resulta muy versátil. Al poder variar la longitud de una de sus barras se pueden deducir dos conclusiones que resultan útiles dependiendo de las restricciones que se tengan, ya sea por el espacio de amasado o por las características de la masa. Hay que resaltar que se ha diseñado a partir de un modelo de barras de Artobolevski con el único dato de distancia entre articulaciones. Con este modelo se ha realizado una simulación del movimiento para diferentes casos de estudio.

El análisis de posición determina que a mayor longitud de la barra 6, el mecanismo tiende a reducir la amplitud horizontal de la trayectoria y aumentar la vertical. También se ha analizado como al aumentar la longitud de la barra 6 las velocidades máximas aumentan mientras que las mínimas disminuyen. Estos datos son útiles para la elección de una distancia u otra para dicha barra.

Por otro lado, el análisis cinemático revela como la velocidad media del trazo experimenta una variación en forma de “U” con  $r_6$ , situando su valor mínimo en 168,93 mm/s para una longitud de  $r_6$  de 45 mm. Esto es ventajoso dependiendo del tipo de mezcla que se desee amasar. Si lo que se desea es en una mezcla muy aireada como un merengue, las velocidades deben ser lo más altas posibles, mientras que, si se desea una mezcla para

pan, la velocidad media debe ser mas baja para que no se desarrolle el gluten de la harina, si la velocidad fuera alta en este segundo supuesto, el resultado seria un endurecimiento del producto.

Con esto se cumple el objetivo de analizar la influencia de la variacion de una de las barras en la trayectoria del mecanismo.

También se concluye la alta fiabilidad que tienen los programas como “Autodesk Inventor” al obtener unos resultados análogos a los logrados con las ecuaciones teóricas aplicadas con los valores del mecanismo con una herramienta de calculo automatizado. Esto demuestra la gran utilidad de estos programas y la versatilidad que tienen, así como el apoyo visual y analítico que ofrecen. Pudiendo generar piezas con la única restricción de la longitud y dotándolas de volumen para realizar un ensamblaje funcional.

Se ha construido un prototipo movil del mecanismo, con la posibilidad de modificar la longitud de la barra 6 y conseguir diferentes trazados del punto de amasado. Ha sido necesaria la modificacion del diseño de las piezas necesaria para adaptarlas a las posibilidades de prototipado por impresión 3D utilizando diversas herramientas como Prusa Slicer o Autodesk Inventor. Tambien se ha realizado una selección de componentes electronicos, se han realizado las conexiones y programado el movimiento del eje. El resultado ha sido que se ha conseguido obtener un prototipo capaz de realizar una trayectoria similar a las obtenidas mediante las ecuaciones y la simulacion.

Por lo que se puede deducir que el prototipo se ha generado con una suma de diversas áreas del conocimiento. Por un lado, generando piezas auxiliares de tal forma que el resultado sea un prototipo funcional que cumpla con los requisitos requeridos, para ello se han diseñado varias piezas que han sufrido modificaciones, por lo que ha sido necesario conocer el funcionamiento de programas de diseño y como poder obtener una pieza con una impresora 3D. Por otro lado, ha sido necesario entender como se desarrolla un lenguaje de programación que permita motorizar dicho prototipo. Por último, se necesitan ciertos conocimientos para poder realizar un soporte que permita el buen funcionamiento del mecanismo.

Para finalizar, se debe de remarcar la necesidad de adaptar el conocimiento a estas nuevas herramientas, puesto que facilitan el desarrollo del diseño y cálculo en comparación con los métodos tradicionales. Esta ventaja hace que se reduzca el tiempo y el dinero

---

necesarios para la obtención de resultados con un margen de error ínfimo, lo cual facilita la labor del ingeniero de manera cuantiosa.



## Bibliografía

- [1] Francisco Tejero F.T Asesoría Técnica en Panificación. Las amasadoras, ventajas e inconvenientes de los distintos tipos. 2022  
URL: <http://www.franciscotejero.com/tecnicas/las-amasadoras-ventajas-e-inconvenientes-de-los-distintos-tipos/>
- [2] Artobolevski. Mecanismos en la Técnica Moderna. Ed. Mir (Moscú), 1975-80, 5 Vols.
- [3] J. Shigley. Teoría de máquinas y mecanismos. Edición 2022. Editorial Mc Graw Hill. ISBN 968·451·297·X
- [4] Robert L. Norton. Diseño de maquinaria, Síntesis y análisis de máquinas y mecanismos. Cuarta edición 2009. Editorial Mc Graw Hill. ISBN: 978-970-10-6884-7
- [5] Aprendiendo Arduino. Actuadores y periféricos de salida. 2022.  
URL: <https://aprendiendoarduino.wordpress.com/2015/03/31/actuadores-y-perifericos-de-salida/>
- [6] Shenzhen Xeeffee Technology Co. Motor paso a paso de engranaje 28BYJ-48, 5V, 4 fases, 5 líneas. 2022.  
URL: <https://spanish.alibaba.com/product-detail/28byj-48-5v-4-phase-5-line-gear-stepper-motor-60616345140.html>

---

[7] Control Automático Educación. Motor Paso a Paso Arduino. 2022.

URL: [https://controlautomaticoeducacion.com/arduino/motor-paso-a-paso-arduino/#Usando\\_un\\_Motor\\_Paso\\_a\\_Paso\\_28BYJ-48\\_con\\_ULN2003\\_y\\_Arduino](https://controlautomaticoeducacion.com/arduino/motor-paso-a-paso-arduino/#Usando_un_Motor_Paso_a_Paso_28BYJ-48_con_ULN2003_y_Arduino)



## Anexos

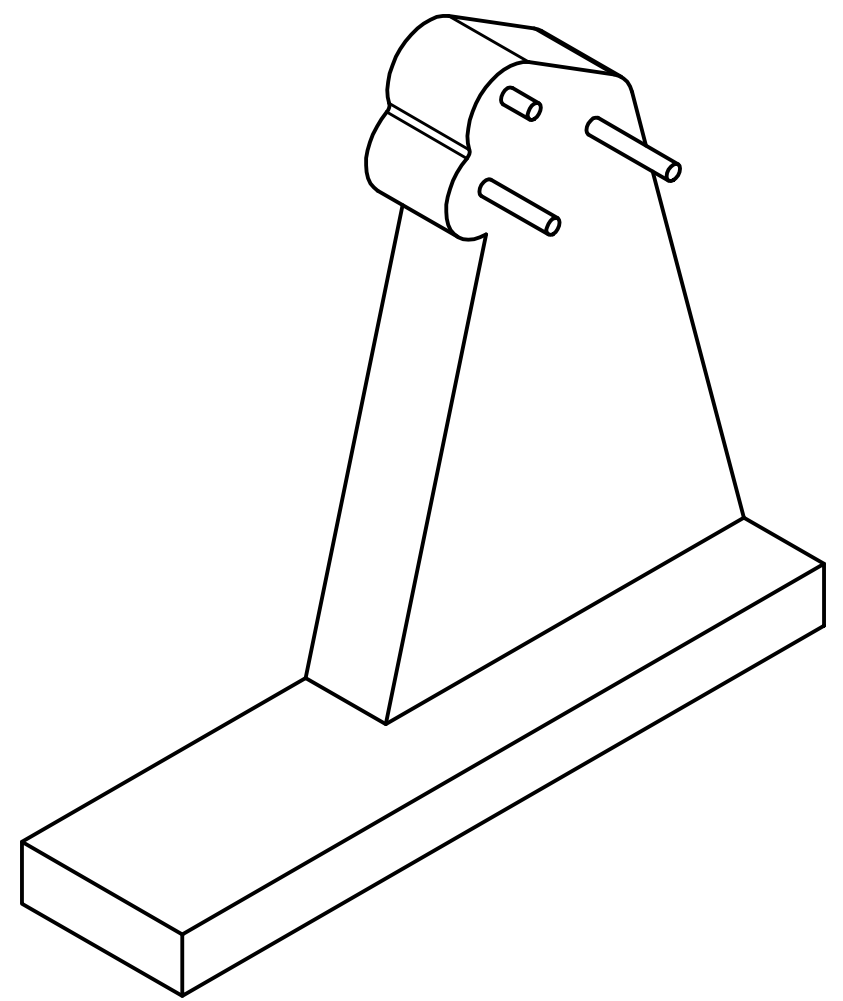
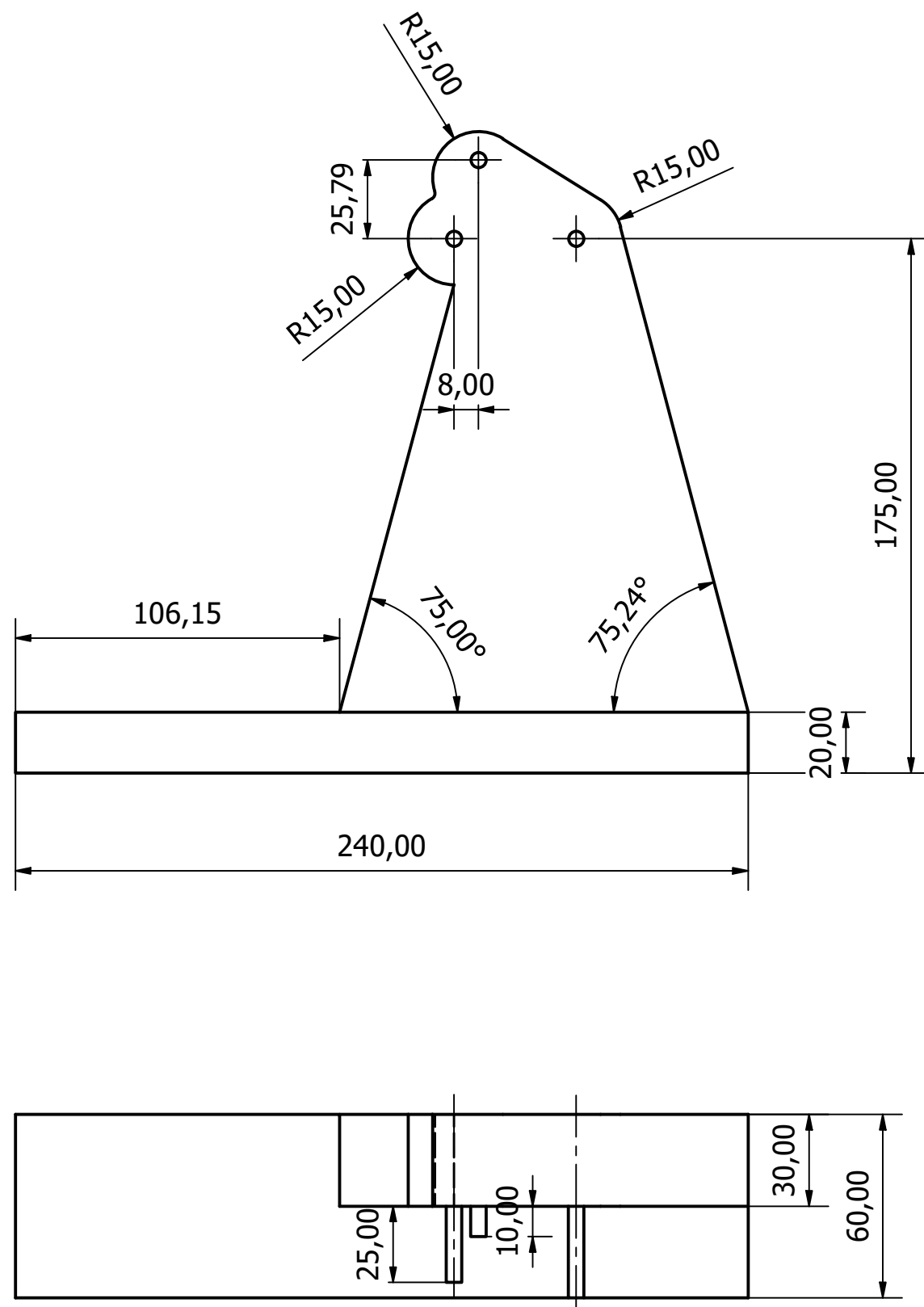
A continuación se mostrarán los diferentes planos que conforman el prototipo y el modelo empleado para la simulación.140



## Anexos

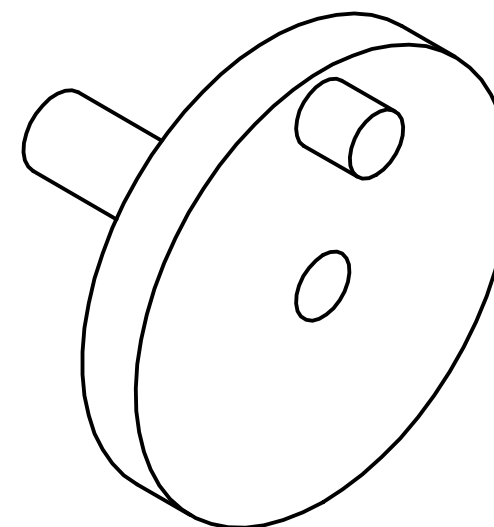
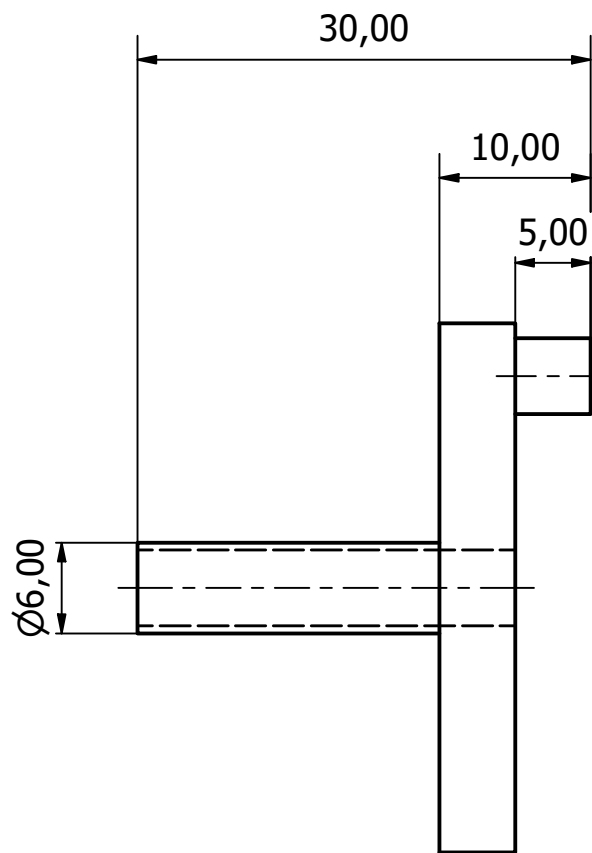
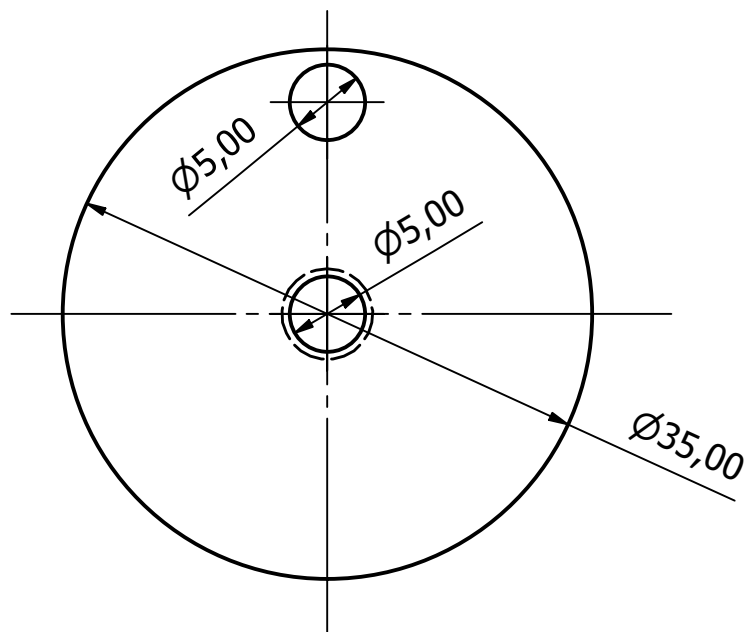
### **Anexo I: Planos modelo Inventor**

---

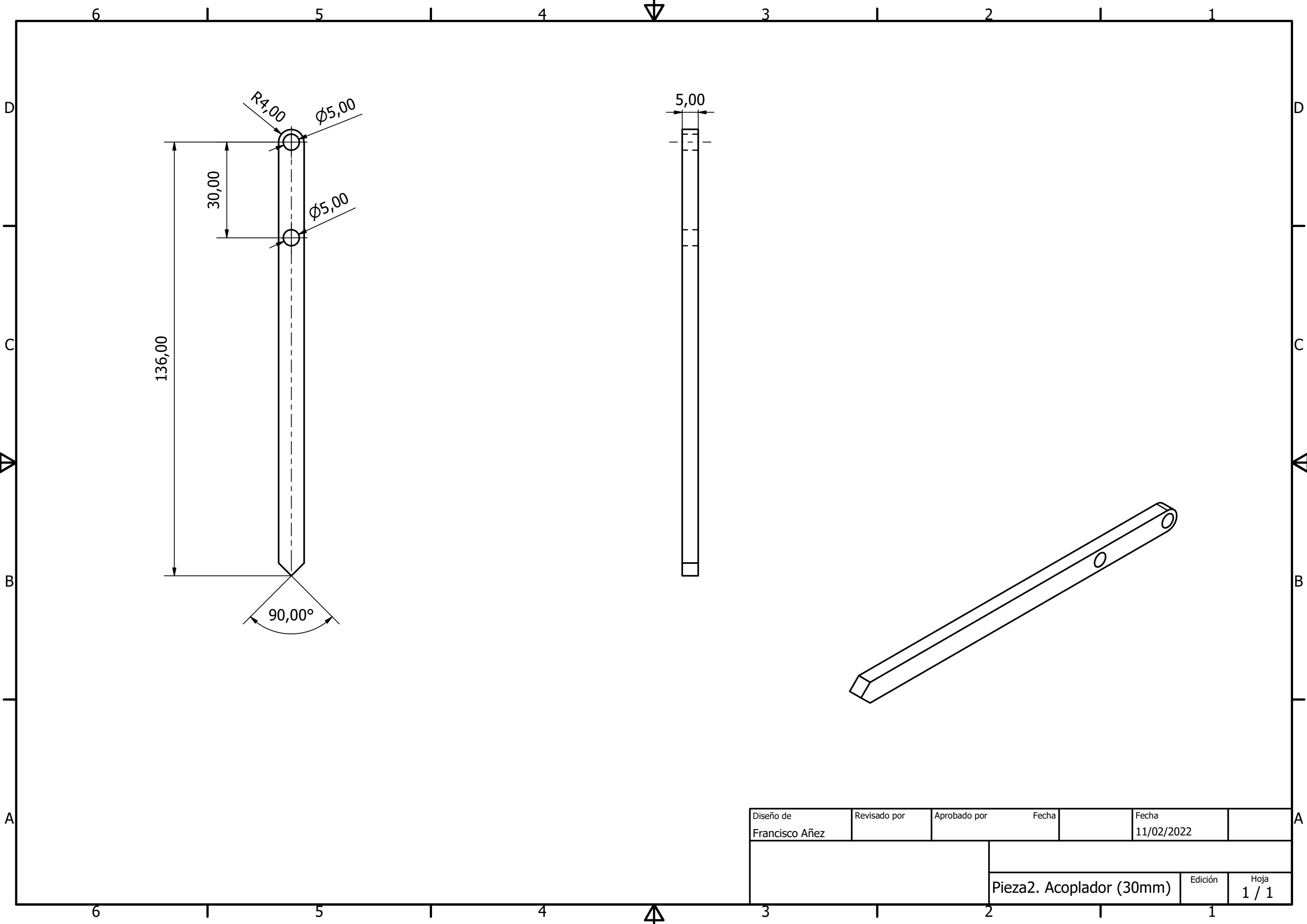


Diseño de Francisco Añez	Revisado por	Aprobado por	Fecha	Fecha 11/02/2022
			Pieza0. Soporte	
			Edición	Hoja 1 / 1



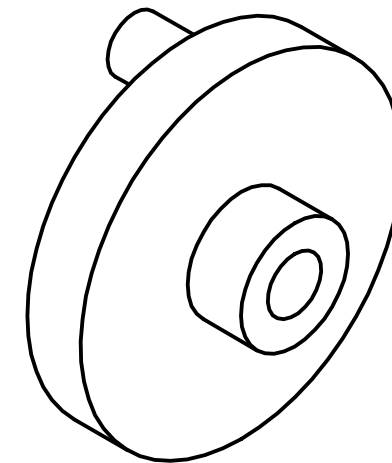
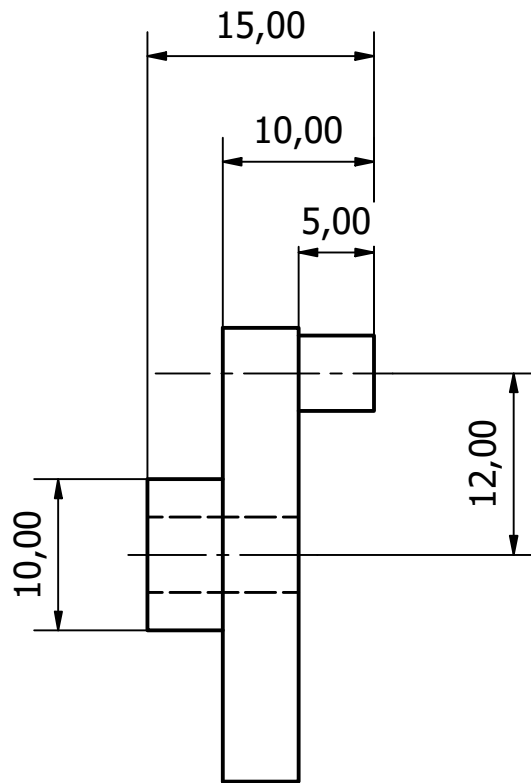
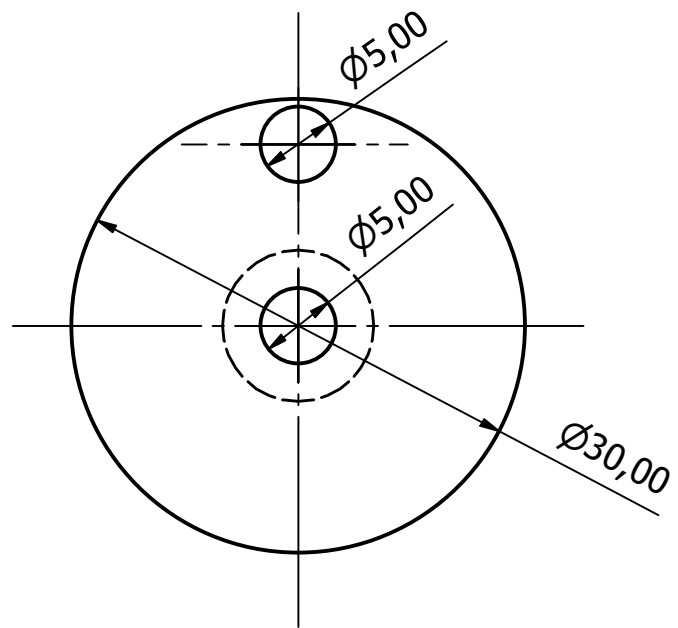


Diseño de Francisco Añez	Revisado por	Aprobado por	Fecha	Fecha 11/02/2022
		Pieza1. Manivela 1		
		Edición	Hoja 1 / 1	

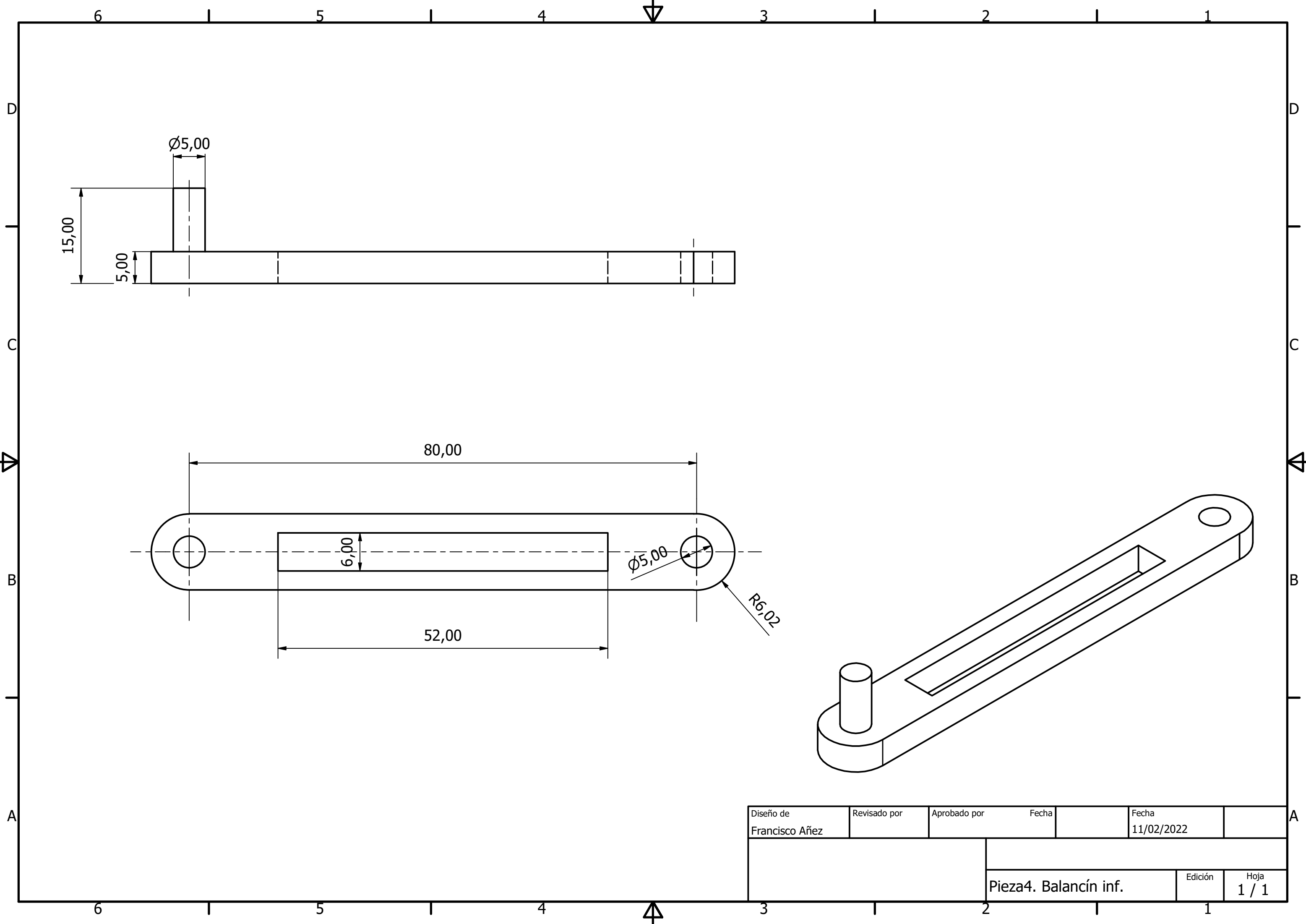


Diseño de Francisco Añez	Revisado por	Aprobado por	Fecha	Fecha 11/02/2022
			Edición	
			Hoja 1 / 1	

Pieza2. Acoplador (30mm)

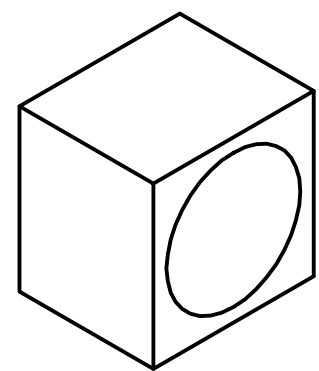
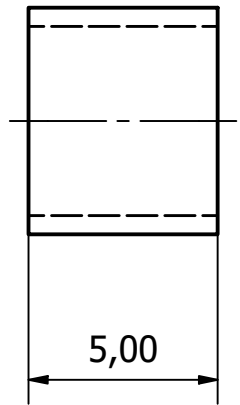
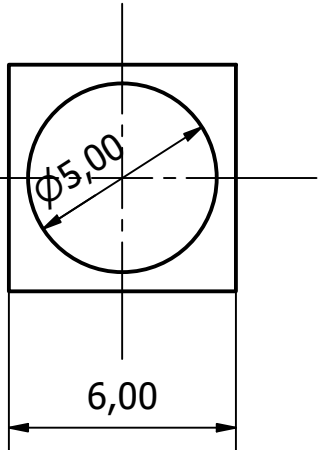
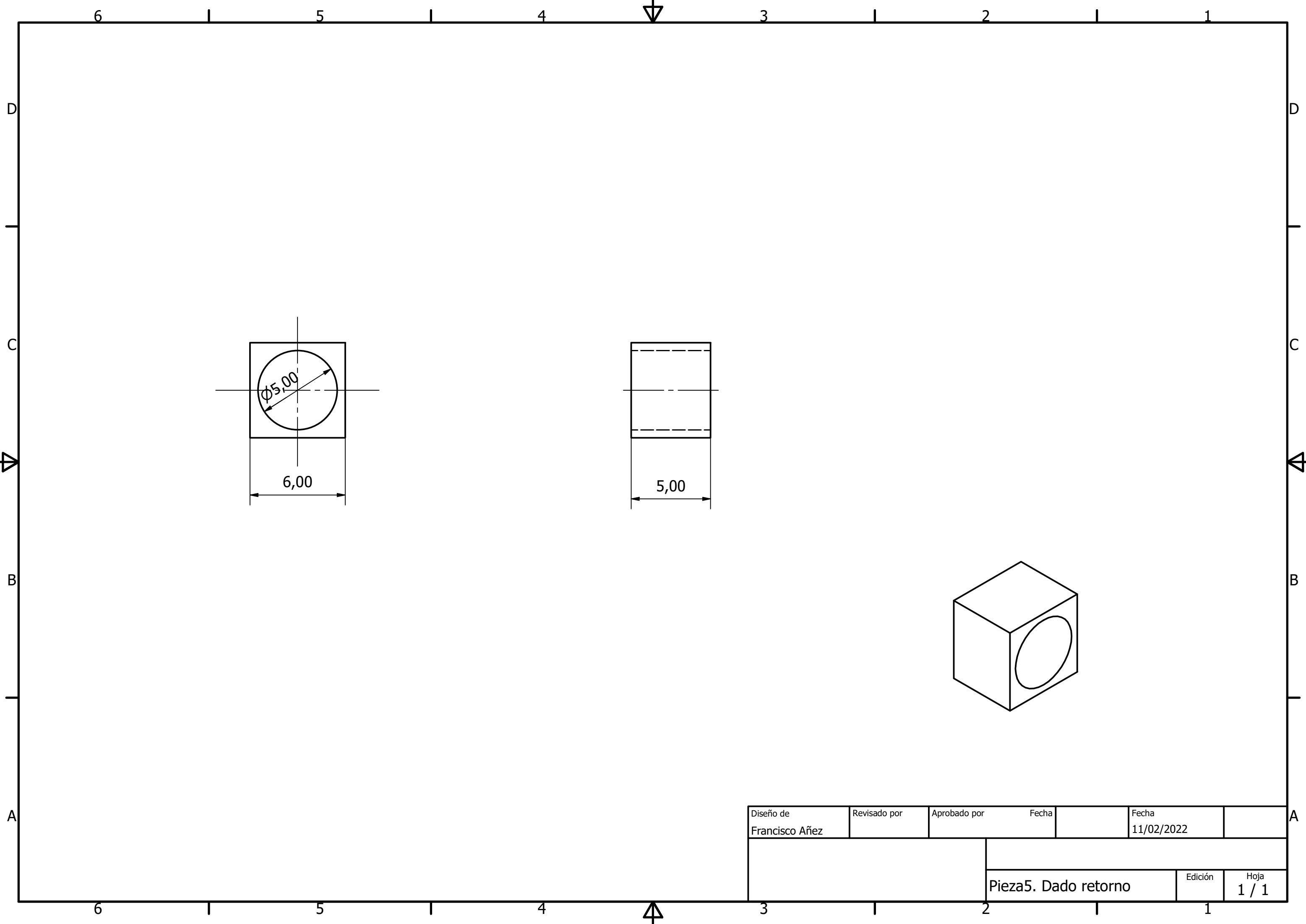


Diseño de Francisco Añez	Revisado por	Aprobado por	Fecha	Fecha 11/02/2022
			Pieza3. Manivela 2	Edición
			Hoja 1 / 1	

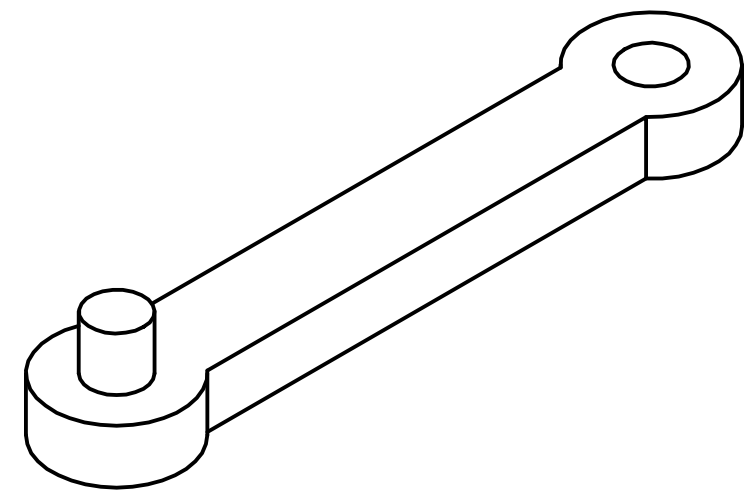
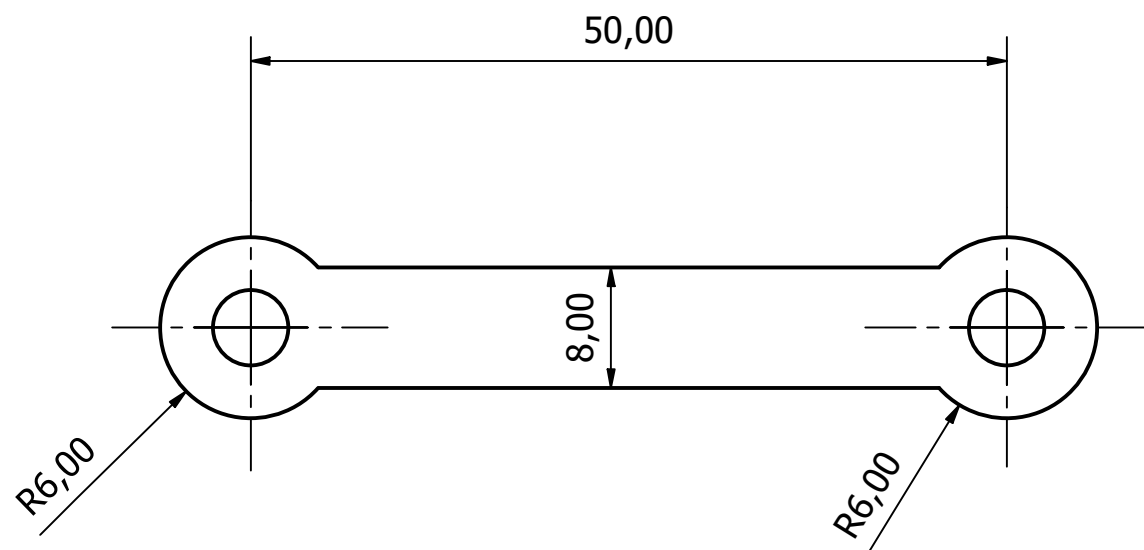
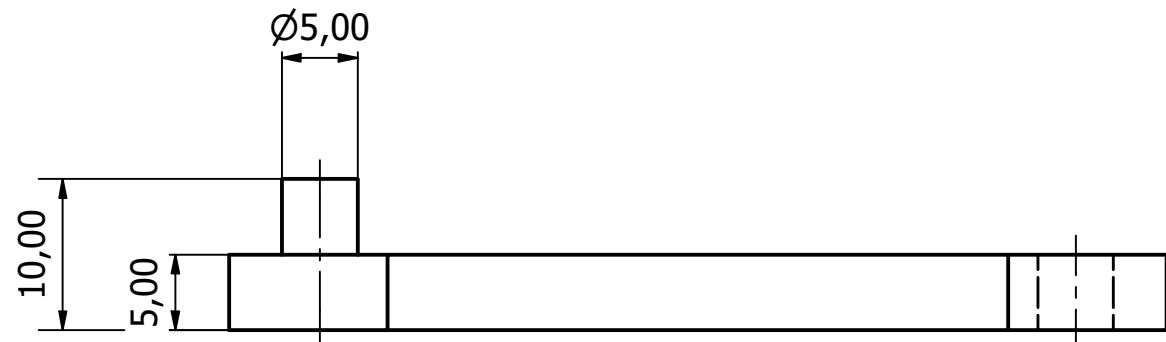


Diseño de Francisco Añez	Revisado por	Aprobado por	Fecha	Fecha 11/02/2022
			Edición	
			Hoja 1 / 1	

Pieza4. Balancín inf.



Diseño de Francisco Añez	Revisado por	Aprobado por	Fecha	Fecha 11/02/2022
		Pieza5. Dado retorno		
		Edición	Hoja 1 / 1	



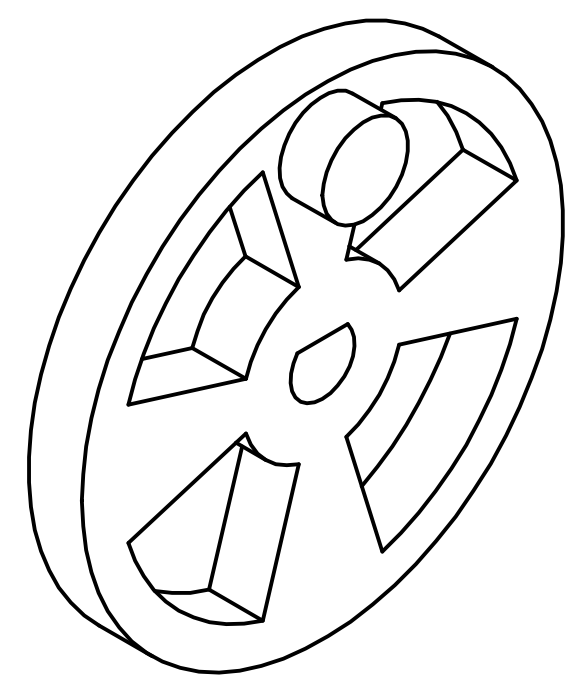
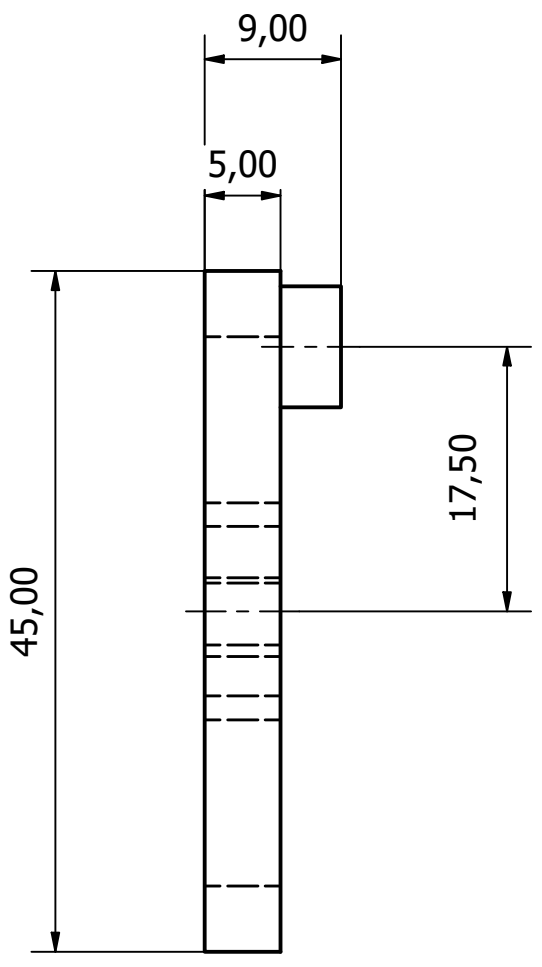
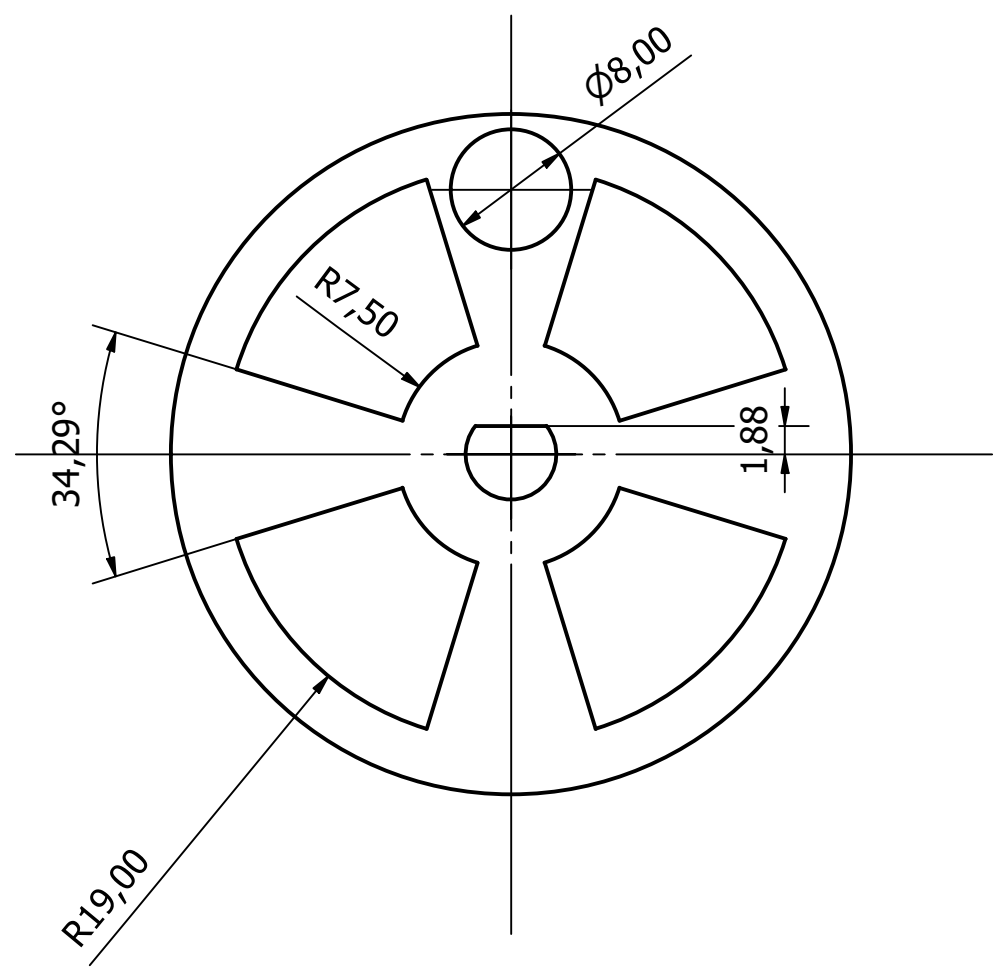
Diseño de Francisco Añez	Revisado por	Aprobado por	Fecha	Fecha 11/02/2022
			Pieza6. Balancín Sup.	
			Edición	Hoja 1 / 1



# Anexos

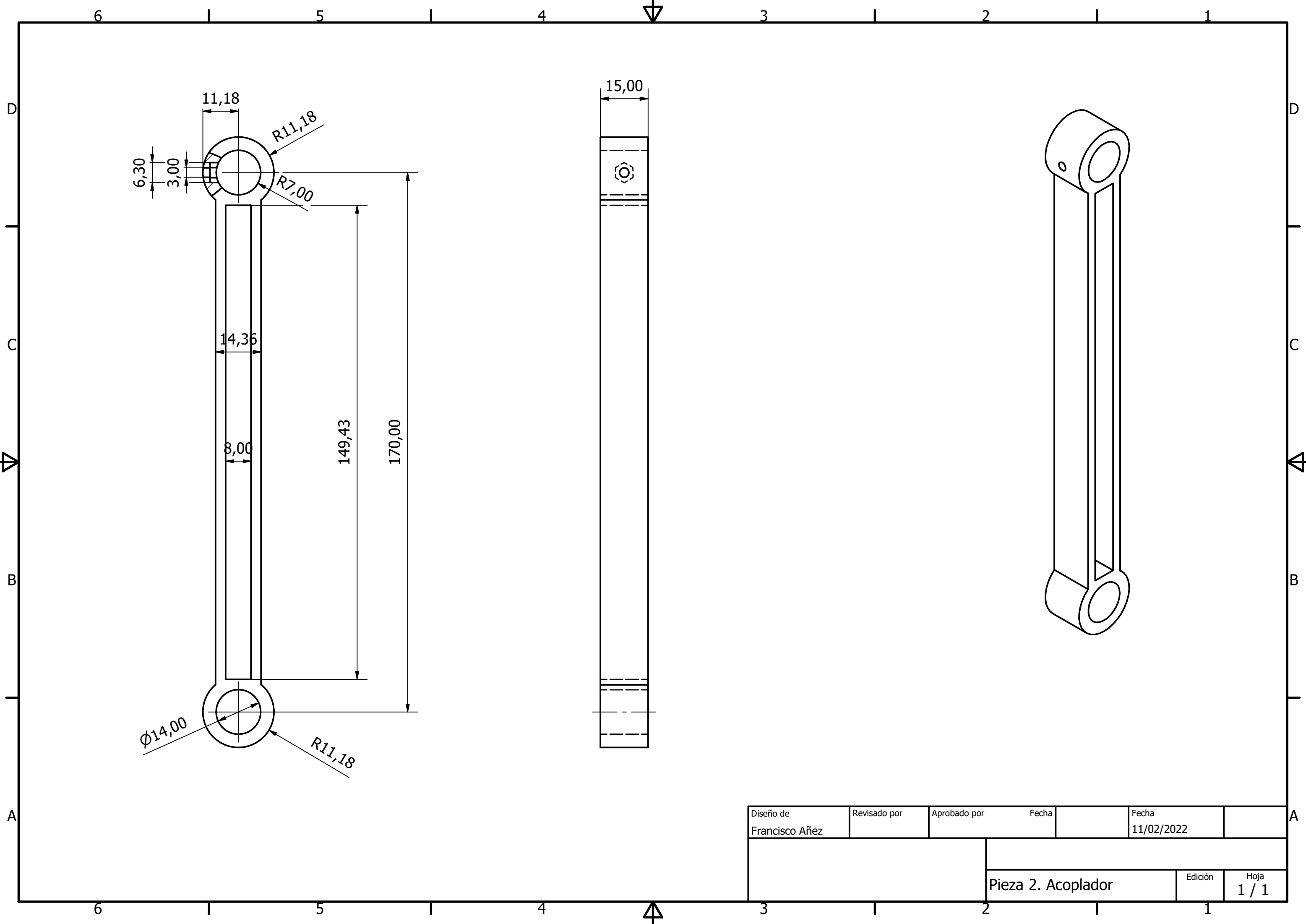
## **Anexo II: Planos Prototipo**

---

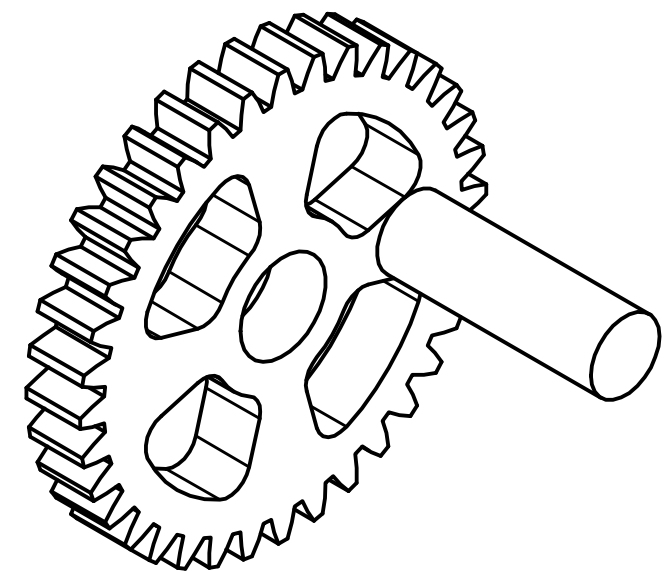
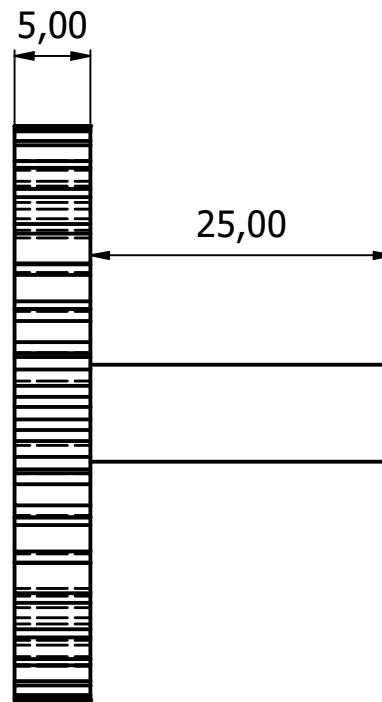
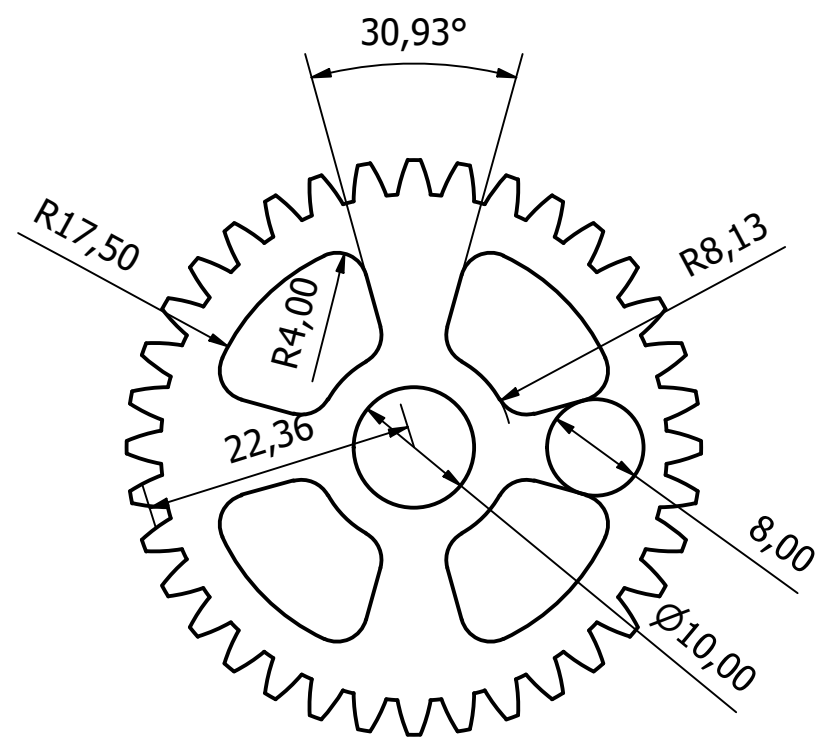


Diseño de Francisco Añez	Revisado por	Aprobado por	Fecha	Fecha 11/02/2022
			Pieza 1. Manivela 1	Edición 1 / 1





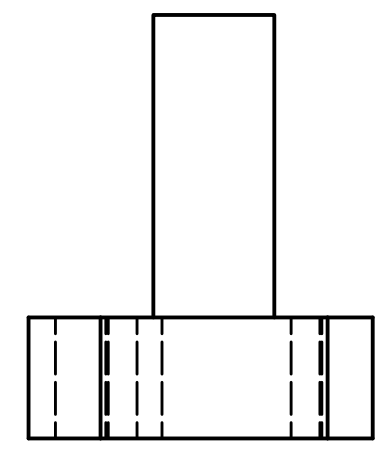
Diseño de Francisco Añez	Revisado por	Aprobado por	Fecha	Fecha 11/02/2022
			Pieza 2. Acoplador	
			Edición	Hoja 1 / 1



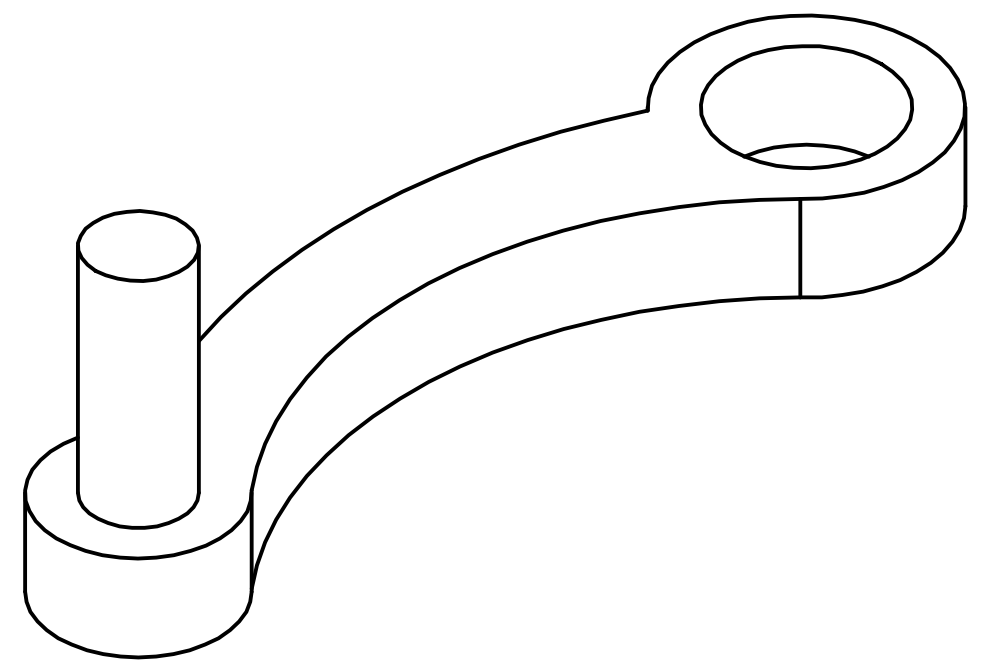
Diseño de Francisco Añez	Revisado por	Aprobado por	Fecha	Fecha 23/02/2022
		Pieza3. Manivela 2		
		Edición	Hoja 1 / 1	

6 5 4 3 2 1

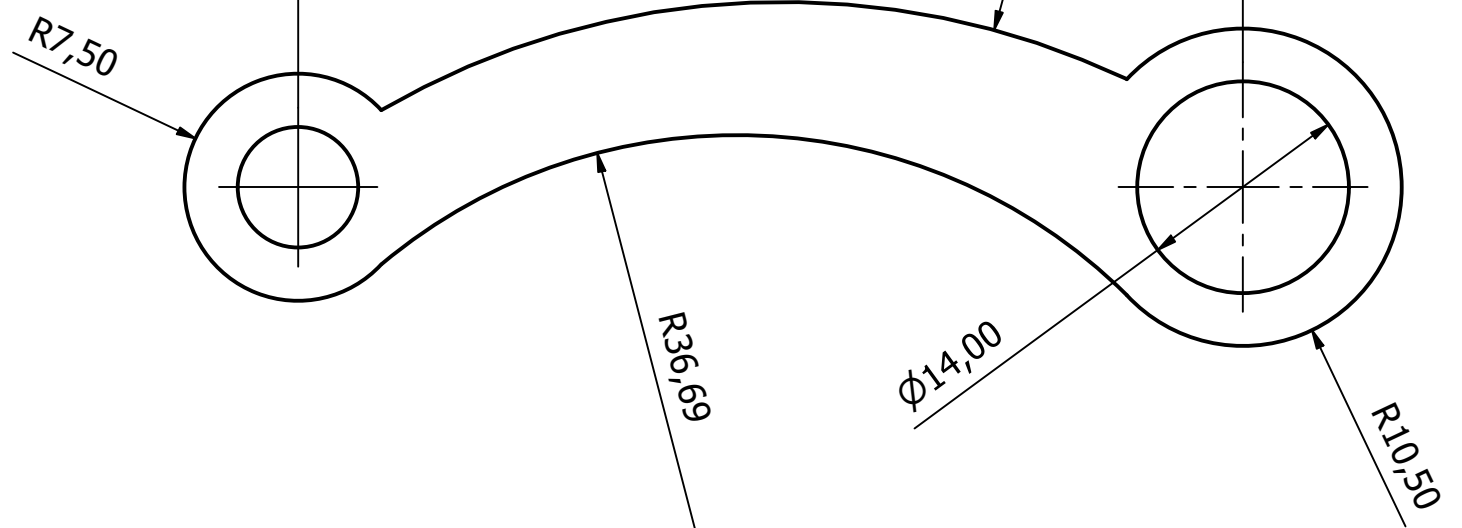
D



C



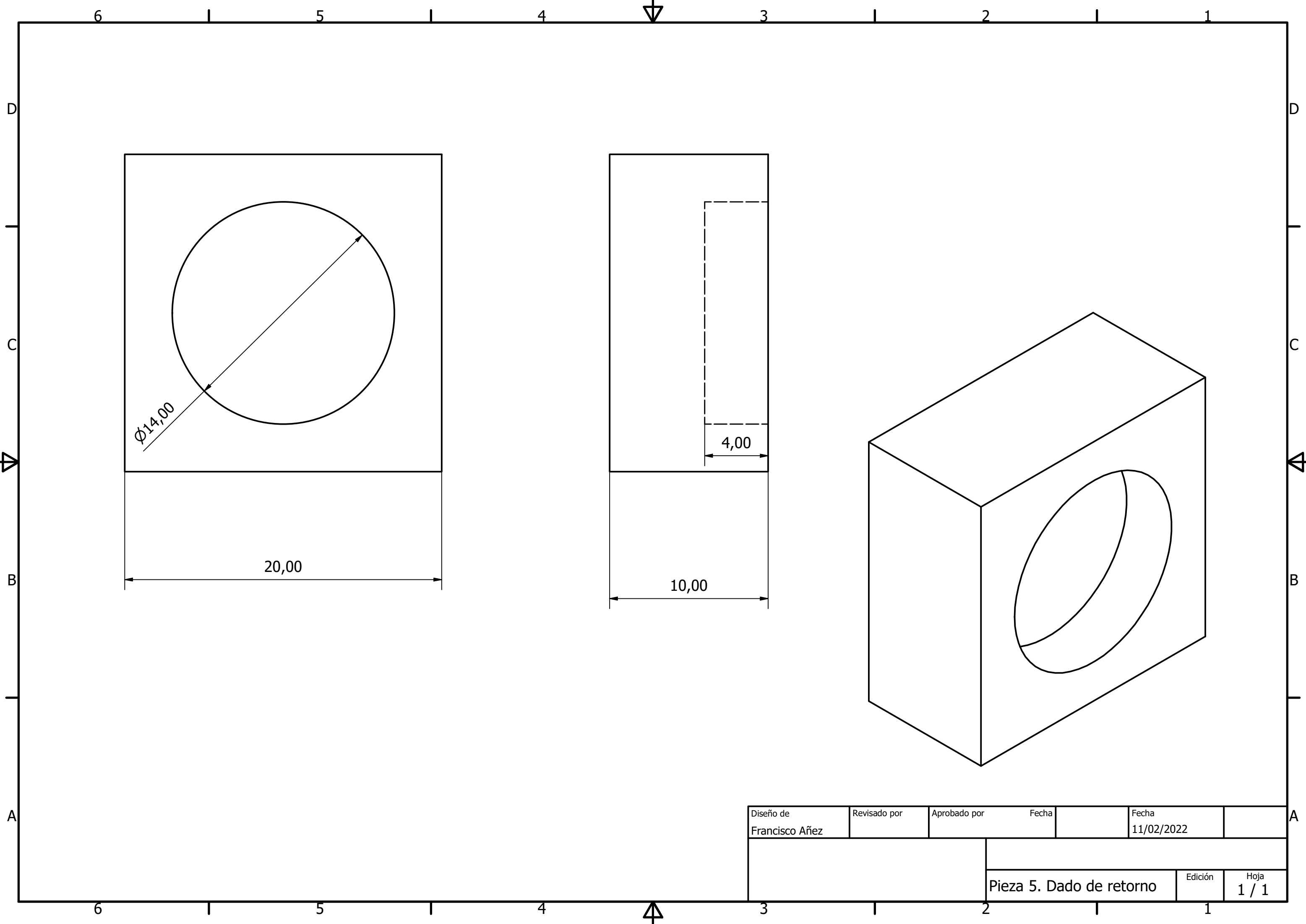
B



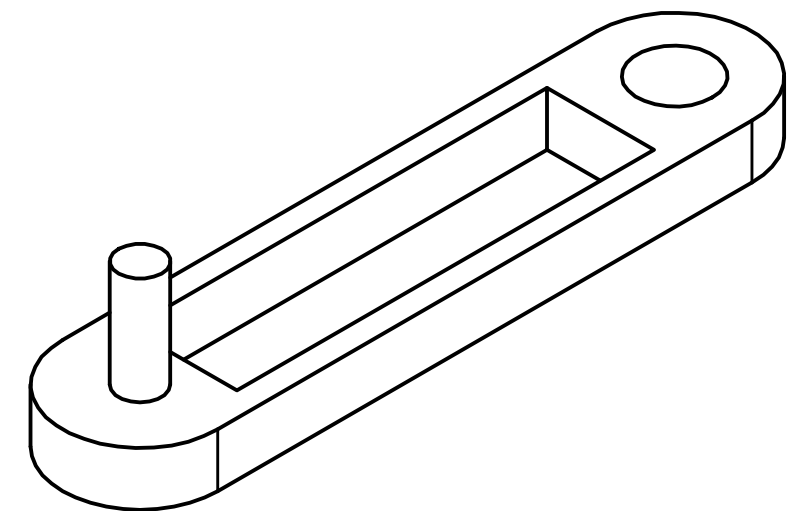
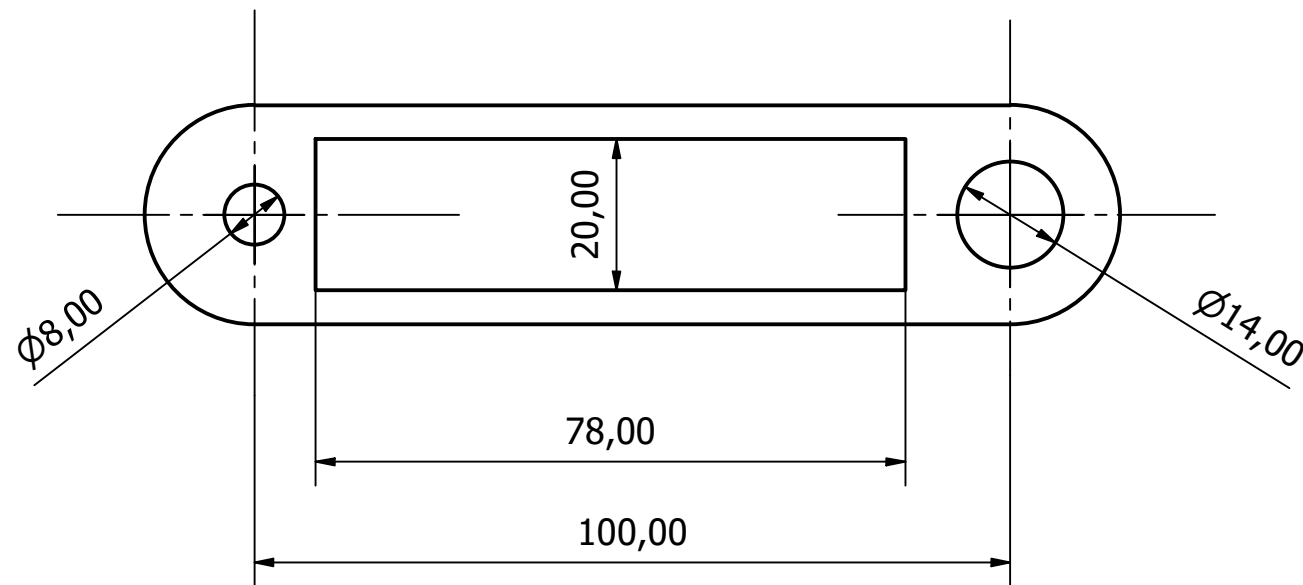
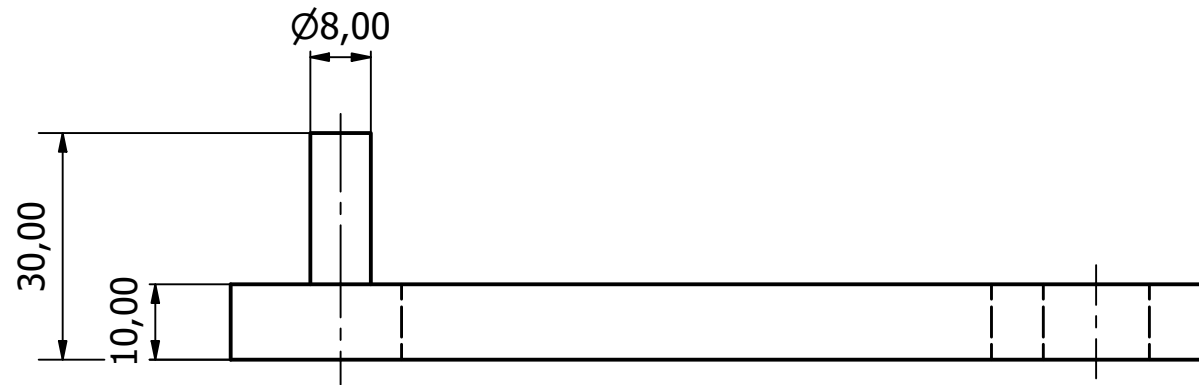
A

Diseño de Francisco Añez	Revisado por	Aprobado por	Fecha	Fecha 11/02/2022
			Pieza 4. Balancin sup.	Edición
			1 / 1	Hoja

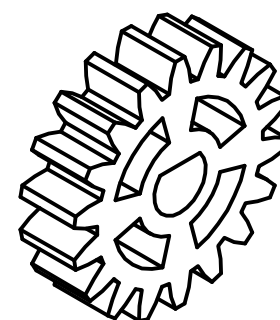
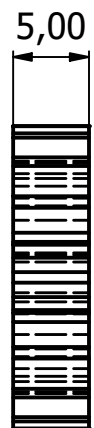
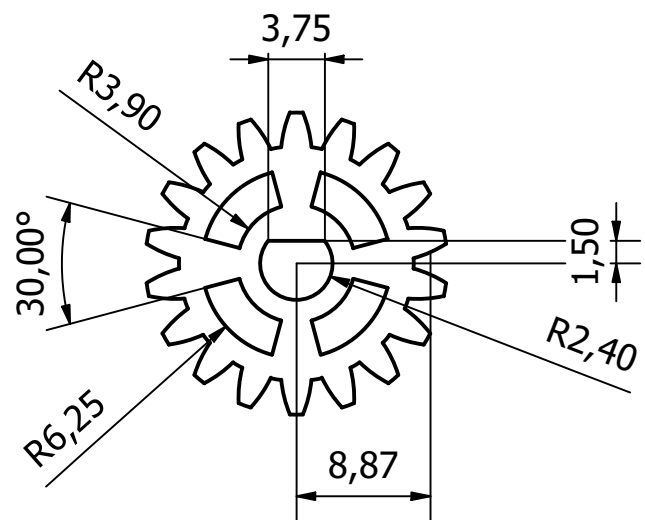
6 5 4 3 2 1



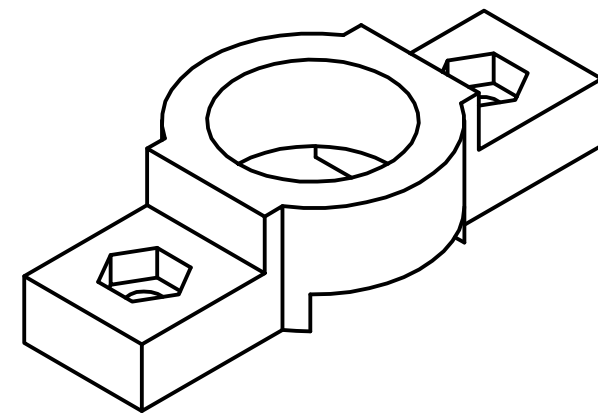
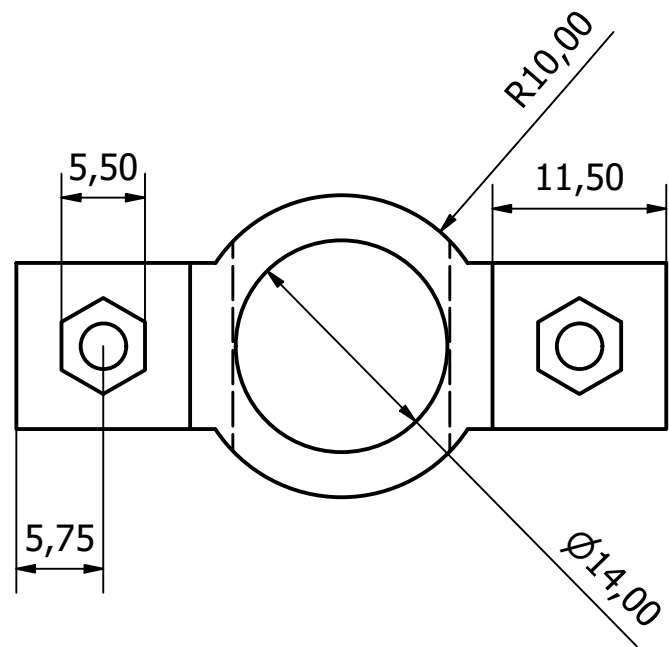
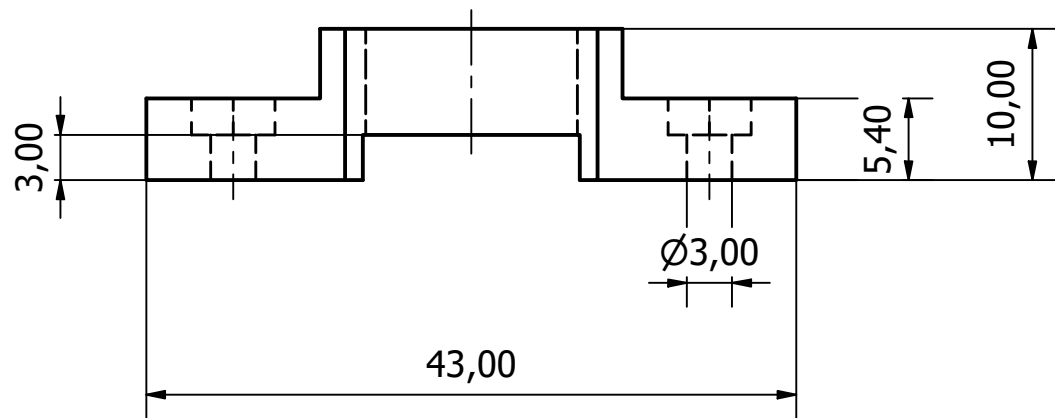
Diseño de Francisco Añez	Revisado por	Aprobado por	Fecha	Fecha 11/02/2022
			Pieza 5. Dado de retorno	
			Edición	Hoja 1 / 1



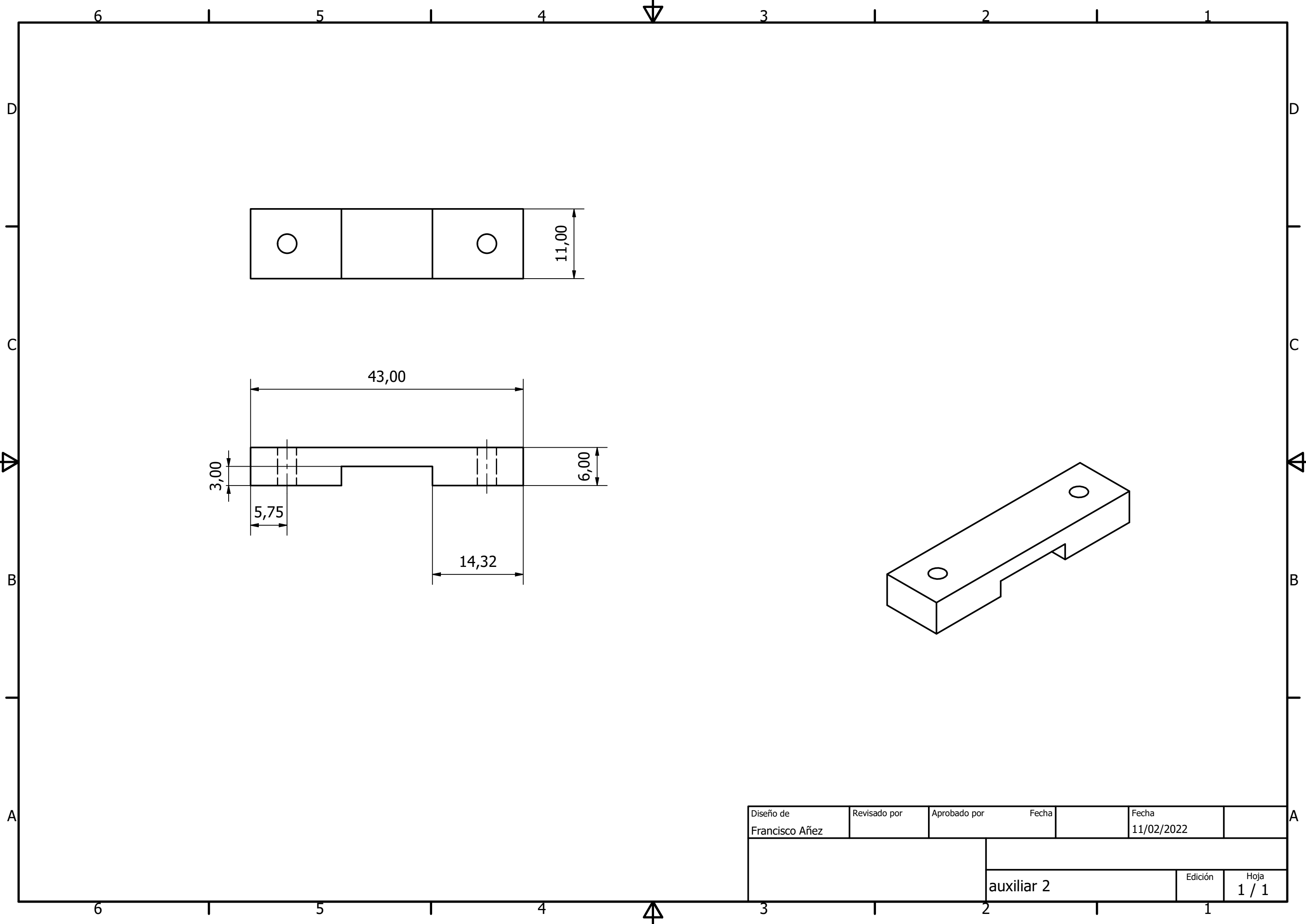
Diseño de Francisco Añez	Revisado por	Aprobado por	Fecha	Fecha 11/02/2022
			Pieza 6. Balancín inf.	Edición
			1 / 1	Hoja



Diseño de Francisco Añez	Revisado por	Aprobado por	Fecha	Fecha 23/02/2022
			Edición	Hoja 1 / 1
			Piñón	

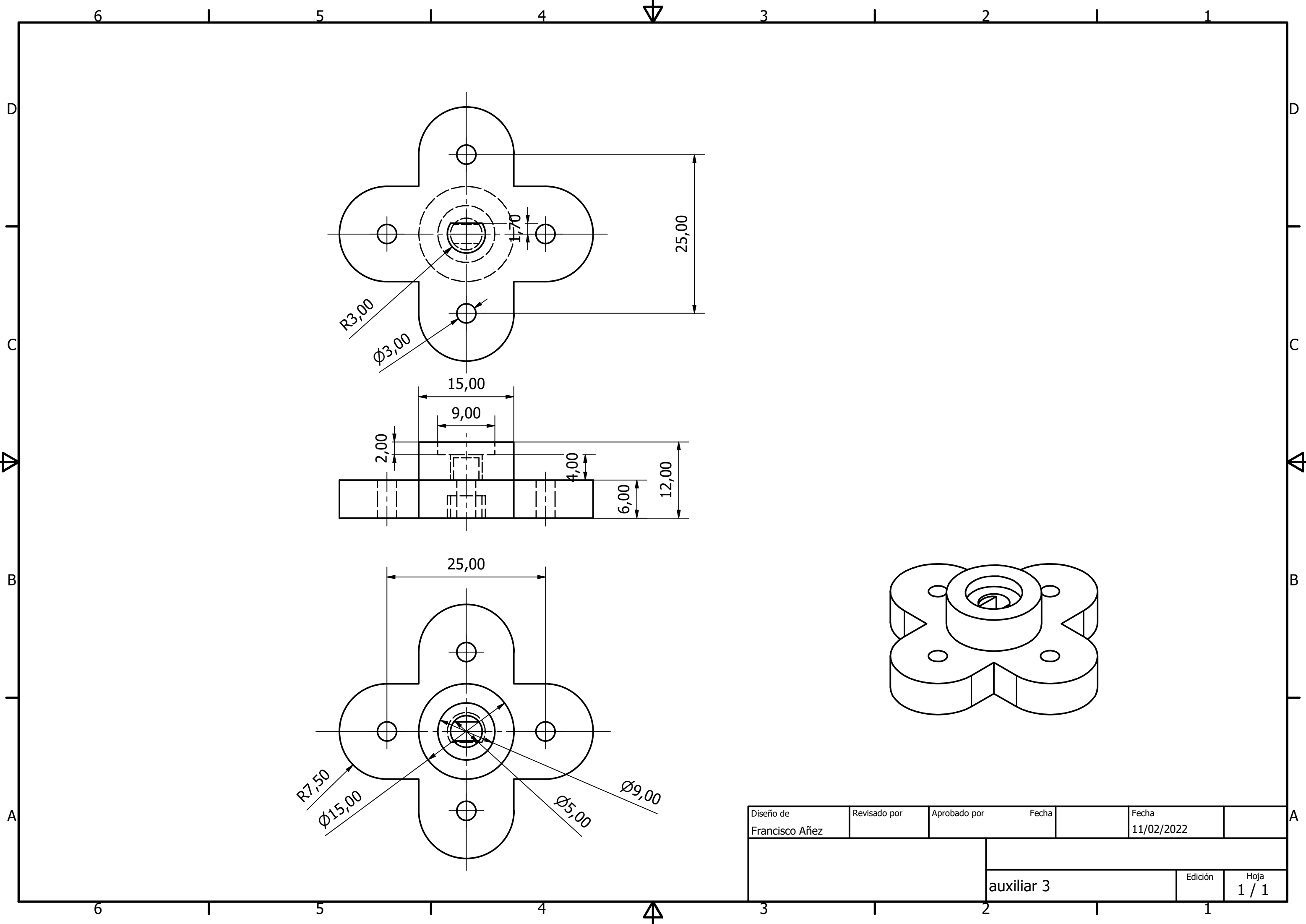


Diseño de Francisco Añez	Revisado por	Aprobado por	Fecha	Fecha 11/02/2022
		auxiliar 1		
		Edición	Hoja 1 / 1	



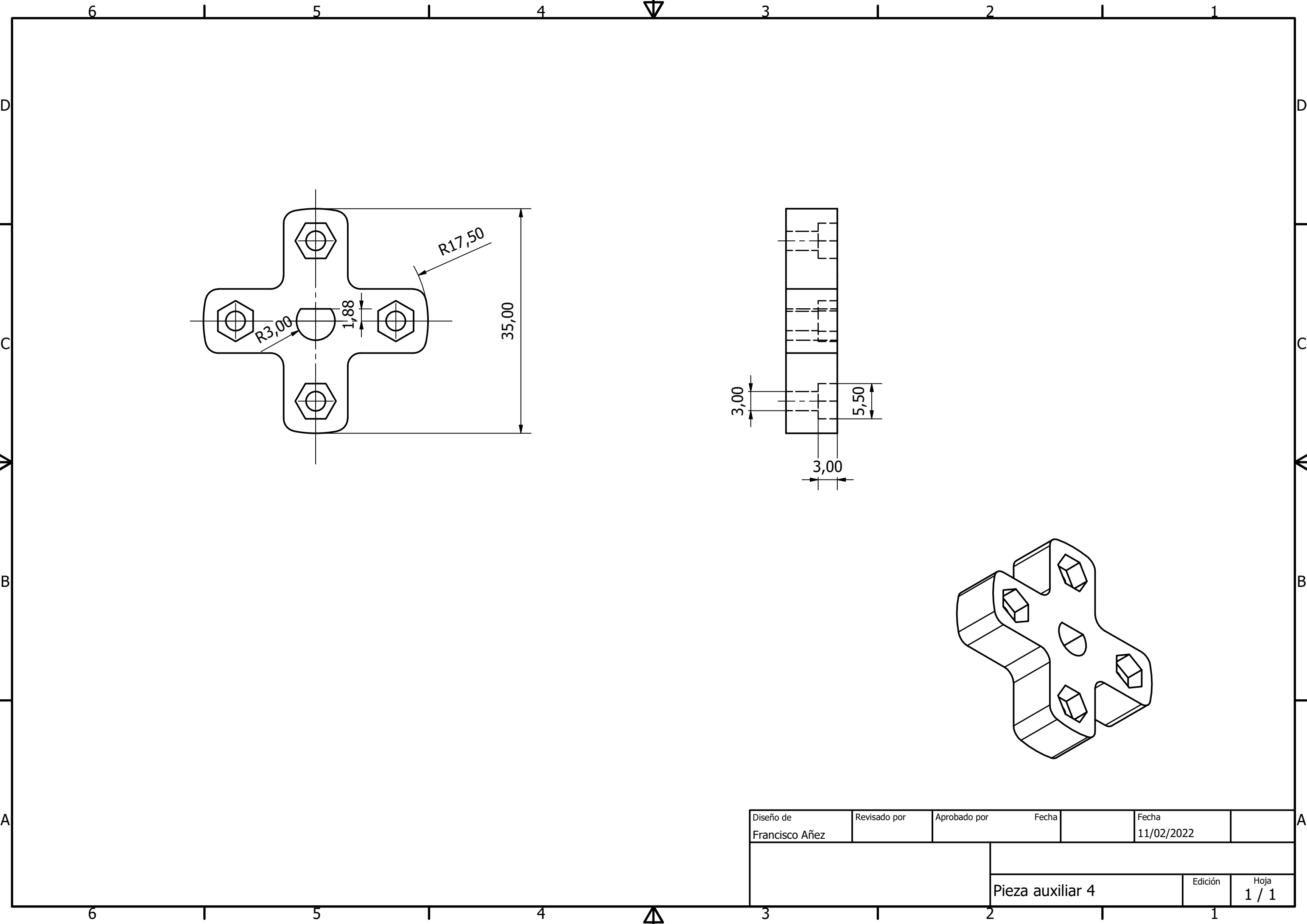
Diseño de Francisco Añez	Revisado por	Aprobado por	Fecha	Fecha 11/02/2022
			Edición	Hoja 1 / 1
			auxiliar 2	



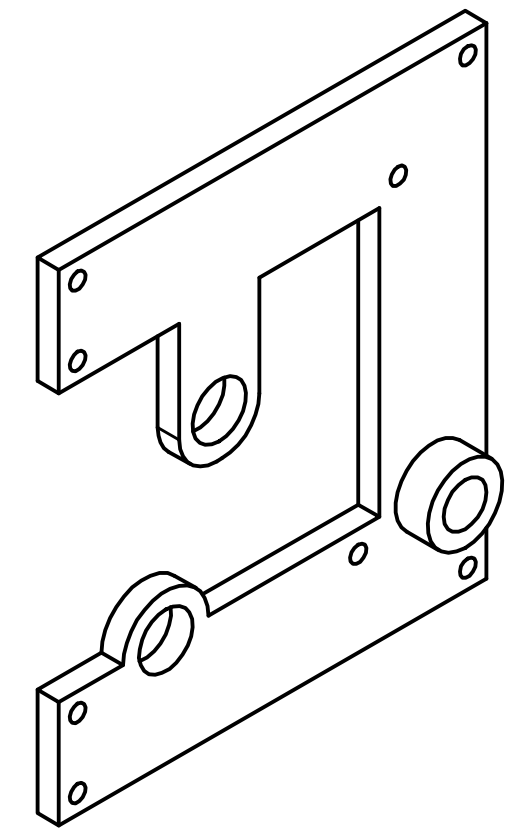
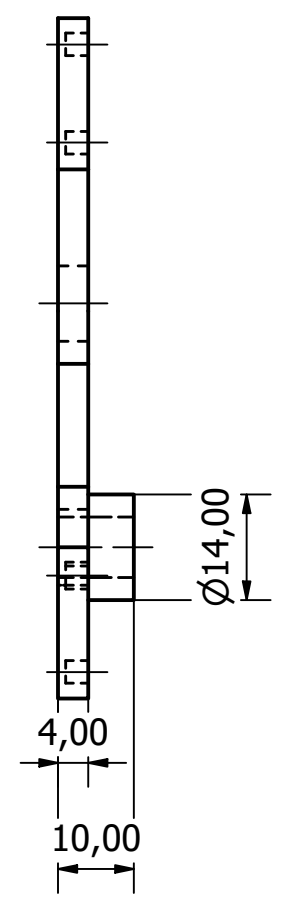
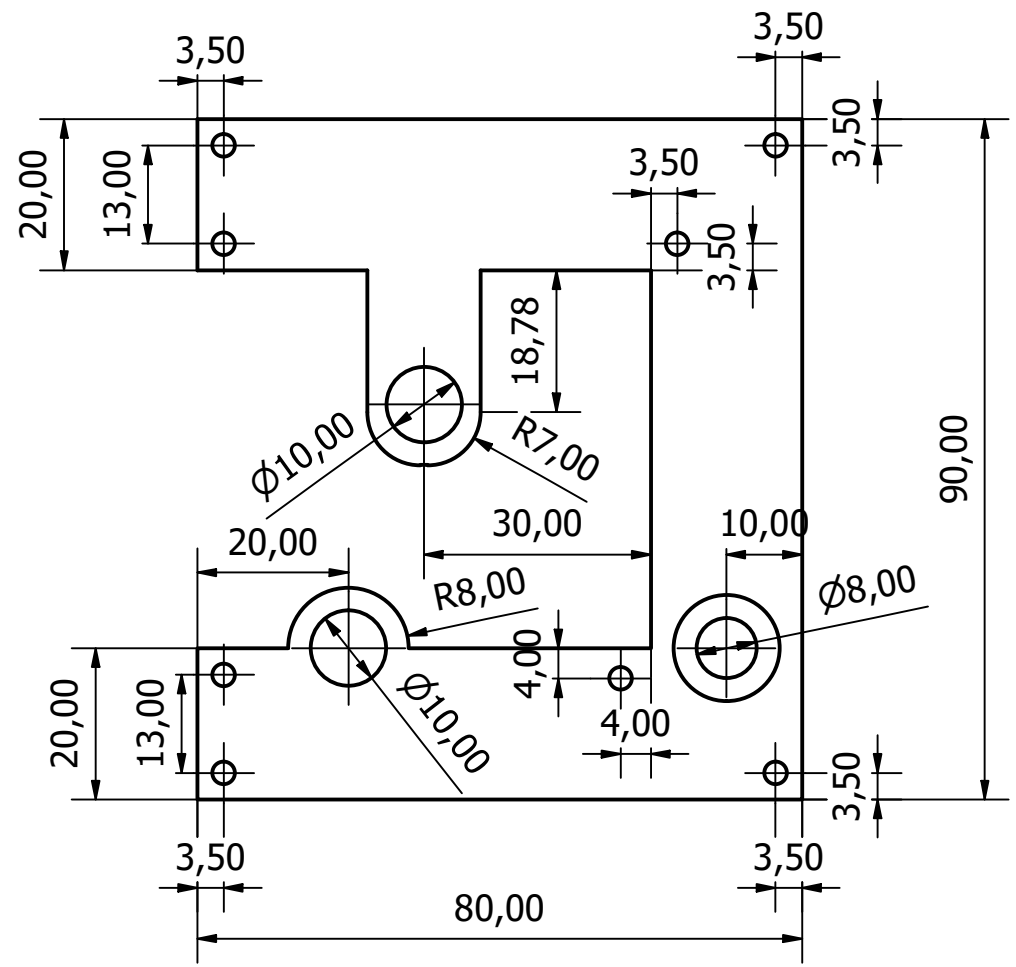


Diseño de Francisco Añez	Revisado por	Aprobado por	Fecha	Fecha 11/02/2022
			Edición	
			Hoja 1 / 1	

auxiliar 3



Diseño de Francisco Añez	Revisado por	Aprobado por	Fecha	Fecha 11/02/2022
			Pieza auxiliar 4	
			Edición	Hoja 1 / 1



Diseño de Francisco Añez	Revisado por	Aprobado por	Fecha	Fecha 11/02/2022
			Edición	Hoja 1 / 1
pieza auxiliar5				

