

Trabajo de Final de Grado

## **Grado en Ingeniería en Tecnologías Industriales**

### **Recursos virtuales de apoyo a la enseñanza y aprendizaje de Teoría de Máquinas y Mecanismos**

#### **MEMORIA**

**Autor:** Daniel Merino Miró  
**Director:** Enrique Zayas Figueras  
**Convocatoria:** Abril 2018



Escola Tècnica Superior  
d'Enginyeria Industrial de Barcelona





## Resumen

El presente Trabajo Final de Grado tiene como objetivo crear modelos virtuales tridimensionales de mecanismos diversos (de barras, de levas-palpador y de engranajes) y simular su funcionamiento, para utilizarlos como material de apoyo didáctico para la enseñanza y el aprendizaje de la materia Teoría de Máquinas y Mecanismos que se imparte en el Grado en Ingeniería en Tecnologías Industriales de la ETSEIB.

Para alcanzar dicho objetivo, se ha propuesto un procedimiento para la selección, modelación y simulación de máquinas y mecanismos. A partir de la aplicación de dicho procedimiento, en el trabajo se han elegido 8 mecanismos, los cuales se han caracterizado técnica y estructuralmente, esquematizado utilizando los símbolos normalizados establecidos y analizado geométrica y cinemáticamente, utilizando como soporte el Programa de Análisis de Mecanismos (PAM). Una vez comprobado el funcionamiento 2D de los mismos, se han creado los modelos virtuales en 3D usando el programa CAD SolidWorks, y se han creado videos que simulan el funcionamiento de dichos modelos utilizando para ello el paquete SolidWorks Motion Simulation.

El análisis de los resultados del proyecto, permite concluir que los modelos virtuales creados en el proyecto y la aportación de sus simulaciones, constituyen recursos didácticos que pueden ayudar o facilitar el aprendizaje de la asignatura Teoría de Máquinas y Mecanismos.



## Sumario

<b>SUMARIO</b>	<b>3</b>
<b>1. PREFACIO</b>	<b>5</b>
1.1. Origen del proyecto	5
1.2. Motivación	6
<b>2. INTRODUCCIÓN</b>	<b>7</b>
2.1. Objetivos del proyecto	7
2.1.1. Objetivos específicos	7
2.2. Alcance del proyecto	7
<b>3. ESTADO DEL ARTE</b>	<b>9</b>
3.1. Los recursos virtuales	9
3.2. Uso de los recursos virtuales para la enseñanza	10
3.3. Los recursos virtuales en la enseñanza de Teoría de Máquinas y Mecanismos	12
<b>4. PROCEDIMIENTO DE SELECCIÓN Y MODELACIÓN DE MÁQUINAS Y MECANISMOS</b>	<b>16</b>
4.1. Criterios para la selección de la máquina o mecanismo	17
4.2. Creación del Modelo Virtual en 3D	18
4.2.1. Modelación de elementos mecánicos de geometría compleja	19
Engranajes	19
Eje roscado	22
Levas	24
4.2.2. Código de colores para la identificación de elementos	25
4.3. Creación de la animación del Modelo Virtual en 3D mediante SolidWorks Motion Simulation	27
<b>5. MECANISMOS ELEGIDOS PARA LA MODELACIÓN Y SIMULACIÓN</b>	<b>29</b>
5.1. Mecanismos presentes en la vida cotidiana	29
5.1.1. Mecanismo Limpiaparabrisas	29
5.1.2. Máquina de coser manual	32
5.1.3. Gato mecánico elevador de vehículo	37
5.1.4. Mecanismo de un Modelo a Escala de una Pala Excavadora	40
5.2. Mecanismos de interés mecánico	44
5.2.1. Mecanismo de un motor alternativo de combustión interna	44
5.2.2. Plataforma elevadora	48

5.2.3.	Tren epicicloidal.....	53
5.2.4.	Leva-palpador.....	56
<b>6.</b>	<b>COSTES DEL PROYECTO.....</b>	<b>59</b>
6.1.	Tipos de gastos.....	59
6.1.1.	Coste del personal.....	59
6.1.2.	Coste del material.....	60
6.2.	Resumen de costes.....	61
	<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>64</b>
	<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>66</b>

## 1. Prefacio

Basado en la experiencia propia del autor del proyecto y de varios de sus compañeros, los alumnos que cursan la materia Teoría de Máquinas y Mecanismos se encuentran con diversas dificultades durante su aprendizaje, a pesar de los recursos didácticos de que se disponen en la actualidad para la impartición de la misma. Una de las principales dificultades es el entendimiento del movimiento y funcionamiento de los mecanismos que, normalmente, son representados en 2D. Esto no solo es debido a la falta de conocimientos del alumnado en cuanto a representación de componentes de los mecanismos y máquinas, sino que muchas veces se debe a la dificultad de visualizar y entender cómo el mecanismo funciona.

Con este proyecto, correspondiente al Trabajo Final de Grado de Ingeniería en Tecnologías Industriales, se pretende aportar nuevos recursos didácticos (modelos virtuales en 3D y videos del funcionamiento de mecanismos y máquinas reales) que faciliten a los alumnos de la asignatura la comprensión de la misma y, además, puedan observar la importancia del estudio de los mecanismos debido a que estos se encuentran, con frecuencia, en la vida cotidiana, y constituyen una parte importante en todas las máquinas utilizadas.

### 1.1. Origen del proyecto

El presente proyecto viene originado por una propuesta del profesor Enrique Zayas Figueras del Departamento de Ingeniería Mecánica (DEM) de la ETSEIB, quien tenía la idea de un proyecto, el cual, utilizando las posibilidades que ofrecen los programas actuales de modelación 3D y simulación del funcionamiento de conjuntos mecánicos, como el SolidWorks, crear modelos virtuales de mecanismos que facilitasen el estudio y aprendizaje de los estudiantes de la asignatura de Teoría de Máquinas y Mecanismos.

La idea fue presentada al alumno que vio como una gran oportunidad de poder utilizar su proyecto de fin de grado y contribuir con su resultado a la formación de futuros ingenieros, a través de facilitar la comprensión de la materia mencionada durante sus estudios en el ámbito de la mecánica. Además, el alumno ha visto la posibilidad de profundizar en el uso del SolidWorks, aspecto esencial en su formación profesional.

## 1.2. Motivación

Este proyecto tiene dos motivaciones que vienen dadas por ambos participantes de él: el alumno y el director.

Por un lado, el director del proyecto siempre ha tenido especial interés en facilitar, en la medida que los recursos de los que dispone le permiten, la enseñanza de sus alumnos y ha puesto empeño en conseguir que sus alumnos entendiesen la materia dada en cada clase.

Por otro lado, el alumno ha conocido de primera mano, durante su formación profesional, las dificultades que tienen los alumnos en el aprendizaje de la asignatura de Teoría de máquinas y mecanismos, sobre todo relacionadas con el entendimiento del funcionamiento de los mecanismos solo observando el esquema en 2D de este. Por ello, con el presente proyecto, se pretende aportar diferentes ejemplos de modelos virtuales de mecanismos comunes, y no tan comunes, y su simulación en 3D, además de sus esquemas en 2D, para apoyar, facilitar y mejorar su aprendizaje y entendimiento de la asignatura.

## **2. Introducción**

### **2.1. Objetivos del proyecto**

El objetivo principal del presente proyecto es crear modelos virtuales tridimensionales de mecanismos diversos (de barras, de levas-palpador y de engranajes) y simular su funcionamiento, como material de apoyo didáctico para la enseñanza y el aprendizaje de la materia Teoría de Máquinas y Mecanismos, aprovechando las posibilidades que los programas modeladores de sólidos ofrecen en la actualidad.

#### **2.1.1. Objetivos específicos**

Para alcanzar el objetivo principal se establecen varios objetivos específicos, que son los siguientes:

- Realizar el estudio del Estado del arte de los recursos virtuales en la enseñanza, exponiendo los fundamentos teóricos de su uso y, en específico, su uso en la enseñanza de Teoría de Máquinas y Mecanismos en universidades españolas.
- Fundamentar la elección de los mecanismos a modelar y simular. Realizar una descripción del funcionamiento de los mecanismos elegidos y explicar los criterios que se han tenido en cuenta en la elección de los mismos.
- Caracterizar y analizar los mecanismos y máquinas escogidos para modelar y simularlos en 3D utilizando herramientas de modelaje.
- Crear modelos virtuales en 3D y simular su funcionamiento mediante la creación de videos utilizando para ello el software SolidWorks y su módulo SolidWorks Motion.
- Extraer conclusiones de los resultados obtenidos con las modelaciones y simulaciones realizadas.

### **2.2. Alcance del proyecto**

Este proyecto pretende apoyar el proceso de aprendizaje de los estudiantes de Teoría de Máquinas y Mecanismos (TMM), en el grado de Ingeniería en Tecnologías Industriales en la

Escola Tècnica Superior d'Enginyeria Industrial de Barcelona (ETSEIB).

Con el objetivo de facilitar la comprensión del funcionamiento de mecanismos, en el proyecto se eligen 8 mecanismos (artefactos que puedan encontrar en el día a día, y otros menos frecuentes), se muestra su fotografía y se realiza la representación normalizada mediante esquemas de símbolos. Seguidamente, se realiza una simulación mediante el PAM (programa de análisis de mecanismos que utilizan los estudiantes mientras cursan la asignatura TMM), se realiza un proceso de modelación en 3D de los mismos, utilizando el programa SolidWorks (programa que aprenden los estudiantes en la materia expresión gráfica), y también se muestra una simulación de su funcionamiento mediante la creación de animaciones de dichos mecanismos, generando un vídeo de los mismos. Así el proyecto abarca las etapas de: selección, esquematización, simulación con el PAM, modelación en 3D y animación del funcionamiento en SolidWorks.

## **3. Estado del arte**

### **3.1. Los recursos virtuales**

El desarrollo de las tecnologías en el último siglo ha supuesto cambios a todos los niveles en nuestro día a día y, todavía, continúa haciéndolo. Se han experimentado cambios en los medios de transporte, en la forma de trabajar (trabajos de forma remota, conexión global, reducción del esfuerzo y/o riesgo en trabajos manuales, etc) y en muchos aspectos de la vida cotidiana, ofreciendo mayores comodidades y facilidades.

Hoy en día, una rama de estas tecnologías está revolucionando la historia. Las Tecnologías de la Información y las Comunicaciones (TIC) han cambiado totalmente la forma en que obtenemos la información y la almacenamos. Antes, todo debía ser guardado por escrito en libros o textos, los cuáles eran almacenados en bibliotecas u otros centros. Para acceder a la información, había que visitar estos centros y consultar los textos o libros de forma presencial. El problema es que la información era reducida, ya que era imposible reunir todos los textos en un único lugar, y la distribución de esta estaba limitada. Además, la búsqueda de los datos entre todos los libros podía ser tediosa y prolongada, al tener que consultar todos los escritos en busca de algo específico.

Internet ha conseguido crear un banco de información infinita, donde en unos segundos se puede acceder a cualquier texto o libro y, además, poder buscar temas generales, proporcionándote como resultado textos donde se cite o se mencionen estos. Cualquier persona tiene acceso a este banco y puede consultarlo.

La información se ha abierto para todo el mundo, hay un flujo de información infinito. Esto ha provocado que más personas puedan recibir formación, puedan acceder a estudios y que ahora su formación y culturización sea mucho más amplia que en el pasado.

Si se mira en el ámbito profesional, este flujo ayuda a la comunicación entre profesionales de ámbitos parecidos que geográficamente antes no podrían haber podido compartir experiencias, investigaciones y conocimientos. Así, la revolución tecnológica avanza a pasos agigantados, al conectar profesionales de todo el mundo.

Además de esto, la ciencia de la computación ha provocado otra revolución: ha conseguido crear materiales virtuales que mejoran y facilitan la transmisión de ideas y conocimientos. Estos materiales provocan que el emisor de información no deba estar presente o explicando los conocimientos que comparte, sino que pueda transmitirlos de una forma rápida y global. Unido a la creación de programas, fomenta que la información y conocimientos fluyan rápidamente entre estudiantes, investigadores, profesores, etc.

### **3.2. Uso de los recursos virtuales para la enseñanza**

Estos cambios que provocan la tecnología han afectado a la sociedad a todos los niveles. Es por ello que la educación no puede estancarse en el pasado, y debe usar estos avances para mejorar y sacar provecho de las prestaciones que ofrecen.

En el ámbito español se ha de añadir un punto importante: la sustitución de las licenciaturas por los grados. La introducción del plan Bolonia ha cambiado los planes de estudio, y en ellos la presencialidad del alumno se ha visto drásticamente reducida en favor del trabajo independiente para la preparación de los estudios. Este nuevo panorama debe hacer reflexionar al profesorado para adaptar su material docente a las actuales necesidades educativas. Así, los alumnos puedan formarse de la misma manera que si asistiesen a laboratorios o clases prácticas.

La fluidez de información y los avances en la tecnología de comunicación consiguen que los estudiantes no necesiten asistir a centros de enseñanza para estudiar, hacer investigaciones o comunicarse con profesores. Ahora pueden hacerlo desde cualquier lugar, accediendo a Internet. Además, la cantidad de información a la que tienen acceso es sumamente mayor a la que se tenía en el pasado.

Todas las universidades y centros educativos, o prácticamente todos, de todos los niveles tienen una plataforma virtual. Los Moodle (plataforma virtual) son una herramienta de gestión de aprendizaje online. En él, los profesores y estudiantes pueden interactuar y compartir información. Estas herramientas mejoran la comunicación entre docentes y alumnos, y amplían la educación de estos últimos, no limitándola a solo las clases. Gracias a este tipo de herramientas el estudiante tiene un lugar dónde encontrarse e interactuar con compañeros, buscar archivos o documentos que refuercen y complementen su estudio y encontrar tareas que

el profesor pueda encargar para su aprendizaje autónomo.

Por otra parte, los profesores y docentes pueden utilizar los avances en materiales visuales como apoyo a sus enseñanzas en clases presenciales. Es un hecho que este tipo de materiales con frecuencia transmiten ideas y contenidos más fácilmente que las descripciones verbales, como describen diferentes estudios en este ámbito. [1]

El uso de gráficos, presentaciones visuales y fotografías, entre otros, no solo facilita el aprendizaje y entendimiento de los alumnos sino que también hace las clases más amenas para los estudiantes. Por ello, se ha de fomentar el uso de estos recursos virtuales en la enseñanza e investigar cómo utilizar los nuevos avances en la educación, como por ejemplo la realidad virtual que se prevé que creará un gran impacto en el modelo de aprendizaje. [2]

Un ejemplo de cómo la realidad virtual está afectando en la educación es el caso de la medicina. Específicamente, en el ámbito de la cirugía la realidad virtual fomenta la formación de estudiantes más preparados con mejores habilidades en técnicas complejas como la endoscopia, la laparoscopia y la navegación endovascular. El uso de estas tecnologías ha demostrado que reduce la duración de las operaciones quirúrgicas y mejora el desempeño de los cirujanos, como conclúan los autores del artículo *Entrenamiento en realidad virtual para complementar el entrenamiento estándar en cirujanos practicantes con experiencia laparoscópica previa limitada*. [3]

Existen iniciativas que buscan la unión entre la tecnología y la educación. El concepto EdTech (Education Technology) nace al descubrir cómo las herramientas tecnológicas podían mejorar el sistema educativo. EdTech busca sacar el máximo provecho a las herramientas tecnológicas y aplicarlas al proceso educativo para mejorar las formas de enseñanza de los docentes y facilitar el aprendizaje de los estudiantes. Esta iniciativa no busca sustituir la labor de los docentes sino brindarles más herramientas a estos para emplear estrategias enfocadas al aprovechamiento de los recursos y la información disponible para incrementar el rendimiento de las clases. [4]

### **3.3. Los recursos virtuales en la enseñanza de Teoría de Máquinas y Mecanismos**

Los Moodle han fomentado la aparición de herramientas virtuales específicas, creadas por los docentes, que refuerzan el estudio de sus alumnos. Suelen llamarse laboratorios virtuales, y en ellos los profesores cuelgan cuestionarios, problemas con resolución, imágenes, etc. En algunas ocasiones, son creadas herramientas más interactivas, más visuales, que se hagan más ameno y entendedor para el estudiante. En el caso de la ingeniería mecánica, es de especial importancia el uso de estas herramientas visuales, ya que acercan al estudiante a la realidad y eliminan o reducen las dificultades que la falta de capacidad espacial pueda provocar.

En algunos casos, los laboratorios virtuales existentes son páginas webs que no están asociadas a ninguna universidad, sino que un grupo de estudiantes, o docentes han creado esta herramienta para todos los estudiantes que quieran profundizar en este tema [5] [6]. Otros, han sido diseñadas por profesores de universidad y están asociados a estas.

En el caso de la Teoría de Máquinas y Mecanismos, algunas universidades tienen herramientas virtuales relacionadas con este tema. La Universitat Politècnica de Catalunya (UPC), por ejemplo, tiene un Programa de Análisis de Mecanismos (PAM) [7], diseñado por el profesorado, que sirve para la modelación y simulación de mecanismos. Es de acceso gratuito, y de fácil uso, sobre todo permite modelar y simular el funcionamiento de mecanismo de barras que puede ser accionado por transmisiones dentadas, y de correas o cadenas. En la Figura 3-1 se muestra una ventana del PAM, en particular la que corresponde a la simulación del mecanismo de un mecanismo modelado en dicho programa.

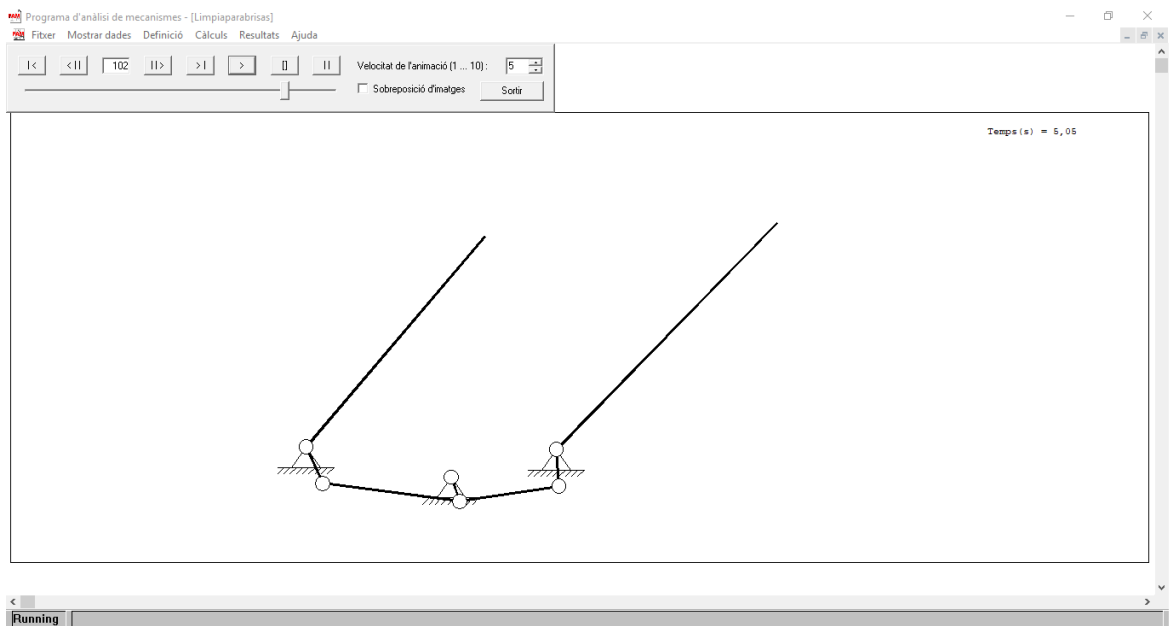


Figura 3-1. Pantalla del Programa PAM con un mecanismo de barras ensamblado.

En la Universidad Politécnica de Madrid (UPM) se ha desarrollado un laboratorio virtual [8] donde se abarcan temas diversos ámbitos dentro de la ingeniería (física, química, materiales, etc). Este contiene cuestionarios, problemas a resolver y otros ejercicios hechos en un soporte de simulación virtual, haciéndolo más visual como se puede apreciar en la Figura 3-2.

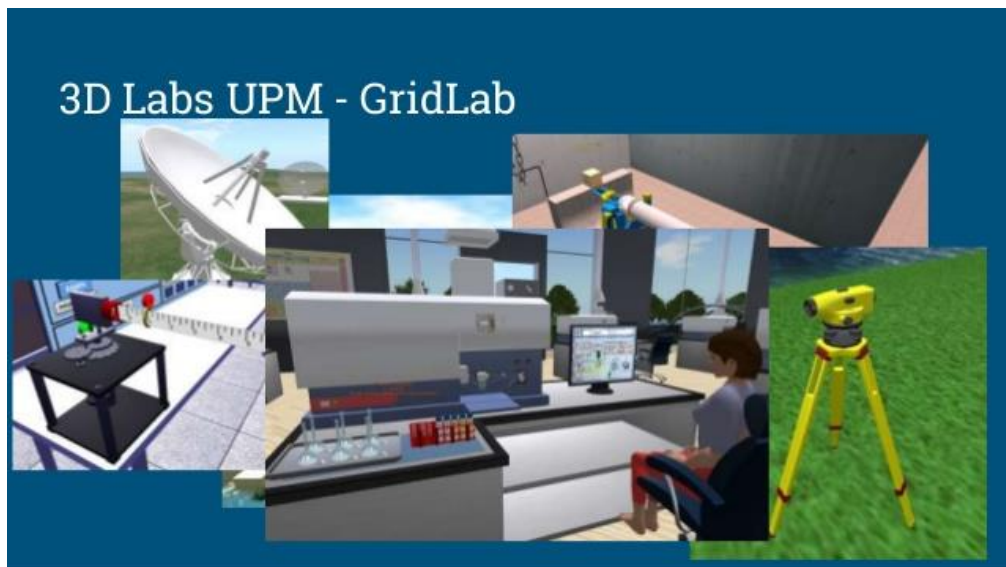


Figura 3-2. Laboratorio virtual de la Universidad Politécnica de Madrid.

La Universidad Carlos III de Madrid (UC3M), también ha creado una serie de simulaciones virtuales disponibles en vídeo (Figura 3-3) de diferentes mecanismos usuales (mecanismo pistón, motor de Stirling, etc) [9].

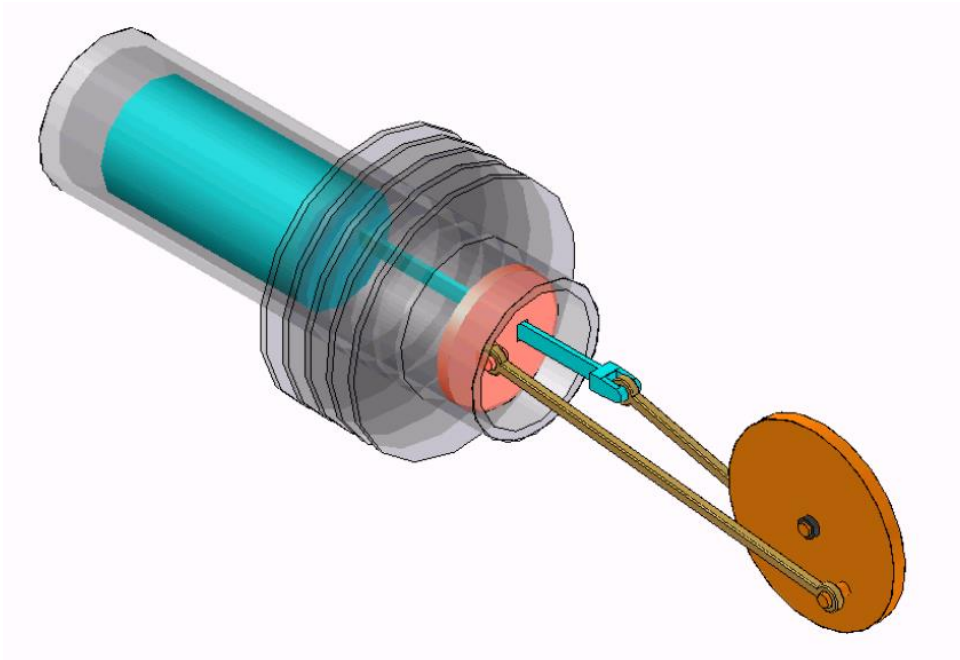


Figura 3-3. Modelo virtual de un motor Stirling desarrollado por la UC3M.

Por último, cabe mencionar la Universidad Jaume I de Castellón, la cual tiene una enciclopedia pública sobre Ingeniería Mecánica, llamada Mecapedia [10]. Esta enciclopedia trata sobre temas diversos dentro de la mecánica, donde se puede encontrar la explicación de sistemas mecánicos o mecanismos de gran interés (como pueden ser mecanismos de Watt, Hoekens o Grashof) y su modelación y simulación en 2D, como se puede observar en la Figura 3-4.

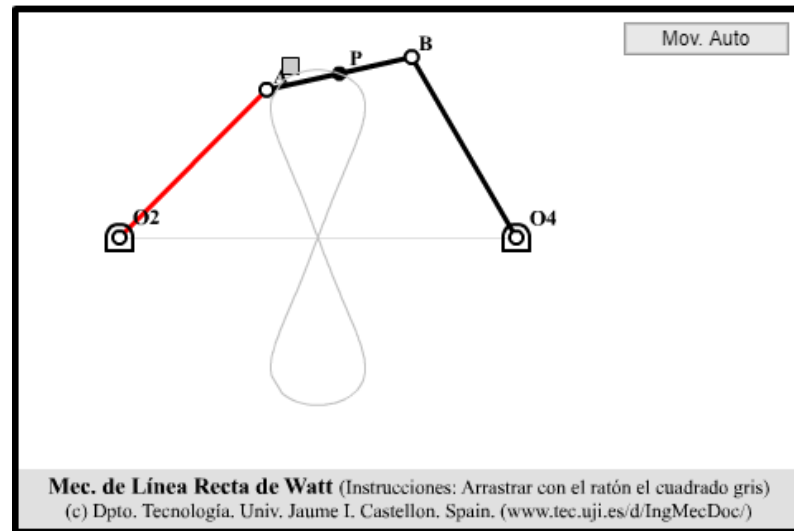


Figura 3-4. Pantalla de la enciclopedia Mecapedia de la Universidad Jaume I de Castellón.

El presente proyecto busca utilizar las herramientas informáticas de que se disponen en la actualidad con el objetivo de aportar recursos virtuales que permitan mejorar el proceso de autoaprendizaje de los estudiantes de Ingeniería Industrial, en la asignatura de Teoría de Máquinas y Mecanismos. En este caso, se modelan diferentes mecanismos y se presentan junto a su esquema de símbolos para que los alumnos fomenten la capacidad de asociación entre esquemas de éstos y su funcionamiento. Este proyecto pretende acercar a los alumnos a la realidad de la ingeniería mecánica que nos rodea o que podrían encontrar una vez finalicen sus estudios.

## 4. Procedimiento de selección y modelación de máquinas y mecanismos

A continuación se exponen un diagrama de flujo (Figura 4-1) que expone el procedimiento que se sigue en el presente proyecto para realizar la selección, modelación y simulación de los mecanismos expuestos en el presenta trabajo. A continuación se explican las etapas y subetapas contenidas en dicho procedimiento y que finaliza con la generación de un video que muestra el funcionamiento de los mecanismos, modelados en tres dimensiones.

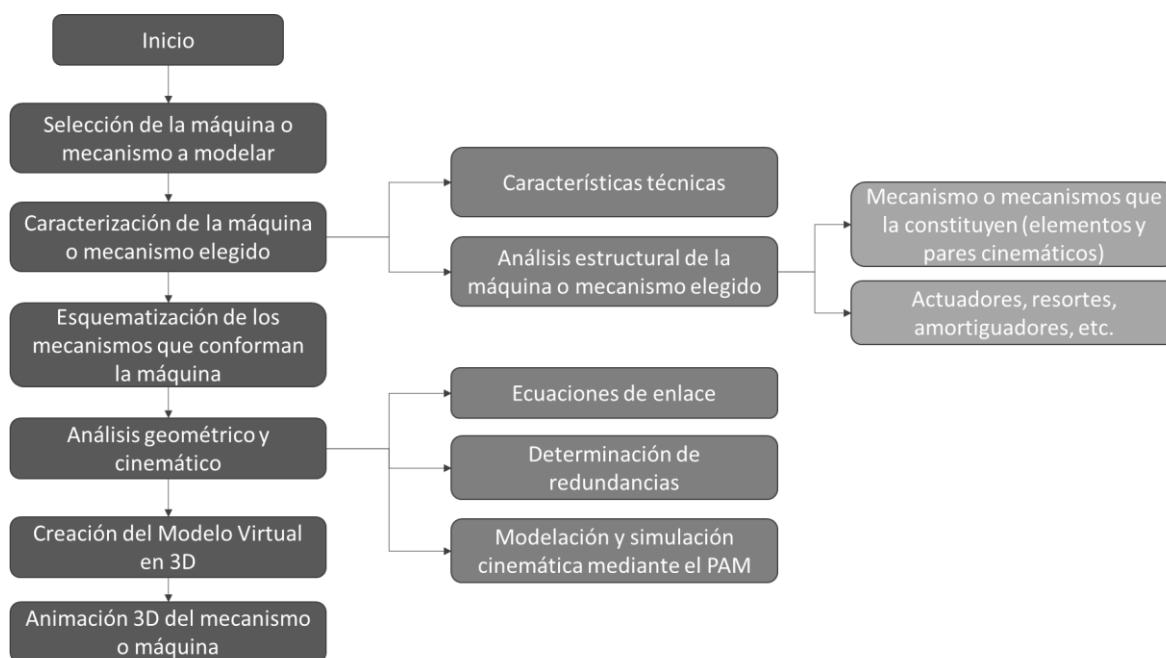


Figura 4-1. Procedimiento seguido para la selección, modelación y simulación de las máquinas y mecanismo expuestos en el trabajo.

Los diferentes pasos seguidos para realizar el modelaje y simulación son:

- Selección de la máquina o mecanismo: para ello se ha establecido unos criterios (los cuales se detallarán en el subapartado 4.1) para elegir qué mecanismos se han considerado más interesantes y útiles para la autopreparación de los estudiantes de la materia TMM.
- Caracterización de la máquina o mecanismo elegido: se han estudiado las características técnicas y realizado un análisis estructural de la máquina o mecanismo para identificar

los diferentes elementos que lo componen.

- Esquemmatización de los mecanismos que conforman la máquina: una vez caracterizado se ha realizado el esquema de símbolo, utilizando la simbología normalizada, la inclusión de coordenadas de posición y de orientación y la indicación de puntos notables en el mecanismo con la finalidad de facilitar, posteriormente, la explicación de su funcionamiento.
- Descripción del funcionamiento del mecanismo o máquina: una vez realizado el esquema se pasa a analizar y explicar su funcionamiento. Se pretende facilitar el proceso de entendimiento del funcionamiento, y la explicación de los grados de libertad que posee, así como la presencia o no de redundancias.
- Análisis geométrico y cinemático: con este análisis se deducen ecuaciones de enlace que permitan estudiar la evolución de coordenadas de interés del mecanismo, según los parámetros geométricos del mismo, y se modelará y simulará con el programa PAM para estudiar su funcionamiento. Aportando gráficos que relacionan la evolución de las coordenadas citadas.
- Creación del Modelo Virtual en 3D: comprobados los parámetros geométricos y el funcionamiento mediante el PAM, entonces se utiliza el software CAD SolidWorks para modelado mecánico 3D, para crear el modelo virtual del mecanismo o máquina.
- Animación 3D del mecanismo o máquina: utilizando el paquete SolidWorks Motion Simulation se conseguirá el vídeo de la simulación del funcionamiento del artefacto. Dicha animación facilitará la comprensión del funcionamiento del artefacto estudiado.

#### **4.1. Criterios para la selección de la máquina o mecanismo**

Como se comentó al inicio, el objetivo del proyecto es crear modelos virtuales como material de apoyo didáctico para la enseñanza y el aprendizaje de la materia Teoría de Máquinas y Mecanismos, que permitan reforzar el autoaprendizaje de los estudiantes de dicha materia y, a la vez, motivarlos y acercarlos a la aplicación práctica de la Ingeniería Mecánica. Por ende, los mecanismos modelados y simulados en este proyecto se han escogido de manera intencional y cuidadosa, siguiendo los objetivos marcados en el proyecto.

Durante la fase inicial de identificación de los mecanismos o artefactos a modelar, se partió de

dos criterios:

- El primero, elegir mecanismos presentes en la vida cotidiana, algunos de los cuales son mecanismos comunes que los estudiantes pueden identificar de manera fácil (como son, por ejemplo, mecanismos contenidos en juguetes o utilizados en un coche: mecanismo limpiaparabrisas de un coche y un gato mecánico) y, así, fomentar una unión entre el estudio de la materia y su aplicación práctica. La búsqueda de estos artefactos podría motivar a los estudiantes a que empiecen a identificar ellos mismos mecanismos en las máquinas o artefactos que utilizan en su día a día, y así consigan un entendimiento mayor del funcionamiento y uso de estos. Esta última idea se considera muy interesante, debido a que muchos estudiantes finalizan sus estudios sin saber cuál es la utilidad de muchas asignaturas que estudian durante el grado, ni si en algún momento darán uso a lo aprendido.
- El segundo criterio es la elección de otros mecanismos o artefactos de especial interés mecánico desde el punto de vista de enriquecer el espectro de conocimiento sobre máquinas y mecanismos. Estos artefactos incluyen elementos mecánicos interesantes para el estudio, que normalmente no se identifican a simple vista en las máquinas más comunes (como puede ser el mecanismo de leva-palpador, contenido en el interior de un motor de combustión interna) o los trenes de engranajes de un reductor de engranajes, etc., aunque sí se estudian en el temario de Teoría de Máquinas y Mecanismos.

## 4.2. Creación del Modelo Virtual en 3D

Una vez caracterizados los mecanismos, se debían modelar para obtener su prototipo virtual en 3D. Para este fin, se ha utilizado el software CAD para modelado mecánico en 3D SolidWorks.

La modelación de la mayoría de elementos no han necesitado de un alto conocimiento en herramientas que proporciona SolidWorks, pero algunos han necesitado mayores habilidades y han requerido de consultas a manuales del software, como los engranajes, las roscas y las levas.

En el proceso de creación de los modelos virtuales en 3D se ha sugerido y utilizado un código de colores que destina un color a cada tipo de elementos (manivelas, bielas, correderas, ruedas dentadas, etc.), con ello se pretende facilitar la rápida identificación de los elementos que constituyen un mecanismo o máquina.

#### 4.2.1. Modelación de elementos mecánicos de geometría compleja

##### Engranajes

El modelaje de engranajes ha requerido de una previa consulta de manuales y tutoriales de cómo construirlos [11] y cómo conseguir el engranaje entre ellos cuando se realiza el ensamblaje.

Para realizar el modelo, primeramente se construye un cilindro con el diámetro exterior del engranaje. Una vez se tiene el cilindro, se dibuja sobre la base del cilindro tres círculos con centro en el centro del cilindro del diámetro exterior, primitivo e interior (Figura 4-2).

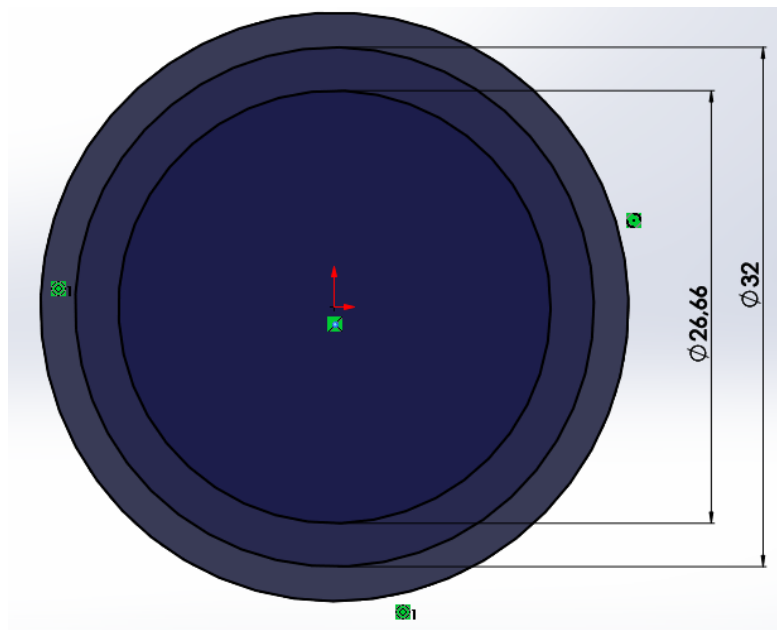


Figura 4-2. Círculos de diámetro exterior, primitivo e interior del engranaje.

Sobre el círculo primitivo se dibujan cuatro círculos (Figura 4-3). Todos los círculos tienen su centro sobre el círculo del diámetro primitivo y su centro también es coincidente con el círculo contiguo (de los cuatro que se dibujan). Además, estos tendrán de diámetro el paso circular.

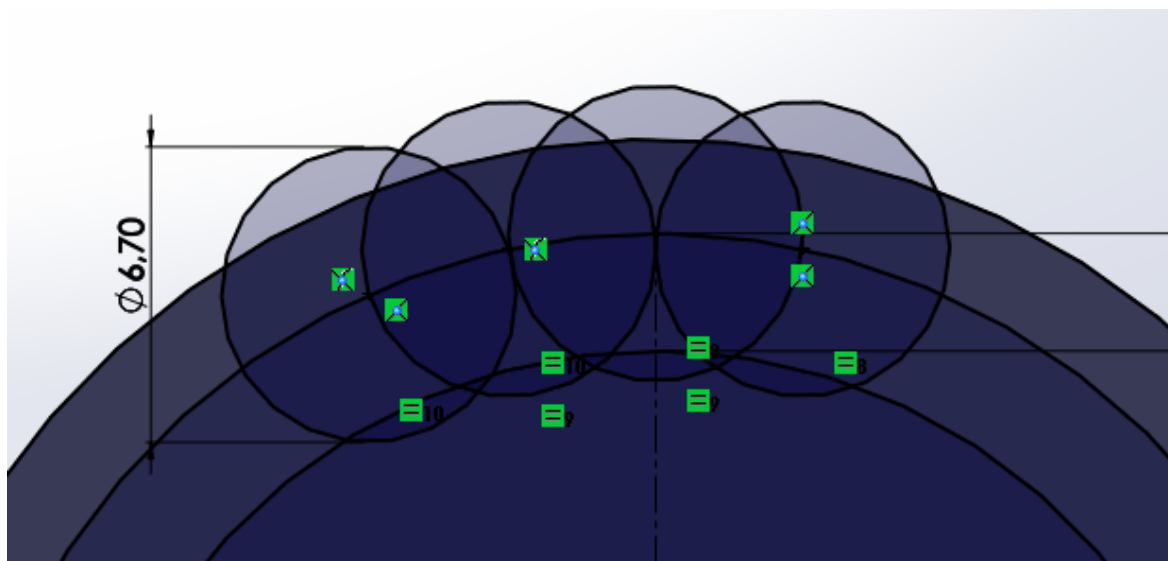


Figura 4-3. Círculos correspondientes al paso circular.

Una vez dibujado los cuatro círculos, se pasa a eliminar las líneas sobrantes hasta conseguir el perfil del hueco entre dientes del engranaje (Figura 4-4).

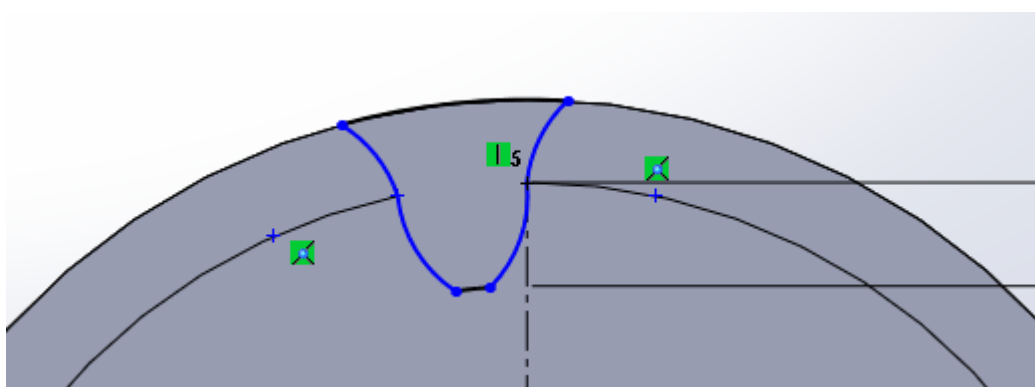


Figura 4-4. Perfil del hueco entre dientes.

Con este perfil, se extrae un corte por todo el cilindro y se tendrá uno de los huecos entre dientes. Seguidamente, realizamos una matriz circular y se tendrá el engranaje finalizado (Figura 4-5).

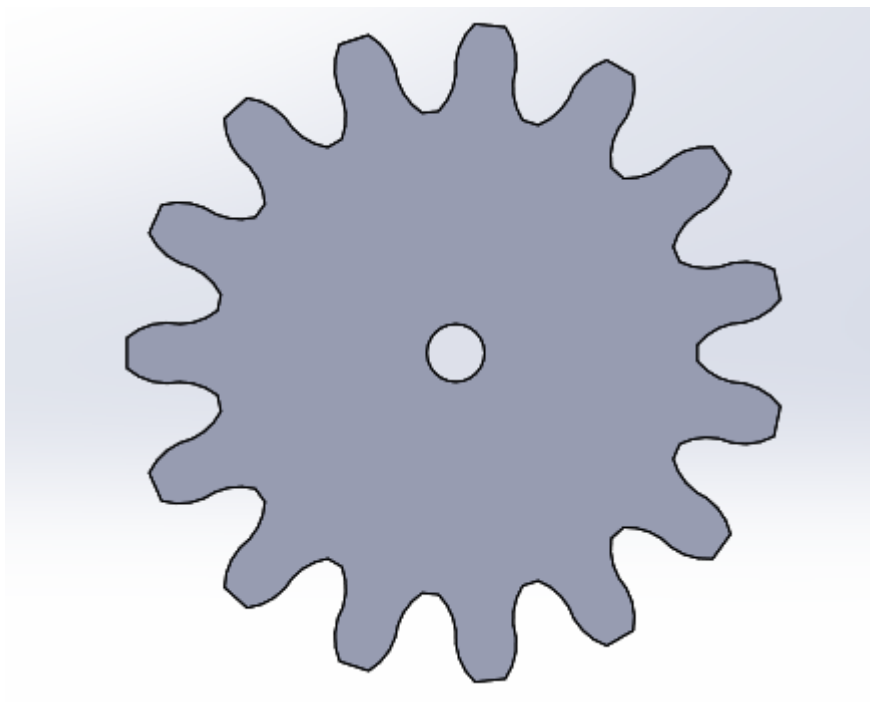


Figura 4-5. Engranaje finalizado.

Para el ensamblaje de los engranajes, primero, se ha de imponer tangencia entre un diente de cada engranaje. Seguidamente, se ha utilizar la relación de posición “Engranaje” que se encuentra en “Relaciones de posición mecánicas” e introducir la relación de dientes entre ellos (Figura 4-6). Finalmente, se elimina la relación de tangencia entre dientes. [12]

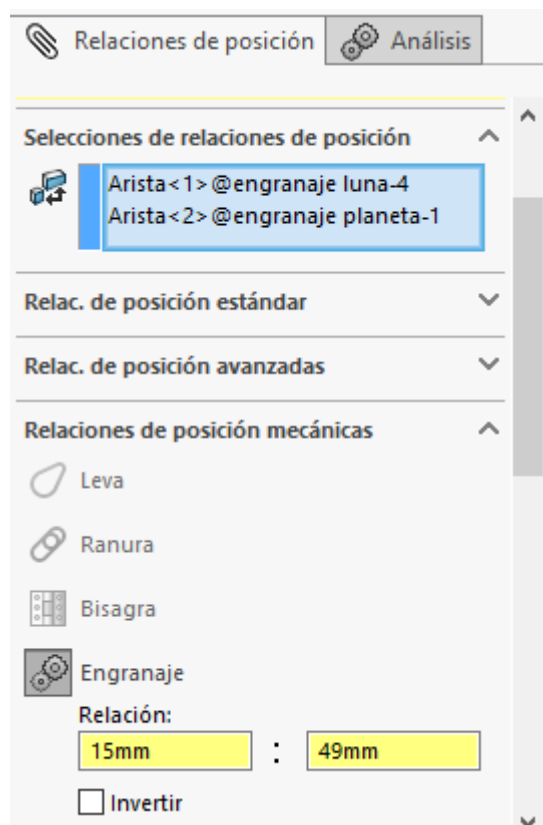


Figura 4-6. Relación de posición mecánica de engranaje.

### Eje roscado

El modelaje del eje roscado ha requerido de una previa consulta de manuales y tutoriales [13]. Para empezar, se dibuja el cilindro que corresponderá al eje y, sobre él, se dibuja una hélice con la opción “Altura y paso de rosca” y se introduce la longitud de la rosca (altura) y el paso de este (Figura 4-7).

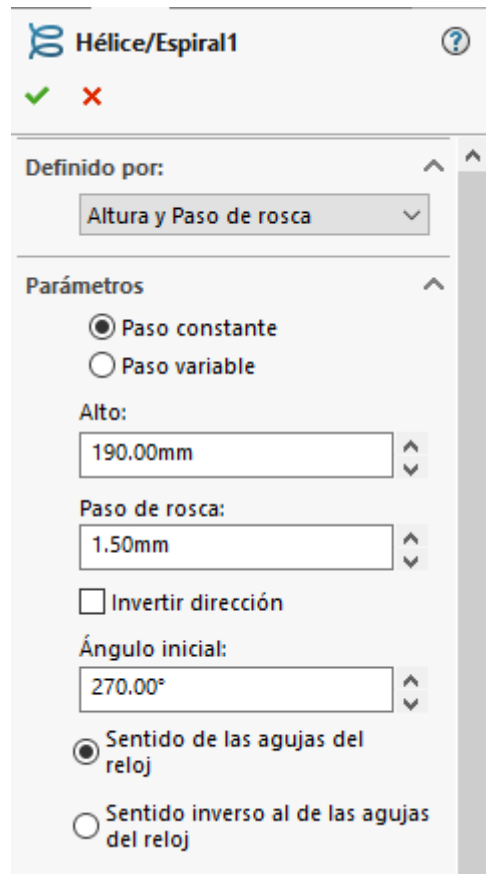


Figura 4.7. Construcción de la hélice para el eje roscado.

Seguidamente, se construye el perfil de corte de la rosca. Este croquis se sitúa en un plano que cortaría a lo largo en dos al cilindro (perpendicular a su base). Se construye un triángulo con círculo circunscrito. El centro de este círculo debe situarse en el extremo del cilindro y el diámetro del círculo (donde se circunscribe el triángulo) debe tener el tamaño del paso circular (Figura 4-8).

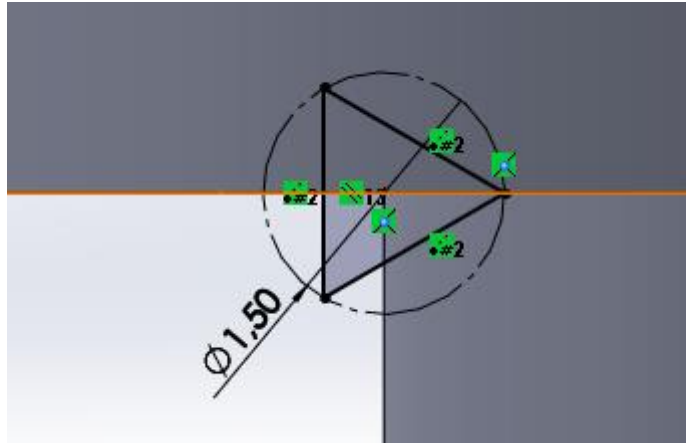


Figura 4-8. Perfil de corte para el eje roscado.

Se realiza un corte barrido del perfil siguiendo la hélice anteriormente dibujada y se tendría finalizado el eje roscado.

### Levas

El modelaje de la leva ha requerido de una previa consulta de manuales y tutoriales [14]. Para empezar, se dibuja el círculo base. Seguidamente, se divide el círculo en varias partes. El número de partes en que se divide depende de cada cuántos grados (intervalos) se tenga la distancia entre el palpador y la leva. A continuación, se dibujan líneas de una longitud correspondiente a la elevación del palpador respecto a la leva. En el extremo de estas líneas, se dibuja el perfil del palpador. Finalmente, se dibuja un spline que sea coincidente con los perfiles del palpador y además sea tangente (Figura 4-9). El spline final será el perfil de la leva.

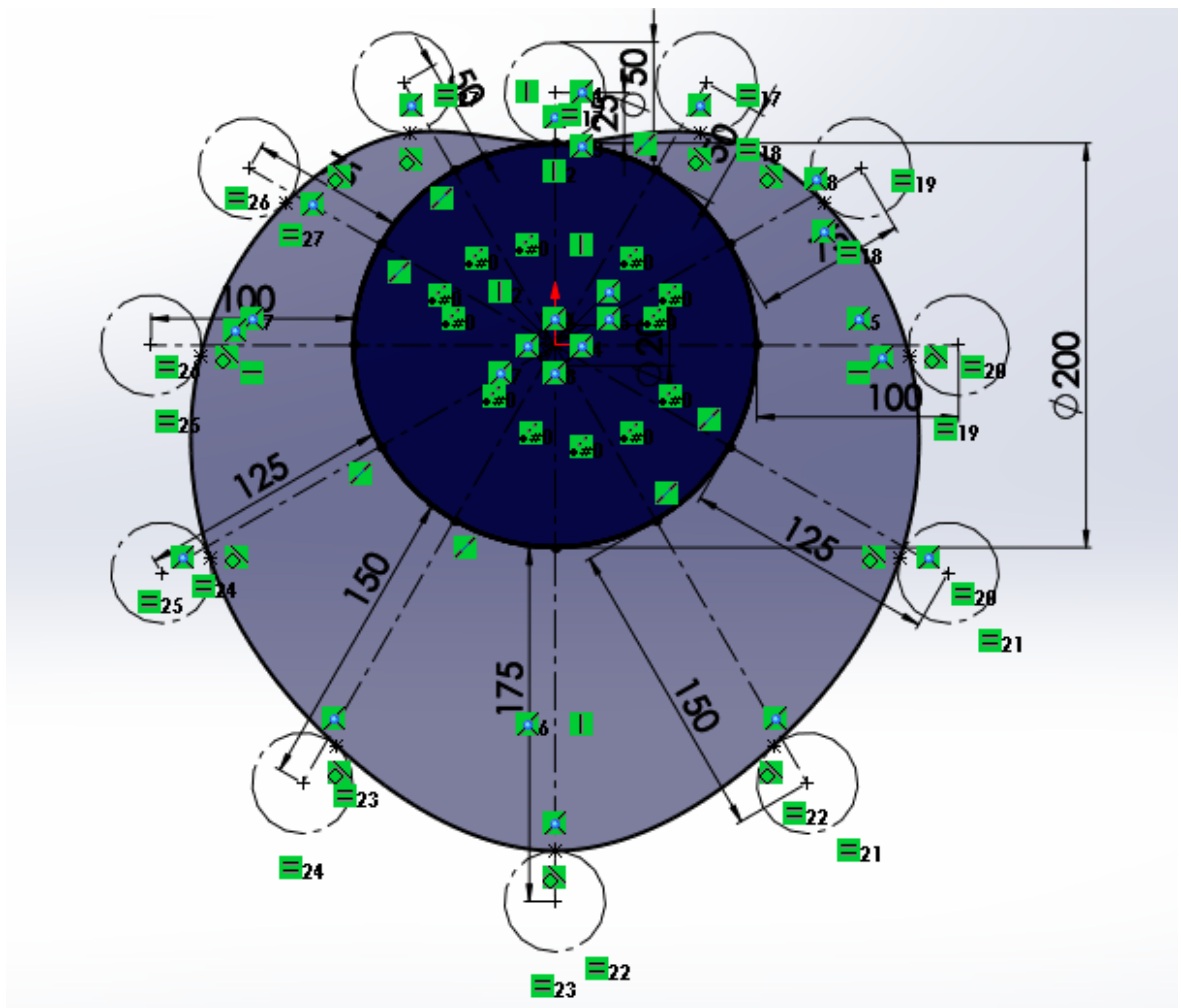


Figura 4-9. Perfil de la leva construida con un spline.

#### 4.2.2. Código de colores para la identificación de elementos

En busca de cómo facilitar y reducir la complejidad del estudio de los modelos virtuales, se ideó un código de colores que busca la fácil identificación por parte de los estudiantes de diferentes elementos que forman un determinado mecanismo. Además, usar colores en los modelos los hace más llamativos y ameno para el estudio.

En la Tabla 4-1 se encuentra los diferentes elementos que se encontraban en los mecanismos modelados, con el nombre simple del color, el nombre técnico y su código en el modelo de color RGB.

Elemento	Color	Color técnico	Modelo RGB		
		(Nomenclatura en inglés) [15] [16]	R	G	B
<b>Biela</b>	Naranja	Vivid orange	232	113	8
<b>Manivela</b>	Verde	Pure lime green	0	255	0
<b>Balancín</b>	Azul	Pure blue	0	0	255
<b>Separador</b>	Amarillo claro	Very light yellow	255	255	128
<b>Palpador</b>	Rojo	Pure red	255	0	0
<b>Pistón</b>	Azul claro	Very light cyan	128	255	255
<b>Rueda pequeña (piñón)</b>	Verde	Strong lime green	0	192	0
<b>Corona dentada</b>	Verde claro	Very pale lime green	192	255	192
<b>Leva</b>	Amarillo claro	Very light yellow	255	255	128
<b>Rodillo</b>	Azul verdoso	Vivid cyan	7	255	251
<b>Planeta (engranaje)</b>	Verde claro	Very light lime green	154	255	151
<b>Elementos terminales</b>	Gris	Grey	180	180	180

Tabla 4-1. Código de colores utilizado para identificar los elementos modelados en 3D.

### **4.3. Creación de la animación del Modelo Virtual en 3D mediante SolidWorks Motion Simulation**

Finalmente, una vez realizado el profundo estudio estructural, geométrico y cinemático del mecanismo y modelado virtualmente para obtener su prototipo tridimensional se realiza el último paso, que es crear la animación del modelo.

Para realizar la animación del modelo se utiliza el paquete SolidWorks Motion Simulation que contiene el software SolidWorks [17]. Con esta herramienta se puede evaluar cómo se comportará y moverá el modelo durante su ciclo operativo mediante el análisis de movimiento. El análisis de movimiento se resuelve con el uso de un enfoque basado en el tiempo para problemas dinámicos y cinemáticos de cuerpos rígidos. Este paquete permite calcular el efecto de:

- Fuerzas
- Resortes
- Amortiguadores
- Gravedad
- Contacto entre componentes

Para simular el funcionamiento de los mecanismos se introduce motores que controlen el o los grados de libertad que disponen estos. La herramienta permite dos tipos de motores: lineales o rotatorios. En este caso se han usado motores rotatorios. A su vez, el paquete permite el uso de motores con diferentes tipos de movimiento (velocidad constante, oscilantes, etc) (Figura 4-10) y permite el cambio de motores en diferentes momentos de la simulación para poder ver el efecto de diferentes motores en una sola simulación.

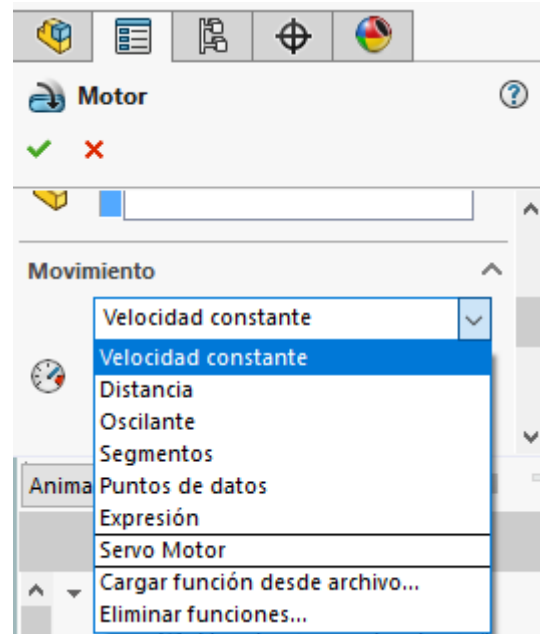


Figura 4-10. Tipos de movimientos del motor disponibles en SolidWorks Simulation.

La simulación de los mecanismos, además, permitía comprobar el correcto funcionamiento y ensamblaje de los componentes, pudiendo apreciar errores de montaje o de medidas al visualizar el comportamiento del modelo durante su animación.

La herramienta contiene la opción de guardar la animación en diferentes formatos, algunos de alta definición (los que se han utilizado para grabar las simulaciones). El formato del archivo vídeo que proporciona es el de AVI, formato usual para vídeos y compatible con cualquier reproductor vídeo.

## 5. Mecanismos elegidos para la Modelación y Simulación

Para describir los mecanismos modelados y simulados primero se empieza por los mecanismos elegidos para fomentar la aproximación del estudiante a máquinas que puede encontrar en su entorno con mayor facilidad, para luego seguir con los mecanismos elegidos que no son tan fáciles de identificar, pero que son de gran interés desde el punto de vista mecánico.

### 5.1. Mecanismos presentes en la vida cotidiana

#### 5.1.1. Mecanismo Limpiaparabrisas

El primer mecanismo seleccionado es el limpiaparabrisas de un coche (Figura 5-1), artefacto frecuentemente utilizado en los automóviles para barrer el agua del parabrisas cuando se circula con lluvia y es fácil de identificar en la práctica. El mecanismo mostrado consta de un motor eléctrico con un reductor de tornillo sinfín (no visibles) como actuador (garantizando 1 grado de libertad forzado), que acciona un mecanismo de barras compuesto por dos cuadriláteros articulados.

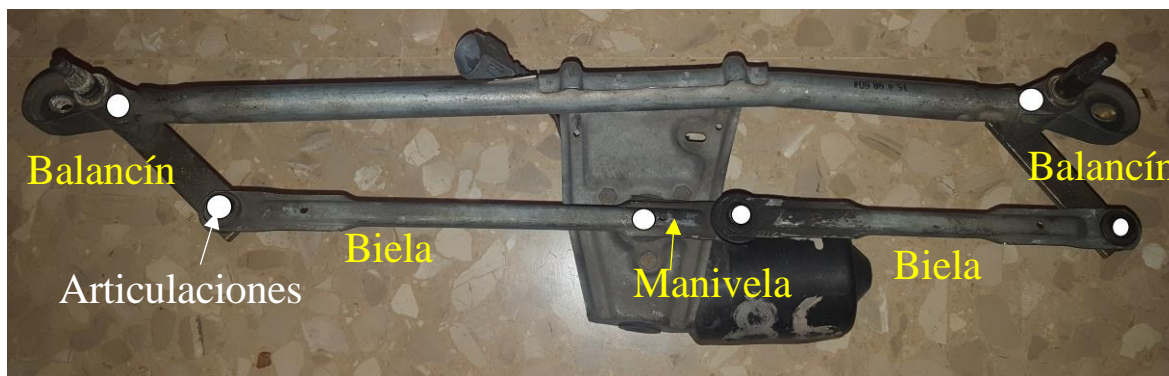


Figura 5-1. Fotografía del mecanismo limpiaparabrisas de un coche, sin incluir las barras con las escobillas.

Una vez identificados sobre el mecanismo los elementos y enlaces que lo constituyen (Figura 5-1), se realiza el esquema de símbolos correspondiente, mostrado en la Figura 5-2.

Utilizando dicho esquema, se describe su funcionamiento, que es el siguiente: la manivela  $O_1P$  (solidaria al eje motor) está articulada en el punto  $O_1$ , y gira alrededor de dicho punto. Su

rotación permite el movimiento de dos cuadriláteros articulados ( $O_1PQO_2O_1$  y el  $O_1PSO_3O_1$ ), formados por la manivela común, las bielas PQ y PS y los balancines  $QO_2$  y  $SO_3$ . Las escobillas del limpiaparabrisas (no mostradas en la Figura 5-1), que van montadas en los balancines del mecanismo (Figura 5-4), son las que recorren el cristal del coche para barrer el agua y posible basura que se deposita en este. Estas escobillas están unidas a un brazo que se monta solidario a los balancines (en los puntos  $O_2$  y  $O_3$ ) que tiene el mismo movimiento oscilatorio que éstos.

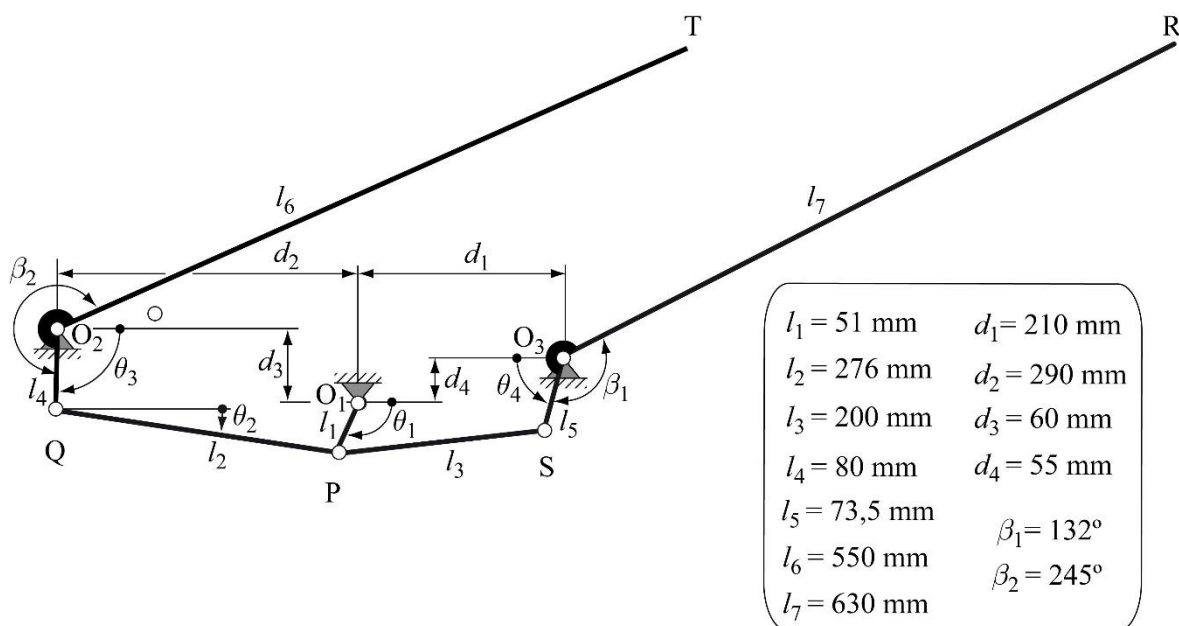


Figura 5-2. Esquema de símbolo y parámetros geométricos del mecanismo limpiaparabrisas.

Con el esquema acabado, se pasa a estudiar el análisis geométrico y cinemático del mismo. Para su estudio se decide utilizar el vector de coordenadas generalizadas  $q = \{\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4\}^t$  que permiten describir su configuración. Como se ha dicho antes, el mecanismo consta de 1 grado de libertad (lo que se puede, además, comprobar por inspección directa, anulando la velocidad de rotación de la manivela ( $\dot{\theta}_1 = 0$ ), que hace fijo el punto P y por tanto quedan en reposo ambos cuadriláteros), por lo que se pueden obtener 3 ecuaciones de enlace a partir de la condición de cierre del anillo  $O_1PQO_2O_1$  y de la condición de invariabilidad de la distancia entre los puntos P y S de la biela. El vector de ecuaciones de enlace es el siguiente:

$$\Phi(q) = \left\{ \begin{array}{c} l_4 \cos \theta_3 + l_2 \cos \theta_2 - l_1 \cos \theta_1 - d_2 \\ -l_4 \sin \theta_3 - l_2 \sin \theta_2 + l_1 \sin \theta_1 + d_3 \\ \sqrt{(l_1 \cos \theta_1 + d_1 - l_5 \cos \theta_4)^2 + (d_4 + l_1 \sin \theta_1 - l_5 \sin \theta_4)^2} - l_3 \end{array} \right\} = 0 \quad (5.1)$$

Para la determinación del número de redundancias se aplica el criterio de superposición de restricciones (Criterio de Grübler-Kutzbach) a todo el mecanismo:

$$5 \text{ sólidos móviles} \times 3 \text{ gdl/sólido} + 7 \text{ articulaciones} \times -2 \text{ gdl/artic.} = 1 \text{ gdl} \quad (5.2)$$

Así, el número de gdl (grados de libertad) determinado por inspección directa coincide con el determinado por el criterio de Grübler-Kutzbach, lo que indica que el mecanismo no presenta redundancias totales.

Para el estudio cinemático se modela y simula el funcionamiento del mecanismo en el PAM (Programa de Análisis de Mecanismos), comprobando la corrección de las dimensiones del mismo, y se muestra el gráfico de ángulo de giro de las barras donde se montan las escobillas respecto al ángulo de giro  $\theta_1$  de la manivela y ver el valor del ángulo de barrido de dichos brazos (Figura 5-3).

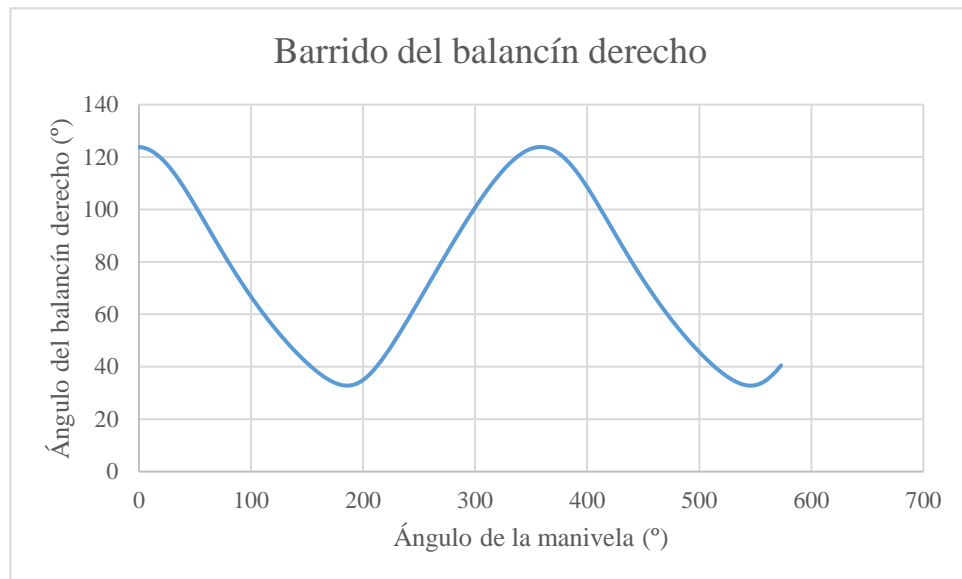


Figura 5-3. Gráfico de ángulo  $\theta_4$  de barrido del balancín derecho respecto del ángulo girado por la manivela  $\theta_1$ .

Como se puede observar, el valor máximo de la barra es alrededor de  $120^\circ$  y el valor mínimo es de  $30^\circ$ . La diferencia, que es  $90^\circ$  correspondería al ángulo de barrido de las escobillas, que pasan de estar horizontales a verticales y viceversa.

Con los datos geométricos comprobados, se pasa a crear el modelo virtual 3D del mecanismo utilizando el software SolidWorks, realizando un proceso de ingeniería inversa (Figura 5-4).

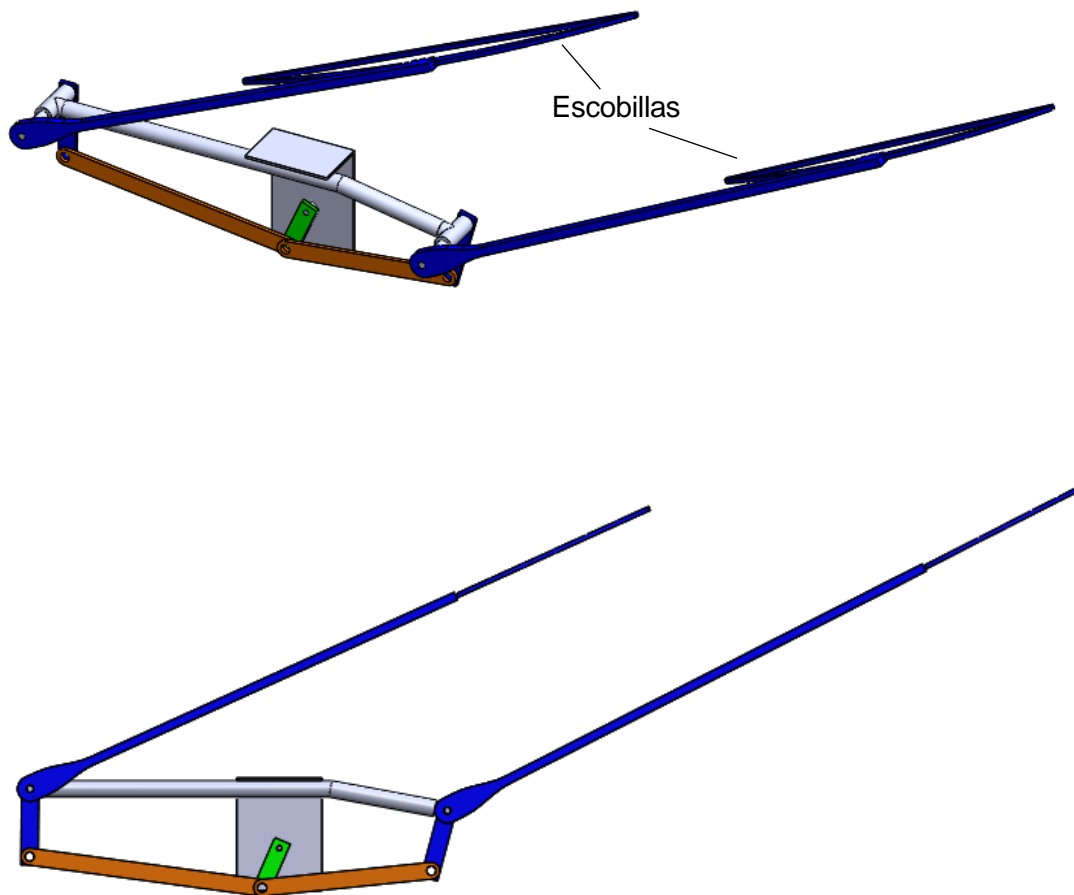


Figura 5-4. Modelo virtual mecanismo limpiaparabrisas: vista trimétrica (imagen superior) y vista en alzado (imagen inferior).

### 5.1.2. Máquina de coser manual

El segundo mecanismo seleccionado es el de un modelo a escala de una máquina de coser manual (Figura 5-5), que es más bien un juguete. Esta máquina se acciona haciendo girar el volante (que es a la vez solidario a una corona con dentado interior), de forma manual

(garantizando 1 grado de libertad, forzado). Dicha corona está engranada con otra rueda de diámetro mucho más pequeño (piñón), y en la cual hay solidaria una manivela que transmite este movimiento a un cuadrilátero articulado.

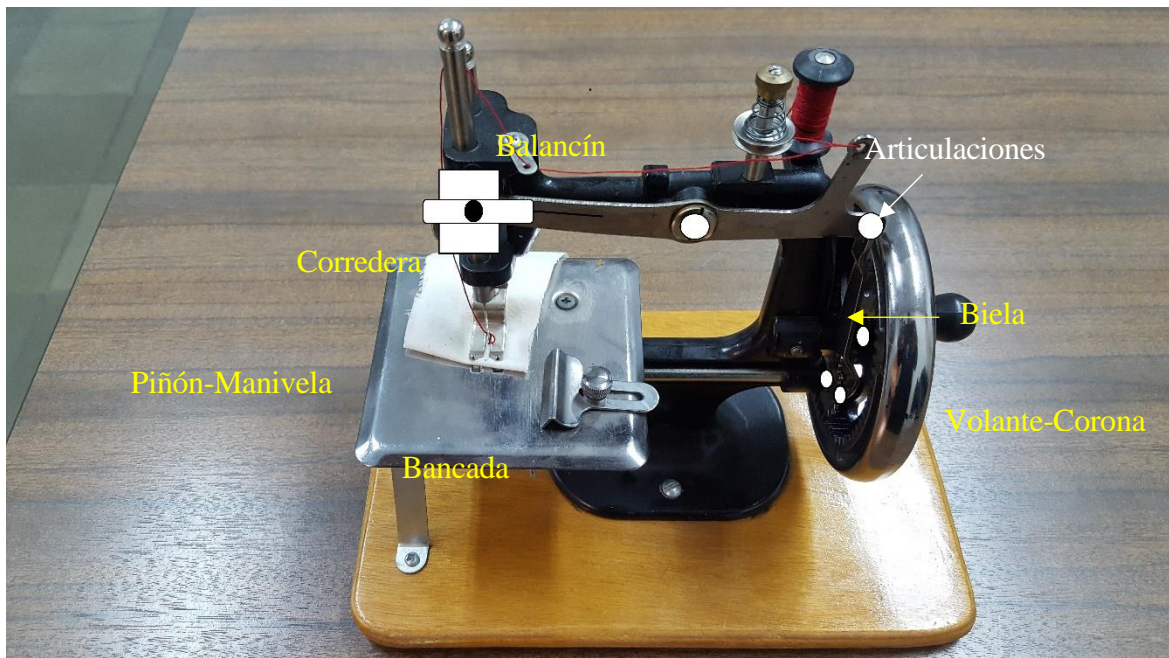


Figura 5-5. Fotografía de la máquina de coser manual.

Una vez identificados sobre el mecanismo los elementos y enlaces que lo constituyen (Figura 5-5), se realiza el esquema de símbolos correspondiente, mostrado en la Figura 5-6.

Utilizando dicho esquema (Figura 5-6), se describe su funcionamiento, que es el siguiente: manualmente se acciona la corona con dentado interior y número de dientes de  $z_2 = 56$ . La corona transmite este movimiento a un piñón de  $z_1 = 22$  dientes, el cual constituye a la vez la manivela  $O_1P$  que rota alrededor de la articulación  $O_1$  y está unida a la biela  $QP$  en el punto  $P$ . La biela está unida en su extremo  $Q$  al balancín  $RQ$ , el cual rota alrededor de la articulación  $O_3$  ubicada en el centro de dicha barra. El extremo del balancín contiene una guía a la que se une el pasador  $R$  contenido en corredera, formando un enlace guía-pasador. La corredera está unida a una guía vertical, formando un enlace prismático. Es precisamente en la corredera donde se monta la aguja de coser de la máquina, que haría un movimiento de translación vertical alternativo. Si se anula la velocidad  $\dot{\theta}_1 = 0$ , el punto  $P$  queda fijo, se tiene un triángulo  $PQO_3$  de lados fijos, así el punto  $Q$  es fijo, y por tanto lo es el punto  $R$ , quedando fijo todo el

mecanismo. De modo, que por inspección directa se ve que el mecanismo tiene 1 gdl.

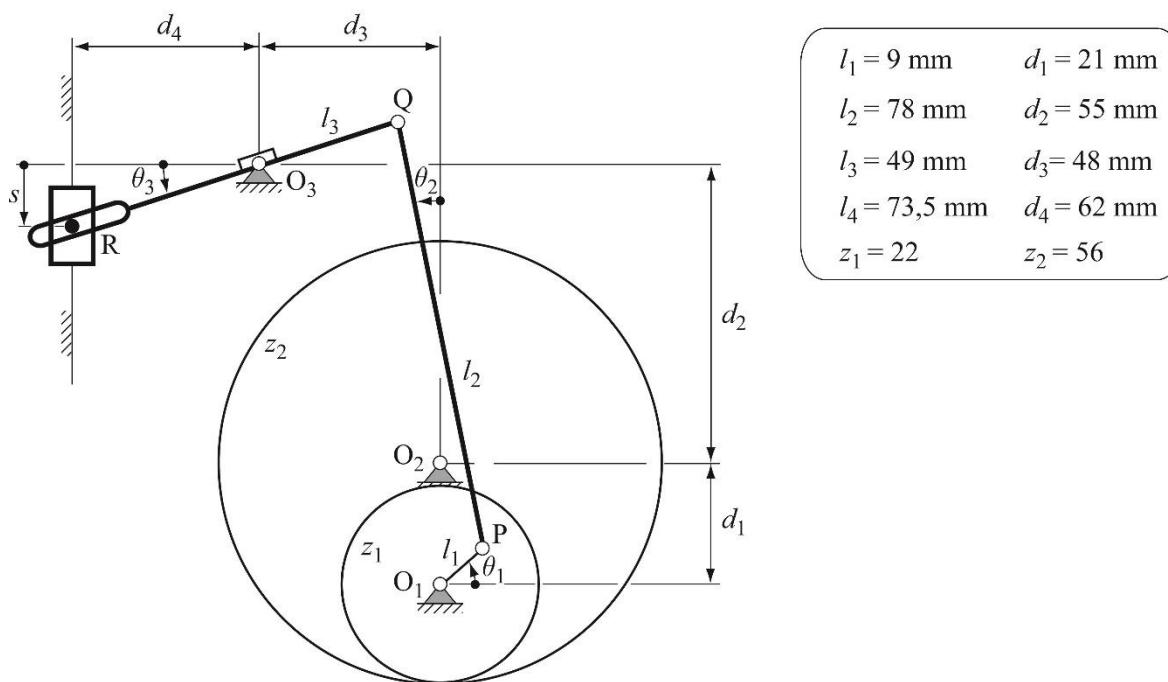


Figura 5-6. Esquema de símbolo y parámetros geométricos del mecanismo de la máquina de coser manual.

Para la determinación del número de redundancias se aplica el criterio de superposición de restricciones (Criterio de Grübler-Kutzbach) a todo el mecanismo:

$$5 \text{ sólidos móviles} \times 3 \text{ gdl/sólido} + 5 \text{ articulaciones} \times -2 \text{ gdl/artic.} + 1 \text{ par prismático} \times -2 \text{ gdl/prism} + 1 \text{ transmisión} \times -1 \text{ gdl/transm.} + 1 \text{ Guia-pasador} \times -1 \text{ gdl/G-pas} = 1 \text{ gdl} \quad (5.3)$$

Así, el número de gdl determinado por inspección directa coincide con el determinado por el criterio de Grübler-Kutzbach, lo que indica que el mecanismo no presenta redundancias totales.

Con el esquema acabado, se pasa a estudiar el análisis geométrico y cinemático del mismo. Para su estudio se decide utilizar el vector de coordenadas generalizadas  $q = \{\theta_1, \theta_2, \theta_3, s\}^t$  que permiten describir su configuración. Como se ha dicho antes, el mecanismo consta de 1 grado de libertad, por lo que se pueden obtener 3 ecuaciones de enlace a partir de la condición de cierre del anillo  $O_1PQO_3O_1$  y de la relación entre la distancia vertical del punto R a  $O_3$  y el ángulo de giro  $\theta_3$ . El vector de ecuaciones de enlace es el siguiente:

$$\Phi(q) = \begin{Bmatrix} l_3 \cos \theta_3 + l_2 \sin \theta_2 - l_1 \cos \theta_1 - d_3 \\ l_3 \sin \theta_3 - l_2 \cos \theta_2 - l_1 \sin \theta_1 + d_1 + d_2 \\ d_4 \tan \theta_3 - s \end{Bmatrix} = 0 \quad (5.4)$$

Para el estudio cinemático se modela y simula el funcionamiento del mecanismo en el PAM (Programa de Análisis de Mecanismos), comprobando la corrección de las dimensiones del mismo, y se muestra el gráfico del movimiento vertical de la aguja de coser respecto al ángulo de giro de la manivela (Figura 5-7).

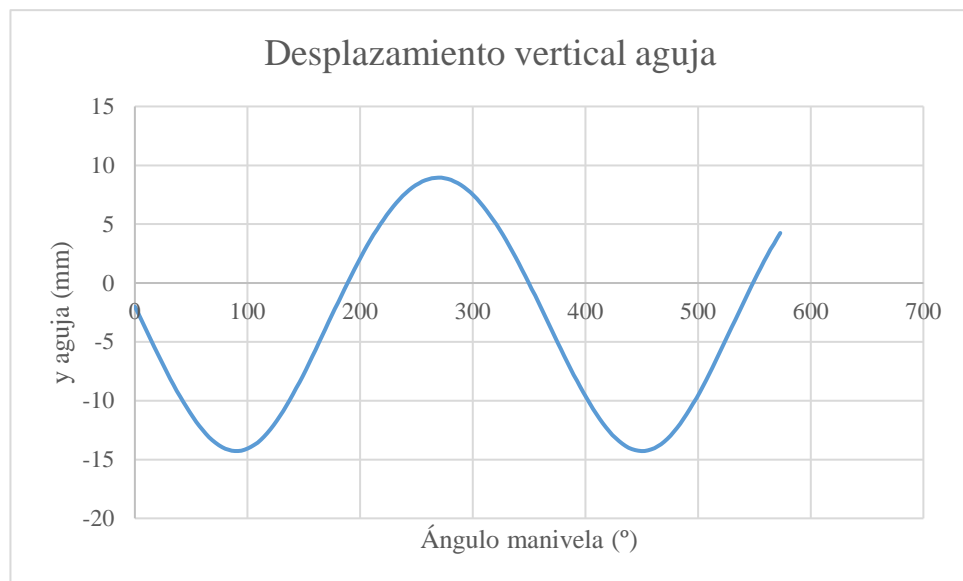


Figura 5-7. Gráfico del movimiento de translación de la aguja de coser.

Con los datos geométricos comprobados, se pasa a crear el modelo virtual 3D de la máquina utilizando el software SolidWorks, realizando un proceso de ingeniería inversa (Figura 5-8).

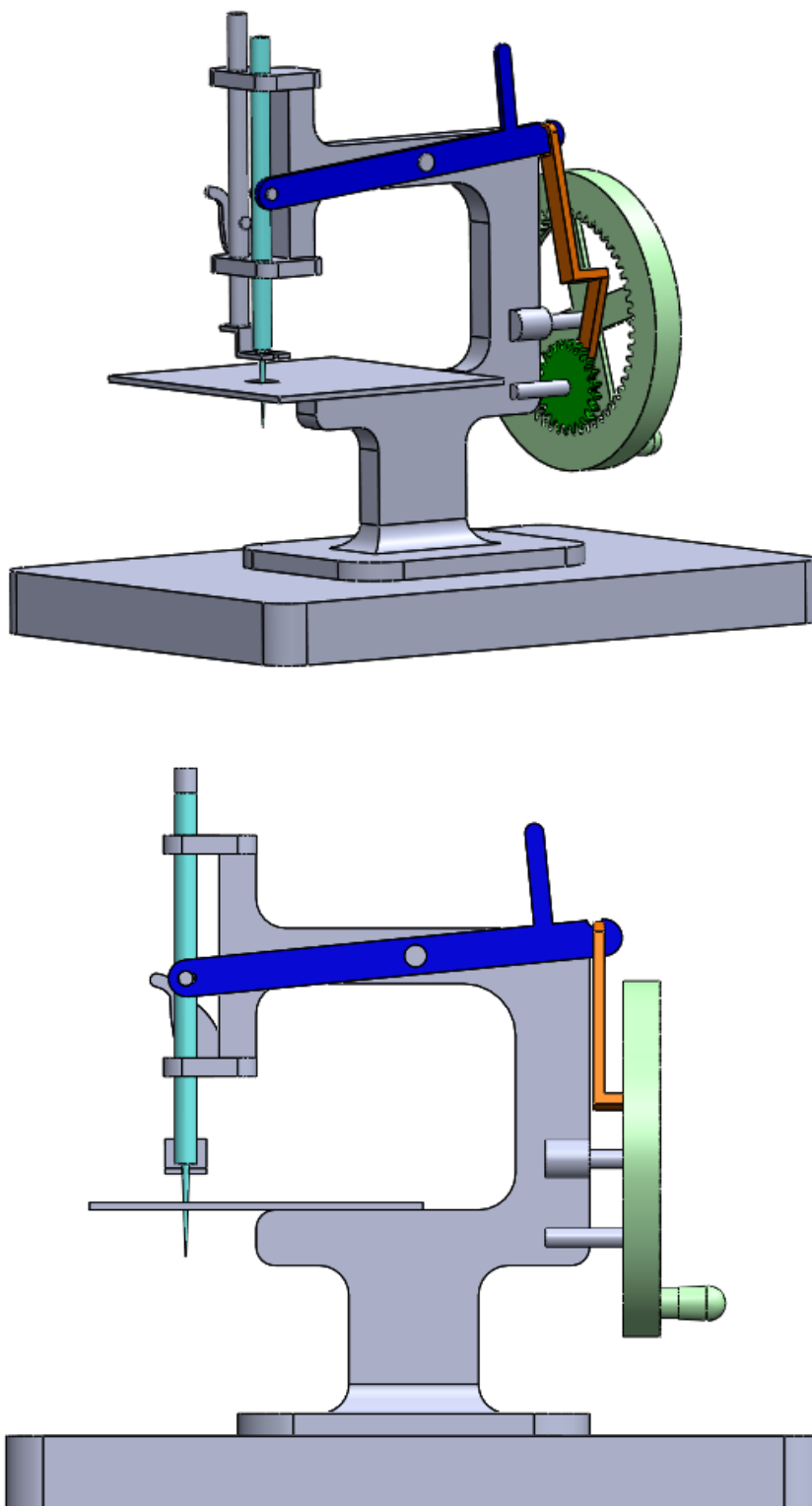


Figura 5-8. Modelo virtual máquina de coser: vista dimétrica (imagen superior) y vista en alzado (imagen inferior).

### 5.1.3. Gato mecánico elevador de vehículo

El tercer mecanismo seleccionado es un gato mecánico elevador de vehículo (Figura 5-9). Todos los vehículos motores deben llevar, por ley, un gato mecánico para poder cambiar la rueda de su coche en caso de pinchazo. Es, por tanto, un mecanismo muy fácil de encontrar en la práctica. Existen diferentes modelos de gatos mecánicos, normalmente de accionamiento manual, que se basan en la transmisión de potencia mediante un par helicoidal (tornillo-tuerca). Así, se hace girar un eje roscado a través de una manivela que rota y desplaza un elemento con forma de U que se une al chasis del coche provocando su movimiento vertical respecto al suelo.

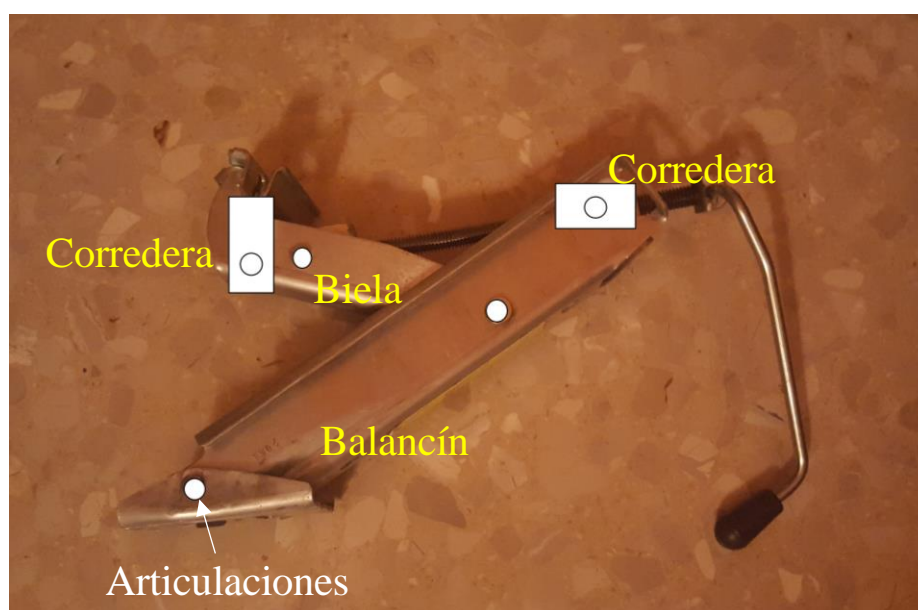


Figura 5-9. Fotografía del gato mecánico elevador de vehículo.

Una vez identificados sobre el mecanismo los elementos y enlaces que lo constituyen (Figura 5-9), se realiza el esquema de símbolos correspondiente, mostrado en la Figura 5-10.

Utilizando dicho esquema, se describe su funcionamiento, que es el siguiente: se hace girar de forma manual, a través de la manivela mostrada, el eje roscado (husillo) que está enlazado con la tuerca en Q. Al girar dicho husillo (según el sentido de giro) se aproximan o se alejan los puntos Q y R. Al acercarse o alejarse, el balancín OPQ rota alrededor del punto fijo O y la biela PRS puede orientarse un ángulo relativo  $\gamma$  respecto a dicho balancín. El punto P realiza un movimiento de rotación con centro en O y el punto S realiza un movimiento de translación vertical. El punto T, situado a una distancia  $l_6$  fija de S, por encima de este, es el punto de unión

entre el gato y el vehículo que se pretende elevar.

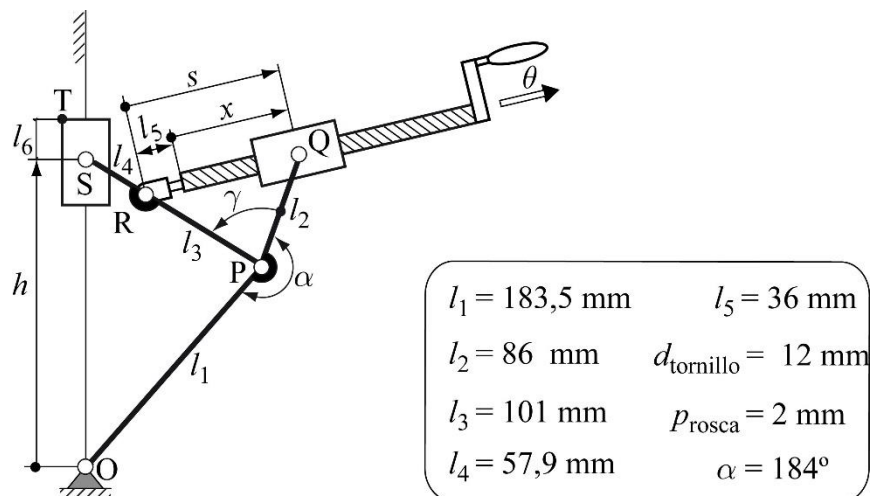


Figura 5-10. Esquema de símbolo y parámetros geométricos del gato mecánico.

Para la determinación del número de redundancias se aplica el criterio de superposición de restricciones (Criterio de Grübler-Kutzbach) a todo el mecanismo:

$$5 \text{ sólidos móviles} \times 3 \text{ gdl/sólido} + 5 \text{ articulaciones} \times -2 \text{ gdl/artic.} + 1 \text{ par prismático} \times -2 \text{ gdl/prism} + 1 \text{ helicoidal} \times -2 \text{ gdl/helicoidal.} = 1 \text{ gdl} \quad (5.5)$$

Así, el número de gdl determinado por inspección directa coincide con el determinado por el criterio de Grübler-Kutzbach, lo que indica que el mecanismo no presenta redundancias totales.

Con el esquema acabado, se pasa a estudiar el análisis geométrico y cinemático del mismo. Para su estudio se decide utilizar el vector de coordenadas generalizadas  $q = \{\theta, \gamma, s, x, h\}^t$  que permiten describir su configuración. Como se ha dicho antes, el mecanismo consta de 1 grado de libertad (lo que se puede, además, comprobar por inspección directa, anulando la velocidad de rotación del husillo ( $\dot{\theta} = 0$ ), que hace fijo la distancia entre Q y R y, por tanto, ambos puntos quedan fijos, así las barras RSP y OPQ quedan en reposo y el triángulo OPS sería de lados constantes, por tanto todo el mecanismo queda en reposo). Se deducen varias ecuaciones de enlace geométrico que relacionan la distancia  $s$ , el ángulo relativo  $\gamma$  entre barras y la altura  $h$  de los puntos S y T con el ángulo de giro  $\theta$  del husillo, así se tiene:

$$s(\theta) = l_5 + x = l_5 + p \cdot \frac{\theta}{2\pi} \quad (5.6)$$

$$\gamma(\theta) = \arccos \left[ \frac{l_2^2 + l_3^2 - s^2}{2l_2l_3} \right] \quad (5.7)$$

$$h(\theta) = \sqrt{(l_3 + l_4)^2 + l_1^2 - 2(l_3 + l_4)l_1 \cos[2\pi - (\alpha + \gamma)]} \quad (5.8)$$

$$h_T(\theta) = h(\theta) + l_6 \quad (5.9)$$

Para el estudio cinemático se modela y simula el funcionamiento del mecanismo en el PAM (Programa de Análisis de Mecanismos), comprobando la corrección de las dimensiones del mismo, y se muestra el gráfico de la  $h_T$  altura del vehículo respecto al número de vueltas del eje roscado (Figura 5-11).

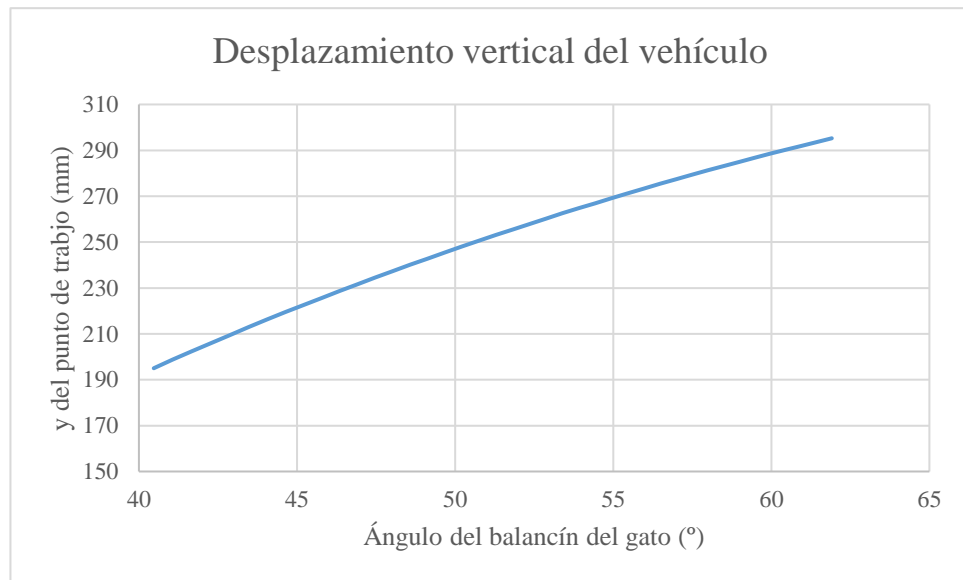


Figura 5-11. Gráfico del movimiento de translación del vehículo.

Con los datos geométricos comprobados, se pasa a crear el modelo virtual 3D del gato mecánico utilizando el software SolidWorks, realizando un proceso de ingeniería inversa (Figura 5-12).

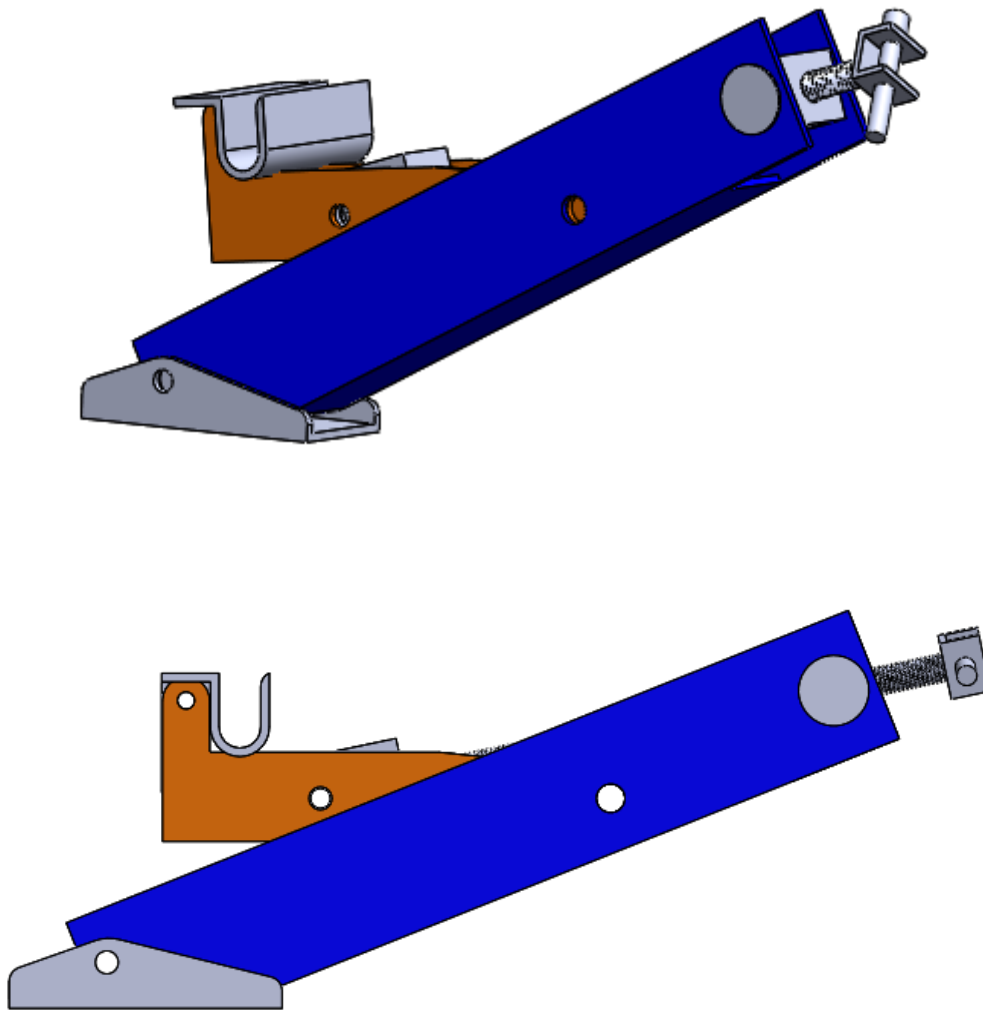


Figura 5-12. Modelo virtual gato mecánico: vista dimétrica (imagen superior) y vista en alzado (imagen inferior).

#### 5.1.4. Mecanismo de un Modelo a Escala de una Pala Excavadora

El cuarto mecanismo seleccionado es el mecanismo de un modelo a escala de una pala excavadora, vehículo muy utilizado en obras para el transporte de materiales o para retirar tierra del suelo (Figura 5-13). El mecanismo elegido tiene dos grados de libertad, controlados por dos cilindros hidráulicos (actuadores lineales), que controlan la orientación del brazo donde articula la pala y así como la orientación de la propia pala respecto a dicho brazo. Es decir, ambos accionamientos permiten controlar la posición vertical de la pala y su orientación respecto a tierra.



Figura 5-13. Fotografía del modelo de la pala excavadora.

Una vez identificados sobre el mecanismo los elementos y enlaces que lo constituyen (Figura 5-13), se realiza el esquema de símbolos correspondiente, mostrado en la Figura 5-14.

Utilizando dicho esquema, se describe su funcionamiento, que es el siguiente: el actuador lineal fijado entre las articulaciones  $O_1$  y P controla la distancia  $s_1$  entre dichos puntos y determina la orientación del brazo  $O_2SQR$  (balancín) que está articulado en el punto  $O_2$  y que controla la altura de la pala respecto al suelo. La pala está articulada en el punto Q del balancín y puede rotar respecto al punto Q para cambiar su orientación, mediante el mecanismo de barras accionado por el actuador lineal que fijado entre los puntos  $O_3$  y T controla la distancia  $s_2$ . Al cambiar dicha distancia  $s_2$  la biela TSU gira alrededor del punto S contenido en el balancín, provocando el movimiento de las bielas que unen los puntos U y V. El movimiento del punto V provoca la rotación de la pala alrededor del punto Q.

Obsérvese que, por inspección, dicho mecanismo tiene 2 gdl, dado que si se anulan las velocidades  $\dot{s}_1 = 0$  y  $\dot{s}_2 = 0$ , con la primera se detiene tanto la orientación del balancín  $O_2SQR$  (quedando fijos todos los puntos del balancín), y con la segunda se detiene la orientación de la pala (y el punto U de la biela TSU y, al fijar el punto U, las bielas que unen U y V no podrían moverse). En la práctica, existe juego entre las articulaciones, lo que se ha

comprobado con el modelo. Sin embargo, como se muestra a continuación, se demuestra que en el mecanismo no hay redundancias y los gdl son 2.

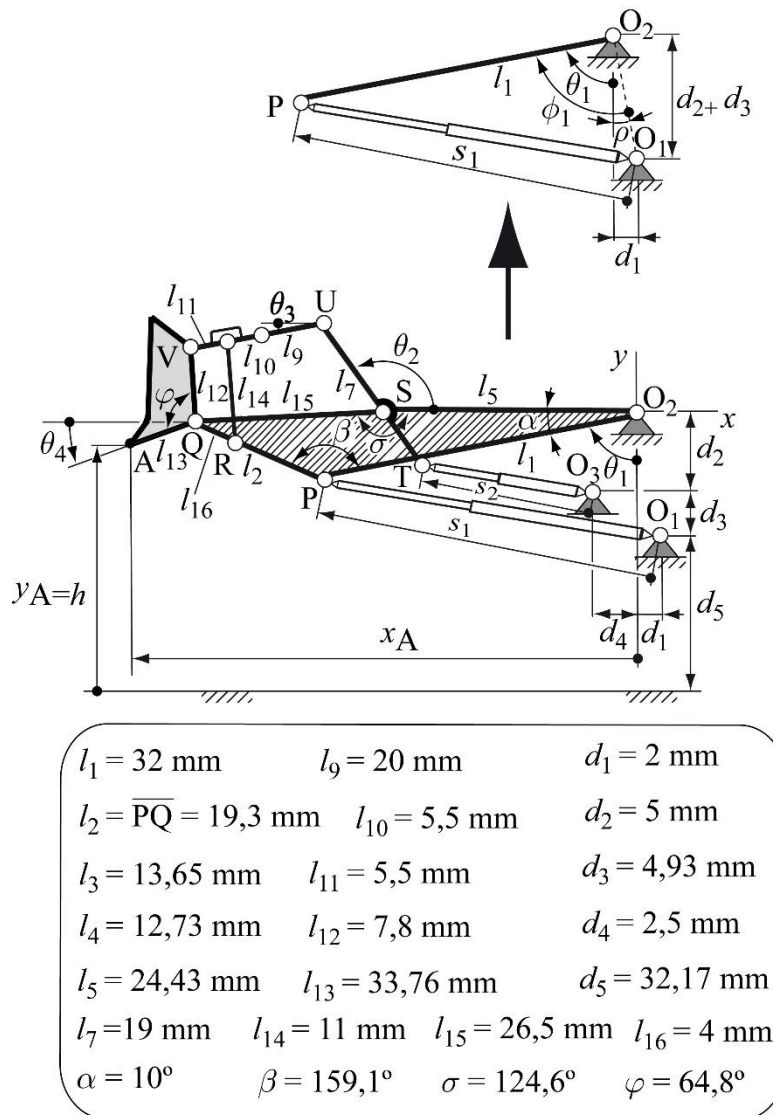


Figura 5-14. Esquema de símbolo y parámetros geométricos de la excavadora de juguete.

Para la determinación del número de redundancias se aplica el criterio de superposición de restricciones (Criterio de Grübler-Kutzbach) a todo el mecanismo:

$$6 \text{ sólidos móviles} \times 3 \text{ gdl/sólido} + 8 \text{ articulaciones} \times -2 \text{ gdl/artic.} = 2 \text{ gdl} \quad (5.10)$$

Así, el número de gdl determinado por inspección directa coincide con el determinado por el

criterio de Grübler-Kutzbach, lo que indica que el mecanismo no presenta redundancias totales.

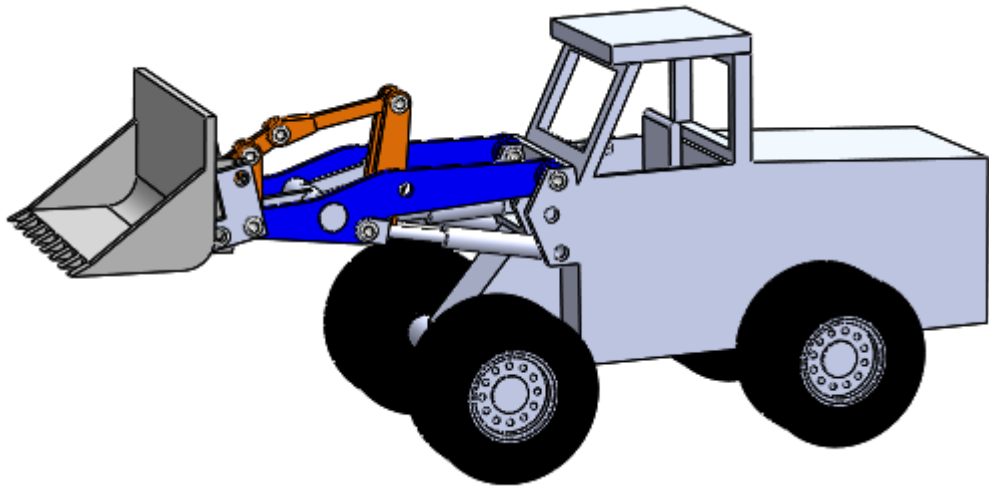
Con el esquema acabado, se pasa a estudiar el análisis geométrico y cinemático del mismo. Para su estudio se decide utilizar el vector de coordenadas generalizadas  $q = \{s_1, s_2, x_A, y_A, \theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4\}^t$  que permiten describir su configuración. Como se ha dicho antes, el mecanismo consta de 2 grados de libertad. Se deducen las ecuaciones que sitúan el punto A de la excavadora respecto a los ángulos  $\theta_1$  y  $\theta_2$ , los que a la vez dependen de los valores de las coordenadas independientes  $s_1$  y  $s_2$ .

$$y_A = h = (d_2 + d_3 + d_5) - l_{13}\sin\theta_4 + l_2 \cos(\beta - \theta_1) - l_1\cos\theta_1 \quad (5.11)$$

$$x_A = l_1\sin\theta_1 + l_2 \sin(\beta - \theta_1) + l_{13}\cos\theta_4 \quad (5.12)$$

$$\theta_1 = \arccos \left[ \frac{l_1^2 + d_1^2 + (d_2 + d_3)^2 - s_1^2}{2l_1\sqrt{d_1^2 + (d_2 + d_3)^2}} \right] - \arctan \left[ \frac{d_1}{d_2 + d_3} \right] \quad (5.13)$$

Con los datos geométricos comprobados, se pasa a crear el modelo virtual 3D de la máquina utilizando el software SolidWorks, realizando un proceso de ingeniería inversa (Figura 5-15).



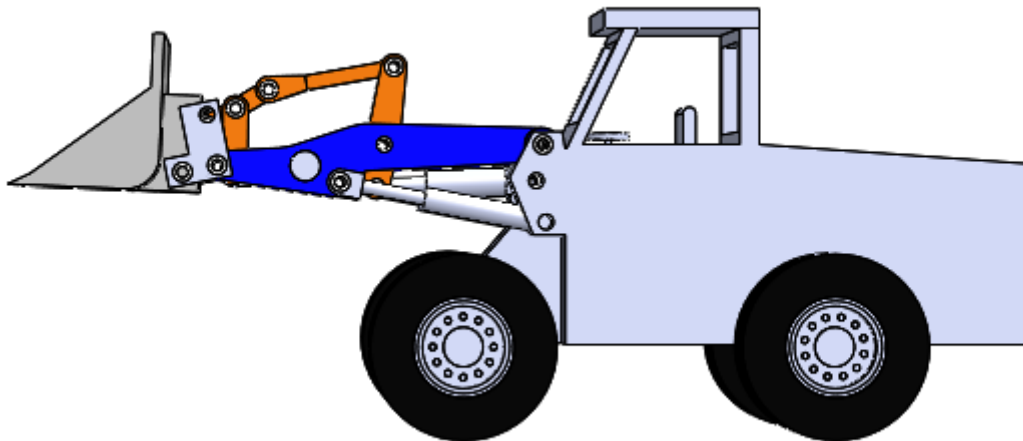


Figura 5-15. Modelo virtual excavadora: vista dimétrica (imagen superior) y vista en alzado (imagen inferior).

## 5.2. Mecanismos de interés mecánico

### 5.2.1. Mecanismo de un motor alternativo de combustión interna

El primer sistema mecánico seleccionado de interés mecánico es un motor alternativo de combustión interna de un vehículo del tipo Otto, frecuentemente utilizado en los vehículos motores. En este caso no se tenía acceso al artefacto real así que se decide crearlo tomando como referencias fotografías y simulaciones encontradas en Internet. Así, se crea un modelo virtual con el SolidWorks y se toma una fotografía de dicho modelo virtual (Figura 5-16). Esta máquina consiste en un cilindro (cámara) donde se introduce, mediante un conducto de admisión, un combustible inflamable que es comprimido para, a continuación, ser encendido por una bujía para provocar su inflamación y provoque el movimiento de translación de un pistón unido a un mecanismo biela-manivela. El sistema tiene un grado de libertad.

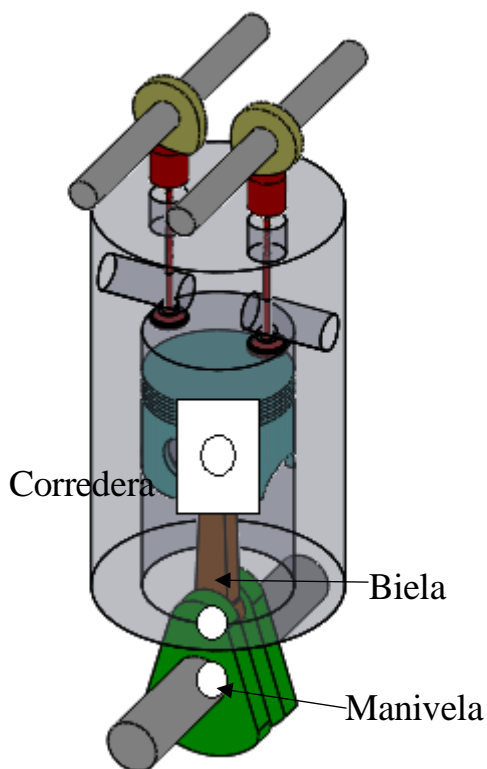


Figura 5-16. Fotografía del modelo virtual de un motor alternativo de combustión interna.

Una vez identificados sobre el mecanismo los elementos y enlaces que lo constituyen (Figura 5-16), se realiza el esquema de símbolos del mecanismo manivela-biela-pistón, que se muestra en la Figura 5-17.

Utilizando dicho esquema, se describe su funcionamiento. El pistón, que tiene movimiento de translación vertical dentro del cilindro, está unido mediante la articulación Q a la biela PQ. La biela se une mediante la articulación P a la manivela OP y le transmite movimiento, haciendo que ésta rote, con lo que se logra la conversión del movimiento de translación del pistón en rotación de la manivela. Este es un mecanismo de 1gdl, ya que si se anula la velocidad lineal de translación del pistón  $\dot{s} = 0$ , el punto Q queda fijo y se tendría un triángulo de lados fijos OPQ, quedando todo en reposo. La manivela en la práctica, rota con una velocidad que es el doble de la velocidad de rotación las levas (Figura 5-16), para cumplir con el ciclo termodinámico del motor.

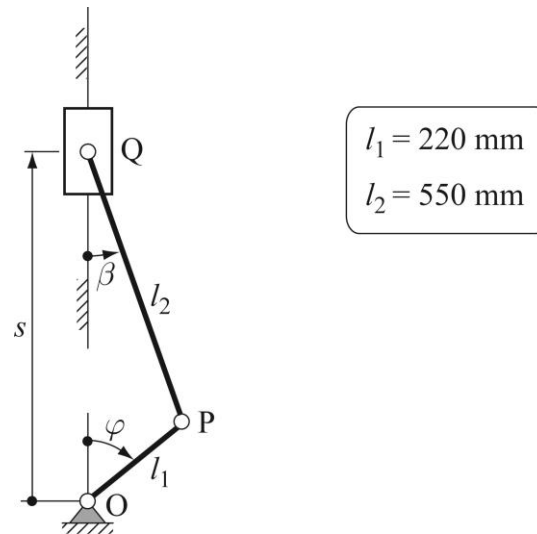


Figura 5-17. Esquema de símbolo y parámetros geométricos del mecanismo pistón-biela-manivela.

Para la determinación del número de redundancias en dicho mecanismo (Figura 5-17) se aplica el criterio de superposición de restricciones (Criterio de Grübler-Kutzbach), con lo que se tiene:

$$3 \text{ sólidos móviles} \times 3 \text{ gdl/sólido} + 3 \text{ articulaciones} \times -2 \text{ gdl/artic.} + 1 \text{ par prismático} \times -2 \text{ gdl/prism.} = 1 \text{ gdl} \quad (5.14)$$

Así, el número de gdl determinado por inspección directa coincide con el determinado por el criterio de Grübler-Kutzbach, lo que indica que el mecanismo no presenta redundancias totales.

Con el esquema acabado, se pasa a estudiar el análisis geométrico y cinemático del mismo. Para su estudio se decide utilizar el vector de coordenadas generalizadas  $q = \{\varphi, \beta, s\}^t$  que permiten describir su configuración. Como se ha comentado antes, el mecanismo consta de 1 grado de libertad. Por tanto, se pueden obtener 2 ecuaciones de enlace a partir de la condición de cierre del anillo OPQO. El vector de ecuaciones de enlace es el siguiente:

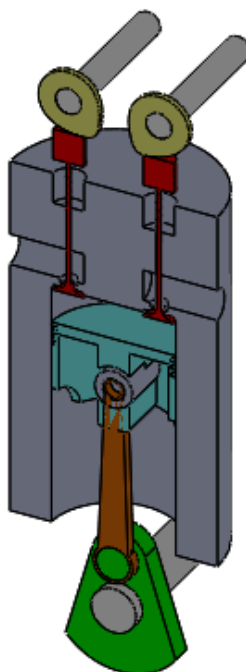
$$\Phi(q) = \begin{Bmatrix} l_1 \cos \varphi + l_2 \cos \beta - s \\ l_1 \sin \varphi - l_2 \sin \beta \end{Bmatrix} = 0 \quad (5.15)$$

Para el estudio cinemático se modela y simula el funcionamiento del mecanismo en el PAM (Programa de Análisis de Mecanismos), comprobando la corrección de las dimensiones del mismo, y se muestra el gráfico del movimiento de translación vertical del pistón respecto al ángulo de giro de la manivela (Figura 5-18).



Figura 5-18. Gráfico del movimiento de traslación del pistón respecto al ángulo de giro de la leva.

Con los datos geométricos comprobados, se pasa a crear el modelo virtual 3D de la máquina utilizando el software SolidWorks, realizando un proceso de ingeniería inversa (Figura 5-19).



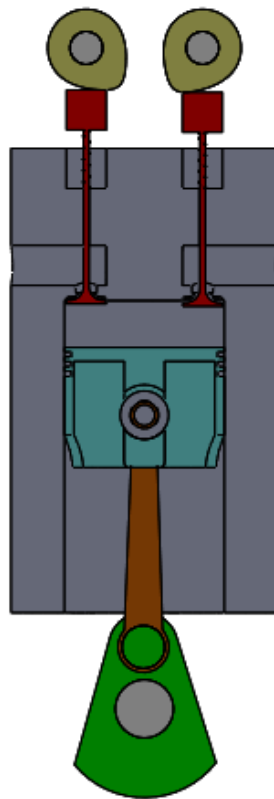
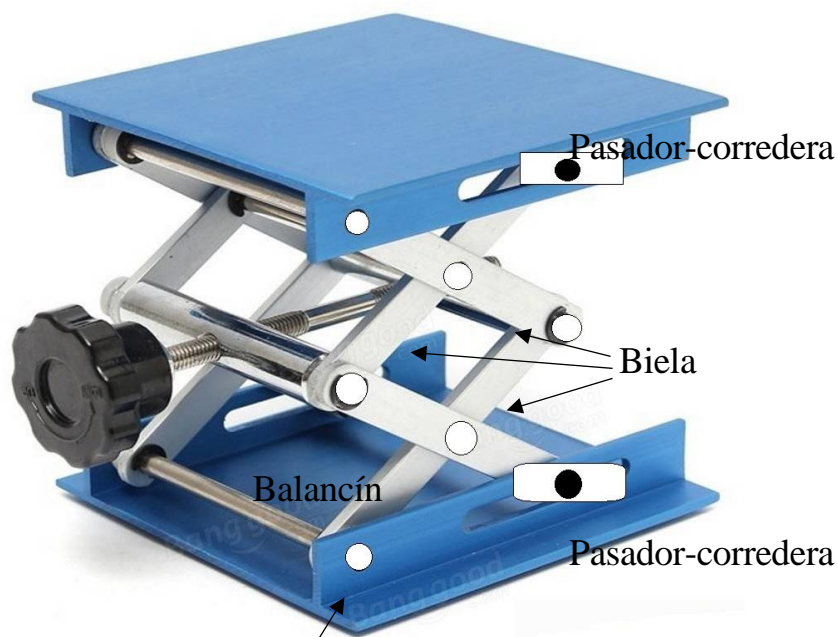


Figura 5-19. Modelo virtual cámara de combustión: vista trimétrica (imagen superior) y vista en alzado (imagen inferior).

### 5.2.2. Plataforma elevadora

El segundo mecanismo seleccionado es la plataforma elevadora, mecanismo utilizado en diferentes aplicaciones, como en los talleres mecánicos para elevar motocicletas cuando hace falta una reparación (Figura 5-20). Este mecanismo consiste en un conjunto de barras principales entrecruzadas entre sí en forma de tijera, que al reducir el ángulo entre ellas separan las dos plataformas en sus extremos, elevando el elemento que tengan en una de las plataformas (si la otra se sitúa contra el suelo). Este movimiento es accionado manualmente por un pomo, el cual garantiza un grado de libertad, forzado.



Articulaciones  
Figura 5-20. Fotografía de la plataforma elevadora.

Una vez identificados sobre el mecanismo los elementos y enlaces que lo constituyen (Figura 5-20), se realiza el esquema de símbolos correspondiente, mostrado en la Figura 5-21.

Utilizando dicho esquema, se describe su funcionamiento, que es el siguiente: se acciona manualmente un pomo colocado en un extremo del husillo o eje roscado haciéndolo girar un ángulo  $\varphi$  no mostrado. Este husillo tiene dos tramos roscados, uno con rosca derecha y otro con rosca a izquierda, y forma dos pares helicoidales con las tuercas ubicadas en los puntos R y S. Cuando se hace girar el husillo (según un ángulo  $\varphi$ ), las tuercas se aproximan o se alejan simultáneamente, según el sentido de giro aplicado. En estas tuercas se articulan, a la vez, por dichos puntos R y S con las barras que se unen por la parte superior a los puntos U (articulación) y V (pasador) de la plataforma móvil y por la parte inferior a los O (articulación fija) y P (pasador) ubicados en el suelo. En el caso de movimiento de aproximación de las tuercas (disminución de la distancia  $d$ ), las barras (OS, PR, SU y RV) que se articulan entre ellas cambian su orientación haciendo crecer el ángulo  $\theta$  y se incrementa el valor de la distancia  $h$ . Con la variación del ángulo  $\theta$  de las barras articuladas se consigue que la plataforma UV se desplace en vertical. Los puntos P y V constituyen los pasadores que entran en las guías correspondientes. Si se hace nula la velocidad  $\omega = 0$  de giro del tornillo, los puntos R y S se quedan fijos, obteniéndose los triángulos OPS, OPR, SUV y RUV de lados fijos, por lo que

todos los puntos del mecanismos se quedan fijo y, por tanto, todos sus sólidos. Así, anulando una única velocidad, se detiene todo el mecanismo, lo que justifica que su gdl es 1.

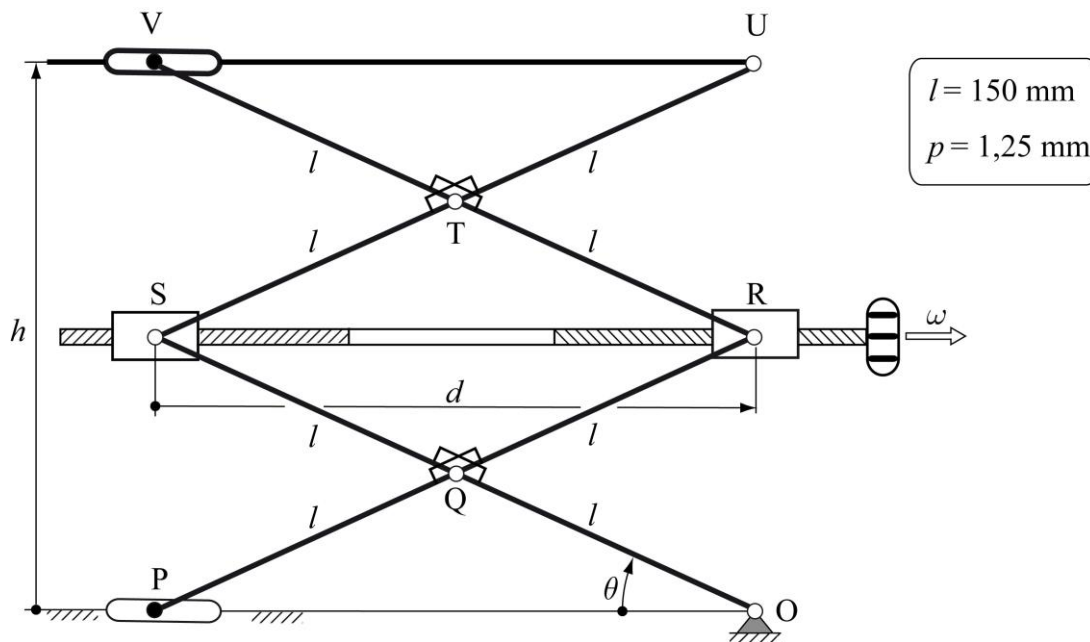


Figura 5-21. Esquema de símbolo y parámetros geométricos de la plataforma elevadora.

Para la determinación del número de redundancias se aplica el criterio de superposición de restricciones (Criterio de Grübler-Kutzbach) a todo el mecanismo:

$$8 \text{ sólidos móviles} \times 3 \text{ gdl/sólido} + 8 \text{ articulaciones} \times -2 \text{ gdl/artic.} + 2 \text{ par prismático} \times -2 \text{ gdl/prism} + 2 \text{ guía-pasador} \times -1 \text{ gdl/guía-pasador} = 1 \text{ gdl} \quad (5.16)$$

Así, el número de gdl determinado por inspección directa coincide con el determinado por el criterio de Grübler-Kutzbach, lo que indica que el mecanismo no presenta redundancias totales.

Con el esquema acabado, se pasa a estudiar el análisis geométrico y cinemático del mismo. Para su estudio se decide utilizar el vector de coordenadas generalizadas  $q = \{h, d, \theta\}^t$  que permiten describir su configuración. Como se ha comentado antes, el mecanismo consta de 1 grado de libertad. Por tanto, se puede obtener 2 ecuaciones de enlace a partir de la condición de cierre del anillo OQPO. El vector de ecuaciones de enlace es el siguiente:

$$\Phi(q) = \begin{Bmatrix} 4l \cdot \sin\theta - h \\ 2l \cdot \cos\theta - d \end{Bmatrix} = 0 \quad (5.17)$$

$$d = 2 \cdot p \cdot \frac{\varphi}{2\pi} \quad (5.18)$$

Para el estudio cinemático se modela y simula el funcionamiento del mecanismo en el PAM (Programa de Análisis de Mecanismos), comprobando la corrección de las dimensiones del mismo, y se muestra el gráfico del movimiento de translación de la plataforma respecto al ángulo de giro del balancín (Figura 5-22).

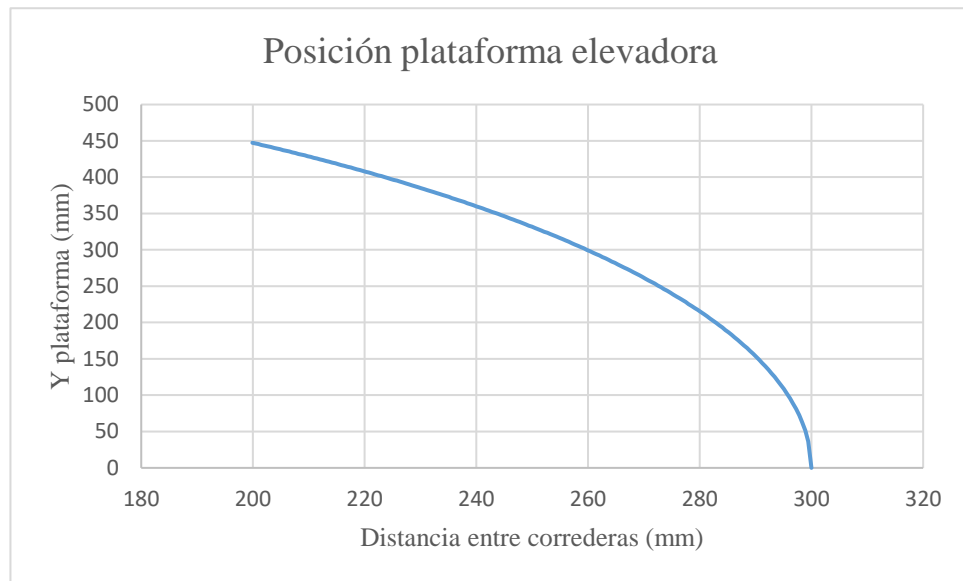


Figura 5-22. Gráfico del movimiento de translación de la plataforma.

Con los datos geométricos comprobados, se pasa a crear el modelo virtual 3D de la máquina utilizando el software SolidWorks, realizando un proceso de ingeniería inversa (Figura 5-23).

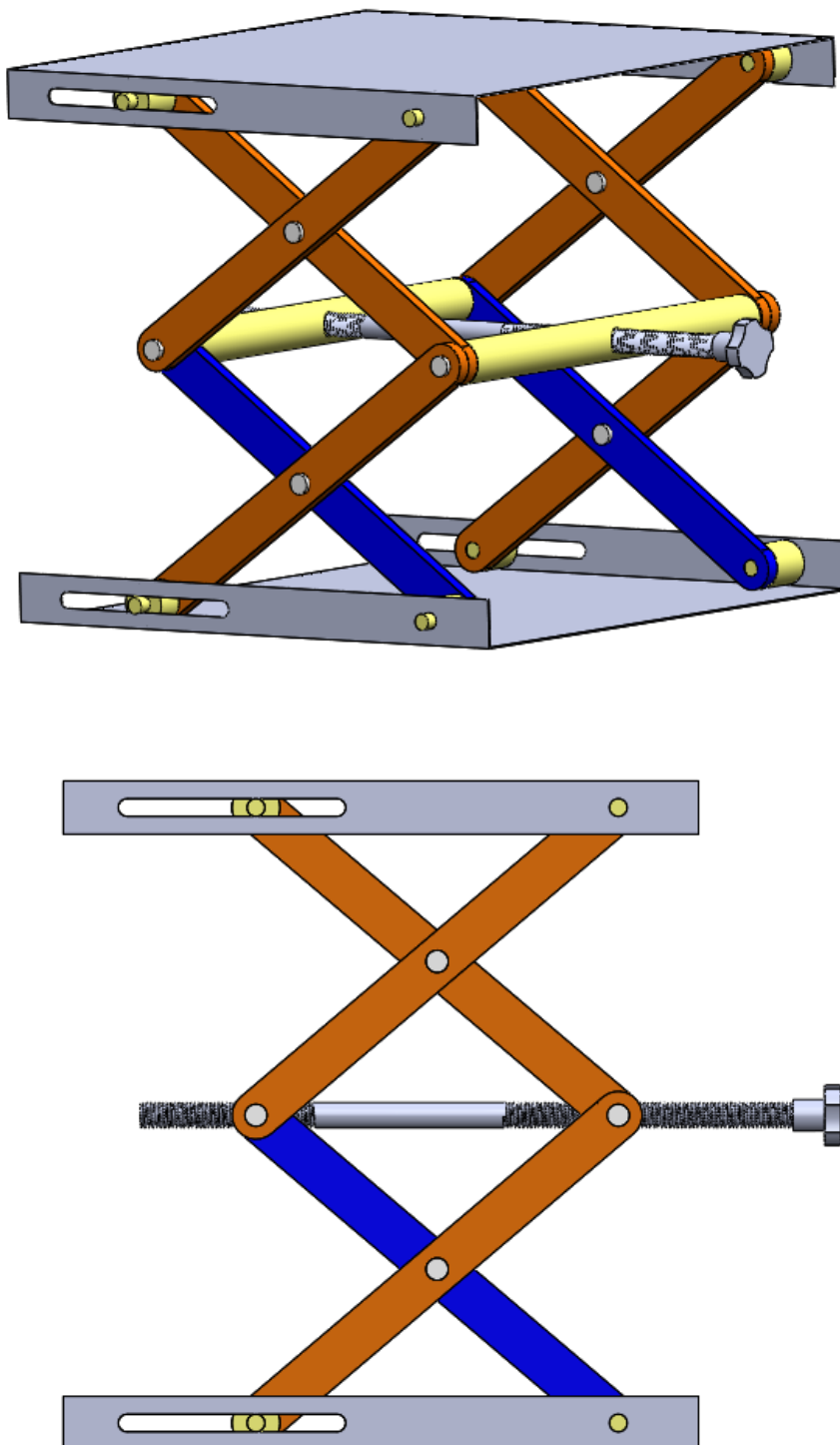


Figura 5-23. Modelo virtual de la plataforma elevadora: vista dimétrica (imagen superior) y vista en alzado (imagen inferior).

### 5.2.3. Tren epicycloidal

El tercer mecanismo seleccionado es un tren epicycloidal, utilizado en el interior de las cajas de velocidades automáticas de vehículos o en reductores de engranajes, entre otras aplicaciones. En este caso, no se tenía acceso al artefacto físico así que se utiliza, para exponerlo, una fotografía del modelo virtual creado con SolidWorks (Figura 5-24). Este tren de engranajes epicycloidal está formado por: la corona con dentado interior, el planeta (o rueda central) y 4 satélites dispuestos angularmente a  $90^\circ$  consecutivamente, éstos rotan sobre los ejes móviles contenidos en el brazo portasatélites. Este tipo de mecanismo tiene 2 gdl, dado que para una entrada de movimiento, por ejemplo por accionamiento del eje del planeta, se tienen dos salidas, una de ellas es la rotación del brazo portasatélites y la otra la rotación de la corona dentada. Si bien en la práctica, con frecuencia, la corona se fija a la carcasa del reductor de engranajes (eliminando su velocidad de rotación y, por tanto, eliminando 1gdl) y se obtiene una relación de transmisión entre la velocidad de entrada del eje del planeta y la velocidad de salida del brazo portasatélites.

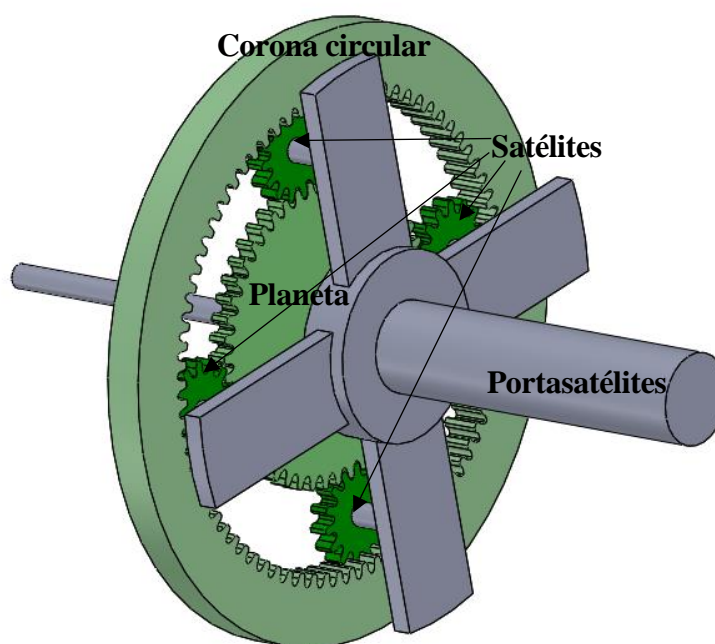


Figura 5-24. Fotografía del modelo virtual 3D del tren epicycloidal.

Una vez identificados sobre el mecanismo los elementos y enlaces que lo constituyen (Figura 5-24), se realiza el esquema de símbolos correspondiente, mostrado en la Figura 5-25.

Utilizando dicho esquema, se describe su funcionamiento, que es el siguiente: el sistema tiene tres elementos que son coaxiales: corona, planeta y brazo portasatélites. Los tres rotan respecto a un eje fijo. Normalmente para determinar la relación de transmisión  $\tau_b$ , se hace fijo el brazo portasatélites (anulando su velocidad) y entonces se obtiene una relación de transmisión entre la velocidad del elemento de entrada, que es el planeta, y la velocidad del elemento de salida, que es la corona.

$$\tau_b = \frac{\omega_{corona}}{\omega_{planeta}} = \frac{z_{planeta}}{z_{corona}} = \frac{49}{79} = 0,62 \quad (5.19)$$

Esta ecuación, muestra la utilización de dicho sistema como reductor de velocidad.

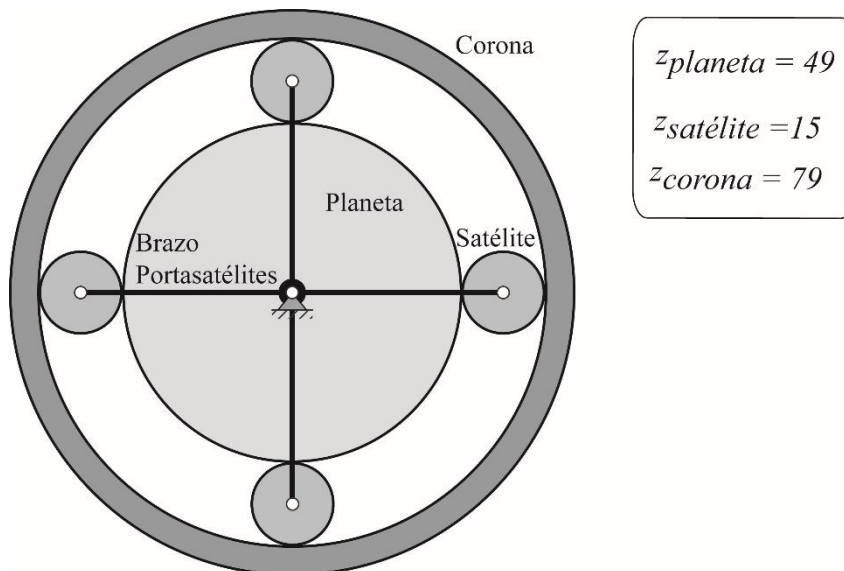


Figura 5-25. Esquema de símbolo y parámetros geométricos del tren epicycloidal.

Para la determinación del número de redundancias, considerando la corona fija y por tanto, considerando el sistema como de 1gdl, si se aplica el criterio de superposición de restricciones (Criterio de Grübler-Kutzbach) a todo el mecanismo:

$$6 \text{ sólidos móviles} \times 3 \text{ gdl/sólido} + 6 \text{ articulaciones} \times -2 \text{ gdl/artic.} + 8 \text{ transmisión} \times -1 \text{ gdl/transm.} = -2 \text{ gdl} \quad (5.20)$$

Así, el número de gdl determinado por inspección directa no coincide con el determinado por el criterio de Grübler-Kutzbach, lo que indica que el mecanismo presenta 3 redundancias totales, que en este caso, son los 3 satélites adicionales. Ya que con un único satélite el sistema

podría funcionar transmitiendo el movimiento entre eje de entrada y eje de salida.

Para el estudio cinemático se modela y simula el funcionamiento del mecanismo en el PAM (Programa de Análisis de Mecanismos), comprobando la corrección de las dimensiones del mismo, y se muestra el gráfico de la rotación de los satélites respecto a la rotación del planeta (Figura 5-26).

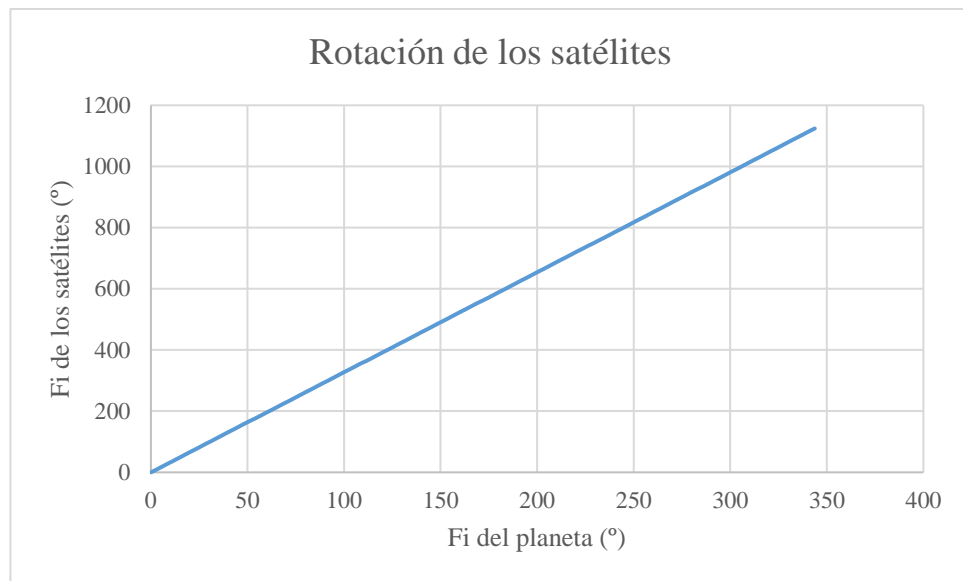


Figura 5-26. Gráfico de la rotación de los satélites.

Como se puede observar en el gráfico, la rotación de los satélites respecto a la rotación del planeta es una recta de pendiente constante. Se mantiene una constante que es igual a la relación de transmisión entre ambos engranajes.

Con los datos geométricos comprobados, se pasa a crear el modelo virtual 3D de la máquina utilizando el software SolidWorks, realizando un proceso de ingeniería inversa (Figura 5-27).

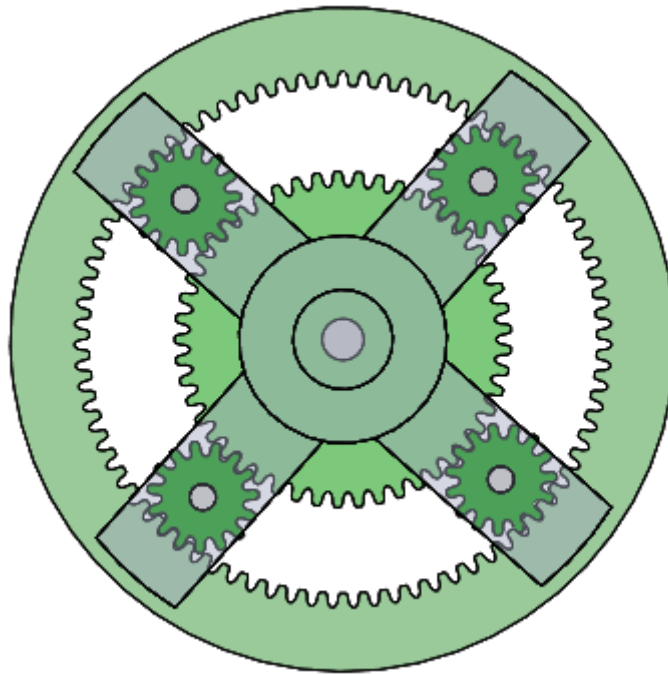


Figura 5-27. Modelo virtual del tren epicycloidal en vista alzada.

#### 5.2.4. Leva-palpador

El cuarto mecanismo seleccionado es un mecanismo de leva-palpador, en el cual el palpador es de rodillo y tiene movimiento de translación, mecanismo usual para diferentes aplicaciones (Figura 5-28). Se puede encontrar en motores de automóviles para regir la apertura y cierre de válvulas, en máquinas textiles, en tornos automáticos, etc. El mecanismo se acciona a través del eje de la leva, transmitiéndole un movimiento de rotación. La leva está en contacto con un palpador de rodillo. El palpador forma un par prismático con la bancada (sólo se traslada), mientras la leva forma un par de rotación con dicho bastidor. El palpador se mantiene en contacto con la leva debido a la acción de la fuerza que introduce un resorte lineal (cierre del par superior por fuerza). Si se detiene la velocidad de rotación de la leva, entonces no se impulsa al palpador y todo el mecanismo quedaría en reposo. Así, queda justificado por inspección directa, que dicho mecanismo tiene 1 gdl.

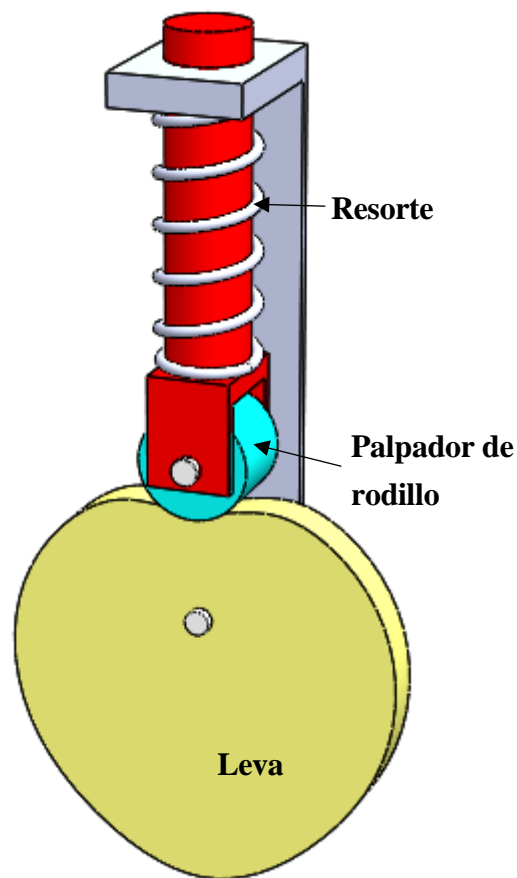


Figura 5-28. Fotografía del modelo virtual del mecanismo de leva-palpador.

Para la determinación del número de redundancias se aplica el criterio de superposición de restricciones (Criterio de Grübler-Kutzbach) a todo el mecanismo, considerando la condición de no deslizamiento en el contacto leva-palpador (y por tanto se considera sólo rodadura):

$$3 \text{ sólidos móviles} \times 3 \text{ gdl/sólido} + 2 \text{ articulaciones} \times -2 \text{ gdl/artic.} + 1 \text{ prismático} \times -2 \text{ gdl/prism.} + 1 \text{ leva-palpador} \times -2 \text{ gdl/leva-palp.} = 1 \text{ gdl} \quad (5.21)$$

Así, el número de gdl determinado por inspección directa coincide con el determinado por el criterio de Grübler-Kutzbach, lo que indica que el mecanismo no presenta redundancias totales.

Finalmente, se crea el modelo virtual 3D del mecanismo utilizando el software SolidWorks, realizando un proceso de ingeniería inversa (Figura 5-29).

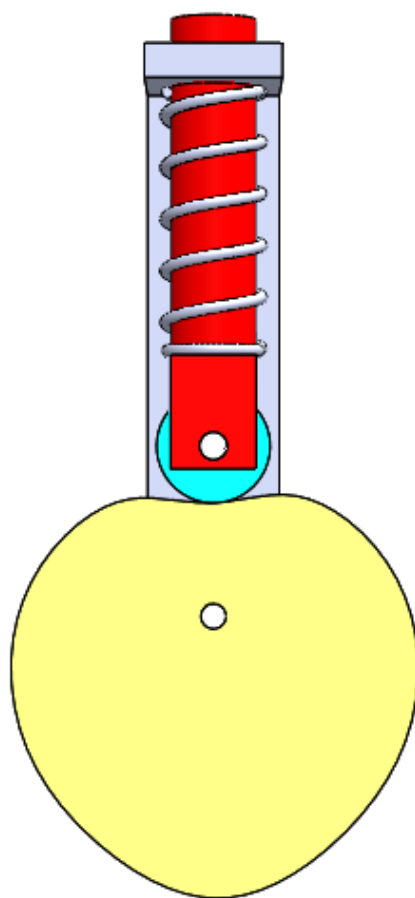


Figura 5-29. Modelo virtual de la leva-palpador en vista alzado.

## 6. Costes del proyecto

En este capítulo se estiman los costes que han supuesto el desarrollo del Trabajo Final de Grado. El coste económico del proyecto tiene en cuenta los costes de equipos, de licencias de software usado y el tiempo de realización del proyecto por parte del estudiante.

El desarrollo del proyecto ha llevado 7 meses de trabajo y el coste total es de **19.200 €**.

### 6.1. Tipos de gastos

#### 6.1.1. Coste del personal

El proyecto ha sido desarrollado por un único ingeniero que trabaja a tiempo parcial. El proyecto tiene destinado un total de 12 créditos, con una destinación de 25 horas por crédito. Es un total de 300 horas. Los honorarios de un ingeniero son de 40 €/hora.

La Tabla 6-1 desglosa el tiempo total invertido en las tareas realizadas para el desarrollo del proyecto.

Tareas	Tiempo invertido (horas)
Estudio estructural, caracterización, estudio geométrico y cinemático	70
Modelación en 3D	100
Animación en 3D	30
Documentación	55
Redacción	45
<b>Total</b>	<b>300</b>

Tabla 6-1. Descomposición de las horas invertidas en el desarrollo del proyecto.

Por tanto, el coste total de mano de obra para desarrollar el Trabajo Final de Grado ha sido de:

$$\text{Coste en personal} = 300 \text{ horas} \cdot \frac{40\text{€}}{\text{hora}} = 12.000\text{€} \quad (6.1)$$

### 6.1.2. Coste del material

El coste del material utilizado se dividirá en dos secciones: una para el material inventariable y otro para el material fungible.

#### Material inventariable

El material inventariable son aquellos bienes que se consideran que no se agotan con el uso, que tienen una vida superior a un año y con un precio superior o igual a un precio determinado. El valor del bien debe ser superior a 150€.

Para desarrollar los modelos virtuales es necesario el uso de un computador. Normalmente, el ordenador destinado al uso de software CAD suele poseer 8 GB de memoria RAM, con procesador de potencia moderada, por lo que se estima que su coste es de unos 900€ y se considera una amortización a los 4 años. Teniendo en cuenta que el ordenador se ha usado completamente durante los 7 meses el coste es de:

$$\text{Porcentaje de vida del ordenador} = \frac{7 \text{ meses}}{4 \text{ años} \cdot 12 \frac{\text{meses}}{\text{año}}} \cdot 100 = 14,58\% \quad (6.2)$$

$$\text{Coste de uso del computador} = 0,1458 \cdot 900\text{€} = 131,25\text{€} \quad (6.3)$$

#### Material fungible

El material fungible engloba los bienes que se gastan con el uso; en este caso es el material de oficina: material de escritura –incluyendo el papel-, impresiones, portapapeles, etc.

El material fungible se valora en 50€.

## Software informático

El desarrollo del proyecto ha requerido del uso de software privativo, el cual tiene un coste por derecho de uso. El coste de uso de software queda reflejado en la tabla 6-2.

Software	Precio anual [€/año]	Precio mensual [€/mes]	Coste por 7 meses [€]
<b>Microsoft Office</b>	99,00	8,25	57,75
<b>Microsoft Windows</b>	145,00	12,08	84,56
<b>SolidWorks 2017</b>	6.600,00	550	3.850
<b>Adobe Illustrator</b>	725,88	60,49	423,43
<b>Total</b>	7.569,88	630,82	4.415,74

Tabla 6-2. Coste del software.

## Conexión a internet

Se ha requerido de internet durante todo el proceso de desarrollo, ya sea para descargar software o paquetes/bibliotecas de desarrollo, o para consultar documentación importante.

Una tarifa de internet de fibra óptica tiene un coste aproximado de 15 €/mes, por lo que el coste de 8 meses es de:

$$\text{Coste del uso de internet} = 15 \frac{\text{€}}{\text{mes}} \cdot 7 \text{ meses} = 105\text{€} \quad (6.4)$$

## 6.2. Resumen de costes

El coste total para desarrollar el proyecto ha sido de **19.200 €** (Tabla 6-3).

Concepto	Coste redondeado [€]
Personal	12.000
Material inventariable	131
Material fungible	50
Software	4420
Internet	105
Otros costes (15%)	2500
<b>Total</b>	<b>19.200</b>

Tabla 6-3. Resumen de costes totales.



## Conclusiones

La culminación del presente Trabajo Final de Grado permite afirmar que se ha alcanzado el objetivo principal de mismo, ya que se han creado 8 modelos virtuales tridimensionales de mecanismos diversos que, junto con los vídeos que simulan su funcionamiento, pueden utilizarse como material didáctico de apoyo para la enseñanza y el aprendizaje de la materia Teoría de Máquinas y Mecanismos.

Para conseguir el objetivo principal, se establecieron un conjunto de objetivos específicos que también se han cumplido, ya que en el trabajo:

- Se expone información sobre el estado del arte del uso de los recursos virtuales en la enseñanza, y en específico, su uso en la enseñanza de Teoría de Máquinas y Mecanismos en universidades españolas.
- Se propone y aplica un procedimiento para la selección, modelación y simulación de máquinas y mecanismos.
- Se exponen el análisis geométrico y cinemático de los mecanismos analizados, aportando los esquemas de símbolos, la justificación de los grados de libertad, el análisis de la presencia de redundancias y ecuaciones de enlace. Los mecanismos elegidos se han modelado y simulado mediante el uso del programa PAM, aportando gráficos cinemáticos.
- Se aportan los modelos virtuales en 3D de los mecanismos elegidos, así como los vídeos que muestran la simulación de su funcionamiento, para lo cual se ha utilizado el SolidWorks y su módulo Motion.

Los recursos virtuales aportados podrían ser utilizados tanto en la impartición de las clases, por el profesorado, para explicar temas de Teoría de Máquinas y Mecanismos, como, también, ser utilizados para el autoaprendizaje de los estudiantes, creando un acceso gratis a los mismos.

Finalmente, cabe mencionar que el autor del Trabajo Final de Grado ha visto ampliado y mejorado sus conocimientos en varios ámbitos gracias a la realización de este proyecto. Principalmente, ha obtenido nuevos conocimientos en áreas de la mecánica durante el profundo estudio realizado a todos los mecanismos, además de mejorar los conocimientos que ya adquirió en la asignatura de Teoría de Máquinas y Mecanismos. Asimismo, ha obtenido mayor habilidad y nuevas capacidades en el modelaje tridimensional de mecanismos utilizando el software SolidWorks, programa que utilizó durante su formación en la asignatura de Expresión Gráfica pero que ahora ha podido ampliar y mejorar.



# Bibliografía

## Referencias bibliográficas

- [1] Bautista Sánchez, M.G. Martínez Moreno, A.R. y Hiracheta, Torres, R. *El uso de material didáctico y las tecnologías de información y comunicación (TIC's) para mejorar el alcance académico.*  
[[http://www.palermo.edu/ingenieria/pdf2014/14/CyT\\_14\\_11.pdf](http://www.palermo.edu/ingenieria/pdf2014/14/CyT_14_11.pdf)]
- [2] El Periódico. *El impacto de la realidad virtual en la nueva educación.*  
[<http://www.elperiodico.com/es/formacion/20171204/el-impacto-de-la-realidad-virtual-en-la-nueva-educacion-6461200>]
- [3] Nagendran M. Gurusamy K. Aggarwal R. Loizidou M. y Davidson BR. *Virtual reality training for surgical trainees in laparoscopic surgery.*  
[<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/14651858.CD006575.pub3/abstract;jsessionid=D75C1C>]
- [4] Suárez, J. *¿Qué es la Edtech y por qué es el futuro?*  
[<http://www.wibbu.com/que-es-la-edtech-y-por-que-es-el-futuro/>]
- [5] Cabrera Medina, J.M. Medina, F. y Sánchez Medina, I.I. *Laboratorio virtual de física para ingeniería.*  
[[http://www.labvirfis.com/es/Lab\\_labvirfis](http://www.labvirfis.com/es/Lab_labvirfis)]
- [6] Hurtado Fernández, S. *Laboratorio Virtual.*  
[<http://labovirtual.blogspot.com.es/>]
- [7] Clos Costa, D. y Puig Ortiz, J. *Programa d'Anàlisi de Mecanismes.*  
[<https://em.upc.edu/ca/docencia/pagines-docents/etseib-tmm/programa-danalisi-de-mecanismes.-pam>]
- [8] Universidad Politécnica de Madrid (UPM). *Laboratorios Virtuales UPM.*  
[<https://3dlabs.upm.es/laboratorios.php#lab7>]

- [9] Universidad Carlos III de Madrid (UC3M). *Open Course Ware*.  
[<http://ocw.uc3m.es/ingenieria-mecanica/teoria-de-maquinas/otros-recursos>]
- [10] Universidad Jaume I de Castellón (UJI). *Mecapedia*.  
[<http://www.mecapedia.uji.es/index.htm>]
- [11] ArtyCAD. *Cómo hacer un engrane fácilmente en SolidWorks*.  
[<https://www.youtube.com/watch?v=26Dac0Cdx9k>]
- [12] Diseño mecánico para ti. *Calcular relación de tren de engranaje sencillo en SolidWorks 2015*.  
[<https://www.youtube.com/watch?v=iFYf7FhucRI>]
- [13] SolidWorksTutoriales. *[SolidWorks] Tornillo con cuerda/rosca estética*.  
[<https://www.youtube.com/watch?v=JhZgzeXEymQ>]
- [14] FacilitaT. *Cómo hacer una leva en solidworks*.  
[<https://www.youtube.com/watch?v=qyMUe9HFt5o>]
- [15] Dixon & Moe. *Códigos de colores HTML*.  
[<https://htmlcolorcodes.com/es/selector-de-color/>]
- [16] ColorHexa. *Color encyclopedia: Information and conversion*.  
[<https://www.colorhexa.com/>]
- [17] SolidWorks. *SolidWorks Motion Simulation*.  
[<https://www.solidworks.es/sw/products/simulation/solidworks-motion.htm>]

## Bibliografía complementaria

1. Cardona Foix, S. Clos Costa, D. *Teoría de máquinas*. Universitat Politècnica de Catalunya. ETSEIB. 2001.
2. Pérez Rodríguez, R. Zayas Figueras, E.E. Quesada Estrada, A.M. Hernández González, L.W. *Un entorno virtual para la enseñanza de máquinas herramienta y teoría de los mecanismos*. Universidad de Holguín.
3. Cambero Rivero, González Andrino, R. Rodríguez Salgado, D. y Herrera Olivenza, J.M. *Utilización de modelos virtuales de máquinas-herramienta en formato de fácil acceso para la docencia en asignaturas relacionadas con fabricación mecánica*. XIX Congreso Nacional de Ingeniería Mecánica. Universidad de Extremadura. 2012.
4. I. Cambero Rivero, R. González Andrino, D. Rodríguez Salgado, F. J. Alonso Sánchez. *Virtualización de máquinas-herramienta para uso docente en asignaturas relacionadas con fabricación mecánica*. XVIII Congreso de Ingeniería Mecánica, Ciudad Real, España. 2010.
5. Wang Hao-Chuan, Chang Chun-Yen, Li Tsai-Yen. *The comparative efficacy of 2D- versus 3D- based media design for influencing spatial visualization skills*. Computer in Human Behavior, 23-4. 2007.
6. Mark J. Clayton, Robert B. Warden, Thomas W. Parker. *Virtual construction of architecture using 3D CAD and simulation*. Automation in Construction, 11-2. 2002.
7. Maceo M, Yendrid. *Desarrollo de un modelo virtual de una Següeta Mecánica*. Holguín; Universidad de Holguín. 2004.