



Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial de Barcelona

Teoría de Máquinas y Mecanismos

y

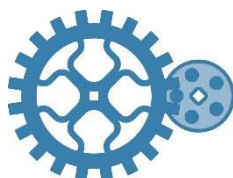
Proyecto II

**Compendio de mecanismos modelados, animados y
materializados mediante impresión 3D**

Enrique Ernesto Zayas Figueras

Aitor Garcia Rovira

José Luis Tejedo Sobrino



Departamento de Ingeniería Mecánica

Octubre/ 2019

Autores: Enrique Ernesto Zayas Figueras

Aitor Garcia Rovira

José Luis Tejedo Sobrino

Universitat Politècnica de Catalunya (UPC)

Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial de Barcelona (ETSEIB)

Departamento de Ingeniería Mecánica (DEM)

“Teoría de Máquinas y Mecanismos y Proyecto II. Compendio de mecanismos modelados, animados y materializados mediante impresión 3D”

ISBN: 978-84-09-16140-9

ÍNDICE

Contenido

INTRODUCCIÓN	5
MECANISMO DEL PICAPORTE DE UNA PUERTA	7
MECANISMO DEL GATO DE UN COCHE	11
MECANISMO DE UNA MÁQUINA DE COSER DE JUGUETE	14
MECANISMO DE RETORNO RÁPIDO DE WHITWORTH: VARIANTES CONSTRUCTIVAS	23
MECANISMO REGULADOR DE WATT	32
MECANISMO DE LEVA-PALPADOR: TRES VARIANTES CONSTRUCTIVAS	39
BIBLIOGRAFÍA	48

Introducción

El presente documento expone un grupo de seis mecanismos cuyos modelos virtuales tridimensionales han sido creados con el programa CAD SolidWorks®2018/Student Edition y posteriormente materializados mediante impresión 3D, en particular con el uso de la tecnología de Modelado por Deposición Fundida (MDF) utilizando plástico de tipo PLA (ácido poliláctico). Este trabajo constituye un segundo compendio de mecanismos, como continuidad y enriquecimiento, de un primer compendio de mecanismos de título “*Teoría de Máquinas y Mecanismos. Compendio de mecanismos modelados y animados en SolidWorks*” de los autores Zayas y Horas (2019).

Los mecanismos que constituyen este nuevo compendio son los siguientes: a) el mecanismo de retorno rápido de Withworth -con tres versiones constructivas de módulos intercambiables sobre una misma bancada, b) el mecanismo Regulador de Watt, c) una máquina de coser de juguete -que incluye diversos mecanismos que facilitan su motorización y funcionamiento, d) el mecanismo de leva-palpador con tres versiones constructivas de módulos intercambiables, e) el mecanismo del picaporte de una puerta y f) el mecanismo de un gato mecánico para coche - este último no se materializa en plástico. Los mecanismos antes citados corresponden por una parte a mecanismos contenidos en artefactos comunes en la vida cotidiana (como lo es el mecanismo del picaporte o el gato mecánico), y por otra a mecanismos clásicos o históricos como por ejemplo el regulador de Watt surgido en la época de primera revolución industrial y utilizado en las máquinas de vapor. El trabajo expone los esquemas de símbolos de los mecanismos (realizados mediante el programa Adobe Illustrator®), incluyendo en los mismos un conjunto de parámetros y variables geométricas, que se utilizan en la descripción del funcionamiento y en la explicación de la determinación del número de grados de libertad de los mecanismos y de la posible existencia de redundancias en los mismos.

Para la creación de los modelos virtuales y reales, así como para la motorización de las maquetas fabricadas, se ha aplicado un procedimiento que comienza con la elección del mecanismo, su caracterización técnica y estructural, la creación de los modelos virtuales, la esquematización utilizando símbolos normalizados de elementos y enlaces, la simulación del funcionamiento del mecanismo utilizando el módulo Motion de SolidWorks, la materialización por impresión 3D de los mecanismos y su motorización utilizando motores paso a paso y motores de corriente continua. Además, se han creado animaciones que simulan el funcionamiento de dichos modelos virtuales y también se han grabado videos del funcionamiento de las maquetas fabricadas y motorizadas, de los cuales aquí se muestran capturas de pantallas de las reproducciones de dichos videos.

En los modelos virtuales creados se utiliza un código de colores en correspondencia a cada tipo de elemento que constituyen a los mecanismos, lo que facilita su descripción. Cabe destacar el hecho de que también en los modelos físicos, se han utilizado en la medida de lo posible, distintos colores en las piezas impresas también con el objetivo de facilitar la identificación de distintos elementos del mecanismo. Los modelos virtuales y reales, así como los esquemas y los videos

antes citados, han sido creados con el objetivo de ser utilizados como material de apoyo didáctico para la enseñanza y el aprendizaje de las materias “Teoría de Máquinas y Mecanismos” y “Proyecto II” recogidas en el Plan de Estudio del Grado en Ingeniería en Tecnologías Industriales de la ETSEIB, las cuales son impartidas por el primer autor del presente trabajo.

Este segundo compendio de mecanismo recoge parte del trabajo conjunto de los autores y expone una versión revisada y corregida del contenido del TFG de título “*Diseño, fabricación, motorización y control de mecanismos diversos a utilizar como recursos didácticos en las asignaturas Teoría de Máquinas y Mecanismos y Proyecto II*” (Garcia, 2019). Este trabajo pretende ser de utilidad para estudiantes, profesores y personas interesadas en el ámbito de los mecanismos y las máquinas, así como en el ámbito de la educación STEM (educación en Ciencia, Tecnología, Ingeniería y Matemáticas), imprescindible en la formación de los futuros profesionales.

Mecanismo del Picaporte de una puerta

La Figura 1 a) muestra la foto del mecanismo picaporte montado en una puerta, así como las manillas que solidarias a la barra de sección cuadrada permiten accionar dicho mecanismo para abrir la puerta tanto desde la parte anterior como la posterior de ésta. En la Figura 1 b) se muestra las partes componentes del mecanismo que son: una leva con cubo de sección cuadrada interior -donde se coloca la barra solidaria a las manillas que la accionan haciéndola rotar en sentido horario o antihorario; un palpador doble con movimiento de translación, en cuyo extremo está unido el pestillo y un resorte de compresión que mantiene el contacto leva-palpador y cuya función es devolver al mecanismo a su posición inicial cuando deja de accionarse una de las manillas y, por último, la carcasa que contiene la guía por donde se desplaza el palpador -ésta se aloja en el interior de la puerta. Este mecanismo tiene un grado de libertad.



Figura 1. Mecanismo del picaporte: a) Mecanismo montado en la puerta, barra de sección cuadrada y manillas anterior y posterior de accionamiento b) Foto del picaporte y sus elementos constructivos.

En la Figura 2 se muestran respectivamente: a) el modelo virtual 3D del mecanismo y b) su vista en alzado y en la parte inferior el esquema de símbolos superpuesto en dicha vista.

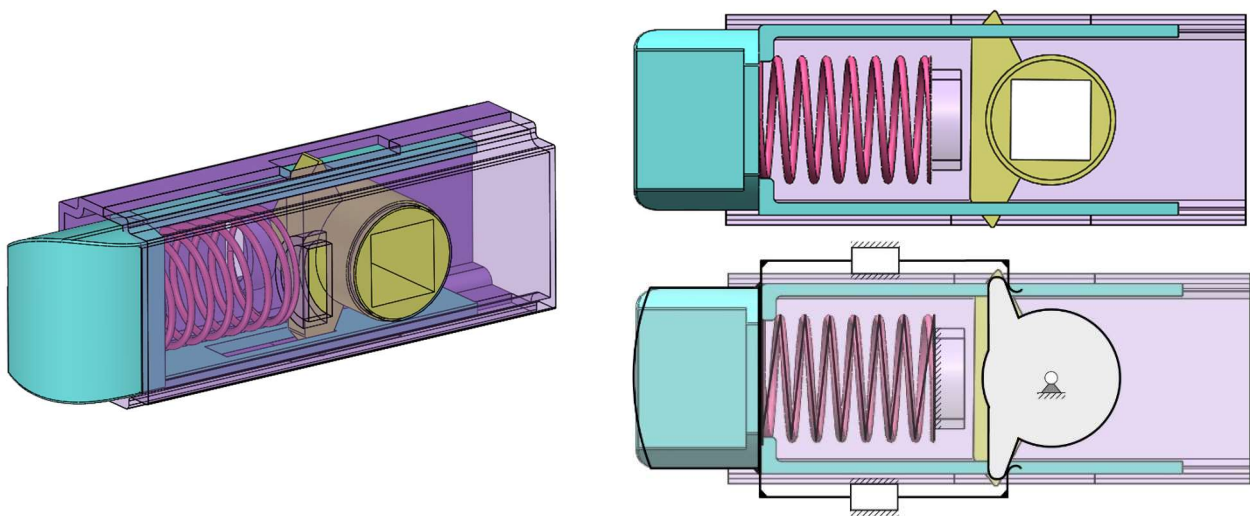


Figura 2. Mecanismo picaporte: a) modelo virtual 3D y b) Vista en alzado (superior) y Esquema de símbolos superpuesto en la vista en alzado (inferior).

La Figura 3 muestra el esquema de símbolos indicando los parámetros y variables geométricas considerados necesarios para realizar sus análisis geométrico y cinemático, así como los valores reales de dichos parámetros.

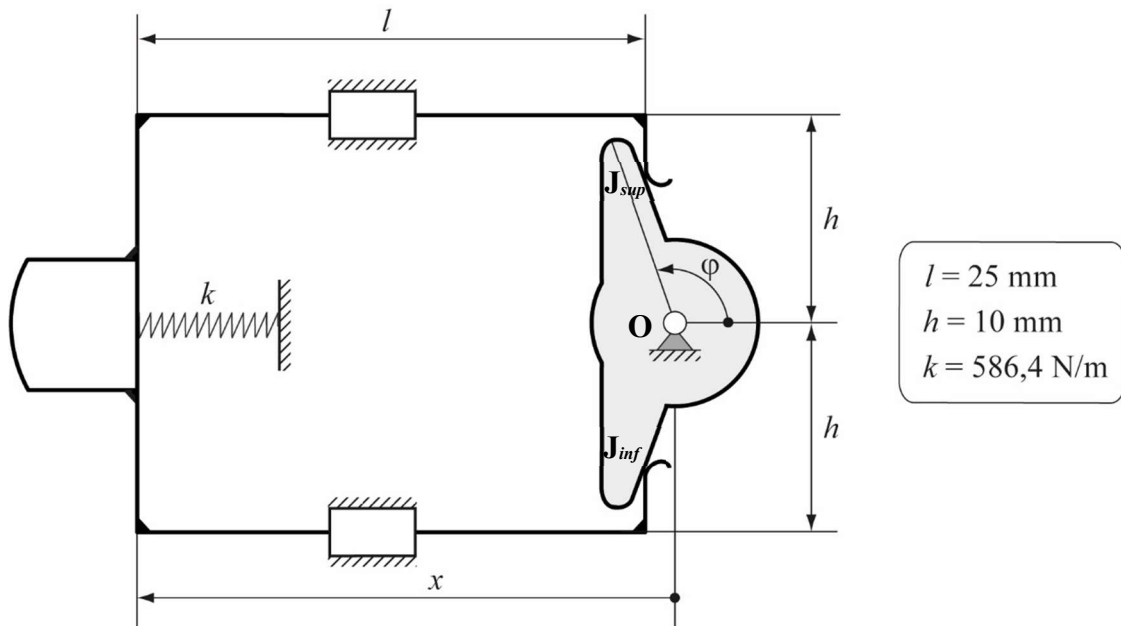


Figura 3. Esquema de símbolos con variables y parámetros del mecanismo picaporte.

El esquema de símbolos mostrado en la Figura 3 facilita explicar y entender mejor el funcionamiento del mecanismo picaporte, que es el siguiente: cuando se acciona una manilla haciéndola girar, se hace girar un ángulo φ a la leva (que está unida a la manilla a través de la barra de sección cuadrada antes citada); la leva empuja al palpador a través de uno de los dos puntos de contactos leva-palpador (punto \mathbf{J}_{sup} de contacto superior y punto \mathbf{J}_{inf} de contacto inferior) según el sentido de giro de la leva, el palpador se traslada disminuyendo la distancia x y comprimiendo al resorte de constante elástica k , así el pestillo -solidario al palpador- se mueve acercándose a la leva y queda oculto dentro de la guía de la carcasa (Figura 1), permitiendo la abertura de la puerta. Al soltar la manilla, el resorte empuja al palpador alejándolo de la leva y el mecanismo regresa a su posición inicial.

Para el estudio del mecanismo se utiliza el vector de coordenadas generalizadas $\mathbf{q} = \{\varphi, x\}^T$. A partir de realizar la inspección directa del mecanismo (Figura 3) se observa que el mismo tiene un grado de libertad (gdl), ya que para detenerlo sólo es necesario anular la velocidad angular de la leva ($\dot{\varphi} = 0$), así ésta no puede accionar al palpador y el mecanismo queda en reposo.

Para comprobar la presencia de redundancias en el mecanismo aplicando el criterio de superposición de restricciones (Criterio de Grübler-Kutzbach) a todo el mecanismo:

$$gdl = 2(\text{sólidos móviles}) \times 3 \text{ gdl / sólido} - 1(\text{articulación}) \times 2 \text{ gdl / artic.} - 2(\text{primásticos}) \times 2 \text{ gdl / prism.} - 2(\text{pares superiores}) \times 1 \text{ gdl / par sup.} = -2 \quad (1)$$

La diferencia entre los grados de libertad real (determinado por inspección directa) y el determinado con el criterio de Grübler-Kutzbach, permite determinar el grado de redundancias totales, así:

$$\text{Grado redundancia} = \text{Grado libertad real} - \text{Grado libertad Grübler} = 3 \quad (2)$$

Este grado de redundancias totales se debe a la presencia de varios enlaces que restringen grados de libertad ya restringidos por otros enlaces. En concreto, estos enlaces son: uno de los pares prismáticos (que restringe 2 *gdl*) y uno de los pares superiores (que restringe 1 *gdl*).

Este mecanismo leva-palpador, en posición inicial o de equilibrio, es de contacto bilateral (Figura 3). Esto hace que el pestillo-palpador pueda accionarse por medio del giro de la leva en uno u otro sentido de rotación, es decir, girando la manilla de la puerta en sentido horario o antihorario.

Si en este mecanismo se eliminan los enlaces redundantes antes citado, hecho que corresponde a girar la leva únicamente en sentido horario, se obtiene el esquema del mecanismo libre de redundancias con contacto unilateral mostrado en la Figura 4.

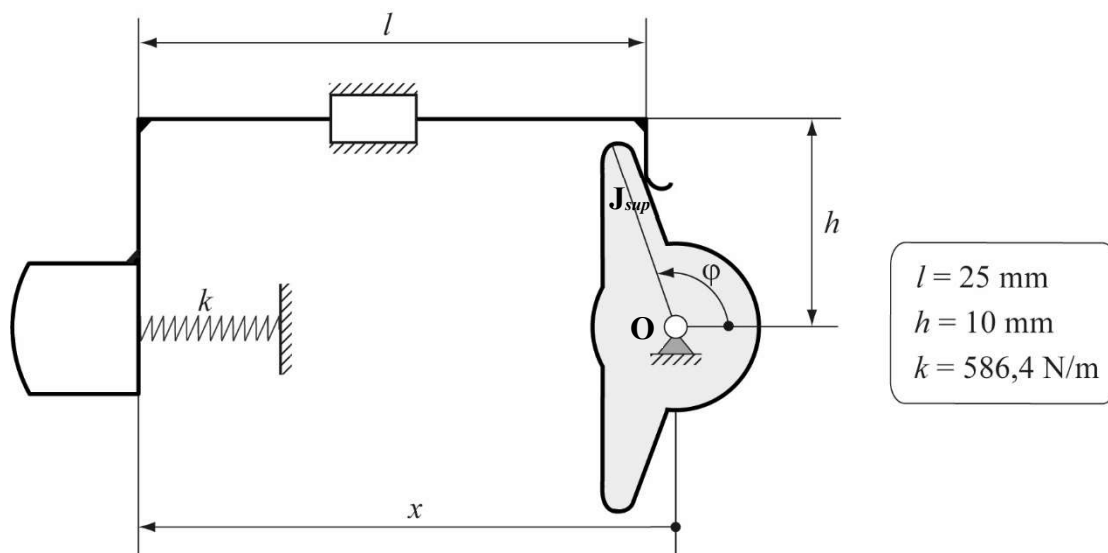


Figura 4. Esquema de símbolos del mecanismo picaporte de contacto unilateral.

Obsérvese que ahora con el criterio de Grübler-Kutzbach se obtiene:

$$\begin{aligned} gdl &= 2(\text{sólidos móviles}) \times 3 \text{ gdl / sólido} - 1(\text{articulación}) \times 2 \text{ gdl / artic.} \\ &- 1(\text{prismático}) \times 2 \text{ gdl / prism.} - 1(\text{par superior}) \times 1 \text{ gdl / par sup.} \\ gdl &= 1 \end{aligned} \quad (3)$$

El número de *gdl* determinado por inspección directa, que es 1, es igual que el determinado por el criterio de Grübler-Kutzbach, lo que indica que en esta nueva representación del mecanismo (Figura 4) no hay redundancias.

El mecanismo del picaporte ha sido modelado con SolidWorks y también se ha realizado la simulación de su funcionamiento mediante el módulo Motion, generando un vídeo con la animación del mismo. En la Figura 5 se expone una captura de imagen tomada durante la reproducción de la simulación citada.

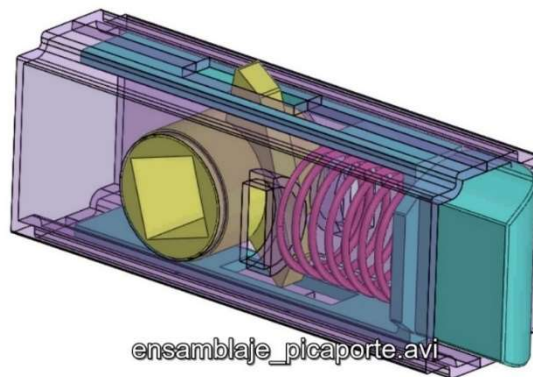


Figura 5. Captura de pantalla de la reproducción de la animación 3D del mecanismo picaporte.

Realizada la simulación del funcionamiento, se pasa a la fase de materialización del mecanismo. La geometría del palpador-pestillo no es fácilmente imprimible, así se ha requerido dividirlo en tres partes para la obtención de un resultado óptimo en la fabricación. Se ha imprimido por separado el extremo del palpador (es decir el pestillo) y sus dos piezas prismáticas laterales (que se deslizarán por la guía y que contienen las ranuras donde entra y contacta la leva). Las tres piezas se han ensamblado con tornillos (Figura 6 a). Con la impresión del resto las piezas de mecanismo y el uso de un muelle que se ha fabricado con alambre de acero, se ha obtenido la maqueta física del mecanismo del picaporte de la Figura 6 b).

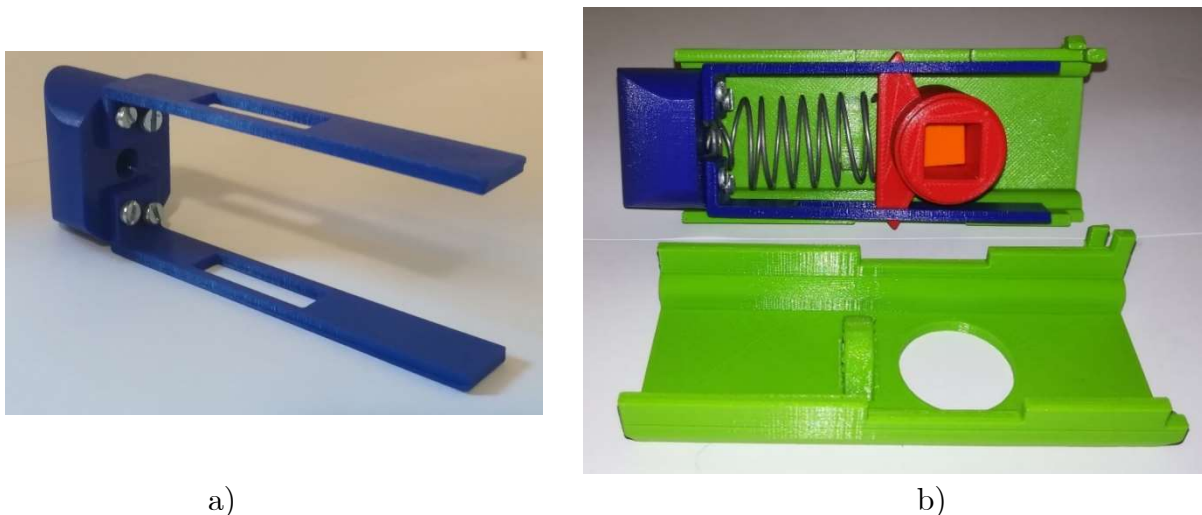


Figura 6. Materialización del mecanismo: a) Ensamble del palpador-pestillo (color azul) y b) Mecanismo ensamblado con leva en color rojo y carcasa en color verde.

Mecanismo del Gato de un coche

En la figura 7 se muestra la fotografía de un gato mecánico, artefacto de uso común, cuya función es ayudar al usuario a levantar el coche por el lado donde está la rueda que se necesita o quiere cambiar, aportando una vez colocado un cuarto punto de apoyo del coche, en concreto, el de la rueda reemplazada. Así, elegido el lado correspondiente, el gato se debe colocar en posición semiabierto debajo del coche y con la muesca de elevación en contacto con el chasis del vehículo. El accionamiento de este mecanismo consiste en hacer girar la manivela en sentido horario accionando de este modo al husillo que está roscado a una tuerca que articula en el balancín y en el extremo próximo a la muesca de elevación que es solidaria a la biela, el husillo gira libremente sobre un elemento articulado a la misma. Todo el conjunto se mueve y el balancín gira sobre el pie de apoyo (base). Esto hará ascender la muesca de elevación y, en consecuencia, la parte del coche en contacto con ella, hasta la altura donde la rueda deje de estar en contacto con el suelo y así puede ser cambiada. El sistema husillo tuerca permite convertir un par de entrada de valor bajo en una fuerza lineal de gran valor, permitiendo vencer la fuerza del peso del coche y elevarlo.



Figura 7. Foto de un gato mecánico de un coche, con indicación de las partes principales.

El análisis de la estructura y características del mecanismo del gato confirma que está constituido por ocho elementos móviles y uno que se une la referencia tierra (la base o pie de apoyo) garantizando la estabilidad necesaria al mecanismo durante su funcionamiento. La manivela (1) es solidaria al husillo (2) de diámetro de 12 mm y con rosca de potencia con paso de $p = 2$ mm ; la tuerca (3) forma un enlace helicoidal con dicho husillo y a la vez articula en

el balancín (4) en el lado próximo a la manivela. Una quinta pieza (5) que permite al extremo del husillo girar libremente (articulación) respecto a ella y a la vez se articula con la biela (6). La pieza (7) con la muesca de elevación articula en la biela (permitiendo una pequeña rotación). Un octavo elemento, no visible a simple vista, es una barra con una sección dentada (barra-cremallera 8) que engrana con un piñón solidario a la barra biela en su extremo derecho (cuyo centro de rotación es la articulación de la biela con el balancín). Dicha barra-cremallera, es accionada por la sección dentada (piñón, oculto en el interior del balancín) solidaria al extremo derecho de la biela, cuando ésta gira sobre su articulación (Figura 8 b).

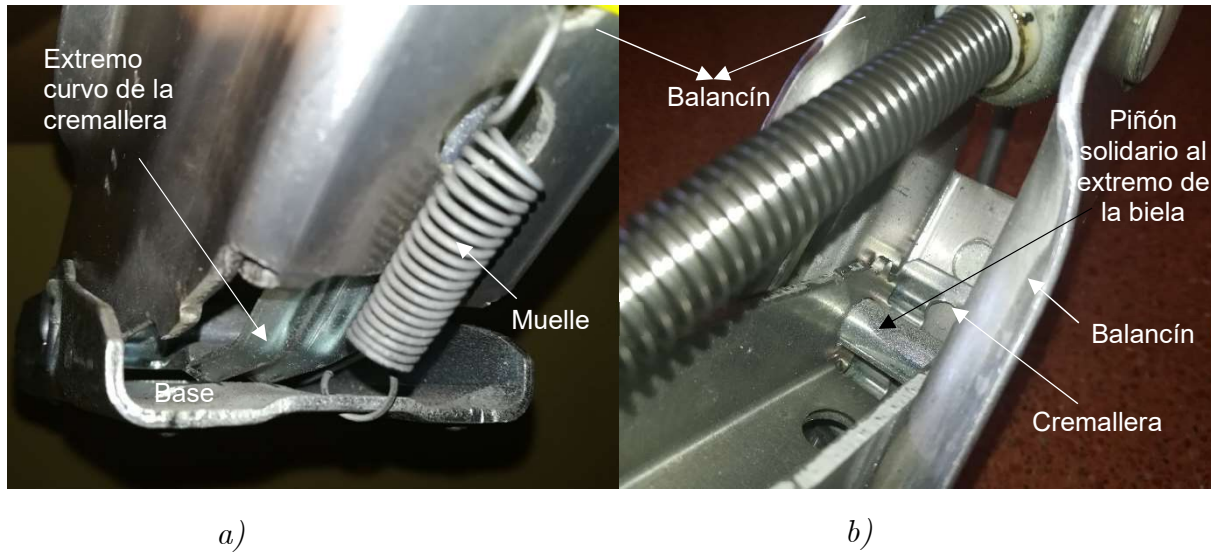


Figura 8. Fotos de detalles de elementos no detectables a simple vista: a) Resorte y extremo curvo de la cremallera que contacta con la base y b) Piñón solidario a la biela que engrana con la cremallera.

En este mecanismo es interesante destacar que la acción del peso del coche permite mantener en todo momento el contacto entre el extremo inferior de la barra-cremallera (Figura 8 a) y la base, formando un par superior -Figura 9), y, en consecuencia, impone el ángulo mínimo que se forma entre la base y el balancín. Por otra parte, para garantizar el contacto entre la barra-cremallera y la base cuando el gato está en posición cerrada, es decir cuando no se utiliza, se incluye un resorte lineal de constante elástica k (elemento elástico auxiliar) (Figura 8 a).

Identificados los elementos principales y explicado el principio de funcionamiento del gato mecánico, se crea el modelo virtual 3D del mecanismo (Figura 9), en el cual se ha prescindido de la incorporación del muelle.

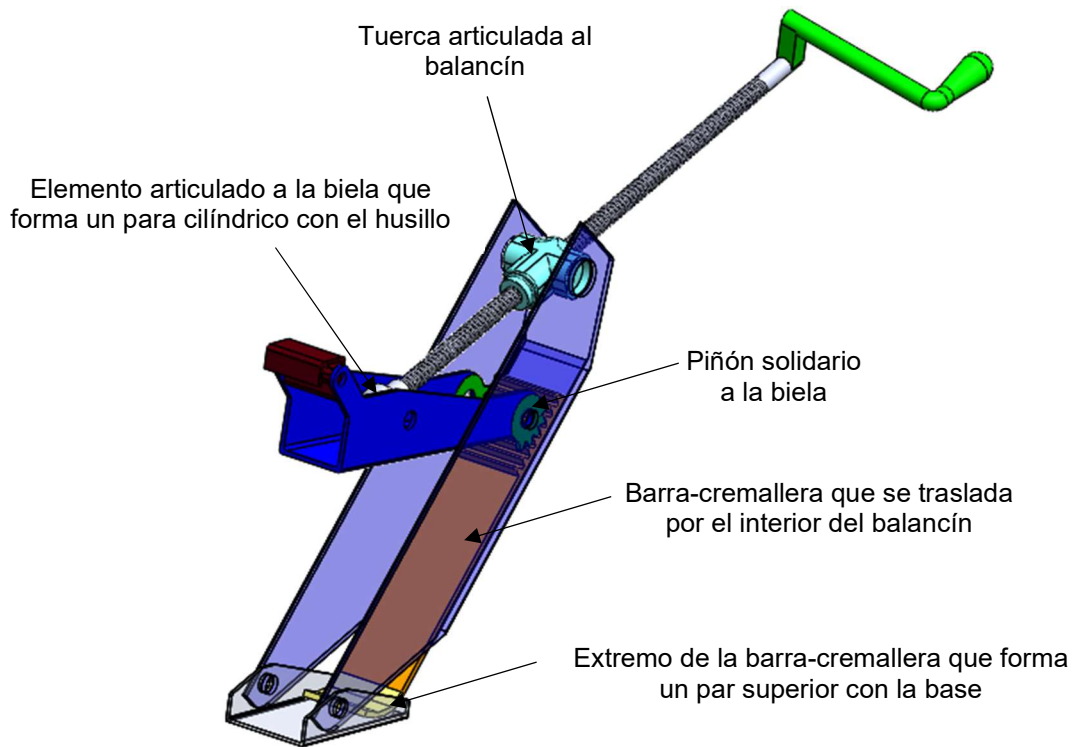


Figura 9. Modelo virtual 3 D del gato mecánico.

En la Figuras 10 a) y b) se muestran la vista en alzado del modelo 3D y la superposición del esquema de símbolos respectivamente.

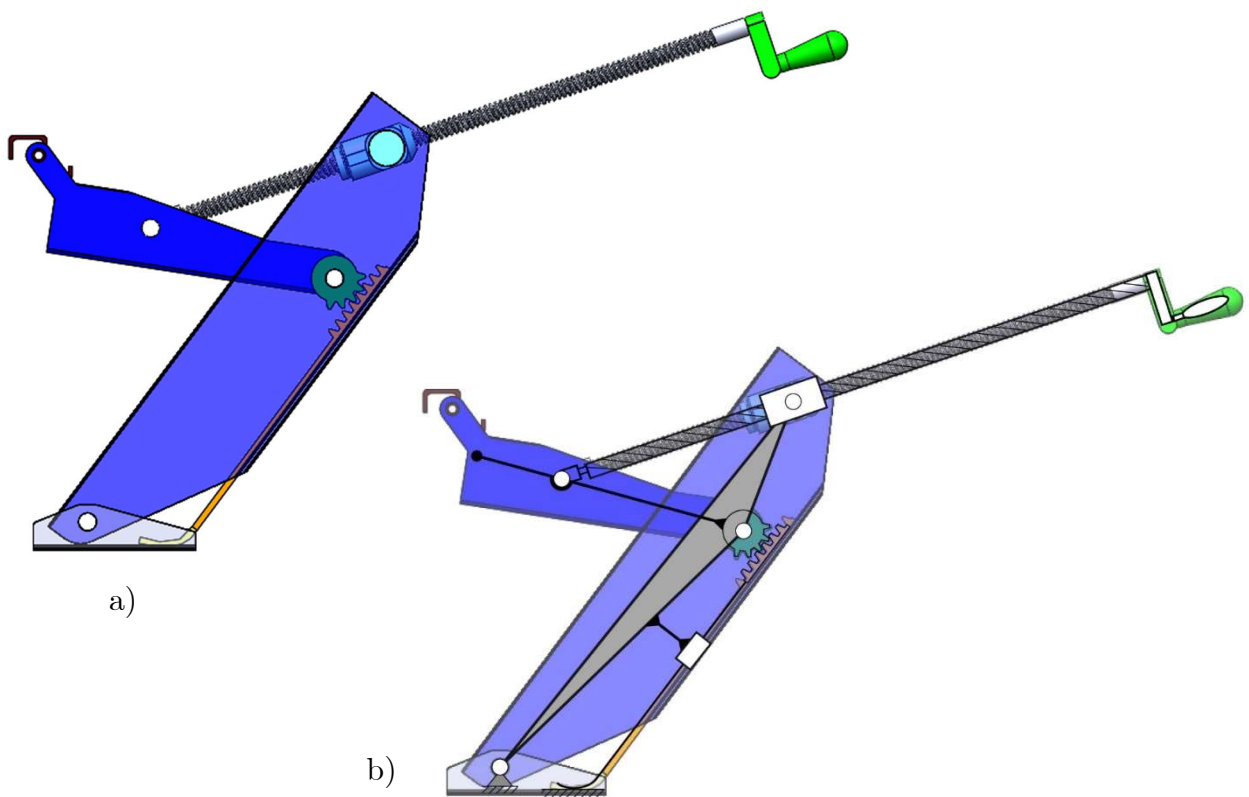


Figura 10. Mecanismo gato mecánico: a) Vista en alzado y b) Esquema de símbolos superpuesto.

En la figura 11 se muestra el esquema de símbolos con las variables y parámetros del mecanismo gato mecánico. Se incluye el resorte de constante k .

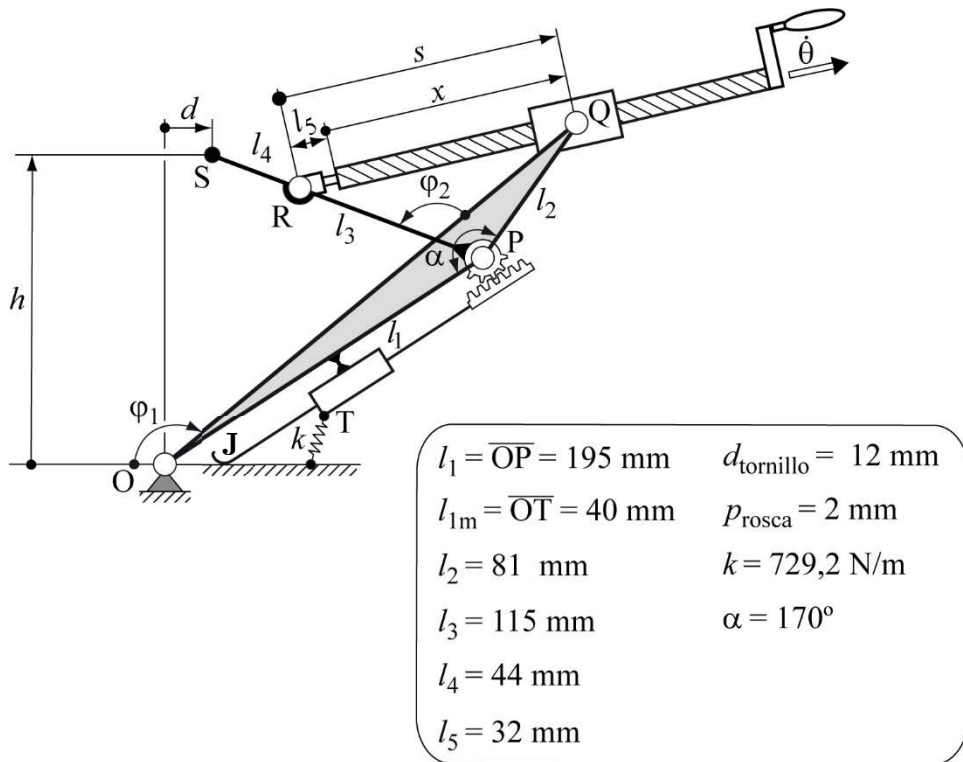


Figura 11. Esquema de símbolos con variables y parámetros del mecanismo gato mecánico de coche. Para el estudio del mecanismo del gato se utiliza el vector de coordenadas generalizadas $\mathbf{q} = \{\varphi_1, \varphi_2, x, s, d, h\}^T$.

Para ilustrar el concepto de grado de libertad forzado, se puede substituir el esquema de la figura 11 por el de la figura 12, que son equivalente cinemáticamente. En este nuevo esquema se ha substituido el sistema husillo-tuerca por un actuador lineal que de igual manera gobierna la variable s (distancia entre los puntos R y Q). El valor de esta variable, en la realidad, se regula mediante el giro del husillo, ya que a cada vuelta del husillo la distancia s varía en una magnitud igual al paso de rosca $s = p = 2 \text{ mm}$.

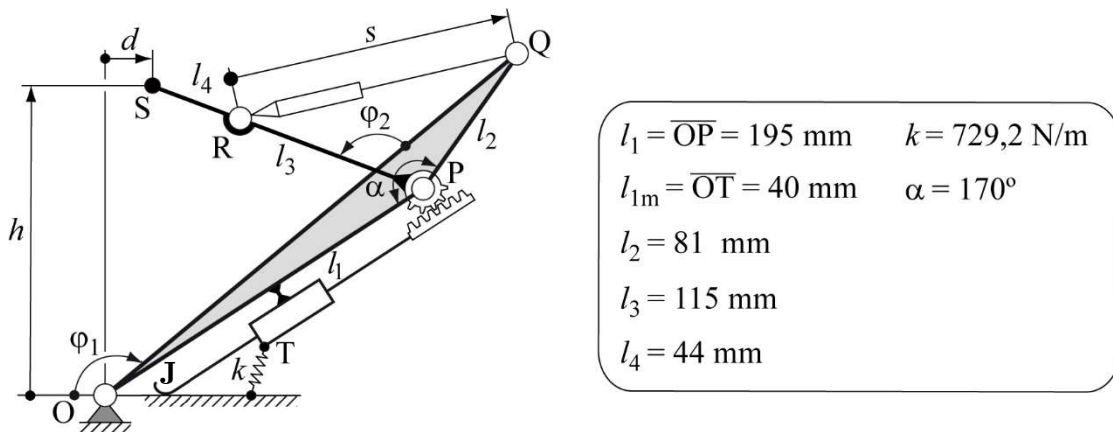


Figura 12. Esquema de símbolos del mecanismo gato mecánico que incluye un actuador lineal.

A partir de realizar la inspección directa del mecanismo esquematizado en la Figura 12 se observa que el mismo tiene un grado de libertad (gdl), ya que para detenerlo sólo es necesario anular sólo la velocidad lineal $\dot{s} = 0$. Así los puntos Q y R quedan fijos. Si R queda fijo la biela SP no cambia su orientación y por lo tanto el piñón no rota y no acciona a la cremallera, lo que hace que el punto J (de contacto cremallera-base) quede fijo, por tanto, tampoco gira el balancín OPQ alrededor de la articulación O y el punto S (de contacto del gato con el chasis del coche), permanece fijo y por tanto no se puede levantar al coche. Es importante destacar, que hacer $\dot{s} = 0$, equivale en el mecanismo real (Figura 11) a anular la velocidad angular del husillo $\dot{\theta} = 0$.

Aplicando el criterio de superposición de restricciones (Criterio de Grübler-Kutzbach) a todo el mecanismo (Figura 12), se comprueba que no tiene redundancias, dado que los gdl por inspección directa y por Grübler coinciden.

$$gdl = 3(\text{sólidos móviles}) \times 3 \text{ gdl / sólido} - 2(\text{articulaciones}) \times 2 \text{ gdl / artic.} - 1(\text{primástico}) \\ \times 2 \text{ gdl / prism.} - 1(\text{transmisión}) \times 1 \text{ gdl / transm.} - 1(\text{pars superior}) \times 1 \text{ gdl / par sup.} \quad (4)$$

$$gdl = 1$$

Una vez finalizada la caracterización, la creación del modelo virtual 3D y la esquematización, se realiza la simulación del mecanismo. Para la realización de la misma, únicamente ha sido necesario la incorporación de un motor rotatorio en la manivela. En la figura 13 se expone una captura de pantalla tomada durante la reproducción de la simulación citada.



Figura 13. Captura de pantalla de la reproducción de la animación 3D del mecanismo gato mecánico. Para este mecanismo en particular, se ha decidido no realizar su materialización en plástico. Esto se debe a la gran complejidad geométrica de algunas de sus piezas y a la dificultad de materializarla por impresión 3D.

Mecanismo de una Máquina de Coser de juguete

En la figura 14 se muestra la fotografía de una maqueta funcional fabricada en metal de una máquina de coser de juguete. La función de una máquina de coser es unir dos trozos de tela mediante dos hilos que se entrelazan, uno enhebrado en una aguja (hilo de un carrete superior) y otro que se coloca en un carrete inferior, donde va la lanzadera. Para que la máquina haga puntadas consecutivas, la tela se hace avanzar mediante un mecanismo denominado arrastra tela. De este modo, la máquina de coser está formada por dos mecanismos básicos: el que acciona la aguja y el que acciona los dientes que hacen avanzar la tela (mecanismo arrastra tela). El mecanismo que transmite movimiento a la aguja está formado por: una corona dentada con una pequeña manilla (para su accionamiento manual) que engrana con un piñón; en éste se articula una biela que a través de un enlace acciona a un balancín articulado en su centro a la bancada y en su extremo izquierdo a una corredera de movimiento vertical, la cual contiene a la aguja. El mecanismo que hace avanzar la tela está formado por: una leva de excéntrica (que contiene a la lanzadera) que al ser solidaria al eje donde va el piñón gira a la misma velocidad que éste y acciona a un palpador con movimiento compuesto de translación y rotación. En la parte superior del palpador están los dientes que levantan y hacen avanzar la tela después de cada puntada. Este mecanismo de leva-palpador tiene cierre del par superior por forma, es decir el palpador tiene contacto bilateral con la excéntrica.

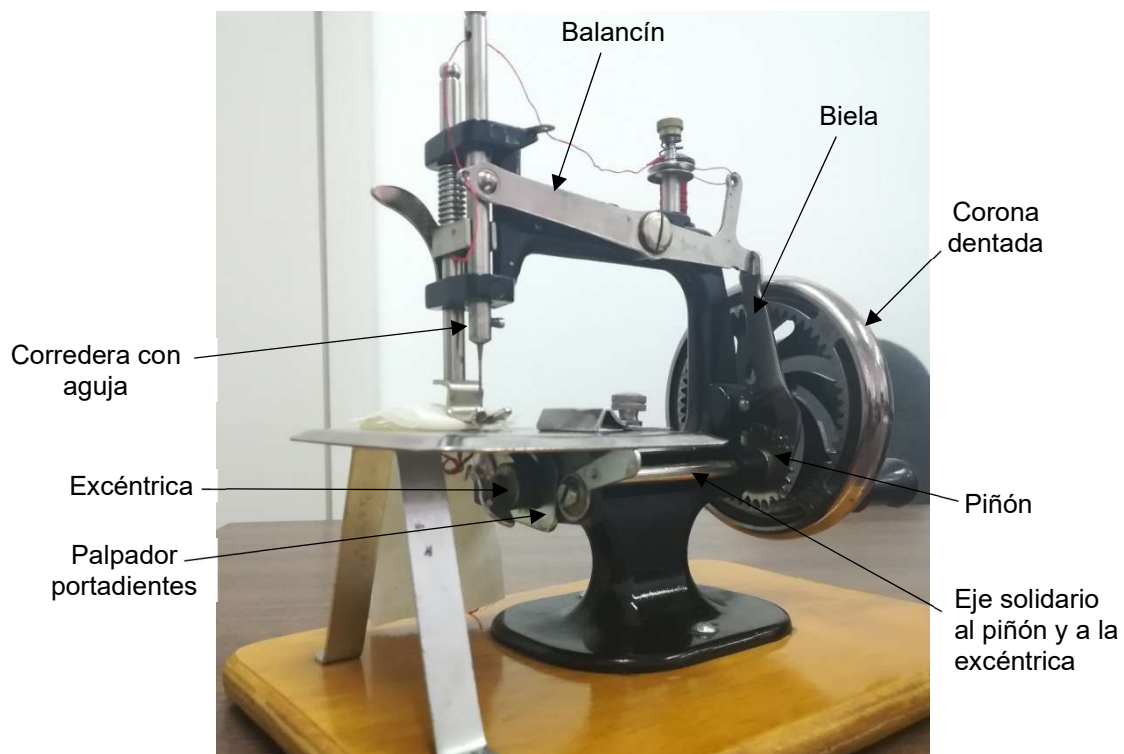


Figura 14. Fotografía de la máquina de coser y sus partes principales.

El análisis de la estructura constructiva de la máquina, permite identificar otro mecanismo auxiliar denominado mecanismo del prensa-tela (Figura 15) cuya función permite guiar la tela cuando ésta avanza en el plano horizontal sin que se levante más allá de la altura requerida durante el funcionamiento normal de la máquina de coser, también permite pisar y sujetarla

cuando es necesario inmovilizarla. Este mecanismo está compuesto por: una corredera en la que es solidaria la horquilla plana (prensa-tela), un muelle de compresión que empuja a la corredera con el prensa-tela hacia abajo y la palanca de accionamiento de dicho mecanismo.

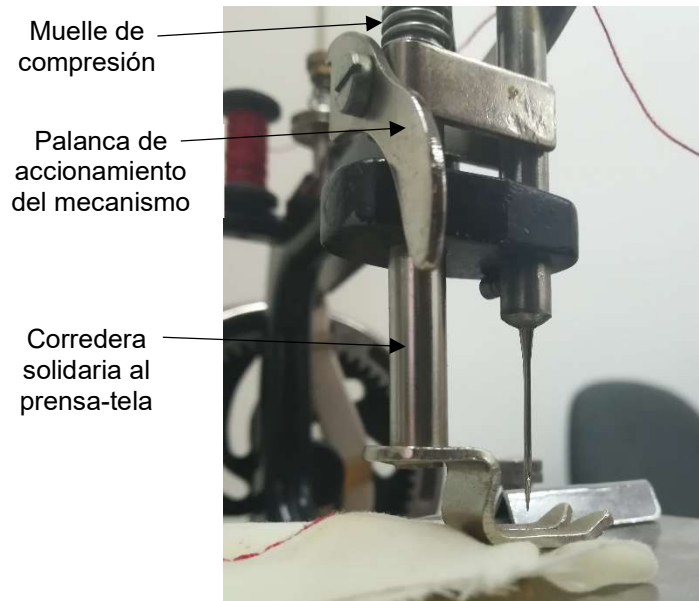


Figura 15. Fotografía del mecanismo auxiliar prensa-tela

Una vez analizada la estructura y el funcionamiento de la máquina de coser, se crea su modelo virtual 3D (Figura 16).

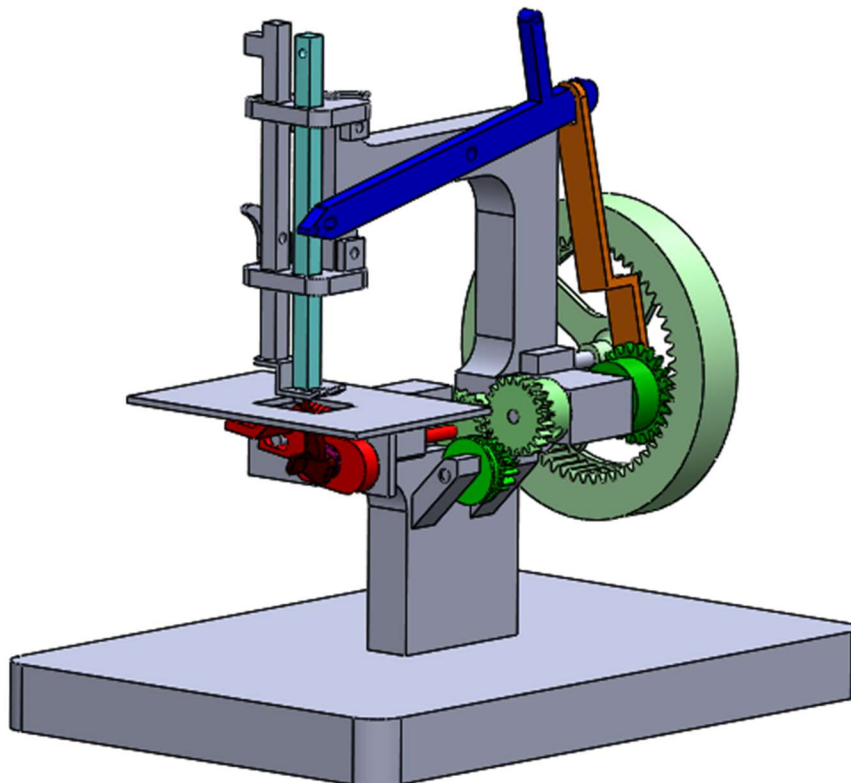


Figura 16. Fotografía de la máquina de coser y sus partes principales.

Es importante destacar que el modelo virtual creado (Figura 16) incorpora variaciones respecto al diseño original (introduciendo nuevos elementos) consideradas necesarias para establecer un accionamiento motorizado. Estas variaciones se han plasmado en la introducción de un tren de

engranajes compuesto por tres ruedas cilíndricas dentadas (de color verde claro), una rueda (1) central motriz (a la que es solidaria una polea) que gira sobre un nuevo eje fijo a la bancada y que engrana con las otras dos ruedas accionando de manera simultánea por un lado al mecanismo de la aguja y por otro al mecanismo arrastra-tela. La nueva rueda (2) que mueve al mecanismo de la aguja, es solidaria al eje del piñón (que ahora es más corto y gira respecto a la bancada). La otra nueva rueda (3) es solidaria al eje de la excéntrica y está montada sobre un eje de longitud mediana que también gira respecto a la bancada. La rueda motriz que contiene a una polea solidaria (de diámetro d_{p1}) recibe movimiento desde un motor a través de una polea plana (de diámetro d_{p2}) que se indica en el esquema de símbolos (Figura 17) y posteriormente se puede ver en la fotografía del mecanismo motorizado (Figura 19).

Para el caso particular de la máquina de coser, se ha optado por pasar directamente a la esquematización de los mecanismos principales que la forman (Figura 17). Esto se debe a que los elementos de la máquina están contenidos en diferentes planos y en planos perpendiculares entre sí, complicando la representación de los elementos y sus uniones en una única vista. En el caso del mecanismo de la aguja se hace una simplificación colocando la corona dentada y el piñón en el mismo plano que el balancín y la corredera con aguja, aunque en realidad están en planos perpendiculares. Además, no se ha esquematizado el mecanismo auxiliar del prensa-tela ya que durante el funcionamiento normal de la máquina de coser éste está en reposo.

El vector de coordenadas generalizadas utilizado para el estudio del mecanismo que transmite el movimiento a la aguja es $\mathbf{q} = \{\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, s\}^T$. Por inspección directa el mecanismo tiene un grado de libertad (1 *gdl*), es decir si se anula la velocidad $\dot{\varphi}_1 = 0$ del piñón que contiene a la manivela OP, el punto P queda fijo, y se obtiene un triángulo O_3PQ de lados constantes, con lo que el punto Q queda fijo y por tanto el balancín QO_3R también queda fijo. Ello implica que el punto R es fijo y la corredera no se mueve. Así todo el mecanismo queda en reposo, anulando una única velocidad generalizada.

A partir de los esquemas de la figura 17, se pueden calcular las relaciones de transmisión principales. Por una parte, la que hace referencia al accionamiento de la máquina de coser de forma manual, es decir, por medio del giro de la corona dentada; y por otra la que hace referencia al accionamiento por parte del motor, utilizando las transmisión de correa y ruedas dentadas.

- La relación de transmisión entre la corona dentada con z_2 dientes y velocidad angular ω_2 y el piñón, con z_1 dientes y velocidad angular ω_1 , del accionamiento manual es:

$$\tau_1 = \pm \frac{\omega_{salida}}{\omega_{entrada}} = \pm \frac{\prod Z_{conductoras}}{\prod Z_{conducidas}} \quad (5)$$

$$\tau_1 = \frac{\omega_1}{\omega_2} = \frac{z_2}{z_1} = \frac{56}{22} = 2,55$$

En el caso del accionamiento motorizado (Figura 19) se tiene que en el eje del motor (articulación O_6 en la figura 17) está montada la polea de diámetro d_{p2} (con velocidad angular ω_{p2}), y desde aquí se transmite movimiento de rotación por un lado hasta rueda dentada de z_4 dientes solidaria al eje O_5 (con velocidad angular ω_4) que acciona el mecanismo de los dientes y por el otro lado hasta rueda dentada de z_3 dientes solidaria al eje O_1 (con velocidad angular ω_1) que acciona el mecanismo de la aguja. Así, se tienen 2 relaciones de transmisión, que son las siguientes:

- La relación de transmisión τ_2 desde el eje motor O_6 hasta el eje al eje O_5 que acciona el mecanismo de los dientes es:

$$\tau_2 = \pm \frac{\omega_{salida}}{\omega_{entrada}} = -\frac{\omega_4}{\omega_{p2}} = \frac{d_{p2}}{d_{p1}} \cdot -\frac{z_5}{z_4} = \frac{6}{18} \cdot -\frac{13}{23} = -0,188 \quad (6)$$

- La relación de transmisión τ_3 desde el eje motor O_6 hasta el eje al eje O_1 que acciona el mecanismo de la aguja es:

$$\tau_3 = \pm \frac{\omega_{salida}}{\omega_{entrada}} = -\frac{\omega_1}{\omega_{p2}} = \frac{d_{p2}}{d_{p1}} \cdot -\frac{z_5}{z_3} = \frac{6}{18} \cdot -\frac{13}{23} = -0,188 \quad (7)$$

Las relaciones τ_2 y τ_3 son iguales, al ser igual el número de dientes de las ruedas dentadas que accionan los dos mecanismos principales, de tal modo que al igual que en el mecanismo original (Figura 14), se han diseñado transmisiones que garantizan la misma velocidad del eje de entrada de los mecanismos de la aguja y de los dientes.

A partir del esquema de símbolos de la parte superior de la figura 17, se observa por inspección directa que el mecanismo tiene un grado de libertad (1 *gdl*), ya que al detener el giro de la corona dentada haciendo su velocidad angular $\omega_2 = 0$, no se transmite rotación al piñón y por

tanto el punto P (articulación del piñón con la biela) queda fijo, y se obtiene un triángulo O_3PQ de lados constantes, así Q queda fijo y el balancín QR no se mueve, ni tampoco la corredera (con el pivote R) que contiene la aguja. Todo queda fijo, anulando una única velocidad generalizada.

A continuación, se aplica el criterio de Grübler-Kutzbach a toda la máquina para determinar la presencia de redundancias, considerando los 2 mecanismos básicos y las transmisiones de polea-correa y dentadas esquematizadas en la figura 17, así se obtiene:

$$gdl = 9(\text{sólidos móviles}) \times 3 \text{ gdl / sólido} - 8(\text{articulaciones}) \times 2 \text{ gdl / artic.} - 1(\text{primástico}) \\ \times 2 \text{ gdl / prism.} - 4(\text{transmisiones}) \times 1 \text{ gdl / transm.} - 2(\text{guía - pasador}) \times 1 \text{ gdl / guía - pas.} \quad (8) \\ - 2(\text{pares superiores}) \times 1 \text{ gdl / par sup.} = 1$$

Se determina, de esta forma, que el mecanismo no presenta redundancias totales.

Completado el análisis de la máquina de coser y su diseño del modelo virtual en 3D, se realizó la simulación del funcionamiento. En la figura 18 se muestra una captura de pantalla del video.

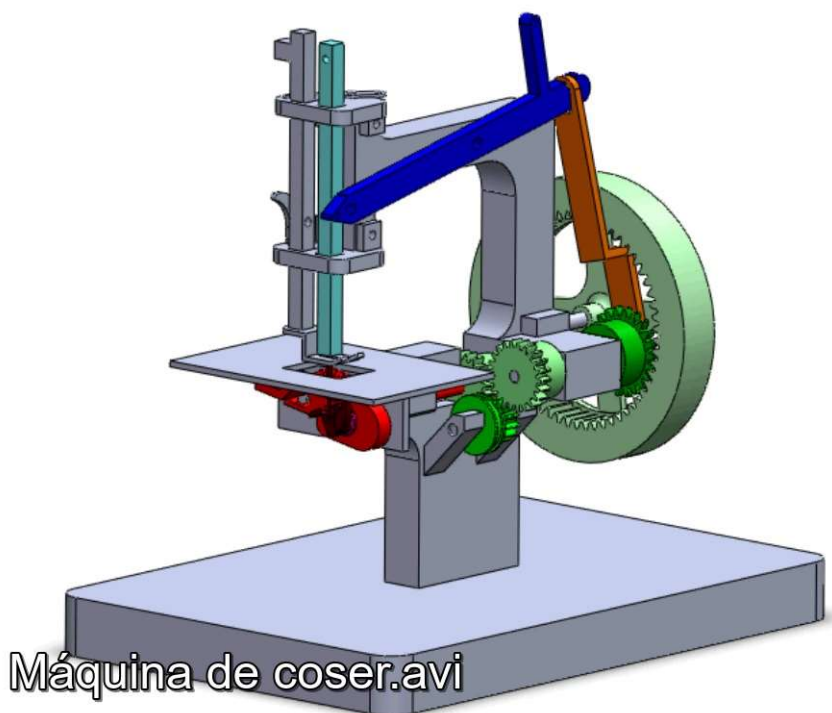


Figura 18. Captura de pantalla de la reproducción de la animación 3D de la máquina de coser.

Una vez realizada la simulación, se ha pasado a la materialización de la maqueta mediante impresión 3D (Figura 19) y a su motorización utilizando un motor de corriente continua, una caja de 2 baterías de 1,5 voltios (caja de color negro), cables eléctricos y un interruptor se han colocado en el lado posterior de la bancada. Los cables eléctricos que conectan los distintos

elementos se han colocado en ranuras mecanizadas en la parte inferior de la base de madera (bancada), quedando así ocultos.

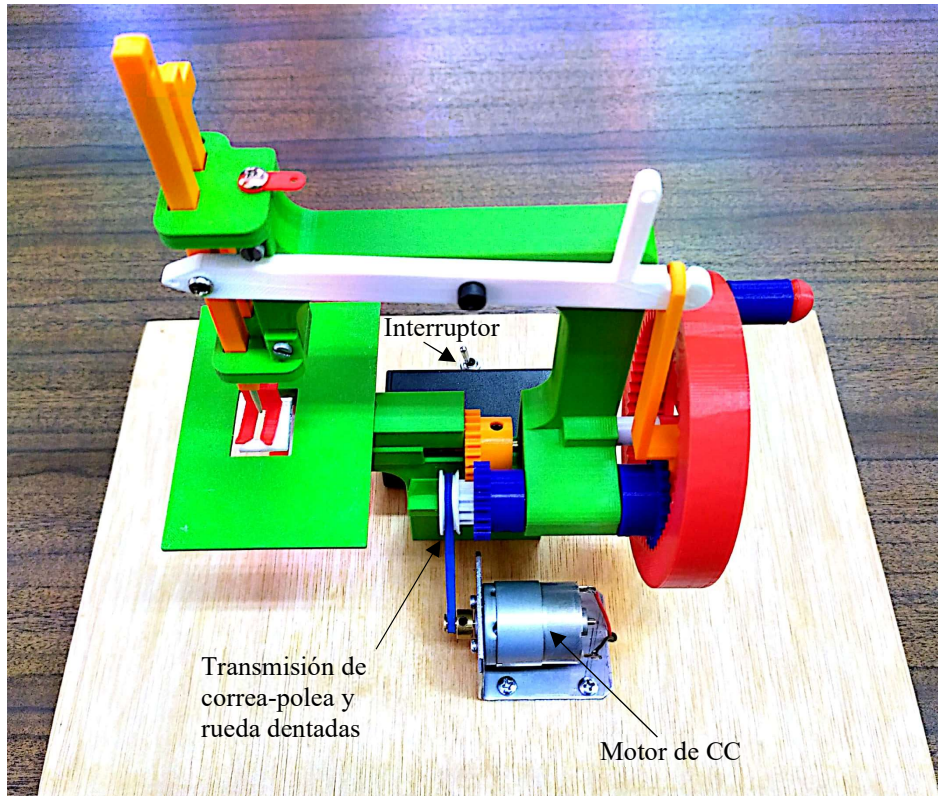


Figura 19. Fotografía de la maqueta impresa en material plástico de la máquina de coser motorizada.

Es importante, destacar el hecho de que esta maqueta se replicó y entregó como regalo a los familiares del profesor catedrático Salvador Cardona Foix de la UPC, en un homenaje póstumo. La maqueta funcional entregada como obsequio y colocada en el interior de una caja de acrílico transparente se muestra en la figura 20.

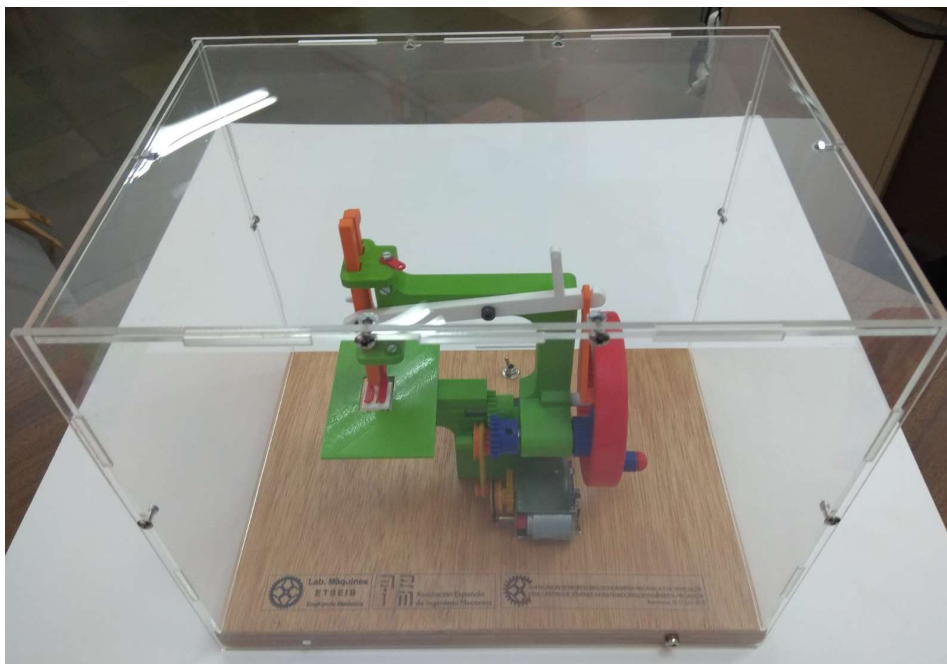


Figura 20. Fotografía de la maqueta entregada en el homenaje al profesor Salvador Cardona.

Mecanismo de Retorno Rápido de Whitworth: variantes constructivas

En este caso, se ha tomado como referencia el mecanismo del retorno rápido (Figura 21) que Carlos Horas materializó en su trabajo de final de grado (Horas, 2019) y que se muestra en el primer compendio de mecanismos de título “Teoría de Máquinas y Mecanismos. Compendio de mecanismos modelados y animados en SolidWorks” de los autores Zayas y Horas (2019).

En el presente compendio, se han estudiado y diseñado otras dos variantes constructivas del mecanismo de retorno rápido de Withworth y, se ha aplicado el paradigma de diseño modular con el objetivo de utilizar la misma bancada y configurar sobre ésta las tres variantes constructivas de dicho mecanismo, agregando o substrayendo elementos (o módulos) a una única estructura base.

El mecanismo de retorno rápido de Whitworth (Figura 21) se caracteriza porque la carrera de retorno (o carrera en vacío) es más rápida que la carrera de trabajo. Éste se utiliza con frecuencia en máquinas-herramientas denominadas limadoras en las que durante la fase de trabajo se produce el proceso de arranque de virutas de un metal (por una herramienta de corte solidaria a la corredera –de color rojo) y en la fase de vacío la herramienta vuelve a su posición inicial de partida. En este caso, no se muestra la herramienta de corte antes mencionada.

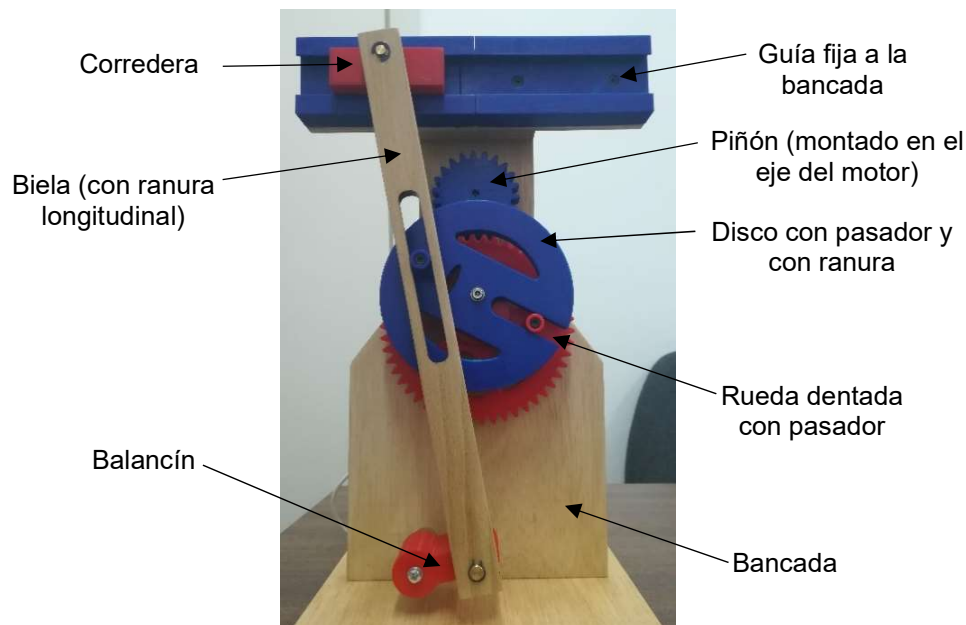


Figura 21. Foto de la maqueta del mecanismo de retorno rápido de Whitworth con indicación de los elementos que lo constituyen.

El mecanismo anterior se acciona por medio de un piñón azul (que va montado en el eje de un motor paso a paso no visible en la fotografía) que está engranado con la rueda dentada de color rojo. La rueda mediante su pasador acciona a través de un enlace guía-pasador al disco azul, transfiriéndole un movimiento de rotación. Dicho disco contiene, en el lado opuesto a la ranura (o guía), un pasador que se acopla en la ranura de la biela (pieza fabricada en madera),

transmitiéndole movimiento a la misma. El extremo superior de la biela se articula con una corredera de color rojo, la cual se enlaza mediante un par prismático a la guía azul de la bancada. El extremo inferior de la biela se articula con un balancín de color rojo, que a la vez está articulado en la bancada, por lo que tiene un movimiento de rotación alternativo.

En la figura 22 se muestra el esquema de símbolos, del mecanismo de referencia (Figura 21) con los parámetros y variables considerados. Este esquema se toma del primer compendio de mecanismos antes mencionado, donde se expone que es un mecanismo de 1 *gdl*. Aquí el vector de coordenadas generalizadas utilizado para su estudio del mecanismo es $\mathbf{q} = \{\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \varphi_4, \varphi_5, s\}^T$.

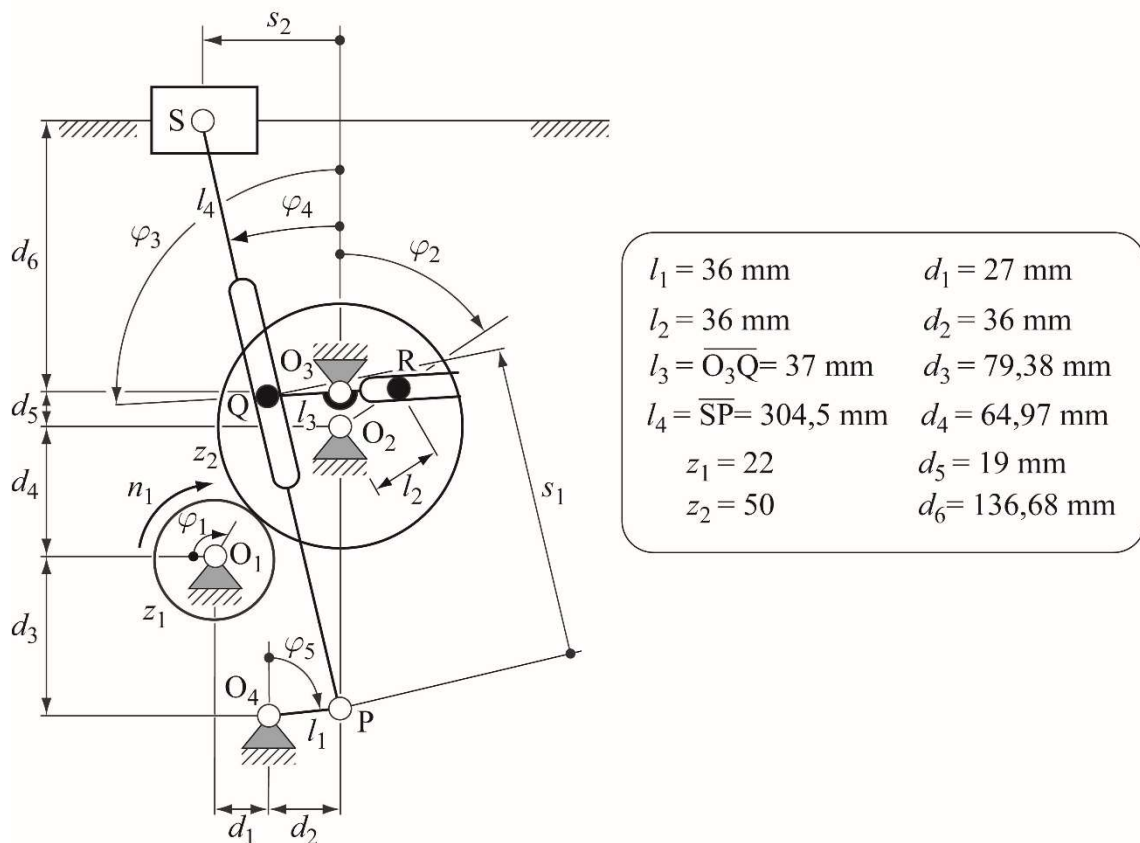


Figura 22. Esquema de símbolos con variables y parámetros del mecanismo de referencia.

Las otras dos variantes del mecanismo de retorno rápido se explican en un artículo de los un grupo de profesores de la Universidad Pública de Navarra, que ha sido consultado online [Zabalza, I et al]. A partir de dicha referencia se han creado los esquemas de las dos variantes constructivas que se muestran en la figura 23. La primera variante constructiva elimina el balancín O_4P del mecanismo original (Figura 22) y contiene una colisa articulada en el punto A de la bancada, así como dos correderas articuladas en el punto E (Figura 23 a). La segunda variante constructiva, también elimina el balancín O_4P del mecanismo original y contiene una guía articulada en el punto A de la bancada (Figura 23 b).

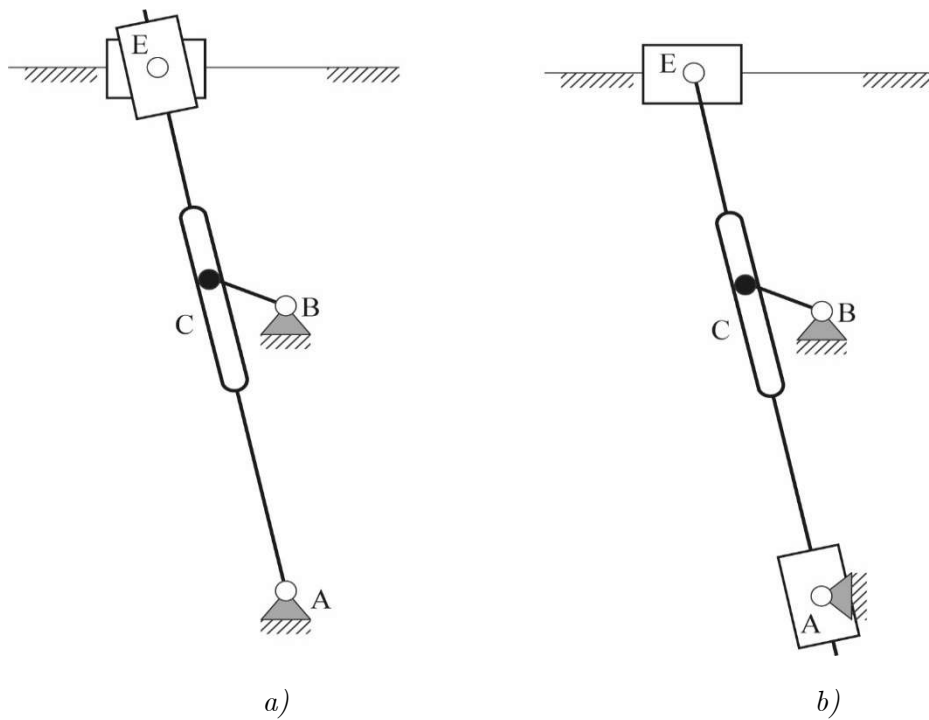


Figura 23. Mecanismo de retorno rápido de Withworth: a) variante constructiva con colisa articulada en el punto A de la bancada y b) Variante constructiva con guía articulada en dicho punto A.

Como se ha comentado antes, se quiere que la maqueta física resultante conste de módulos intercambiables que permitan el montaje de las tres variantes (la original y las dos antes explicada) con adición y/o sustracción de elementos o módulos. Para facilitar la adición o sustracción de elementos se propone utilizar es el sistema tornillo-tuerca, garantizando uniones fácilmente montables y desmontables.

Para simplificar el diseño, se han substituido el enlace corredera con articulación (punto S en figura 22 o punto E en la figura 23) por su equivalente cinemático, un enlace guía-pasador (haciendo el pasador solidario a la corredera con movimiento horizontal). Se ahorra así la utilización de al menos una corredera (la que desliza sobre la colisa mostrada en la figura 23 a). La anterior simplificación de diseño impone la necesidad de modificar la biela PS del mecanismo original (Figura 22). Así, se sustituye la biela original con ranura central y dos articulaciones, por una biela con una ranura de mayor longitud que la original llegando hasta un extremo de la misma y en el otro extremo se coloca una articulación, éste modificación de diseño permite que éste nuevo elemento pueda ser utilizado para las distintas variantes constructivas (Figura 24 a, b y c). Para obtener una biela con doble articulación como la original, se diseña e introducen elementos auxiliares que, colocados en un extremo de la ranura de la biela rediseñada, permiten disponer de una articulación en dicho extremo donde unir la corredera superior (Figura 24 a). Se obtiene así un diseño más compacto y con menor número de elementos, utilizando una única bancada. El nuevo diseño modular también incorpora unos distanciadores (de color amarillo) para las piezas que se montan en planos paralelos.

Por último, y garantizando una mejor la funcionalidad de las variantes constructivas, se ha eliminado el disco con pasador y ranura (disco azul, Figura 21) y se ha unido directamente la rueda dentada con pasador a la biela mediante un enlace guía-pasador. Para ello ha sido necesario cambiar la posición original del piñón, que ahora engrana por la parte inferior de la rueda, ya que el espacio en la parte superior es limitado por la presencia de la guía horizontal.

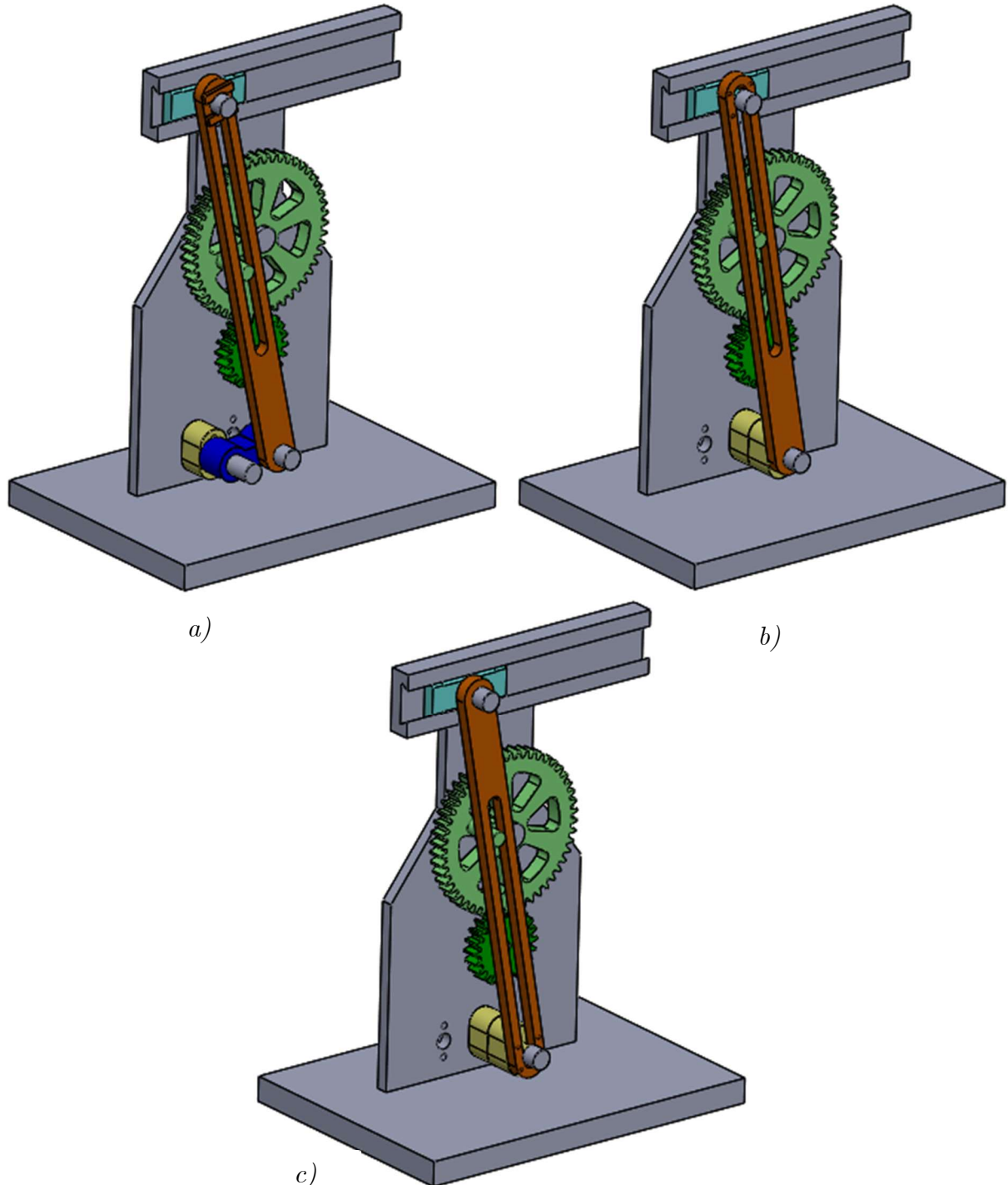


Figura 24. Modelos virtuales de las variantes constructivas del mecanismo de retorno rápido de Withworth: a) Configuración del mecanismo original, b) Configuración de la segunda variante constructiva y c) Configuración de la tercera variante constructiva.

En la siguiente figura, se muestran las vistas en alzado con los esquemas de símbolos superpuestos de las tres variantes constructivas, diseñadas modularmente.

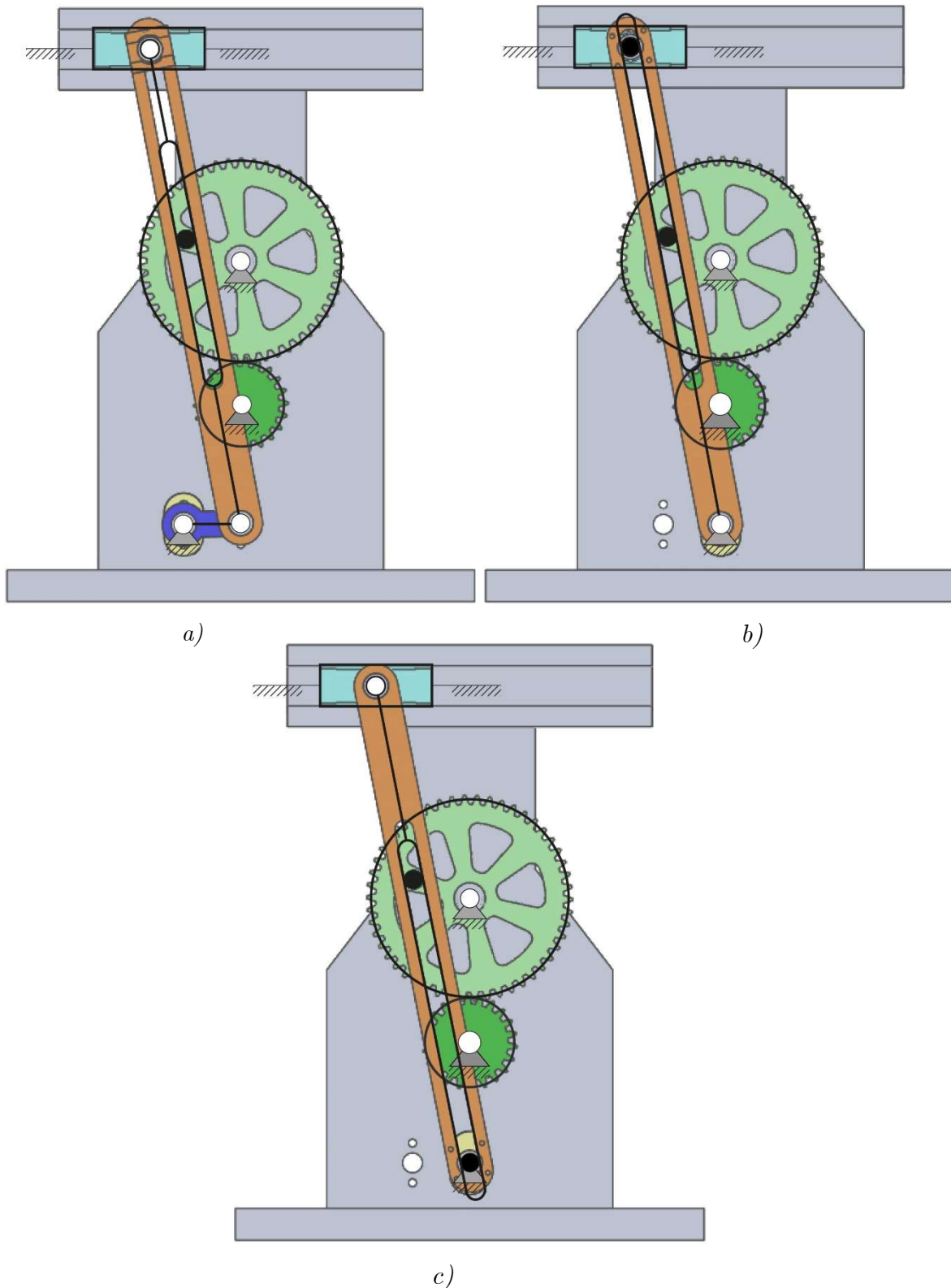


Figura 25. Vistas en alzado de los modelos virtuales de las variantes constructivas con los esquemas de símbolos superpuestos: a) Configuración del mecanismo original, b) Configuración de la segunda variante constructiva y c) Configuración de la tercera variante constructiva.

En la figura 26 se muestran los esquemas de símbolos con los parámetros y variables geométricas de las tres variantes constructivas.

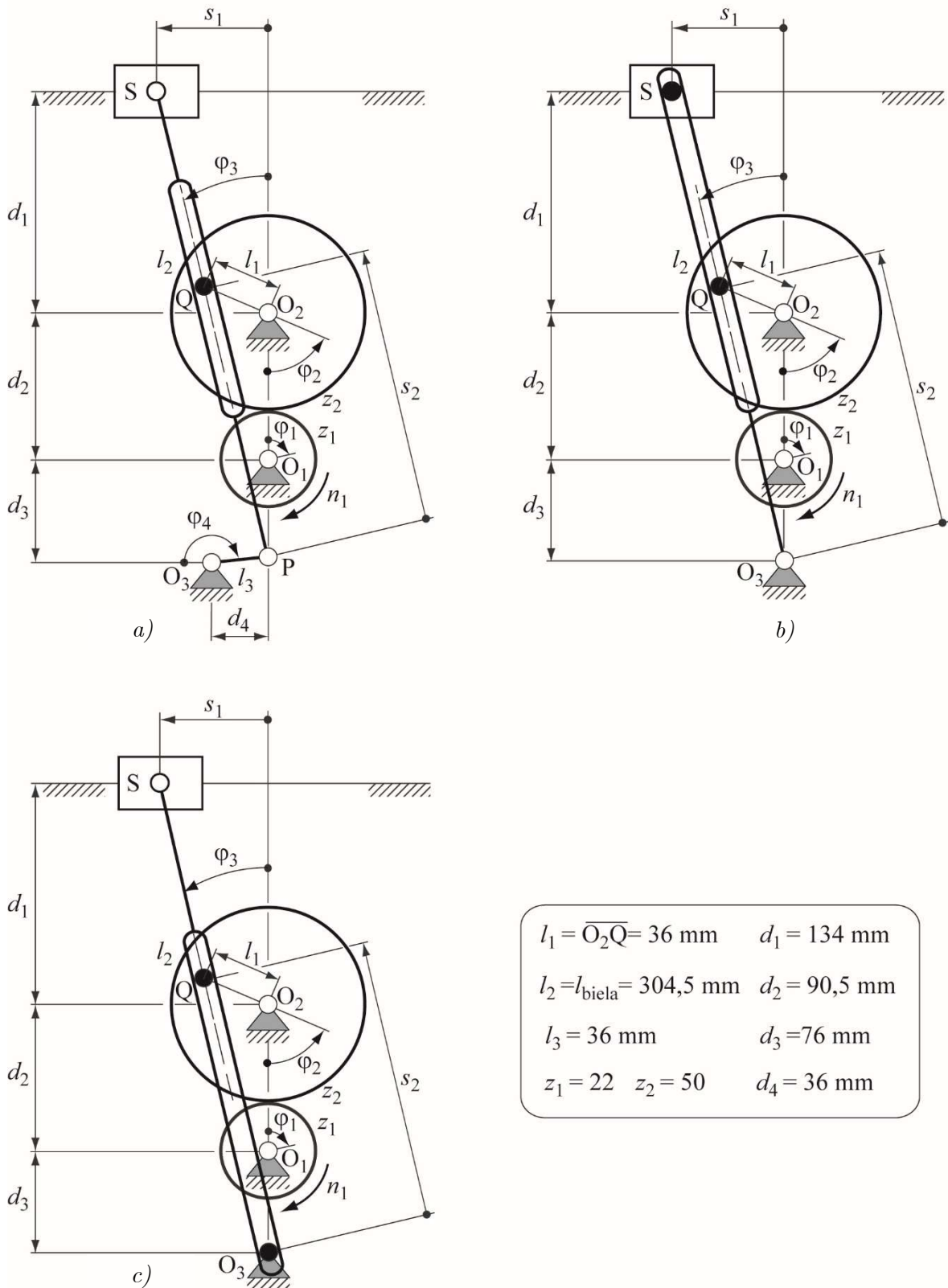


Figura 26. Esquemas con parámetros y variables geométricas: a) Esquema del mecanismo original, b)

Esquema de la segunda variante constructiva y c) Esquema de la tercera variante constructiva.

El vector de coordenadas generalizadas utilizado para el estudio del mecanismo de la figura 26

a) es $\mathbf{q} = \{\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \varphi_4, s\}^T$ y para los otros dos mecanismos b) y c) es $\mathbf{q} = \{\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, s\}^T$.

A partir de los esquemas de la figura 26, se puede calcular el valor de la relación de transmisión entre el piñón motriz y la rueda que impulsa a los mecanismos de barras. En todas las variantes constructivas esta relación es única y se calcula según:

$$\tau = \pm \frac{\omega_{salida}}{\omega_{entrada}} = \pm \frac{Z_{conductor}}{Z_{conducida}} \quad (9)$$

$$\tau_1 = -\frac{\omega_{rueda}}{\omega_{piñón}} = -\frac{z_1}{z_2} = -\frac{22}{50} = -0,44$$

Donde z_1 y z_2 son los números de dientes del piñón y la corona respectivamente.

A partir de los esquemas de la figura 26, también se determina por inspección directa que las variantes constructivas segunda y tercera tienen un único grado de libertad. Esto se debe a que si se detiene la rotación del piñón ($\omega_{piñón} = 0$) todos los elementos del mecanismo quedan en reposo. Además, se comprueba mediante el criterio de Grübler-Kutzbach que no hay presencia de redundancias totales en dichas variantes constructivas, ya que su valor se corresponde con el grado de libertad determinado por inspección directa (1 *gdl*).

Para la variante primera (Figura 26 a) se tiene:

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

$$\times 2 \text{ gdl / prism.} - 1(\text{transmisión}) \times 1 \text{ gdl / transm.} - 1(\text{guía - pasador}) \times 1 \text{ gdl / guía - pas.} \quad (10)$$

$$gdl = 1$$

Y para las variantes (Figura 26 b y c) se tiene:

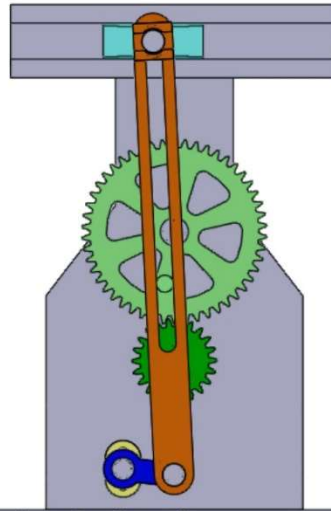
$$gdl = 4(\text{sólidos móviles}) \times 3 \text{ gdl / sólido} - 3(\text{articulaciones}) \times 2 \text{ gdl / artic.} - 1(\text{primástico})$$

$$\times 2 \text{ gdl / prism.} - 1(\text{transmisión}) \times 1 \text{ gdl / transm.} - 2(\text{guía - pasador}) \times 1 \text{ gdl / guía - pas.} \quad (11)$$

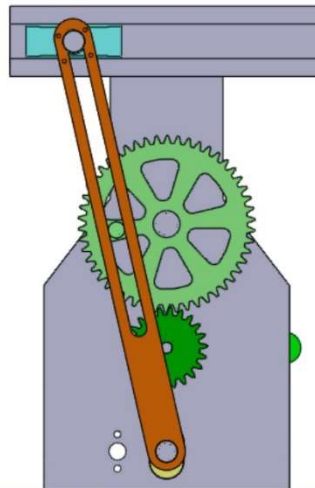
$$gdl = 1$$

Una vez completadas las etapas de caracterización, creación del modelo virtual 3D y esquematización, se pasa a la etapa de simulación. Dada la presencia de múltiples variantes, para este mecanismo se han realizado tres simulaciones. Para su realización únicamente ha sido necesario incluir un motor rotatorio de velocidad constante en el piñón. En la figura 27 se muestran las capturas de pantallas de los videos que muestran las simulaciones de funcionamiento de cada variante.

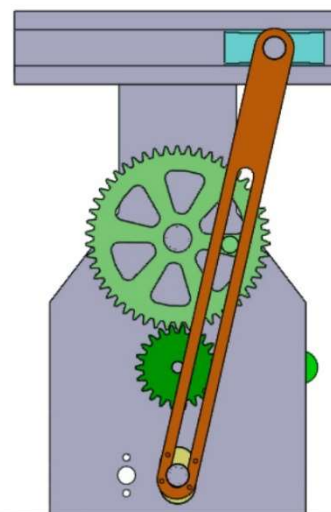
En la figura 28 se muestran tres fotos correspondientes a los montajes de las variantes de los prototipos físicos del mecanismo de retorno rápido de Withworth, todas ellas utilizando la misma bancada y con la inclusión de las piezas y módulos correspondientes.



Ensamblaje variante1.avi



Ensamblaje variante2.avi



Ensamblaje variante3.avi

Figura 27. Captura de pantalla de las reproducciones de la animación 3D de cada variante constructiva del mecanismo de retorno rápido de Withworth.

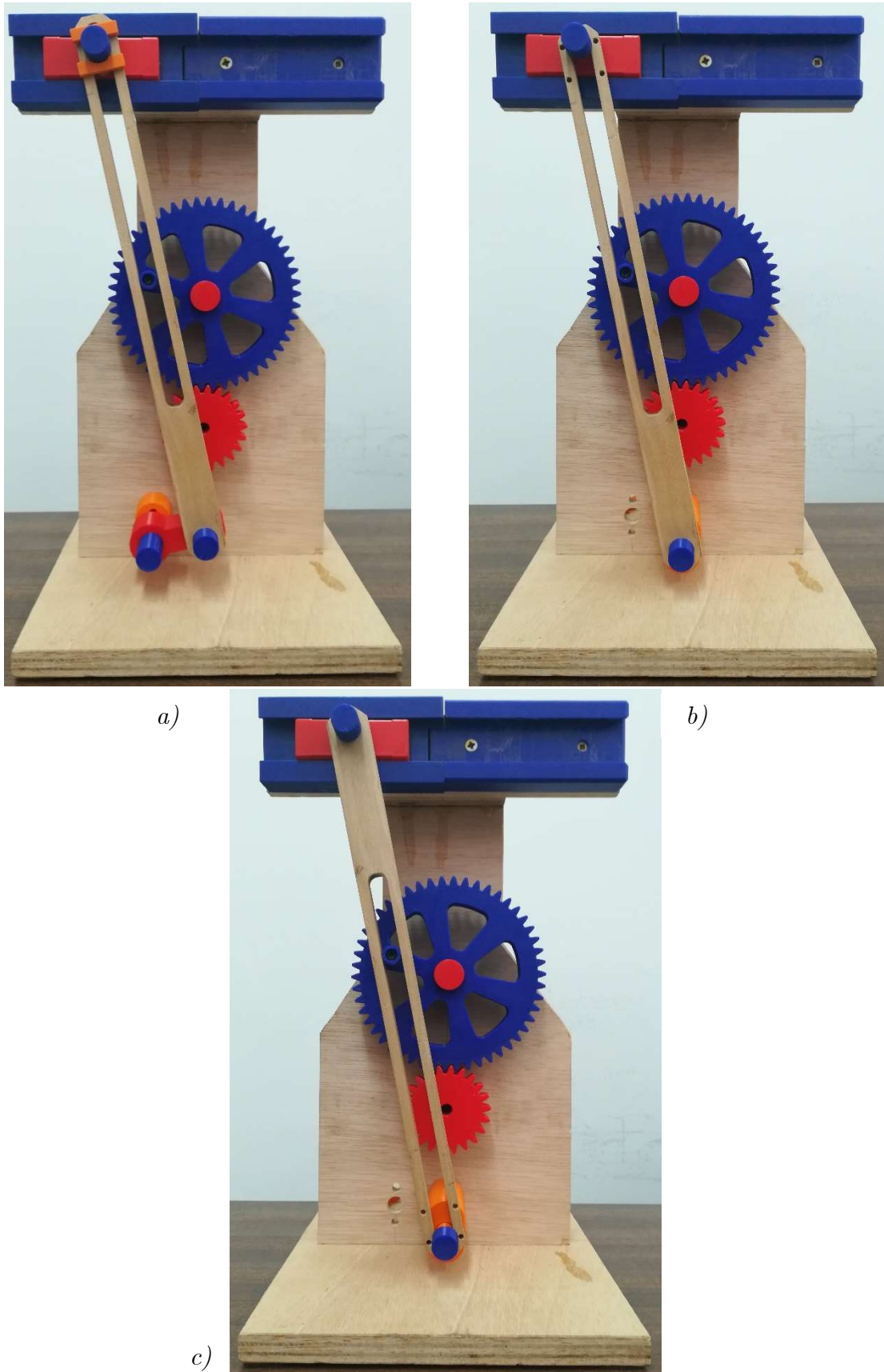


Figura 28 Foto de los tres montajes de la maqueta retorno rápido de Whitworth correspondientes al mecanismo original (a) y a las variantes constructivas (b y c).

Mecanismo Regulador de Watt

En el primer compendio de mecanismos de título “Teoría de Máquinas y Mecanismos. Compendio de mecanismos modelados y animados en SolidWorks” de los autores Zayas y Horas (2019), se presentan los modelos físico -en madera- y virtual de una máquina de vapor; máquina esencial en la primera Revolución Industrial, creada por James Watt a finales del siglo XVIII.

En el presente compendio se muestra otro dispositivo cuya creación también se atribuye a Watt, en este caso es un regulador centrífugo. Vale la pena comentar que en 1787 Thomas Mead inventó y patentó un sistema basado en el uso de un péndulo centrífugo para controlar la altura entre las piedras (solera y volandera), para mantener el molido del grano uniforme en función de la velocidad de rotación. Watt se percató de que utilizando el sistema del péndulo centrífugo podría controlar de manera directa la velocidad de la máquina de vapor, y con la ayuda de Matthew Boulton (empresario de Birmingham) pusieron en práctica un nuevo uso de dicha máquina a introducirla en un molino de harina. Así, Watt empezó a trabajar en el diseño del Regulador de Watt, cuya denominación en inglés es *Fly-ball* (Salagre et al, 2010).

James Watt y su socio Boulton no tenían intención de patentar su diseño, sino de llevarlo en secreto, hasta que a finales del siglo XVIII se publicó en el “*Nicholson’s Journal*” una descripción del dispositivo. Más tarde, el diseño se hizo de dominio público y se convirtió en pieza clave de los ingenios de vapor de la época. Finalmente, el regulador de Watt pasó a ser en uno de los artilugios clave de la Revolución Industrial, y constituyó el primer uso del control por realimentación que tuvo un conocimiento popular y extendido (Salagre et al, 2010). Debido a su importancia histórica, es uno de los elementos que forman parte del escudo de la Federación de Ingenieros Industriales de España (Figura 29 a) y del escudo de la ETSEIB (Figura 29 b).



a)



b)

Figura 29. Escudos de las instituciones: a) Federación de Ingenieros Industriales de España y b) ETSEIB, que incluyen en su emblema la representación del regulador de Watt.

El regulador de Watt (Figura 29) se compone de dos masas o pesos que unidos a unos brazos (péndulos) giran alrededor de un eje dispuesto verticalmente (Eje 2). Debido a la acción de las fuerzas centrífugas, las masas citadas tienden a alejarse del eje de rotación a medida que se incrementa la velocidad de rotación de dicho eje. Por otro lado, un sistema de palancas (brazos 1 y 2 articulados con las bielas 1 y 2) transforma el movimiento tangencial de las masas en un deslizamiento axial de un collar (corredera con ranura circular) sobre el eje vertical (unido mediante dos articulaciones a las bielas antes mencionadas). El desplazamiento del collar se

transforma, a través de un sistema de barras (balancín 1, biela 3 y balancín 2) en una rotación de la mariposa (solidaria al eje del balancín 2) para abrir o cerrar la válvula de paso de vapor, regulando la presión de vapor que actuaría sobre los pistones de una máquina de vapor. En la maqueta mostrada en la figura 30, el regulador es accionado manualmente mediante un volante con manilla que solidario al eje horizontal (Eje 1) en su extremo derecho lo hace girar con velocidad angular ω_1 variable; la transmisión dentada cónica (rueda-piñón) permite multiplicar dicha velocidad proporcionando al eje vertical la velocidad angular ω_2 variable que hace que se muevan las masas citadas (colocadas en los extremos de los brazos o péndulos) y que desde una referencia solidaria a dicho eje rotatorio, hace que aparezcan las antes mencionadas fuerzas centrífugas.

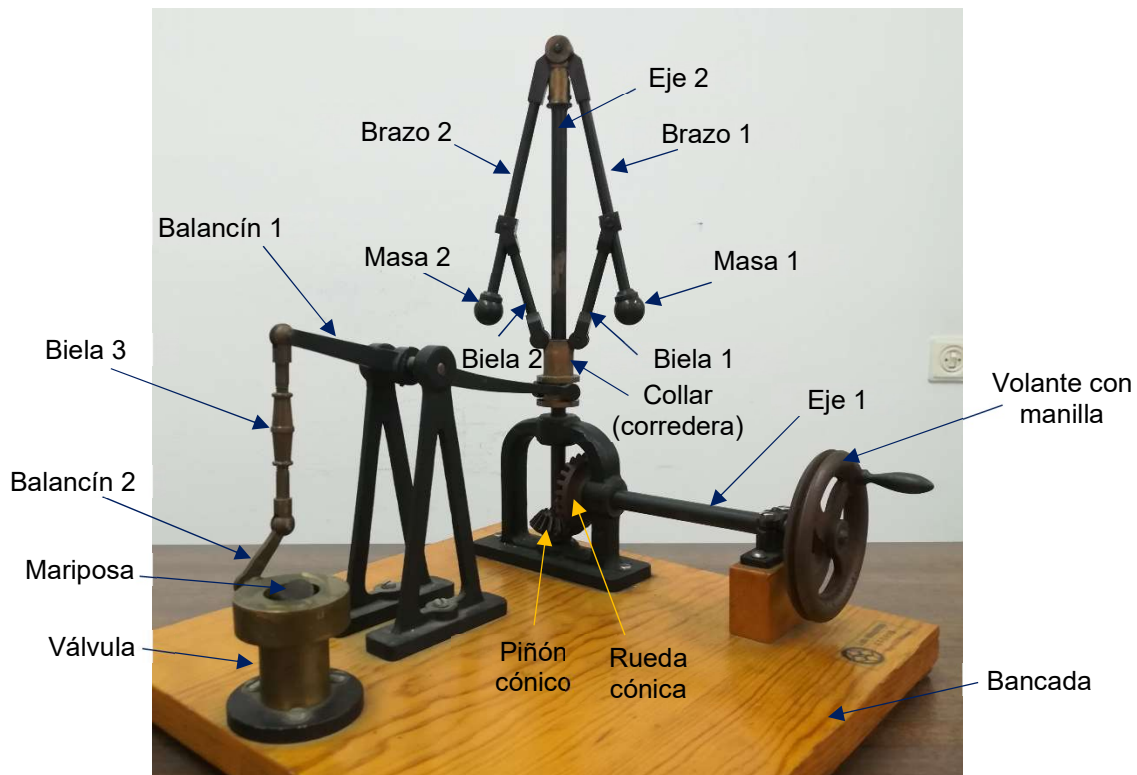


Figura 30. Maqueta del Regulador de Watts con indicación de sus componentes

Es interesante destacar que en la maqueta de la figura 30, la tercera biela es de longitud variable. Esta biela está compuesta por tres piezas: una tuerca alargada –situada en el medio de la biela– que en cada uno de sus extremos permite enroscar dos segmentos de barras roscados. Por medio del giro de dicha tuerca se puede regular la longitud de la biela (haciendo que los segmentos roscados se alejen o se acerquen entre sí) y así regular la orientación inicial de la mariposa de la válvula, es decir la puesta a punto de la misma. Este detalle constructivo, no se ha considerado en el diseño virtual de dicha biela y ni tampoco en la esquematización del mecanismo con el fin de simplificarlo.

Analizados los distintos elementos que constituyen el mecanismo regulador de Watt y su funcionamiento, se crea el modelo virtual 3D de cada elemento y del conjunto ensamblado. Es interesante destacar que la geometría de las masas ahora son elementos cilíndricos huecos,

aspecto de diseño que facilita la posterior etapa de su fabricación en plástico (material de baja densidad), así como la colocación en el interior de los cilindros de masas (tornillo con arandelas), para la calibración del funcionamiento del sistema. También en el modelo virtual, se ha colocado la manilla (o manivela) directamente acoplada al eje horizontal. El resultado del modelo se muestra en la figura 31.

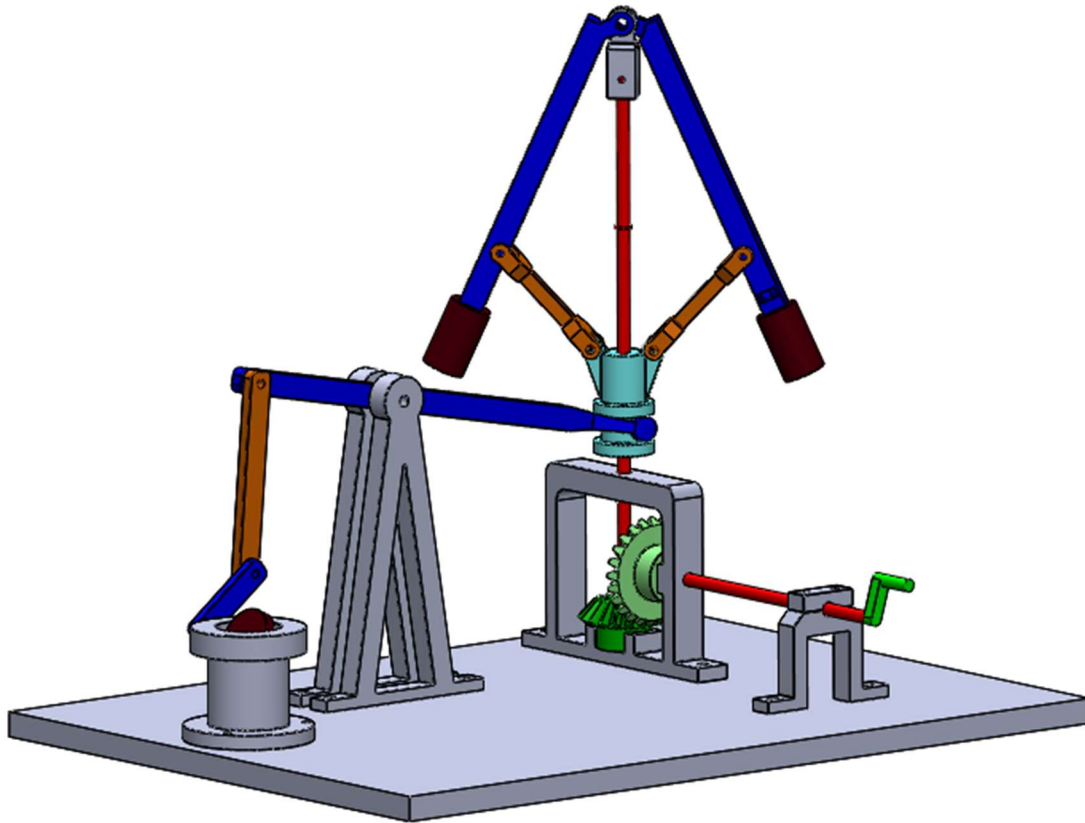
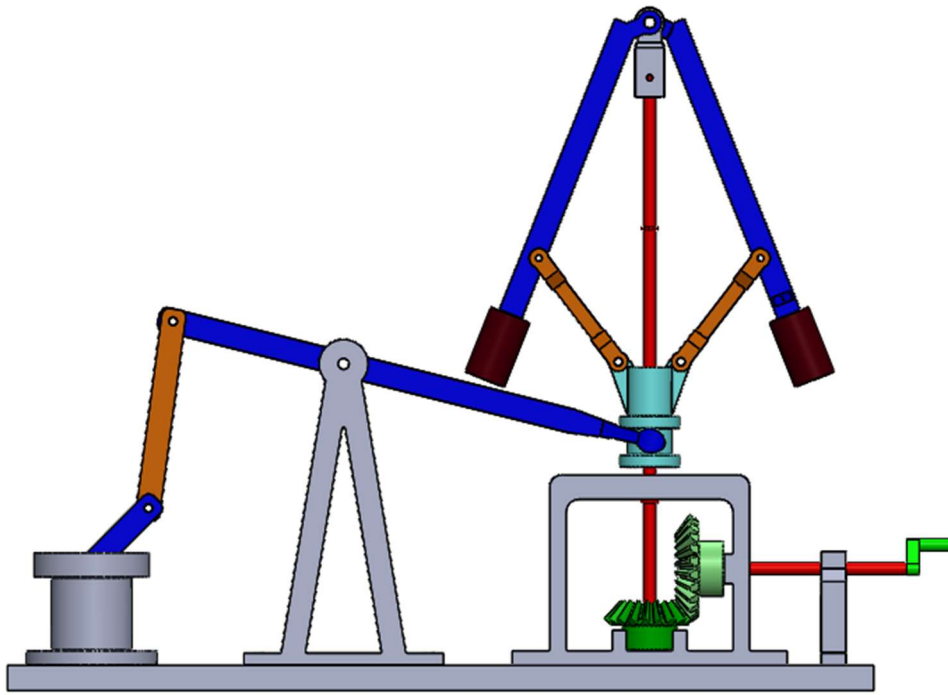
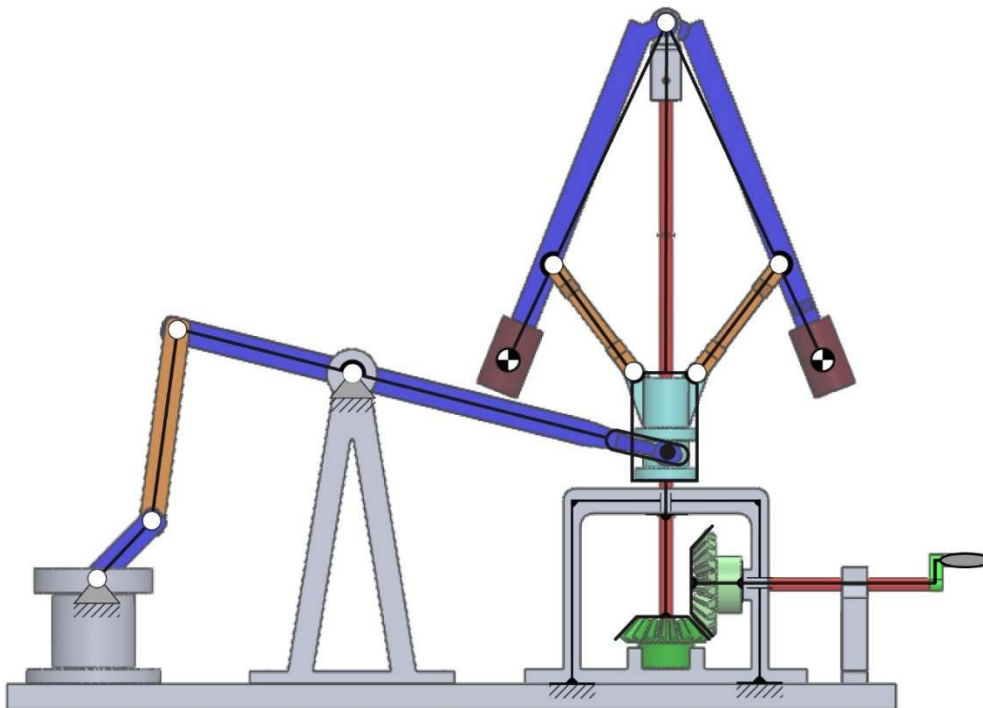


Figura 31. Modelo virtual del mecanismo Regulador de Watt, con modificaciones geométricas que facilitan su posterior fabricación en plástico.

Para la representación de la vista en alzado (Figura 32 a) del modelo virtual se ha realizado una pequeña modificación. Se ha rotado la posición del eje 1, respecto al eje 2, 90° para así disponer todos los elementos del mecanismo en un único plano y simplificar la esquematización del mismo. En la Figuras 32 a) y 32 b) se exponen la vista en alzado del modelo virtual modificado y el esquema de símbolos superpuesto. Se debe destacar que el enlace que une al balancín 1 con el collar (corredera con ranura circular) es un enlace de 3 *gdl*, pero se ha representado en el plano como un enlace guía-pasador, que permite 2 *gdl*. Esto es otra simplificación dada las posibilidades de representación de pares cinemáticos en el plano, sin embargo, se considera que facilita la comprensión de la estructura y del funcionamiento del mecanismo.



a)



b)

Figura 32. Modelo virtual del mecanismo Regulador de Watt: a) Vista en alzado con todos los elementos en un mismo plano y b) Vista en alzado con el esquema de símbolos superpuesto.

En la figura 33 se muestra el esquema de símbolos con las variables y parámetros geométricos e inerciales considerados adecuados para su estudio.

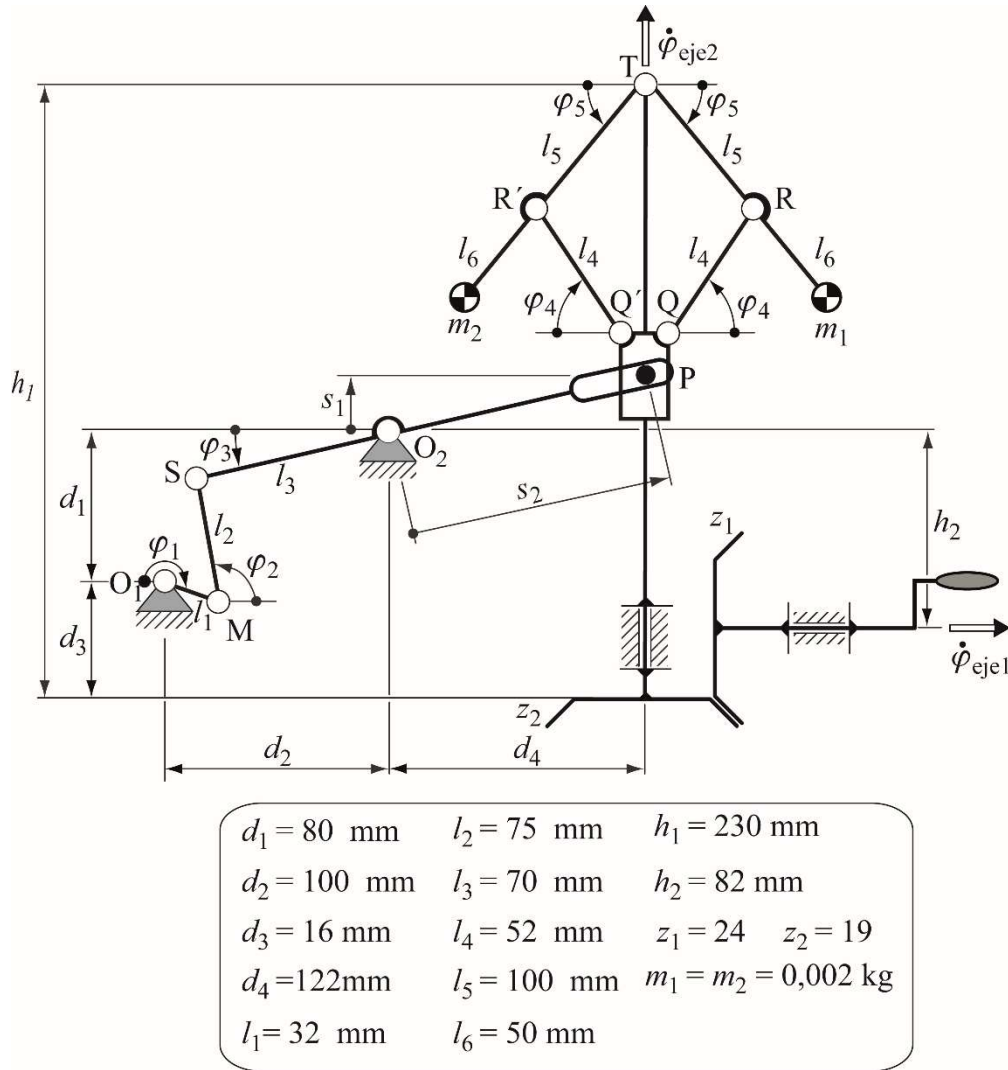


Figura 33. Esquema de símbolos con variables y parámetros del mecanismo Regulador de Watt.

A partir de los esquemas de la figura 33, se puede calcular el valor de la relación de transmisión entre la rueda cónica motriz y el piñón cónico conducido, que se calcula según:

$$\tau = \pm \frac{\omega_{salida}}{\omega_{entrada}} = \pm \frac{Z_{conductor}}{Z_{conducida}} \quad (12)$$

$$\tau = \frac{\omega_{piñón}}{\omega_{rueda}} = \frac{z_1}{z_2} = \frac{24}{19} = 1,26$$

Donde z_1 y z_2 son los números de dientes de la rueda y del piñón respectivamente.

El principio de funcionamiento del regulador de Watt, tiene como base la variación de la velocidad angular del eje 2, donde articulan los brazos con las masas, que cuando giran alrededor de dicho eje bajan y suben debido a la acción de la fuerza de inercia centrífuga (antes explicada) y es el movimiento de dichas masas el que produce el movimiento de translación lineal del collar (esquematisado en la figura 33 como una corredera con un pasador P) que acciona la cadena cinemática que abre o cierra la válvula; es decir, que en realidad si se elimina la velocidad de rotación del eje 1 ($n_{rueda} = 0 \Rightarrow \dot{\varphi}_{eje1} = 0$) y, por tanto, la del eje 2 ($n_{piñón} = 0 \Rightarrow \dot{\varphi}_{eje2} = 0$), las masas no se mueven (ya que no rotan, ni se levantan). Así, se detiene dicha corredera ($\dot{s}_1 = 0$

), el punto P queda fijo y el balancín PO₂S queda fijo, y por tanto el cuadrilátero O₂SMO₁ queda fijo, así todo el mecanismo está en reposo. De lo anterior se deduce que se han requerido eliminar 1 velocidad generalizada para que se detenga todo el sistema. Por tanto, este mecanismo tiene 1 grado de libertad.

El análisis de la estructura de este mecanismo (Figura 33), permite ver la simetría en la parte superior (bielas articuladas a los brazos con las masas), es evidente que en este mecanismo existen redundancias totales, si se elimina por ejemplo las barras Q'R' y el brazo con la masa m_2 , el sistema seguiría funcionando, es decir, el mecanismo puede alcanzar las mismas configuraciones y tiene el mismo movimiento que antes.

El vector de coordenadas generalizadas utilizado para el estudio de este mecanismo es $\mathbf{q} = \{\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \varphi_4, \varphi_5, s_1, s_2\}^T$.

Caracterizado el mecanismo y creado su modelo virtual 3D, se realiza su simulación mediante Motion de SolidWorks. Dado que los módulos utilizados para las simulaciones no tienen en cuenta el efecto de las fuerzas, para la simulación del movimiento del regulador de Watt se han utilizado dos motores. El primero motor es rotatorio, de velocidad variable y se aplica sobre el eje 1; el segundo motor es lineal, de velocidad constante y se aplica sobre la corredera. La simulación empieza únicamente con el primer motor funcionando. Cuando este ha aumentado su velocidad lo suficiente, se activa el segundo motor que desplaza la corredera verticalmente, simulando el efecto del aumento de la fuerza centrífuga sobre las masas. Alcanzada la velocidad máxima por el primer motor, esta va disminuyendo hasta que, simulando la disminución de la fuerza centrífuga, la corredera se desplaza hacia abajo por acción del segundo motor. En la figura 34 se muestran la captura de pantalla del video de dicha simulación del funcionamiento.

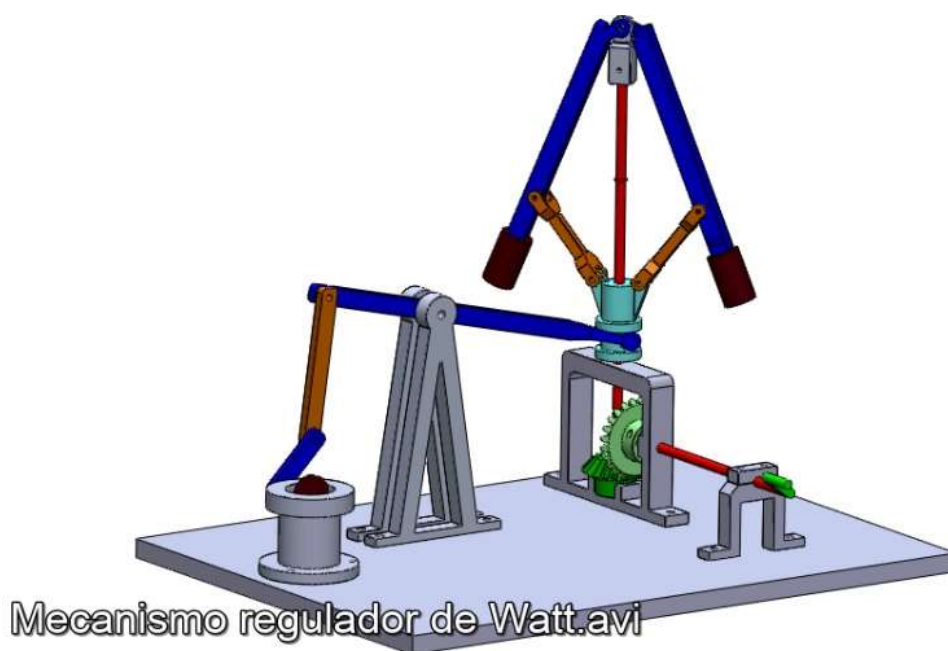


Figura 34. Captura de pantalla de la reproducción de la animación 3D del Regulador de Watt.

En la figura 35 se muestra la materialización de la maqueta del regulador de Watt, con piezas impresas en 3D y donde se incluye un motor paso a paso con una transmisión de correa-polea, así como el driver del motor, una tarjeta de prototipado, leds, un pulsador y un ArduinoUno.

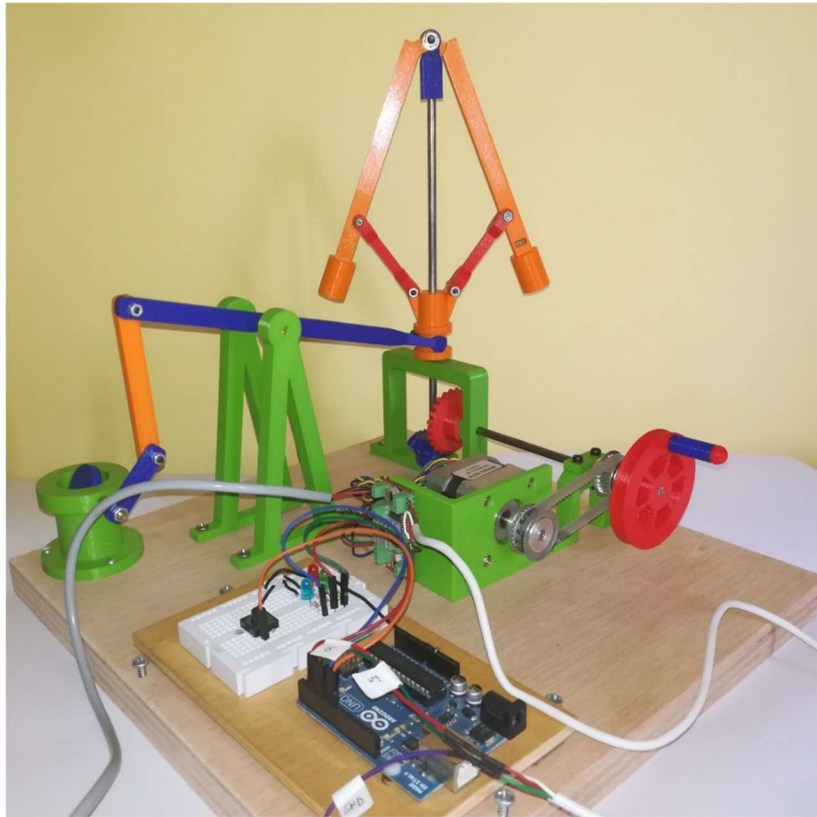


Figura 35. Fotografía de la maqueta motorizada del Regulador de Watt.

Mecanismo de leva-palpador: tres variantes constructivas

Un mecanismo leva-palpador consiste básicamente de 2 elementos móviles (Figura 36): el palpador (también llamado seguidor) y la leva, que es el elemento motriz que impulsa al palpador para que éste realice un movimiento predeterminado, el contacto leva-palpador es a través de un par cinemático superior y normalmente con cierre por fuerza (uso de un resorte). Los mecanismos leva-palpador se utilizan frecuentemente en muchas clases de máquinas, por ejemplo: en motores de combustión interna, telares, máquinas herramienta, etc. El mecanismo leva-palpador más comúnmente conocido y utilizado es el de leva rotatoria, razón por la cual es el tipo de leva que se modela y materializa en este compendio de mecanismos (Zayas, 2001). Los palpadores más habituales son de rodillos (Figura 36) y planos, con movimientos de translación o de rotación. Una de las ventajas principales de este tipo de mecanismo respecto a otros es que permitan una gran flexibilidad en el diseño de la ley del movimiento deseada en el palpador (elemento guiado).

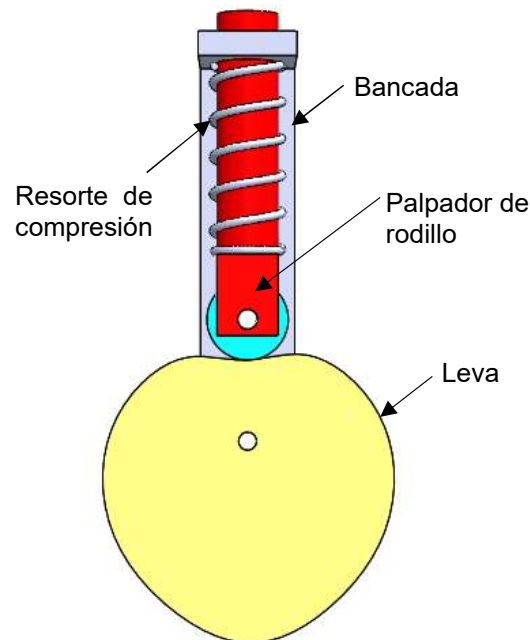


Figura 36. Mecanismo de leva rotatoria con palpador de rodillo de translación y cierre del par superior por fuerza (Fuente: Merino, 2018).

En este compendio se muestra una propuesta de diseño de una maqueta con una única bancada y con módulos intercambiables (aplicando el paradigma del diseño modular), que permite mostrar y transportar dos tipos de mecanismos leva-palpador: uno con palpador plano de translación y otro con palpador de rodillo con movimiento de rotación y, además permite el intercambio de las levas con perfiles diferentes que se acoplan a un mismo eje motor.

El proceso de diseño de los sistemas de leva-palpador aquí mostrados ha estado asistido mediante el uso del programa libre QtCAM (Parra, 2016 y Zayas et al., 2018). En la figura 37 se muestra un ejemplo de diseño de una de las levas, mediante el uso de dicho programa.

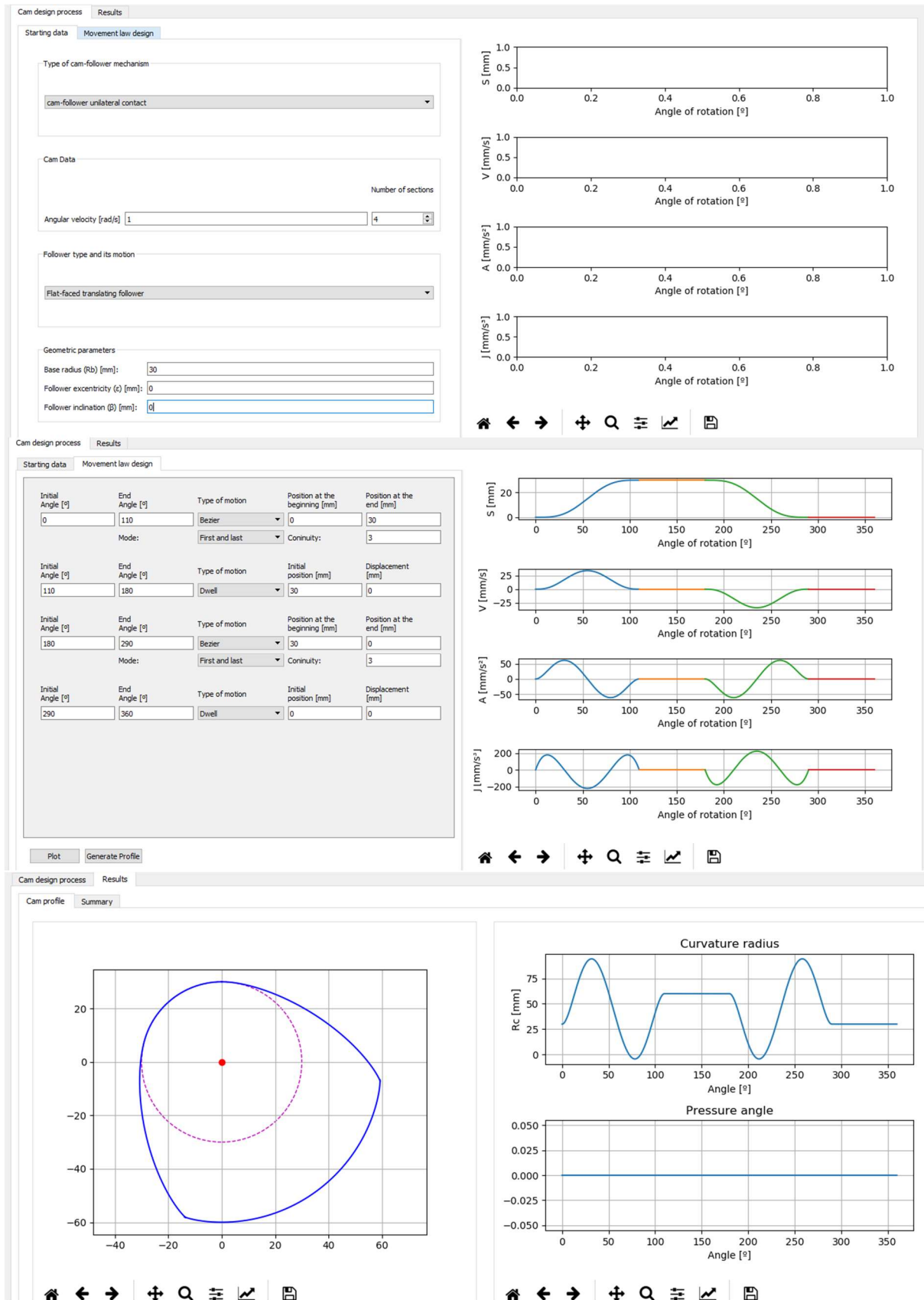


Figura 37. Captura de pantallas del programa QtCAM (Fuente: García, 2019).

Así se han diseñado tres levas, que corresponden a tres variantes constructivas de mecanismos de leva-palpador, dos diseñadas para accionar el palpador de traslación y una es para accionar el palpador de rodillo. Los requerimientos de diseño y funcionales son distintos en cada caso. Las leyes de desplazamiento (mostradas con tramos en colores distintos en la figura 37) se han diseñado utilizando curvas de Bézier no paramétricas y continuidad C^3 (Cardona y Clos, 2000). Obtenidos los perfiles de levas en QtCAM, se han exportado a SolidWorks y se han generado sus modelos 3D. Diseñados todos los elementos: palpadores –color rojo y color verde-azul, módulos intercambiables a colocar en la bancada –color azul claro, levas –color amarillo, eje de levas –color gris, guías de la bancada –color violeta, bancada –color gris), se realiza el ensamblaje de cada mecanismo.

La figura 38 muestra el modelo virtual 3D correspondiente a cada variante constructiva: a) Con leva que garantiza doble detención en el palpador plano de traslación, b) Con leva que garantiza simple detención en el palpador plano de traslación y c) Con leva que garantiza doble detención en el palpador de rodillo de rotación.

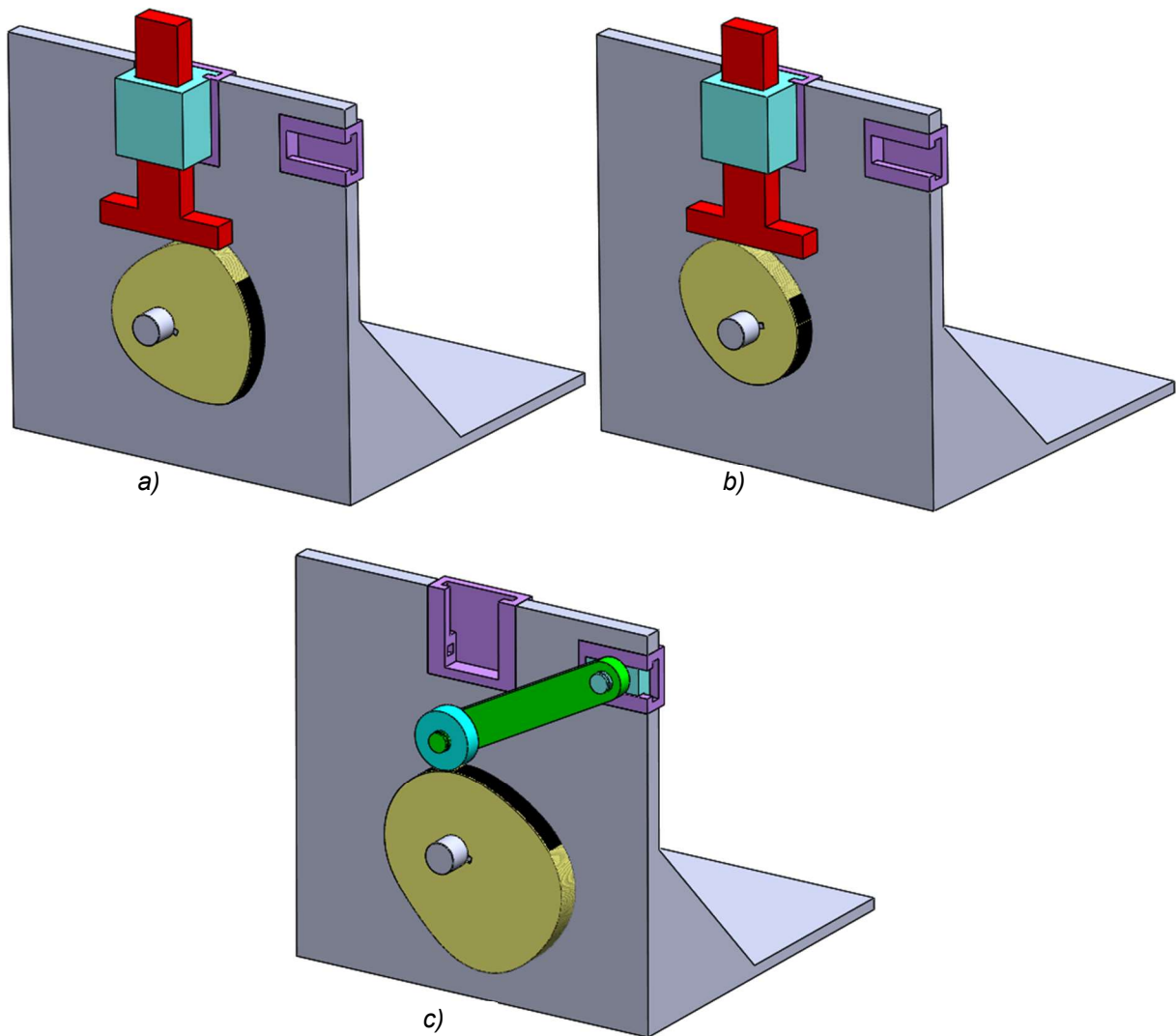


Figura 38. Modelos virtuales correspondiente a las variantes constructivas: a) Leva para doble detención en el palpador plano de traslación, b) Leva para simple detención en el palpador plano de traslación y c) Leva para doble detención en el palpador de rodillo de rotación

A continuación, se muestran las vistas en alzado de cada modelo virtual 3D de las variantes constructivas del mecanismo leva-palpador que utilizan una misma bancada (Figura 39).

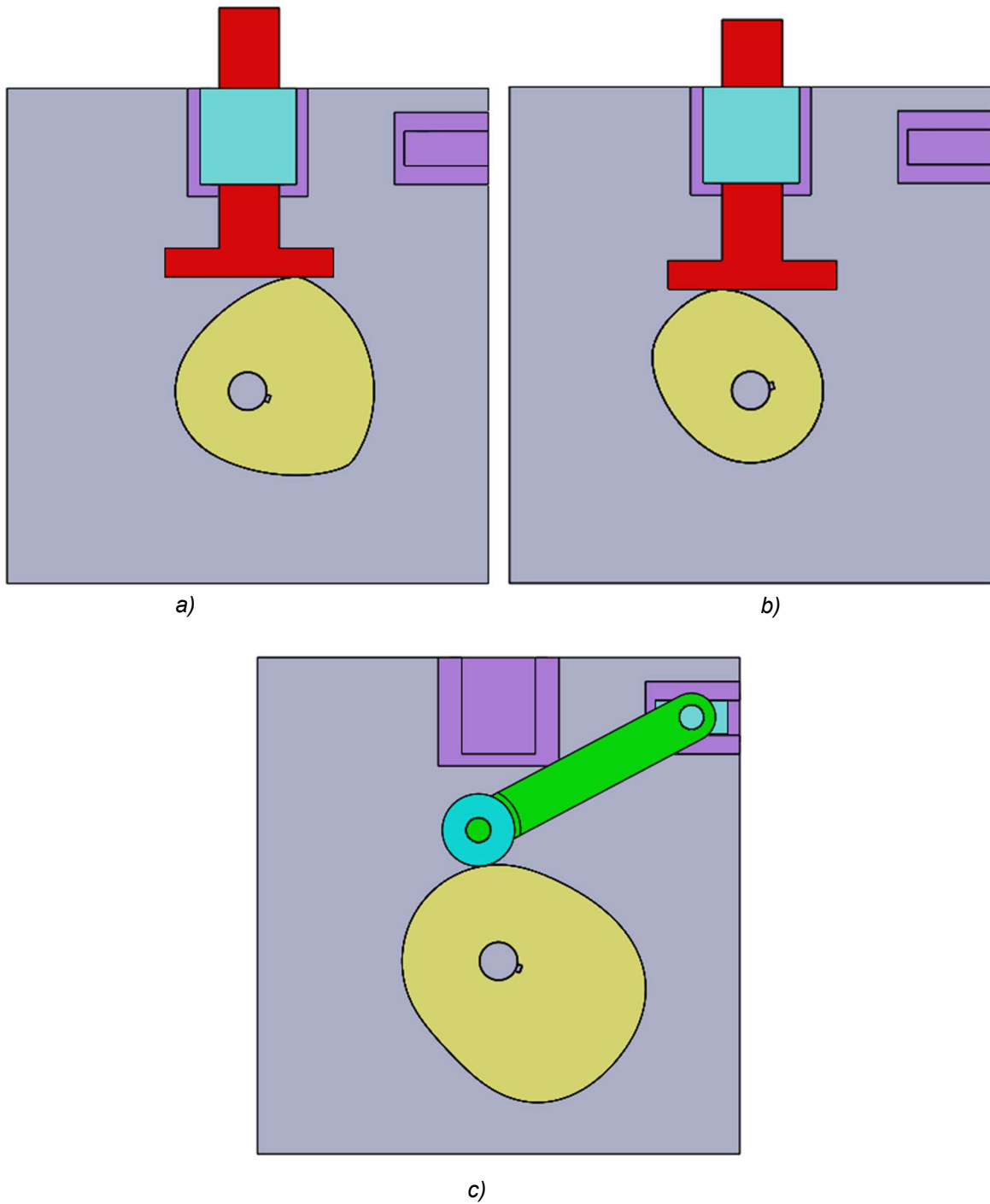


Figura 39. Vista en alzado las tres variantes constructivas de mecanismos de leva-palpador que se montan utilizando una única bancada

En la figura 40 se muestran los esquemas de símbolos superpuestos en las vistas en alzado de expuestas en la figura 39.

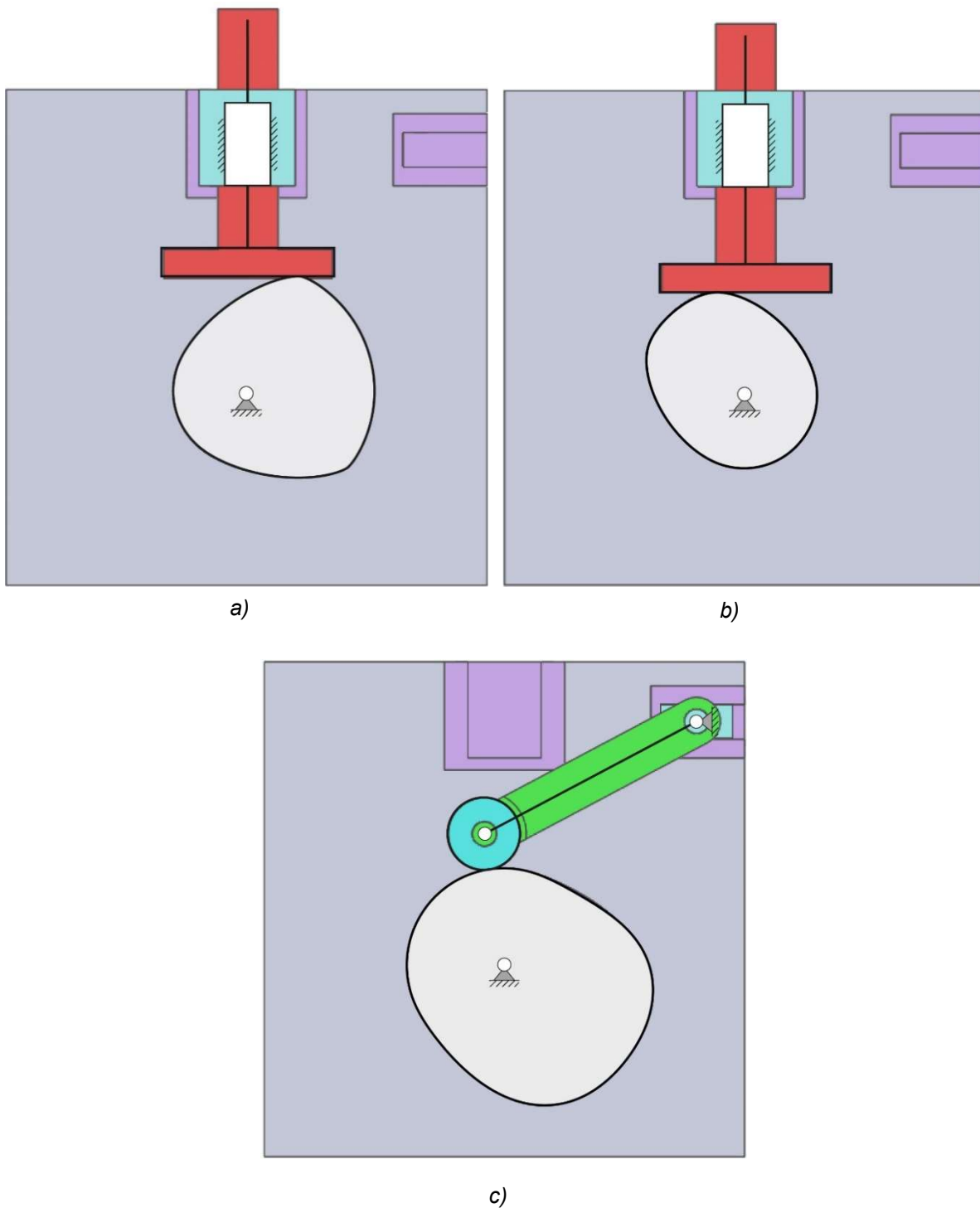


Figura 40. Vistas en alzado y esquema de símbolos superpuestos correspondientes a las tres variantes constructivas del mecanismo leva-palpador.

En la figura 41 se muestran los tres esquemas de símbolos de las variantes constructivas del mecanismo de leva-palpador, a los que se se añaden los parámetros y variables geométricas considerados adecuados para su estudio.

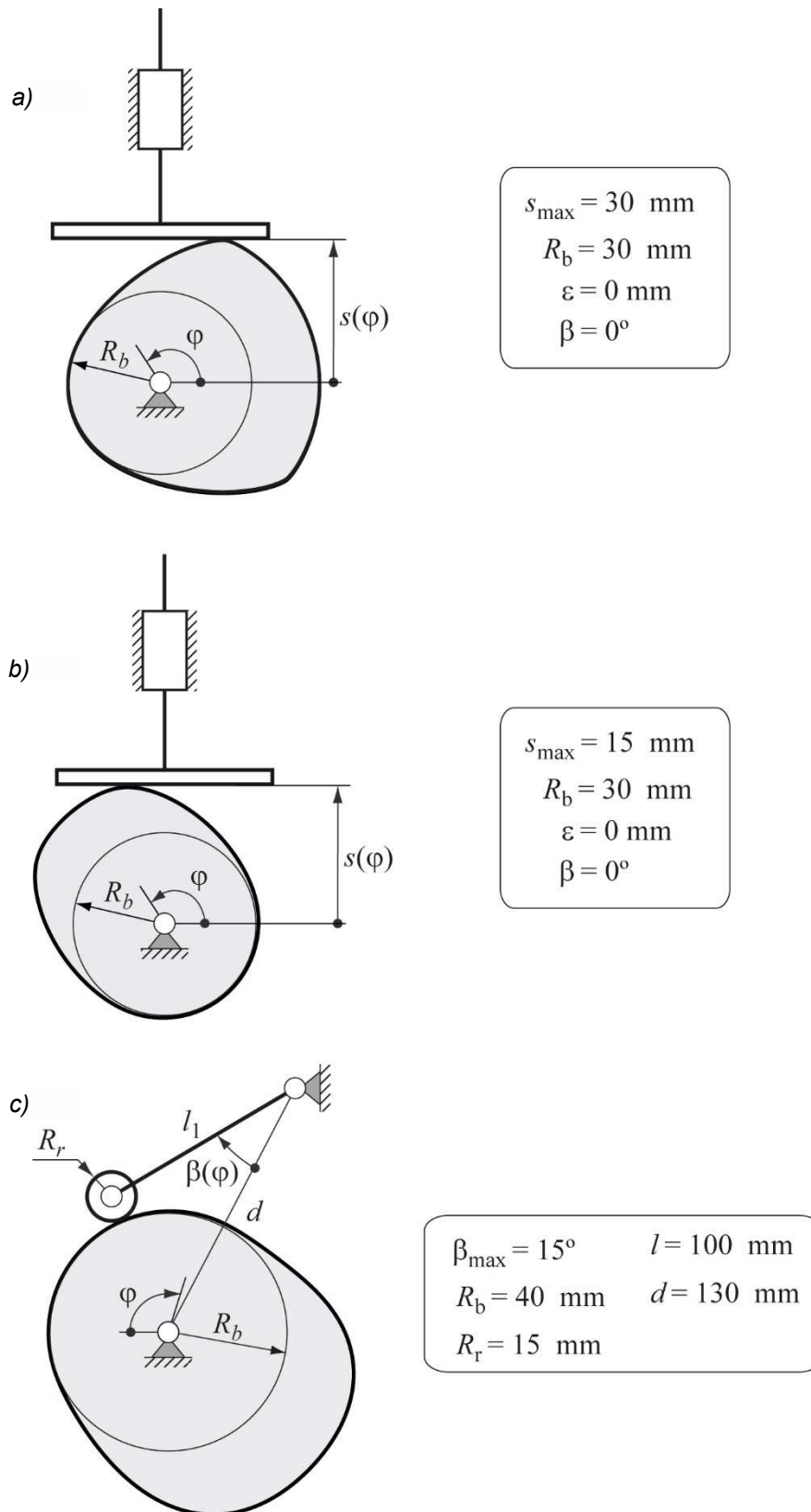


Figura 41. Esquemas de símbolos de las tres variantes constructivas (a, b y c) del mecanismo leva-palpador, con las variables y los parámetros geométricos correspondientes.

Con los esquemas de símbolos mostrados en la figura 41 se puede acabar de caracterizar cada variante constructiva (a, b y c) del mecanismo leva-palpador. Por inspección directa de los esquemas de las variantes a) y b) de mecanismos con leva de rotación y palpador plano de traslación, se determina que dichas variantes tienen un único grado de libertad, ya que al detener la velocidad angular de la leva ($\dot{\varphi} = 0$), está queda fija y no impulsa al palpador, así el mecanismo se detiene. Por otro lado, a primera vista el análisis de la variante c) donde la leva impulsa a un palpador de rodillo con movimiento de rotación, nos indica que tiene el mecanismo dos grados de libertad, ya que al detener la rotación de la leva ($\dot{\varphi} = 0$) el rodillo aún puede girar sobre su eje (solidario al extremo del palpador), aún cuando el palpador no cambie su orientación angular. Sin embargo, el grado de libertad real es uno, ya que lo que realmente se ha hecho en este diseño, es introducir el diseño el rodillo, para sustituir el rozamiento por deslizamiento por el rozamiento por rodadura entre la leva y el palpador, y garantizar un menor desgaste de los elementos en contacto.

Aplicando el criterio de Grübler-Kutzbach a las dos primeras variantes constructivas con palpador de translación (figura 41 a y b), se deduce que dichos mecanismos leva-palpador no presenta redundancias totales. Así se tiene:

$$\begin{aligned} gdl &= 2(\text{sólidos móviles}) \times 3 \text{ gdl / sólido} - 1(\text{articulación}) \times 2 \text{ gdl / artic.} - 1(\text{primástico}) \\ &\quad \times 2 \text{ gdl / prism.} - 1(\text{par superior}) \times 1 \text{ gdl / par sup.} \\ gdl &= 1 \end{aligned} \tag{13}$$

Aplicando dicho criterio a la tercera variante constructiva con el palpador de rodillo y movimiento de rotación (figura 41 c), se tiene:

$$\begin{aligned} gdl &= 3(\text{sólidos móviles}) \times 3 \text{ gdl / sólido} - 3(\text{articulación}) \times 2 \text{ gdl / artic.} \\ &\quad - 1(\text{par superior}) \times 1 \text{ gdl / par sup.} \\ gdl &= 2 \end{aligned} \tag{14}$$

Caracterizadas las variantes constructivas del mecanismo leva-palpador, creados sus modelos virtuales en 3D y obtenidos sus esquemas de símbolos, se puede proceder a la creación de las simulaciones del funcionamiento de cada una de dichas variantes. Para hacer estas simulaciones en el módulo Motion de SolidWorks, únicamente ha sido necesaria la introducción de un motor rotatorio de velocidad constante en las levas. En la figura 42 se muestran las capturas de pantallas de los videos que muestran las simulaciones de funcionamiento de cada variante.

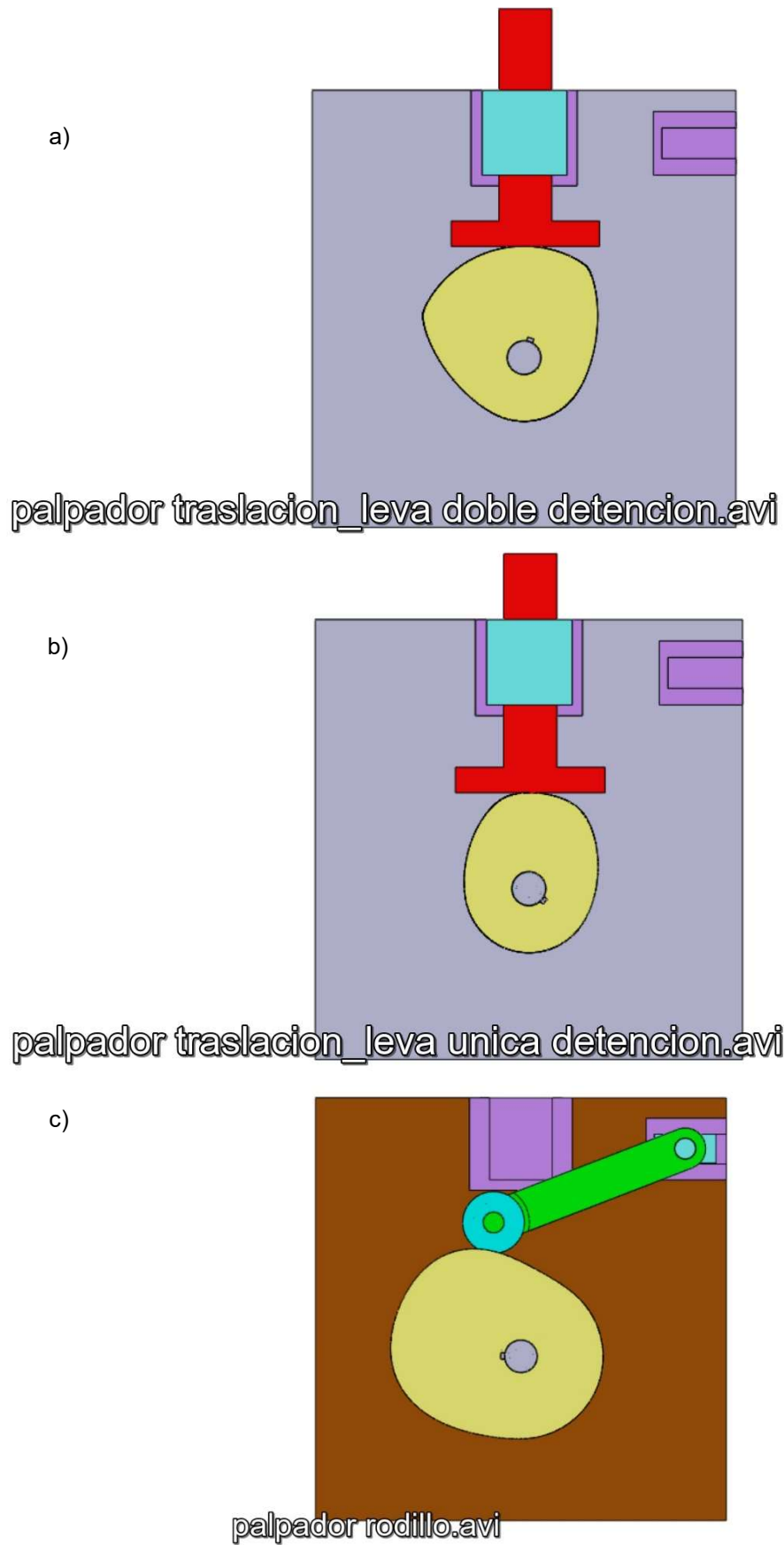
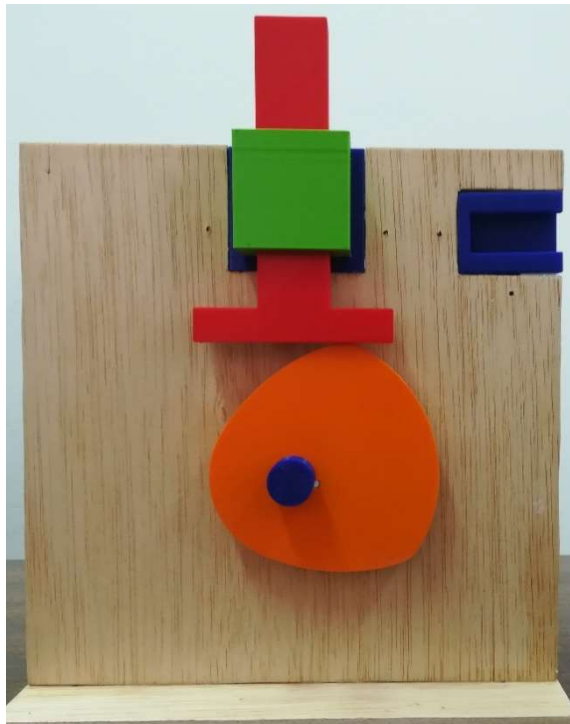
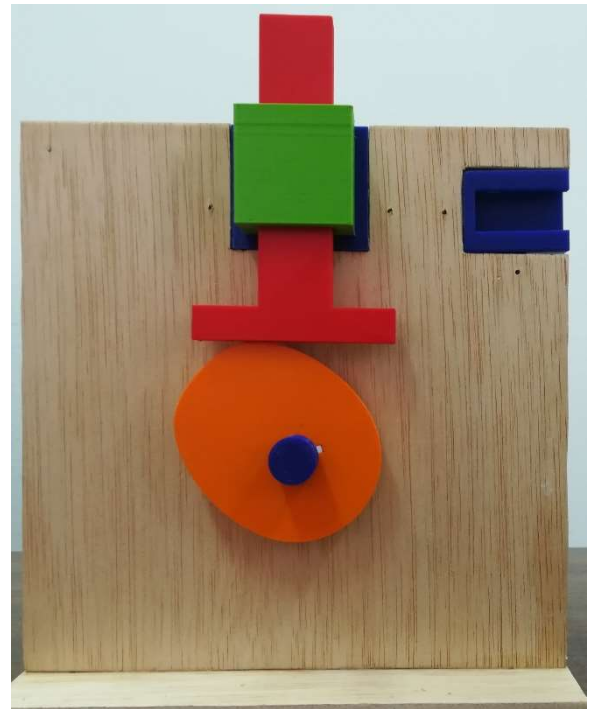


Figura 42. Captura de pantalla de las reproducciones de la animación 3D de cada variante constructiva del mecanismo leva-palpador.

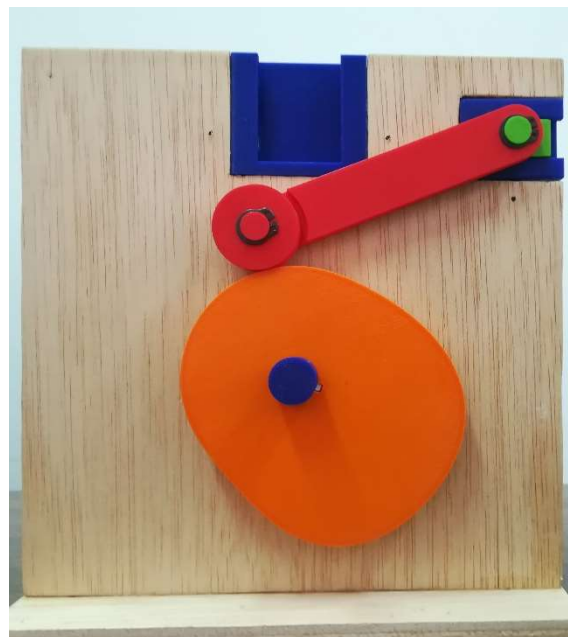
En la figura 43 se muestran tres fotos correspondientes a los montajes de las variantes de los prototipos físicos del mecanismo de leva-palpador, todas ellas utilizando la misma bancada y con la inclusión de las piezas y módulos correspondientes.



a)



b)



c)

Figura 43 Foto de los tres montajes de la maqueta de mecanismos de leva-palpador correspondientes a las tres variantes constructivas, que se ensamblan sobre una misma bancada y cuyas levas utilizan un mismo motor paso a paso (no visible en las fotografías)

Bibliografía

- [1] Zayas, E.E. y Horas, C. (2019). *Teoría de Máquinas y Mecanismos. Compendio de mecanismos modelados y animados en SolidWorks* (Monografía). Universitat Politècnica de Catalunya.
- [2] Garcia, A. (2019). *Diseño, fabricación, motorización y control de mecanismos diversos a utilizar como recursos didácticos en las asignaturas Teoría de Máquinas y Mecanismos y Proyecto II* (Trabajo Final de Grado). Universitat Politècnica de Catalunya.
- [3] Horas, C. (2019). *Recursos didácticos para la enseñanza y aprendizaje de la asignatura Teoría de Máquinas y Mecanismos: prototipos virtuales y reales* (Trabajo Final de Grado). Universitat Politècnica de Catalunya.
- [4] Zabalza, I. et al. () *Síntesis dimensional óptima de una variante del mecanismo de retorno rápido de Whitworth*. Recuperado de [http://www.imac.unavarra.es/web_imac/documentation/Sintesis_Dimensional_Optima_de_una_Variante_del_Mecanismo_de_Retorno_Rapido_de_Whitwoth_\(X-RKS\).pdf](http://www.imac.unavarra.es/web_imac/documentation/Sintesis_Dimensional_Optima_de_una_Variante_del_Mecanismo_de_Retorno_Rapido_de_Whitwoth_(X-RKS).pdf)
- [5] Salagre, I. C., Elorza, I. A., & Cabrerías, G. L. (2010). *Caracterización y control del regulador de Watt*. Recuperado de <https://academica-e.unavarra.es/bitstream/handle/2454/4185/577604.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [6] Zayas, E.E. et al. (2001). *Aportación al estudio de levas desmodrómicas* (Tesis Doctoral). Universitat Politècnica de Catalunya.
- [7] Merino, D. (2018). *Recursos virtuales de apoyo a la enseñanza y aprendizaje de Teoría de Máquinas y Mecanismos* (Trabajo Final de Grado). Universitat Politècnica de Catalunya.
- [8] Parra, F. (2016). *Programa QtCAM para el diseño y análisis de mecanismos planos de leva-palpador* (Proyecto Final de Carrera). Universitat Politècnica de Catalunya.
- [9] Zayas, E.E. et al. (2018). QtCAM: software libre para el diseño y el análisis de mecanismos planos de leva-palpador. En *Libro de Actas del XXII Congreso Nacional de Ingeniería Mecánica* (pp. 875-884). Madrid, España.
- [10] Cardona, S. y Clos, D. (2001). *Teoría de máquinas* (1ª Edición en Castellano). Barcelona: Edicions UPC.