

Trabajo Fin de Grado

Grado en Ingeniería de Tecnologías Industriales

Análisis y modelado de mecanismos de Artobolevski basados en cuatro elementos con colisa.

Autor: Julia M^a Mazuelos Gómez de Terreros

Tutor: D. Francisco Andrés Valderrama Gual

Dpto. de Ingeniería Gráfica
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2020



Departamento de
Ingeniería Gráfica

Trabajo Fin de Grado
Ingeniería de Tecnologías Industriales

Análisis y modelado de mecanismos de Artobolevski basados en cuatro elementos con colisa.

Autor:

Julia M^a Mazuelos Gómez de Terreros

Tutor:

D. Francisco Andrés Valderrama Gual

Profesor titular

Dpto. de Ingeniería Gráfica
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2020

Proyecto Fin de Grado: Análisis y modelado de mecanismos de Artobolevski basados en cuatro elementos con colisa.

Autor: Julia M^a Mazuelos Gómez de Terreros

Tutor: D. Francisco Andrés Valderrama Gual

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2020

El Secretario del Tribunal

Agradecimientos

Me gustaría agradecer enormemente a mi tutor D. Francisco Valderrama, por poner todo su empeño en ayudarme y apoyarme para que este proyecto salga adelante aún con la situación tan difícil que tenemos este año debida a la crisis del coronavirus.

Agradecer también a la Escuela y a sus profesores por hacer que durante estos años haya crecido mucho tanto profesional como personalmente.

Igualmente, gracias a mis compañeros de la Escuela y muchos ya amigos, por los momentos tan buenos que hemos vivido, por todas las experiencias que nos llevamos y por ser un grandísimo apoyo en los momentos más duros.

Finalmente, a mi familia y amigos, gracias por estar siempre disponibles tanto en lo bueno como en lo malo y porque sois el motivo de que haya llegado hasta aquí y sea quien soy hoy.

Resumen

El fin de este proyecto es como su título indica, el análisis y modelado de varios mecanismos de cuatro elementos con colisa. Dichos mecanismos pertenecen al libro *Mecanismos de la Técnica Moderna* escrito por Iván Ivánovich Artobolevski y el cual recoge una recopilación de muchos y muy diversos mecanismos.

Para el diseño, se han utilizado tantos los documentos correspondientes a dichos mecanismos como los conocimientos adquiridos durante los años de carrera en teoría de máquinas y mecanismos. Con esto, se ha hecho un estudio y análisis previo al modelado para conocer previamente el resultado que se esperaba obtener y poderlo comparar así con lo obtenido.

Una vez realizado este, se han modelado las piezas de la manera más fiel posible a lo que refleja el documento y posteriormente se han ensamblado. Tras el montaje, los mecanismos se han puesto en movimiento para ver su funcionamiento.

Para la representación gráfica de las piezas, de los mecanismos ensamblados y sus movimientos se ha hecho uso del programa CATIA V5R20, considerada una de las herramientas fundamentales del diseño asistido por ordenador, que permite además de generar las piezas y ensamblarlas, obtener imágenes de los conjuntos y animaciones de los movimientos que estos realizan.

El resultado de este proyecto es satisfactorio ya que los cuatro mecanismos, tras su análisis y modelado, realizan los movimientos esperados con éxito. Sin embargo, para ello ha sido necesario realizar suposiciones y ligeras variaciones de los mecanismos iniciales de Artobolevski entre las que destaca la suposición de las dimensiones de los elementos puesto que no se incluían en los documentos fuente.

Abstract

The purpose of this project is to analyse and model several four beam mechanisms with guides. These mechanisms belong to the book *Mechanisms in Modern Engineering Design* written by Iván Ivánovich Artobolevski and which includes a compilation of many and very diverse mechanisms.

For the design, the documents which correspond to these mechanisms are been used as well as the knowledge acquired during the degree years in theory of machines and mechanisms. With this all, a study and a previous analysis have been made in order to know in advance the results expected and compare them to the results obtained.

Once this has been made, the parts have been modelled in the most similar way possible to the ones in the document and later they have been assembled. After the assembly of the mechanisms, they have been set in motion in order to see their functioning.

For the graphical representation of the parts, of the mechanisms assembled and their movements, CATIA V5R20 has been used. This tool, which is considered one of the main tools in CAD, enables us to generate parts and assembly them, obtain pictures of the assemblies and animations of the movements that those make.

The result of this project is satisfactory because the four mechanisms, after their analysis and modelling, generate the expected movements with success. However, for that some suppositions and slight variations have been made to the initial mechanisms of Artobolevski. The main one to be outlined are the suppositions made in the dimensions of the parts because they were not included in the source documents.

Índice

Agradecimientos	7
Resumen	9
Abstract	11
Índice	12
Índice de figuras	14
1. Introducción	18
1.1 Objetivo	18
1.2 Antecedentes	19
1.2.1 Iván Ivánovich Artobolevski	19
1.2.2 Diseño por ordenador	20
2. Teoría de máquinas y mecanismos	22
2.1 Mecanismos de cuatro barras	24
3. CATIA V5	25
3.1 Mechanical design	25
3.1.1 Part Design	26
3.1.2 Assembly design	27
3.2 Digital Mockup – DMU Kinematics	27
3.3 Infrastructure – Photo Studio	28
4. Modelado de mecanismos	29
4.1 Mecanismo 946	29
4.1.1 Análisis	30
4.1.2 Modelado	30
4.1.3 Ensamblaje y cinemática	34
4.1.4 Resultado	35
4.2 Mecanismo 947	37
4.2.1 Análisis	37
4.2.2 Modelado	38
4.2.3 Ensamblaje y cinemática	41
4.2.4 Resultado	44
4.3 Mecanismo 962	46
4.3.1 Análisis	46
4.3.2 Modelado	47
4.3.3 Ensamblaje y cinemática	50
4.3.4 Resultado	54
4.4 Mecanismo 963	56
4.4.1 Análisis	56
4.4.2 Modelado	57
4.4.3 Ensamblaje y cinemática	60
4.4.4 Resultado	63
5. Conclusiones	67
	12

6. Desarrollos futuros	68
7. Bibliografía	69

Índice de figuras

Figura 1.1: Iván I. Artobolevski	19
Figura 2.1 – Esquema de los pares cinemáticos	23
Figura 2.2 – Ejemplos de mecanismos de cuatro barras	24
Figura 3.1 – Módulo Mechanical Design de CATIA V5	25
Figura 3.2 – Módulo Digital Mockup de CATIA V5	27
Figura 3.3 – Ventana para creación de mecanismos de CATIA V5	28
Figura 3.4 – Módulo Infrastructure de CATIA V5	28
Figura 4.1 – Croquis del mecanismo 946	29
Figura 4.2 – Mecanismo doble balancín	30
Figura 4.3 – Vista frontal del cuerpo del mecanismo 946	31
Figura 4.4 – Vista lateral del cuerpo del mecanismo 946	31
Figura 4.5 – Vista frontal la barra 1 del mecanismo 946	31
Figura 4.6 – Vista lateral de la barra 1 del mecanismo 946	32
Figura 4.7 – Vista frontal de la corredera 2 del mecanismo 946	32
Figura 4.8 – Vista lateral de la corredera 2 del mecanismo 946	32
Figura 4.9 – Vista frontal de la colisa 3 del mecanismo 946	33
Figura 4.10 – Vista lateral de la colisa 3 del mecanismo 946	33
Figura 4.11 – Detalle de la cara trasera de la colisa 3 del mecanismo 946	33
Figura 4.12 – Mecanismo 946	34
Figura 4.13 – Detalle del mecanismo 946	34
Figura 4.14 – Pares cinemáticos del mecanismo 946	35
Figura 4.15 – Restricción de movimiento del mecanismo 946	35
Figura 4.16 – Mecanismo 946 en posición 1	36
Figura 4.17 – Mecanismo 946 en posición 2	36
Figura 4.18 – Croquis del mecanismo 947	37
Figura 4.19 - Vista frontal del cuerpo del mecanismo 947	38
Figura 4.20 - Vista lateral del cuerpo del mecanismo 947	39

Figura 4.21 – Vista frontal de la corredera 1 del mecanismo 947	39
Figura 4.22 – Vista lateral de la corredera 1 del mecanismo 947	39
Figura 4.23 – Vista frontal de la barra 2 del mecanismo 947	40
Figura 4.24 – Vista lateral de la barra 2 del mecanismo 947	40
Figura 4.25 – Vista frontal de la corredera 3 del mecanismo 947	40
Figura 4.26 – Vista lateral de la corredera 3 del mecanismo 947	40
Figura 4.27 – Mecanismo 947	41
Figura 4.28 – Detalle 1 del mecanismo 947	41
Figura 4.29 – Detalle 2 del mecanismo 947	42
Figura 4.30 – Detalle 3 del mecanismo 947	42
Figura 4.31 – Detalle 4 del mecanismo 947	42
Figura 4.32 – Pares cinemáticos del mecanismo 947	43
Figura 4.33 – Restricción de movimiento del mecanismo 947	43
Figura 4.34 – Mecanismo 947 en posición 1	44
Figura 4.35 – Mecanismo 947 en posición 2	45
Figura 4.36 – Croquis del mecanismo 962	46
Figura 4.37 – Vista frontal del cuerpo del mecanismo 962	47
Figura 4.38 – Vista lateral del cuerpo del mecanismo 962	47
Figura 4.39 – Vista frontal de la barra 1 del mecanismo 962	48
Figura 4.40 – Vista lateral de la barra 1 del mecanismo 962	48
Figura 4.41 – Detalle de la barra 1 del mecanismo 962	48
Figura 4.42 – Vista frontal de la colisa angular 2 del mecanismo 962	49
Figura 4.43 – Vista lateral de la colisa angular 2 del mecanismo 962	49
Figura 4.44 – Detalle de la colisa angular 2 del mecanismo 962	49
Figura 4.45 – Vista lateral de la corredera 3 del mecanismo 962	50
Figura 4.46 – Vista lateral de la corredera 3 del mecanismo 962	50
Figura 4.47 – Mecanismo 962	50
Figura 4.48 – Detalle 1 del mecanismo 962	51
Figura 4.49 – Detalle 2 del mecanismo 962	51
Figura 4.50 – Detalle 3 del mecanismo 962	51
Figura 4.51 – Detalle 4 del mecanismo 962	52
Figura 4.52 – Detalle 5 del mecanismo 962	52
Figura 4.53 – Detalle 6 del mecanismo 962	52
Figura 4.54 – Pares cinemáticos del mecanismo 962	53
Figura 4.55 – Restricción de movimiento del mecanismo 962	53
Figura 4.56 – Ángulos de giro de los pares de rotación 1 y 3	54
Figura 4.57 – Mecanismo 962 en posición 1	55
Figura 4.58 – Mecanismo 962 en posición 2	55

Figura 4.59 – Croquis del mecanismo 963	56
Figura 4.60 – Vista frontal del cuerpo del mecanismo 963	57
Figura 4.61 – Vista lateral del cuerpo del mecanismo 963	57
Figura 4.62 – Vista frontal de la colisa angular 1 del mecanismo 963	58
Figura 4.63 – Vista lateral de la colisa angular 1 del mecanismo 963	58
Figura 4.64 – Vista frontal de la corredera 3 del mecanismo 963	59
Figura 4.65 – Vista lateral de la corredera 3 del mecanismo 963	59
Figura 4.66 – Vista frontal de la corredera 4 del mecanismo 963	59
Figura 4.67 – Vista lateral de la corredera 4 del mecanismo 963	59
Figura 4.68 – Vista frontal de la barra 5 del mecanismo 963	60
Figura 4.69 – Vista lateral de la barra 5 del mecanismo 963	60
Figura 4.70 – Vista frontal del tornillo 2 del mecanismo 963	60
Figura 4.71 – Vista lateral del tornillo 2 del mecanismo 963	60
Figura 4.72 – Vista frontal del mecanismo 963	61
Figura 4.73 – Vista lateral del mecanismo 963	61
Figura 4.74 – Detalle 1 del mecanismo 963	62
Figura 4.75 – Detalle 2 del mecanismo 963	62
Figura 4.76 – Pares cinemáticos del mecanismo 963	62
Figura 4.77 – Restricción de movimiento del mecanismo 963	63
Figura 4.78 – Caso 1 del mecanismo 963 en posición 1	64
Figura 4.79 – Caso 1 del mecanismo 963 en posición 2	64
Figura 4.80 – Caso 2 del mecanismo 963 en posición 1	65
Figura 4.81 – Caso 2 del mecanismo 963 en posición 2	65
Figura 4.82 – Caso 3 del mecanismo 963 en posición 1	66
Figura 4.83 – Caso 3 del mecanismo 963 en posición 2	66

1. Introducción

1.1 Objetivo

El objetivo de este proyecto es el análisis previo, modelado y posterior animación de varios mecanismos de cuatro barras pertenecientes al libro *Mecanismos en la técnica moderna* del cual es autor Iván Ivánovich Artobolevski.

Este libro incluye un número altísimo de mecanismos y, en particular de mecanismos de cuatro barras. Al ser una cuestión imposible realizarlos todos debido al tiempo, dentro del alcance de este proyecto, se ha acordado que en este únicamente se recoja una breve selección, que incluye cuatro que contienen tanto rotación como traslación en sus movimientos. Dichos mecanismos son:

- Mecanismo número 946: Mecanismo de cuatro elementos articulados con colisa circular.
- Mecanismo número 947: Mecanismo de colisa de cuatro elementos que efectúan movimiento de traslación.
- Mecanismo número 962: Mecanismo de cuatro elementos articulados con colisa angular.
- Mecanismo número 963: Mecanismo de colisa de cuatro elementos articulados con longitud regulable de la manivela.

El estudio previo es necesario puesto que los mecanismos que presenta Artobolevski no cuentan con dimensiones por lo que hay que estudiar primeramente los grados de libertad de los mecanismos y dimensionarlos. Para esto último es muy útil el uso de CATIA V5 ya que realizar cambios en las dimensiones de las piezas es mucho más sencillo y visual que a mano. Con dichas dimensiones, se modelan las piezas y se ensamblan. En último lugar, con el módulo de cinemática de CATIA V5 se ponen los mecanismos en movimiento y se comprueba si se mueven adecuadamente y según lo que indican los documentos.

Si bien los mecanismos aparecen como planos y se pueden estudiar como mecanismos planos, una vez se modelan, se aprecia que en muchas situaciones es imposible que todo el mecanismo se encuentre en el mismo plano por lo que algunas piezas se deben adelantar o atrasar en profundidad con el fin de evitar choques o incrustaciones que inhabiliten el movimiento de estos. Dichas interferencias se deben a que los documentos únicamente aportan una figura de los mecanismos que no es ni un plano ni un esquema cinemático y como tal no aportan la información necesaria para el modelado por lo que se deben realizar estudios y suposiciones. Estos problemas que se han ido dando durante el diseño, se han ido resolviendo hasta dar con mecanismos válidos para los movimientos requeridos.

1.2 Antecedentes

1.2.1 Iván Ivánovich Artobolevski



Figura 1.1: Iván I. Artobolevski

Iván Ivánovich Artobolevski nació en Moscú el 9 de octubre de 1905 en una familia cuyo padre, Iván Alekseevich Artobolevski, era profesor de Teología y posteriormente sacerdote. Su familia tenía contacto con muchos intelectuales rusos de la época como el historiador Vasily O. Kluchevsky entre otros. Esto influye en Artobolevski que ya desde pequeño se interesa por la cultura y el arte además de por formarse en el ámbito de la ciencia. Durante su infancia, también aprende francés, lo que más adelante le será muy útil en su carrera profesional.

En 1915, tras aprobar las pruebas de acceso, entra en la escuela donde descubre su pasión por las matemáticas de la mano del profesor A. F. Fortunov, quien se convierte en su supervisor.

Tras la Revolución de Octubre (1917), en 1918 la Iglesia se separa del Estado y desaparece la cátedra de Teología, por lo que el padre de Artobolevski es despedido. Con 15 años y tras finalizar la educación secundaria busca acceder a estudios superiores, pero tiene varias oposiciones a esto. En primer lugar, su edad y en segundo, que su padre sea sacerdote con escasos recursos económicos. Finalmente, accede a la Universidad Estatal de Agricultura de Moscú Timiryazev, donde también estudia su hermano, y realiza los estudios en la facultad de ingeniería mecánica, siendo el más joven del curso. Para poder financiarse los estudios tiene que trabajar como asistente entre otros trabajos hasta que le contratan como ayudante de topógrafo, trabajo bien pagado en la época.

Durante sus años de estudiante, los profesores que más le influyen son V.P. Goriachkin y N.I. Mertsalov, de los que obtiene amplios conocimientos de dinámica de máquinas y teoría de mecanismos. Durante 1924 también asiste a clases de mecánica aplicada en la Escuela Técnica Superior de Moscú donde comienza a tratar de resolver problemas de síntesis de mecanismos más complicados. Finalmente, se gradúa como ingeniero

agrónomo.

Posteriormente, Artobolevski es admitido en “Melstroy” como diseñador junior, donde se le pide diseñar elevadores de grano y más adelante, en 1927, trabaja como asistente de A.P. Malyshev, catedrático de mecánica aplicada en el Instituto textil de Moscú. En ese momento, comienza a dar clases en dicho Instituto y más tarde en ese mismo año, es contratado como profesor del departamento de mecánica aplicada en el Instituto de mecánica Lomonosov de Moscú. Destaca su carrera como profesor, ya que es considerado un magnífico profesor.

En 1936 aprueba el doctorado. En 1939 es elegido miembro de la Academia de Ciencias de la Unión Soviética y en 1946 es nombrado académico en mecánica. Debido a su gran aportación en el desarrollo de la ciencia nacional y actividad social es galardonado como Héroe del Trabajo Socialista, condecoración de grandísima importancia en la Unión Soviética. Pero no solo recibe reconocimiento en su tierra natal, sino también en el extranjero como la medalla de oro James Watt de parte del Instituto de Ingeniería Mecánica de Gran Bretaña, el mayor galardón dado a ingenieros en el mundo.

En 1965, fue elegido vicepresidente de la Federación Mundial de Trabajadores Científicos. Y, debido a que siempre buscó la integración entre especialistas de teoría de mecanismos de diferentes países, en 1969, con la creación de la Federación Internacional de Teoría de Máquinas y Mecanismos, fue nombrado su primer presidente.

Artobolevski se puede definir como una persona muy inteligente, culta e interesante que luchó por tener una vida profesional rica aun teniendo una vida complicada en muchos momentos por su situación personal y por la situación de la Rusia de su época.

Durante su vida escribió muchas obras entre las que destacan las siguientes:

- *Teoría de mecanismos espaciales* (1937)
- *Estructura, cinemática y cinetostática de mecanismos planos de múltiples eslabones* (1939)
- *Teoría de mecanismos y máquinas* (1940)
- *Síntesis de mecanismos* (1944)
- *Mecanismos*, en cuatro volúmenes (1947-1957)
- *Teoría de mecanismos para reproducir mecanismos planos* (1959)
- *Síntesis de mecanismos planos* (1959)
- *Mecanismos en la técnica moderna*, en cinco volúmenes (1970-1975)

1.2.2 Diseño por ordenador

El diseño de piezas para su posterior fabricación es una de las partes fundamentales de la ingeniería y hasta el desarrollo del diseño por ordenador, se hacía generalmente a mano y mediante el uso de planos, lo que lo convertía en un trabajo muy tedioso.

Con el desarrollo del diseño asistido por ordenador (DAO) o CAD (siglas que corresponden a *Computer Aided Design*) se consigue diseñar piezas de manera más rápida, visual y eficaz. Además, en caso de necesitar

realizar modificaciones en alguna pieza, el tiempo de corrección también es considerablemente menor debido a que en muchos casos no hace falta rehacer la pieza. A nivel empresarial también es un gran avance ya que agiliza el tiempo dedicado al diseño y permite reproducir piezas de mayor complejidad.

La función principal para la que inicialmente se concibieron estos programas era realizar planos de piezas, así como de conjuntos, es decir, una visión 2D. Pero, con el avance de las tecnologías, se consiguió no solo realizar planos sino también representar las piezas y conjuntos en tres dimensiones.

Hay una gran variedad de programas de CAD, por ejemplo, AutoCAD, CATIA o SolidWorks entre muchos otros. Y son muchas empresas las que los implementan en el desarrollo de sus productos. Por ejemplo, Boeing o AIRBUS, en el campo de la aeronáutica o las empresas automotrices Audi o Ferrari entre otras.

2. Teoría de máquinas y mecanismos

Puesto que este proyecto consiste en el diseño de mecanismos, es necesario incluir una base teórica de teoría de máquinas y mecanismo. Dicha materia es así mismo parte de la asignatura del mismo nombre del grado de Ingeniería en Tecnologías Industriales y gran parte de la información aquí mostrada está contenida en el libro de dicha asignatura.

Primeramente, se define máquina como una combinación de cuerpos resistentes agrupados y conectados de tal modo que tienen entre sí unos movimientos relativos determinados y transmiten fuerzas desde una fuente de energía a una resistencia a vencer, realizando un trabajo. Un ejemplo de máquina es un avión.

Por otro lado, se define mecanismo como un ensamblaje de cuerpos resistentes, conectados por articulaciones móviles, para formar una cadena cinemática cerrada con un eslabón fijo y con el propósito de transformar el movimiento (Uicker et al., 2003).

Los mecanismos se pueden agrupar en los siguientes:

- Mecanismos de levas.
- Mecanismos de engranajes.
- Mecanismos de tornillo.
- Mecanismos con elementos flexibles.
- Mecanismos con elementos fluidos.
- Mecanismos de barras.

Las combinaciones de estos mecanismos forman la mayoría de los mecanismos usados en la industria. Aunque esta no es la única clasificación ya que también se pueden distinguir entre planos o espaciales, o de tipo abierto o cerrado.

Los mecanismos que se van a estudiar en este proyecto forman parte del grupo de mecanismos de barras, grupo más amplio y variado. Dichos mecanismos están formados por eslabones o barras que son los elementos que tienen movimiento relativo respecto a otros. Según el movimiento que realizan, los eslabones se clasifican en:

- Manivela: gira 360° alrededor de un punto fijo.
- Balancín: gira alrededor de un punto fijo entre dos posiciones extremas.
- Corredera: desliza a lo largo de una línea.
- Biela: realiza tanto rotación como traslación.
- Eslabón fijo o soporte: no tiene movimiento y sirve de soporte para el mecanismo.

Por otra parte, se tienen los pares cinemáticos que son la unión de dos o más barras con capacidad de movimiento entre ellas. Los usados en este proyecto son:

- Par de rotación: permite la rotación de un sólido respecto a otro alrededor de un eje común.
- Par prismático: permite la traslación relativa entre dos sólidos a lo largo de un eje común.

Otros pares cinemáticos usados habitualmente son los pares cilíndricos, helicoidales, de rodaduras sin deslizamiento, de levas, esféricos y planos.

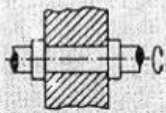
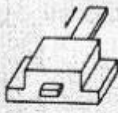
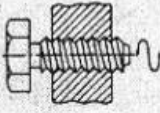
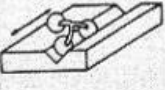
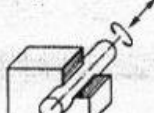

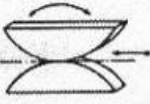




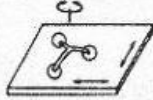
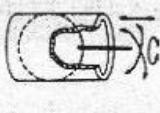
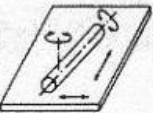
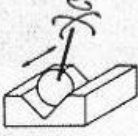
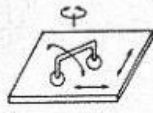
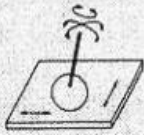
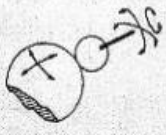
Grado de libertad	Esquemas, nombres y símbolos de pares cinemáticos			
I	 Par de revolución <i>R</i>	 Par prismático <i>P</i>	 Par helicoidal <i>H</i>	 Contact. pentapuntual
II	 Par cilíndrico <i>C</i>	 Par esférico ranurado	 Par de leva <i>L</i>	 Contact. tetrapuntual
III	 Par esférico <i>E</i>	 Par plano <i>Pl</i>	 P. cilíndrico ranurado	 Contact. tripuntual
IV	 Par esfera cilindro <i>Ec</i>	 Par plano cilindro <i>Pc</i>	 Contacto bipuntual	 Contacto bipuntual
V	 Par esfera plano <i>E</i>	 Par esfera <i>Ee</i>		

Figura 2.1 – Esquema de los pares cinemáticos

Dentro del estudio de los mecanismos de este proyecto, es necesario conocer el grado de libertad de estos. Los grados de libertad (gdl) se definen como las variables independientes que son necesarias conocer para que queden posicionados los diferentes eslabones de un mecanismo. Se suele representar con la letra *G*. Un sólido en el plano tiene 3 grados de libertad y un mecanismo de *N* barras tendrá $3N$ si se estudian los eslabones individualmente. Sin embargo, al conectar unos eslabones a otros, el número de grados de libertad disminuye.

Los tipos de pares que restringen grados de libertad pueden ser de dos tipos:

- Pares de clase I (C_I): permiten un grado de libertad.
- Pares de clase II (C_{II}): permiten dos grados de libertad.

Para conocer el número de grados de libertad, se utiliza la ecuación de Grübler:

$$G = 3(N - 1) - 2C_I - C_{II}$$

Si $G = 0$ el mecanismo es inmóvil, por el contrario, si G es mayor que cero significa que el mecanismo se mueve y hay una o más variables independientes que son necesarias conocer para saber el movimiento del mecanismo.

Por otro lado, un mecanismo es equivalente a otro si los dos se comportan igual desde el punto de vista del movimiento o cinemático.

2.1 Mecanismos de cuatro barras

Existen infinidad de mecanismos que pueden ser tanto simples como muy complejos. Dentro de estos, los mecanismos más simples son los mecanismos de cuatro barras o cuadriláteros articulados y se utilizan en todo tipo de máquinas. Varios mecanismos de este tipo son el objeto de estudio de este proyecto.

En el cuadrilátero articulado se tienen tres sólidos con movimiento más un sólido fijo. Los eslabones se suelen numerar del 1 al 4 siendo el 1 el soporte o eslabón fijo.

Mediante la elección adecuada de dimensiones e introduciendo un movimiento se pueden satisfacer aplicaciones tan diferentes como las mostradas en la siguiente figura. (Domínguez Abascal & Acosta Muñoz, 2020)

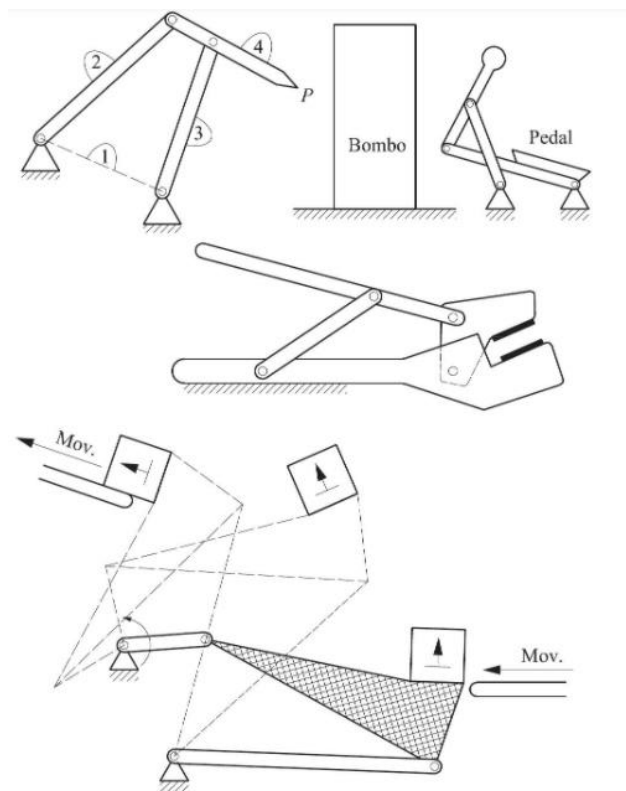


Figura 2.2 – Ejemplos de mecanismos de cuatro barras

3. CATIA V5

CATIA (Computer Aided Three Dimensional Interactive Application) es un programa de CAD creado por Dassault Systèmes en 1971. Se crea con el fin de facilitar el diseño y la fabricación de piezas en dicha empresa aeronáutica y, en 1981, se comercializa para su uso en otras empresas de sectores no solo aeroespacial sino también automovilístico, naval o arquitectónico.

Su uso en la actualidad es tan común en la industria que en muchas universidades se incluyen cursos en los que se maneja este programa o similares con el fin de que los futuros ingenieros dominen esta técnica.

En cuanto a las versiones que se pueden encontrar de este programa, comenzando por la V1 en 1982, se ha llegado en la actualidad a la versión V5-6R2019 aunque para el desarrollo de este proyecto se va a usar la versión V5R20.

Con el paso de los años, CATIA ha ido incluyendo diferentes módulos hasta contar con un grandísimo número de ellos. Los que se han utilizado en este proyecto son los que se exponen a continuación.

3.1 Mechanical design

La función de este módulo es el diseño y modelado de piezas (*parts*) así como su posterior ensamblaje (*products*). Dentro de él se incluyen muchas funciones, pero en este proyecto únicamente ha sido necesario usar *Part Design* y *Assembly Design*.

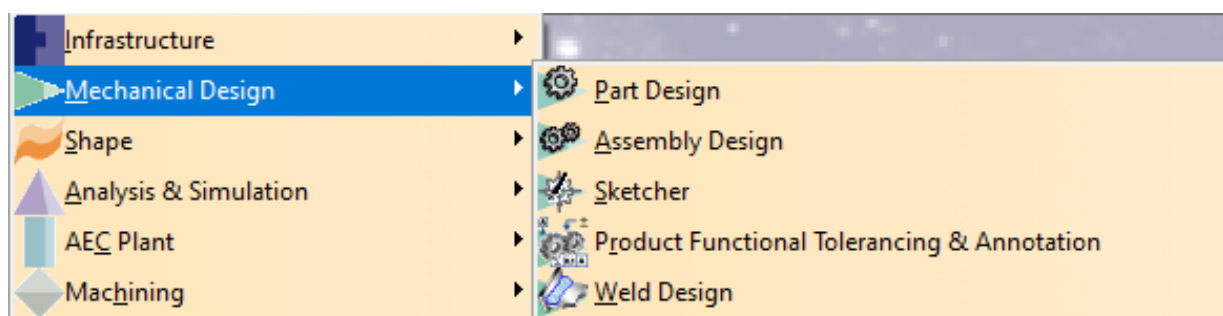












Figura 3.1 – Módulo Mechanical Design de CATIA V5







3.1.1 Part Design

Part design se utiliza para el diseño de piezas. Dentro de esta ventana encontramos las siguientes funciones:

- *Sketch* : su traducción literal es boceto y sirve para realizar el diseño de los perfiles 2D que forman cada pieza. Para salir de él se usa *Exit Workbench* . Dentro del sketch, se han usado los bloques:
 - o *Profile* , *Circle* , *Line*  y *Rectangle* : que dibujan perfiles, círculos, líneas y rectángulos. También está la opción de realizar puntos, elipses o ejes.
 - o *Corner* : crea una curva entre dos líneas, sirve para redondear las esquinas.
 - o *Quick trim* : recorta el elemento que se selecciona.
 - o *Mirror* : copia por simetría las líneas seleccionadas.
 - o *Constraint* : crea restricciones entre las líneas del boceto. Estas pueden ser de distancia, ángulos, longitudes o radios. También se pueden tener restricciones geométricas como fijo, coincidencia, tangencia, coincidencia, perpendicularidad, paralelismo, horizontalidad o verticalidad.



Una característica de este módulo es que indica mediante colores el estado del boceto, siendo:






- Verde: bien acotado.
- Blanco: sin acotar.
- Morado: excesivamente acotado.
- Negro: incoherentemente acotado.
- Rojo: geometría incoherente.

- *Pad* : permite extrusionar perfiles cerrados.
- *Pocket* : elimina material dado un perfil realizado en el sketch.
- *Shaft* : genera piezas por revolución.
- *Groove* : elimina material por revolución.
- *Hole* : realiza agujeros.
- *Edge fillet* : redondea aristas.

Para cambiar el color a las piezas se clica el botón derecho sobre PartBody del árbol, se selecciona propiedades y en gráficas se cambia el color.

3.1.2 Assembly design

Este módulo se utiliza para ensamblar las piezas y montar mecanismos. Se crea un Product que tiene ese nombre por defecto, pero se puede cambiar clicando el botón derecho sobre el árbol y posteriormente en propiedades. Para crear mecanismos, en primer lugar, o bien se crean nuevas piezas (part ) o se adjuntan piezas que se han realizado previamente (*Existing Component* ). Para realizar el mecanismo es necesario el uso de restricciones, entre ellas destacan:

- Coincidence Constraint : restricción que hace que dos ejes coincidan.
- Contact Constraint : restricción que garantiza el contacto entre dos superficies.
- Offset Constraint : restricción que fija la distancia entre dos elementos.
- Fix Component : fija un elemento, respecto al cual los demás se mueve. Es necesario para después poder simular los mecanismos.
- Fix Together : restricción que fija dos elementos.

3.2 Digital Mockup – DMU Kinematics

El módulo *Digital Mockup* contiene las siguientes funciones:

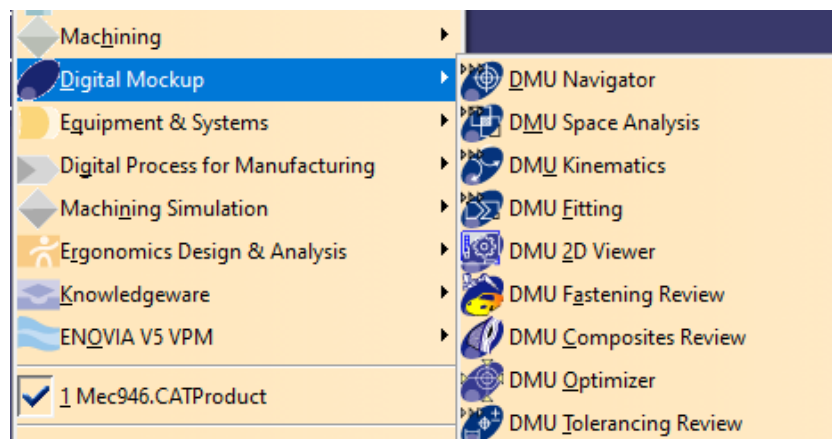



Figura 3.2 – Módulo Digital Mockup de CATIA V5

Entre ellas destaca *DMU Kinematics* que se encarga de simular movimientos de los mecanismos y crea animaciones. Para ello, inicialmente, hay que crear el mecanismo y esto se hace utilizando *Assembly Constraint Conversion* , del que aparece la ventana de la figura que se muestra a continuación. Para generar el mecanismo automáticamente basta con pulsar en *Auto Create*, pero antes de darlo por válido, es necesario revisar que los pares que aparecen son correctos.

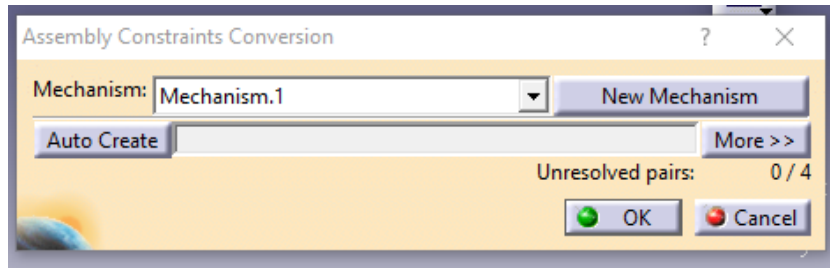




Figura 3.3 – Ventana para creación de mecanismos de CATIA V5

Cuando el mecanismo se crea, en el árbol aparecen los grados de libertad que tiene. En caso de que el número que aparece no coincida con el calculado analíticamente, esto significa que hay errores y deben ser encontrados y solucionados, por lo tanto, es una buena forma de comprobación del trabajo previo.

En los mecanismos que se estudian, el grado de libertad es igual a uno. Esto significa que para poderse simular en CATIA hay que darle valores a una de las juntas entre los que se va a mover. Una vez hecho esto, el mecanismo está listo para simular.

Para la simulación se usa *Simulation*  y posteriormente esta se puede grabar usando *Simulation Player* , que genera un video del movimiento del mecanismo.

3.3 Infraestructure – Photo Studio

Aunque el módulo Infraestructure tiene muchas funciones, solo se va a usar Photo Studio que se encarga de cambiar el fondo, la iluminación, el brillo o la saturación de las piezas o ensamblajes, así como girarlas, con el fin de que se puedan fotografiar para su uso en el proyecto.

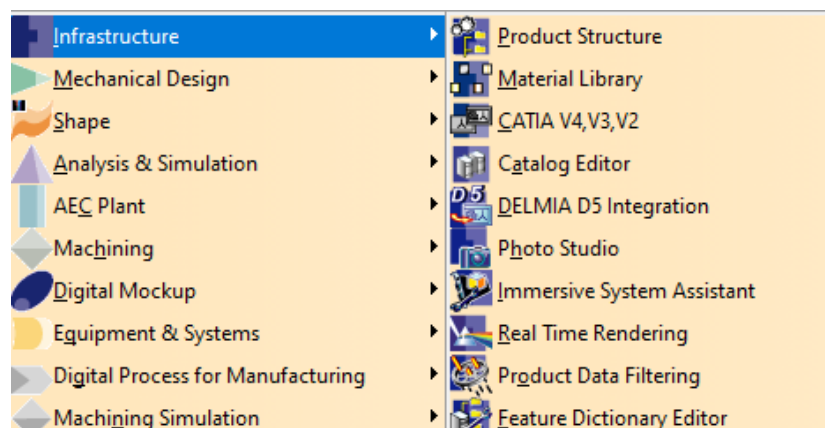


Figura 3.4 – Módulo Infraestructure de CATIA V5

4. Modelado de mecanismos

4.1 Mecanismo 946

MECANISMO DE CUATRO ELEMENTOS ARTICULADOS CON COLISA CIRCULAR.

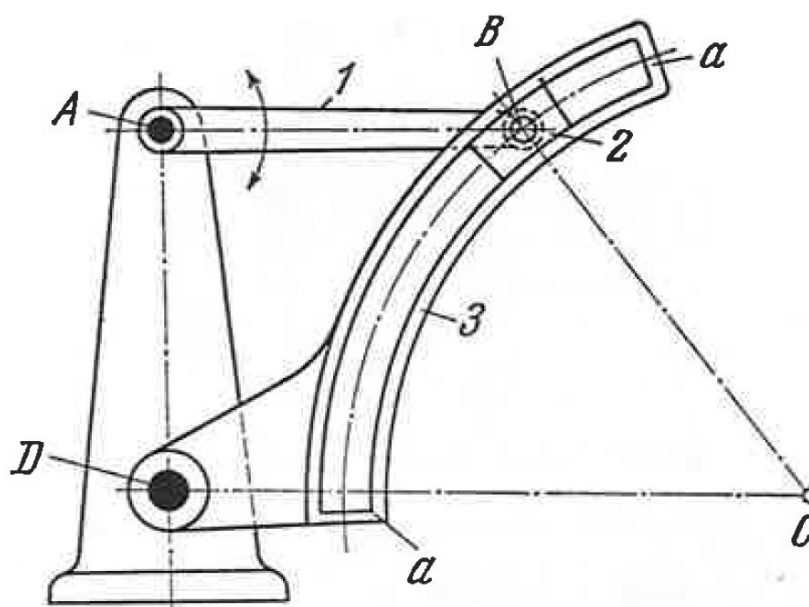


Figura 4.1 – Croquis del mecanismo 946

Las longitudes de los elementos del mecanismo satisfacen las condiciones:

$$AB + BC < AD + DC \quad \text{y} \quad AB < AD < BC < DC.$$

La corredera 2 se desliza por la guía circular fija a – a con centro en el punto C. Cuando el elemento 1 oscila, la colisa 3 efectúa también movimiento oscilatorio. El mecanismo es equivalente al mecanismo de cuatro elementos articulados con dos balancines ABCD, en el cual el elemento BC es la biela y los elementos AB y DC son balancines. (Artobolevski, 1983)

El enunciado indica que este mecanismo es equivalente al doble balancín. Este mecanismo se caracteriza por tener el acoplador como la barra más corta y su función es convertir el movimiento oscilatorio en otro movimiento oscilatorio. Se corresponde con la siguiente imagen:

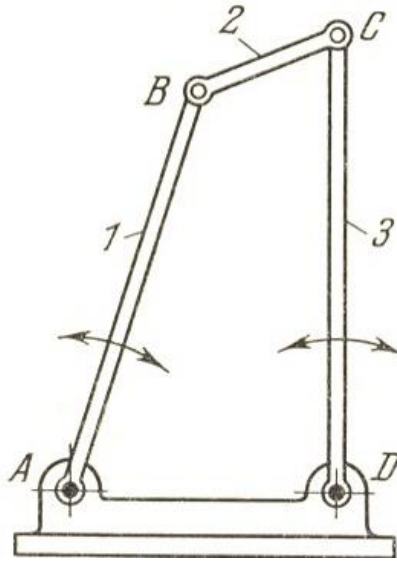


Figura 4.2 – Mecanismo doble balancín

4.1.1 Análisis

El mecanismo 946 de cuatro barras cuenta con el cuerpo que está anclado a tierra y tres elementos más que se mueven respecto a él. Dichos elementos son la barra 1, la corredera 2 y la colisa 3 que contiene una guía circular en su interior. Entre todos estos elementos se encuentran los siguientes pares: tres pares de rotación A, B y D (cuerpo – barra 1, barra 1 – corredera 2 y cuerpo – colisa 3 respectivamente) y un par prismático (corredera 2 – colisa 3). Al estar todo en principio en un mismo plano, se puede analizar como un mecanismo plano. Por lo tanto, se estudia el grado de libertad y se tiene que es uno.

Por otro lado, como se sabe que es un mecanismo que cuenta con dos balancines, en los pares de rotación del mecanismo no se realizarán giros completos (360°) sino menores.

4.1.2 Modelado

- Cuerpo

El cuerpo tiene como función el soporte del mecanismo y se ha diseñado tratando de seguir fielmente el boceto del mecanismo creado por Artobolevski. Además, cuenta con dos cilindros salientes en los que girarán la barra 1 (par de rotación A) y la colisa 3 (par de rotación C).

Para su posible posterior anclaje al suelo, se han extruido cilindros en la base en los que se podrían insertar tornillos o cualquier otro tipo de sujeción.

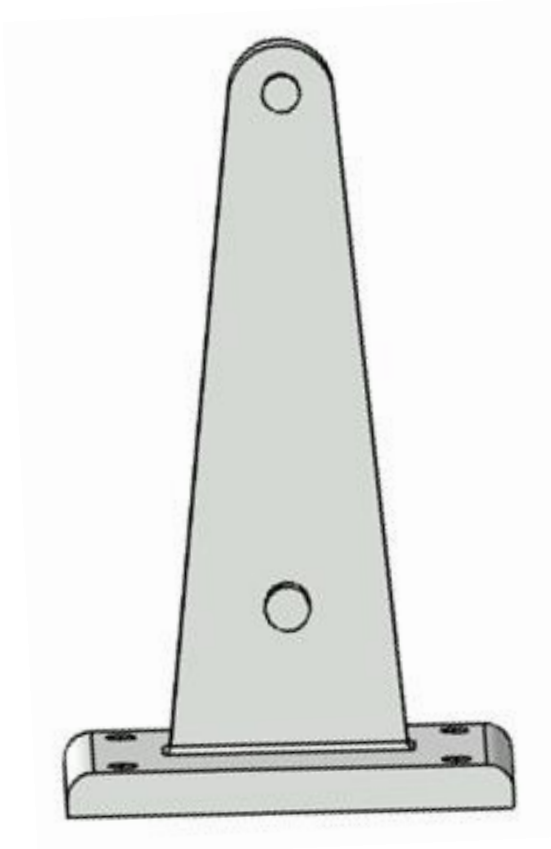


Figura 4.3 – Vista frontal del cuerpo del mecanismo 946

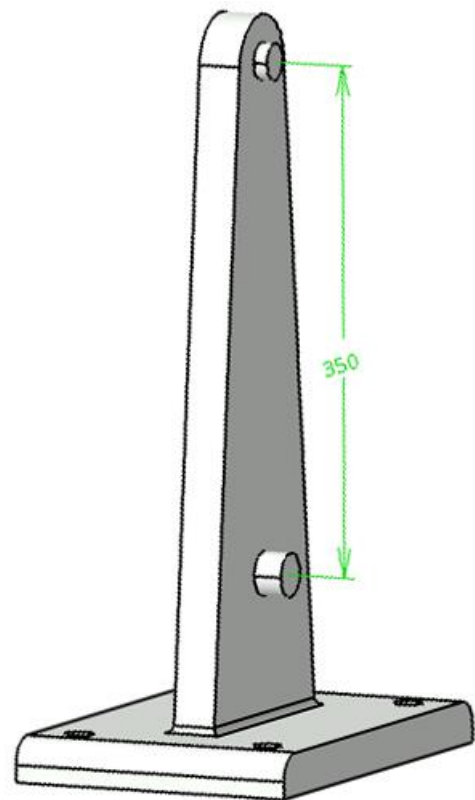


Figura 4.4 – Vista lateral del cuerpo del mecanismo 946

- Barra 1

La barra 1 conecta al cuerpo con la deslizadera. Para ello, cuenta con un cilindro extruido en el cual entra el saliente del cuerpo y con cilindro saliente para conectarse con el extruido de la deslizadera. Con esto se garantizan los pares de rotación A y B.



Figura 4.5 – Vista frontal la barra 1 del mecanismo 946

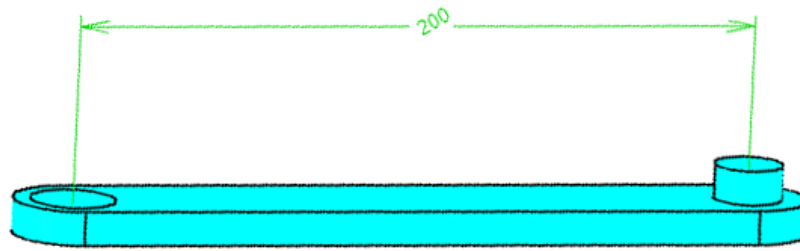


Figura 4.6 – Vista lateral de la barra 1 del mecanismo 946

- Corredera 2

La corredera 2 realiza un movimiento de deslizamiento en la colisa 3. Al ser dicha colisa circular, para que se pueda realizar el movimiento, la corredera se ha diseñado como una especie de prisma que cuenta también con curvatura. Por lo tanto, tiene los mismos radios interior y exterior que la ranura de la colisa. Además, cuenta con un cilindro saliente en el que se inserta el cilindro extruido de la barra 1.

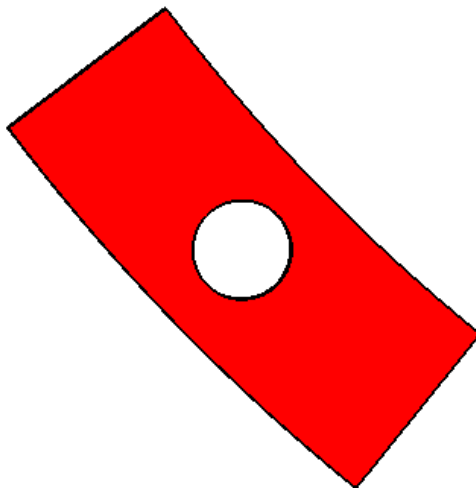


Figura 4.7 – Vista frontal de la corredera 2 del mecanismo 946

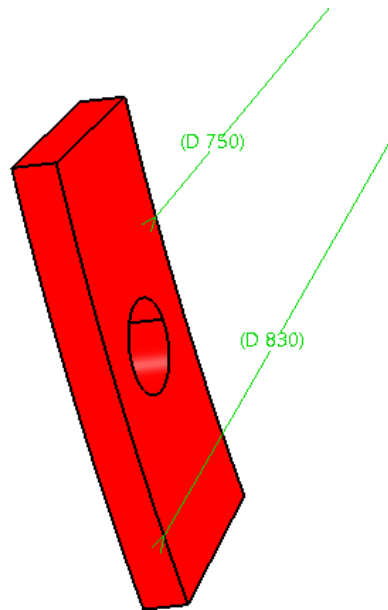


Figura 4.8 – Vista lateral de la corredera 2 del mecanismo 946

- Colisa 3

La colisa es un elemento que cuenta con una ranura en su interior en la que desliza algún elemento. A la hora de diseñarla, se ha basado su forma en la del documento fuente, es decir, una zona curvada con una ranura también curva en su interior y unida a esto una placa en la que se tiene un agujero con el fin de poder unirla al cuerpo.

También hay que considerar que como en este caso la colisa es de forma circular, debe contar con los mismos radios en la ranura que la corredera 2 ya que si no sería imposible el movimiento relativo entre ambos elementos.

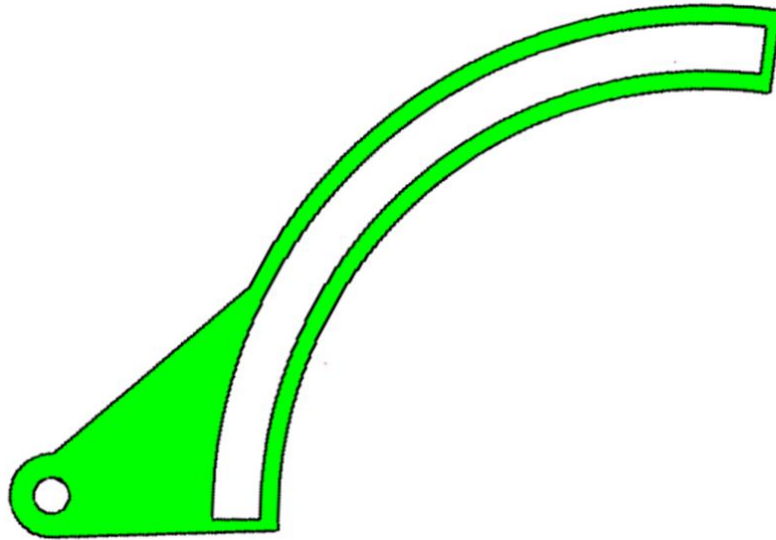


Figura 4.9 – Vista frontal de la colisa 3 del mecanismo 946

Por otro lado, y como después se mostrará, ha sido necesario poner un cilindro tras la pieza ya que sino colisionaban varias piezas del mecanismo. Dicho detalle se puede ver en la vista lateral de la colisa que se muestra a continuación en la Figura 4.10 aunque se aprecia mejor en la Figura 4.11.

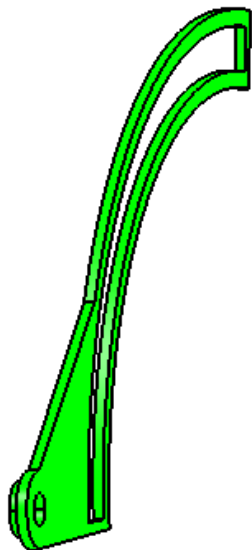


Figura 4.10 – Vista lateral de la colisa 3 del mecanismo 946

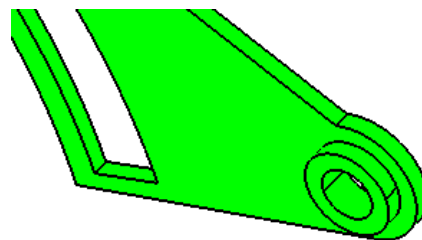


Figura 4.11 – Detalle de la cara trasera de la colisa 3 del mecanismo 946

4.1.3 Ensamblaje y cinemática

Para realizar el ensamblaje de las piezas, se ha usado el módulo Assembly Design de CATIA V5. Primeramente, se ha anclado el cuerpo y a partir de ahí se han ido ensamblando el resto de los elementos mediante restricciones de contacto y de coincidencia.

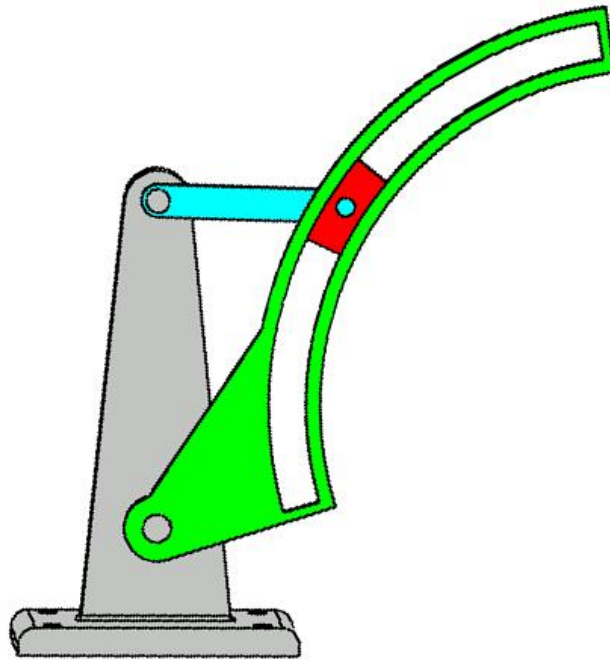


Figura 4.12 –Mecanismo 946

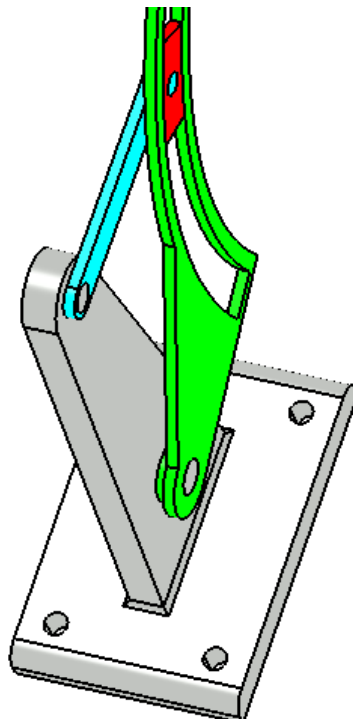


Figura 4.13 – Detalle del mecanismo 946

Cabe destacar que en el árbol se observan los pares que aparecen y se puede comprobar que son iguales a los analizados analíticamente.



Figura 4.14 – Pares cinemáticos del mecanismo 946

Como el mecanismo tiene un grado de libertad, para que CATIA V5 pueda simularlo es necesario aplicar una restricción de movimiento. En este caso, esta se le ha aplicado al ángulo del par de rotación entre la barra 1 y el cuerpo. El valor mínimo y máximo del ángulo que debe haber entre ambos elementos no puede ser 360° por ser un balancín, por lo tanto, para conocer los valores exactos se ha ido probando en CATIA V5 hasta que el mecanismo se moviera correctamente y se ha obtenido que estos son los siguientes:

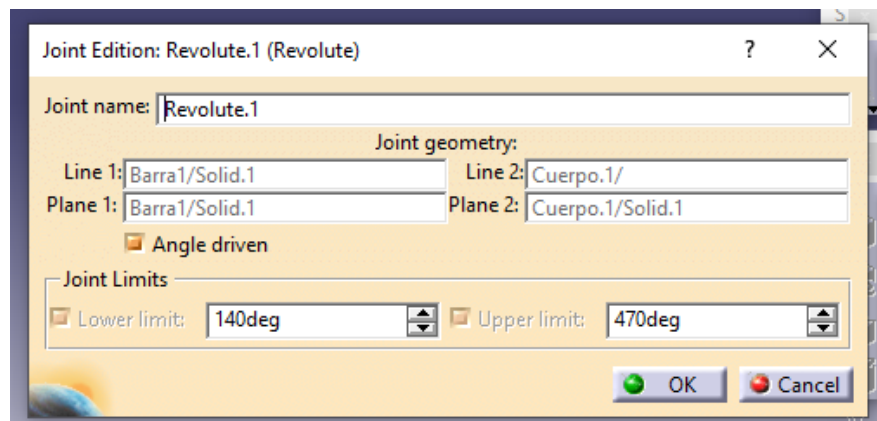


Figura 4.15 – Restricción de movimiento del mecanismo 946

4.1.4 Resultado

Aunque inicialmente se ha estudiado el mecanismo como si fuera plano, la realidad es que, a la hora de ensamblarlo, se ha apreciado que los elementos colisionaban entre sí, particularmente la colisa 3 con la barra 1. Es por ello por lo que se da mayor profundidas a parte del apoyo de la colisa como se puede ver en la Figura 4.11 y se evite el choque.

Una vez se ha solucionado el problema de la colisión, se pone el mecanismo en movimiento y se puede apreciar que realiza el movimiento correctamente. Tras esto se genera una animación que no se puede adjuntar al documento.

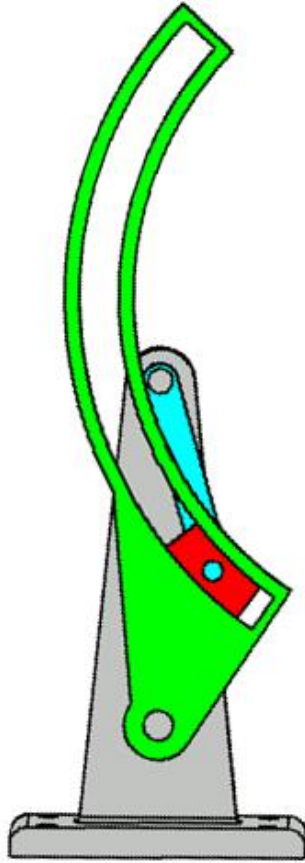


Figura 4.16 – Mecanismo 946 en posición 1

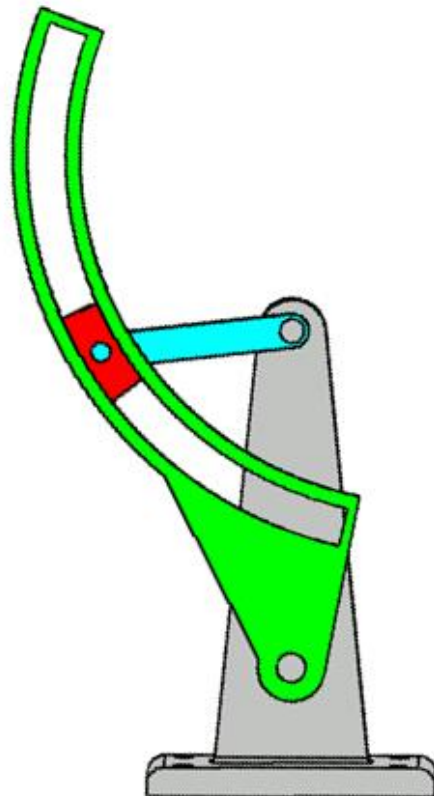


Figura 4.17 – Mecanismo 946 en posición 2

4.2 Mecanismo 947

MECANISMO DE COLISA DE CUATRO ELEMENTOS ARTICULADOS QUE EFECTÚAN MOVIMIENTO DE TRASLACIÓN.

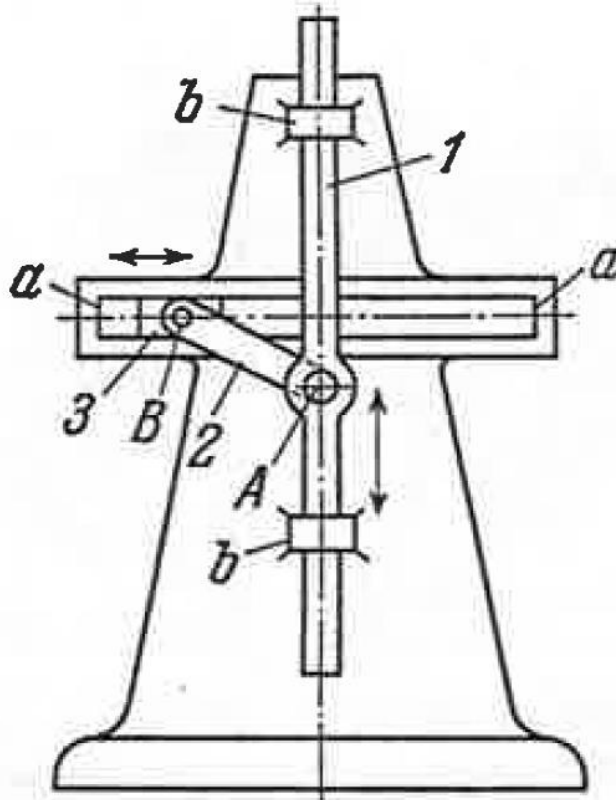


Figura 4.18 – Croquis del mecanismo 947

El elemento 1, que efectúa movimiento alternativo en las guías fijas $b - b$, forma el par de rotación A con el elemento 2. La corredera 3, que forma el par de rotación B con el elemento 2, se desliza por las guías fijas $a - a$. Los ejes de las guías $a - a$ y $b - b$ son mutuamente perpendiculares. (Artobolevski, 1983)

4.2.1 Análisis

El mecanismo 947 se puede estudiar como un mecanismo plano que está formado por tres elementos que se mueven respecto al cuerpo y, este último, está anclado a tierra. Dichos elementos son la corredera 1, la barra 2 y la corredera 3. Además, el cuerpo contiene una colisa en su interior. Entre todos estos elementos se encuentran los siguientes pares: dos pares de rotación A y B (corredera 1 – barra 2 y barra 2 – corredera 3) y dos pares prismáticos (cuerpo – corredera 1 y cuerpo – corredera 3). Tras el cálculo del grado de libertad, se obtiene que este es igual a uno.

Por otro lado, se puede apreciar que el mecanismo cuenta con dos elementos que deslizarán o bien por una guía o por la colisa y una barra que actúa como una manivela, es decir, gira 360° .

4.2.2 Modelado

Como el enunciado no aporta ningunas especificaciones en cuanto a las dimensiones de los elementos estos se han diseñado con medidas del mismo orden que el mecanismo 946, que sí contaba con especificaciones. En caso de que al ensamblar o poner en movimiento el mecanismo se dieran errores de diseño, se han ido modificando las piezas hasta que finalmente fueran correctas.

- Cuerpo

El cuerpo se ha diseñado de forma similar a la que se representa en el documento fuente, por lo que simplemente se han escalado sus dimensiones. En cuanto a los elementos que contiene, estos son una colisa cuadrada en la que desliza la corredera 3 y dos guías por las que desliza la corredera 1. Además, en la base se han incluido cuatro agujeros para su posterior anclaje al suelo.

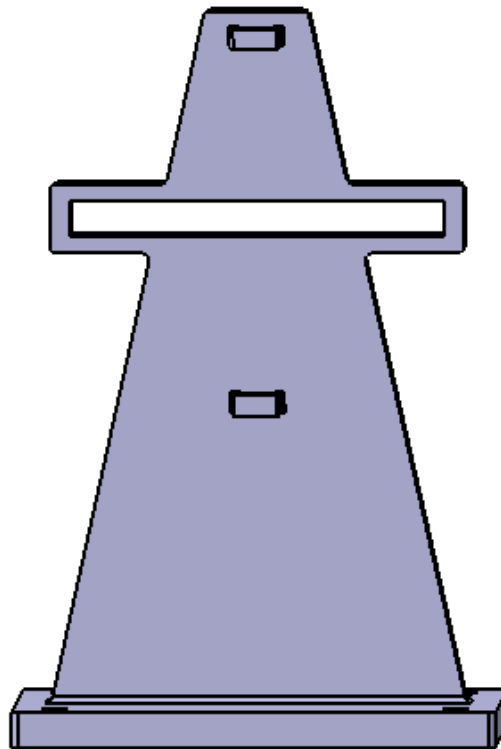


Figura 4.19 - Vista frontal del cuerpo del mecanismo 947

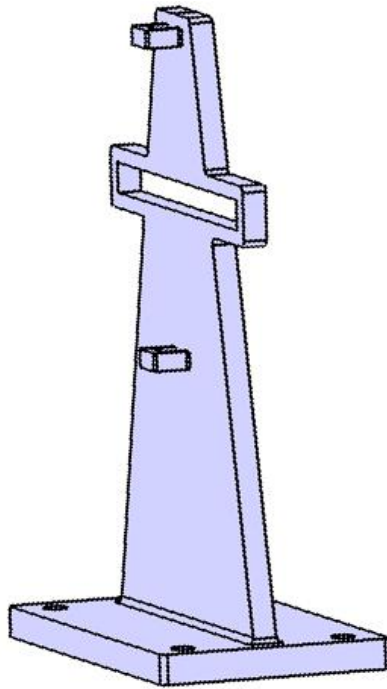


Figura 4.20 - Vista lateral del cuerpo del mecanismo 947

- Corredera 1

La corredera 1 consiste en una barra rectangular que contiene una parte circular con un agujero en la zona media de este. La parte rectangular desliza sobre la guía del cuerpo y en el agujero de la zona circular se inserta el cilindro saliente de la barra 2 para satisfacer el par de rotación A.



Figura 4.21 – Vista frontal de la corredera 1 del mecanismo 947

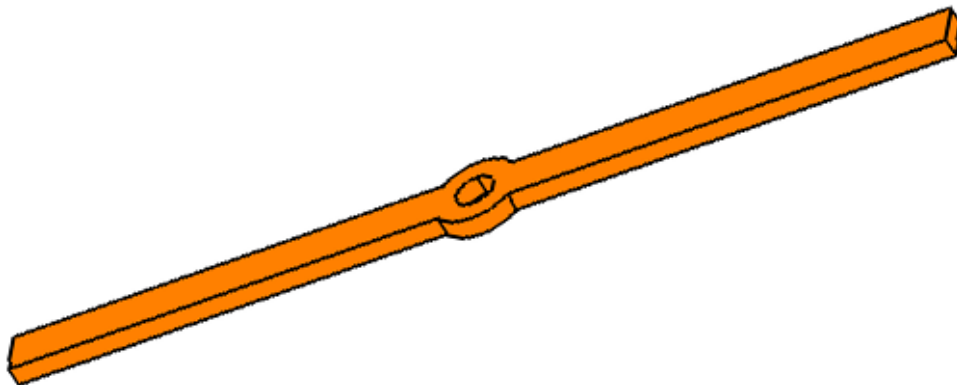


Figura 4.22 – Vista lateral de la corredera 1 del mecanismo 947

- Barra 2

La barra dos sirve de unión entre las correderas 1 y 3 y consiste en una barra en la que en un extremo se encuentra un cilindro saliente para conectarse con la corredera 1 y en el otro extremo tiene un agujero en el que irá insertado el cilindro saliente de la corredera 3.

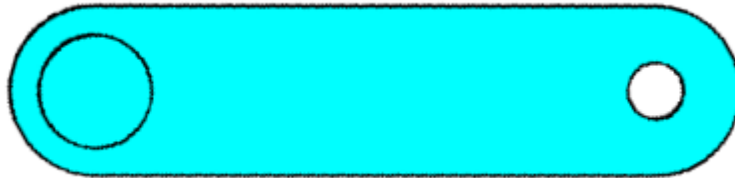


Figura 4.23 – Vista frontal de la barra 2 del mecanismo 947

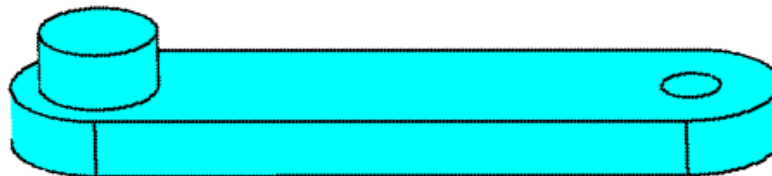


Figura 4.24 – Vista lateral de la barra 2 del mecanismo 947

- Corredera 3

La corredera 3 desliza sobre la colisa rectangular del cuerpo. En cuanto a su diseño, se ha realizado como un prisma en el que hay un cilindro saliente para conectar a la corredera con la barra 2.

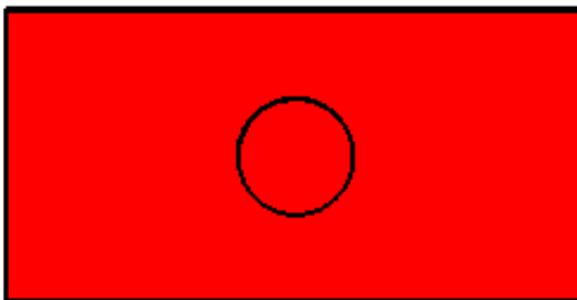


Figura 4.25 – Vista frontal de la corredera 3 del mecanismo 947

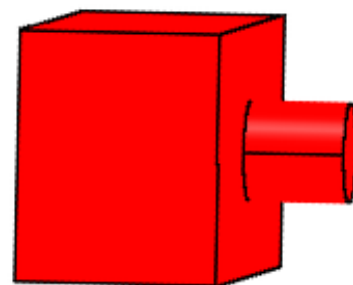


Figura 4.26 – Vista lateral de la corredera 3 del mecanismo 947

4.2.3 Ensamblaje y cinemática

Tras el modelado de todos los elementos, se pasa a ensamblarlos aplicando nuevamente restricciones. Primero, se fija el cuerpo y posteriormente, usando restricciones de contacto y de coincidencia entre los elementos, se obtiene el mecanismo.

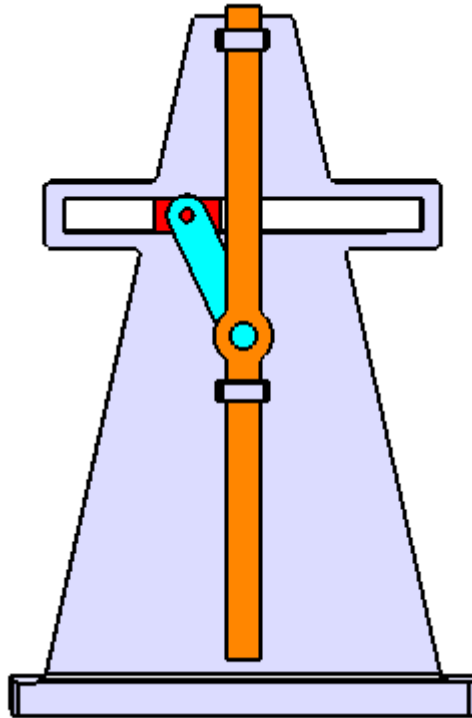


Figura 4.27 – Mecanismo 947

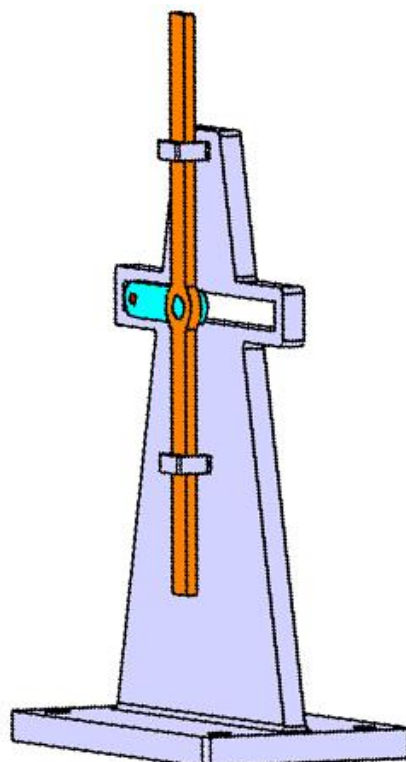


Figura 4.28 – Detalle 1 del mecanismo 947

Como el mecanismo parece que colisiona en varios momentos, se han capturado los momentos críticos para comprobar que no hay choques.

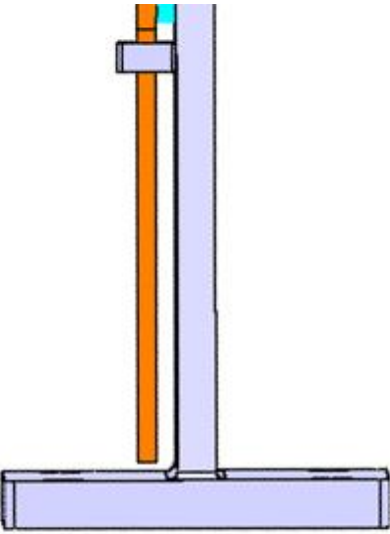


Figura 4.29 – Detalle 2 del mecanismo 947

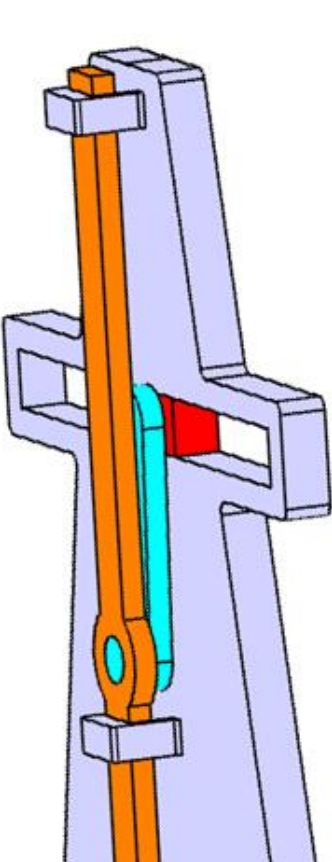


Figura 4.30 – Detalle 3 del mecanismo 947

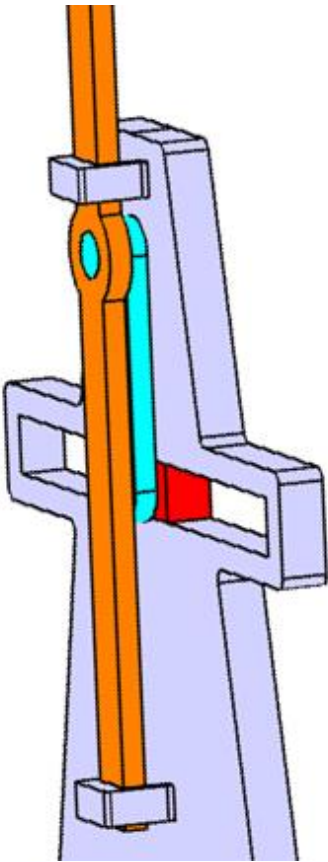


Figura 4.31 – Detalle 4 del mecanismo 947

Para comprobar que el mecanismo tiene los mismos pares cinemáticos que el del documento fuente, se comprueba observando los que aparecen en el árbol. En este caso, se afirma que coinciden.

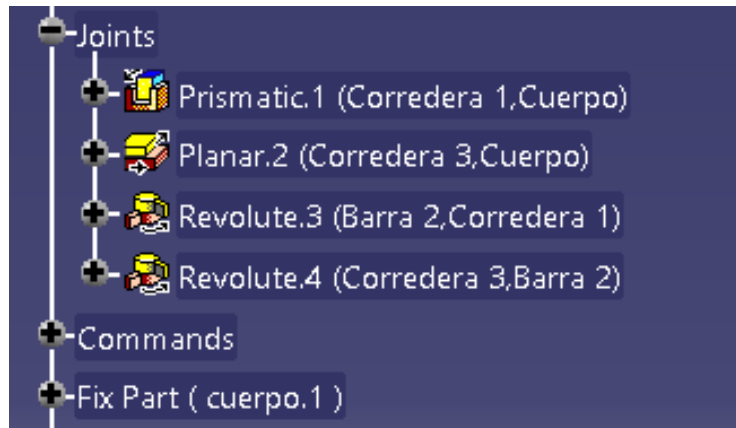


Figura 4.32 – Pares cinemáticos del mecanismo 947

Para que el mecanismo pueda moverse en CATIA V5, al tener un grado de libertad es necesario aplicar una restricción de movimiento. Esta se le aplica al par de rotación entre la corredera 1 y la barra 2 y puesto que es una manivela, la restricción será de giro y en concreto de 0° a 360°.

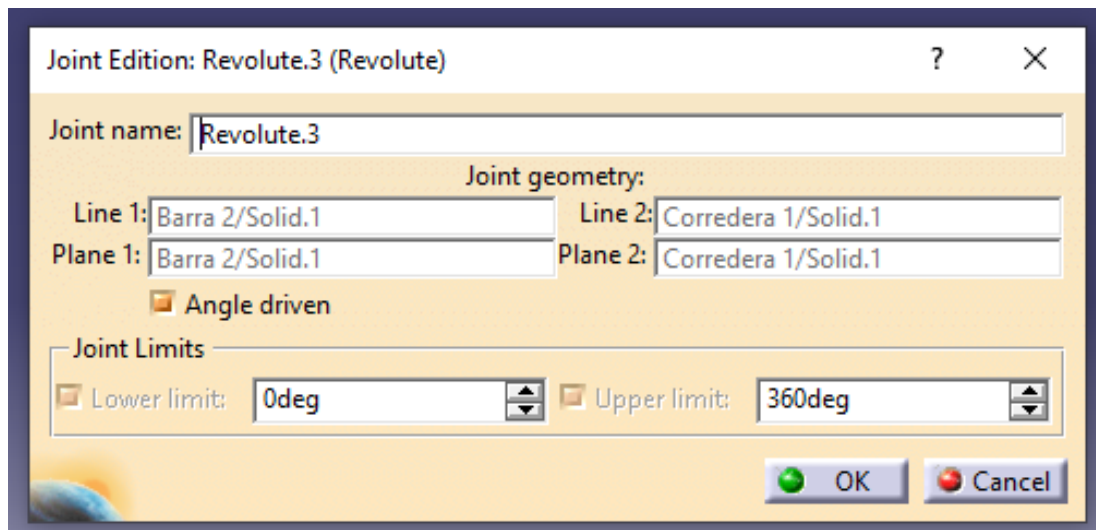


Figura 4.33 – Restricción de movimiento del mecanismo 947

4.2.4 Resultado

Al no haber especificaciones de diseño hay varios incidentes en cuanto al diseño que después se debieron modificar. Entre ellos se tiene que, inicialmente, las guías del cuerpo se pusieron más cercanas a la ranura de la colisa, pero colisionaban con la corredera 1 por lo que se distanciaron. Pero, al separar las guías, también hubo que modificar las dimensiones de la corredera 1 puesto que no era lo suficientemente larga como para atravesarlas. Además, aunque se puede tratar como un mecanismo plano en cuanto al estudio de la cinemática, en la realidad, al ensamblar el mecanismo en el mismo plano, las barras colisionaban. Es por esto por lo que se han tenido que poner en distintos planos.

Tras solucionar estos problemas de diseño y reajustar el ensamblaje, se pone en movimiento el mecanismo y se obtiene que funciona correctamente.

Además de las imágenes aportadas en el documento, se ha realizado un video con la animación del movimiento, pero no es posible adjuntarlo al documento.

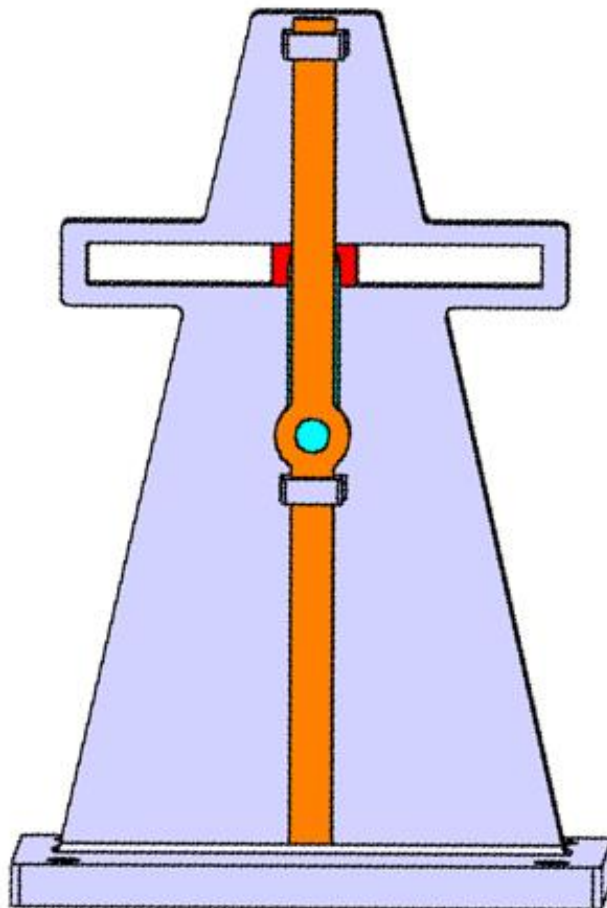


Figura 4.34 – Mecanismo 947 en posición 1

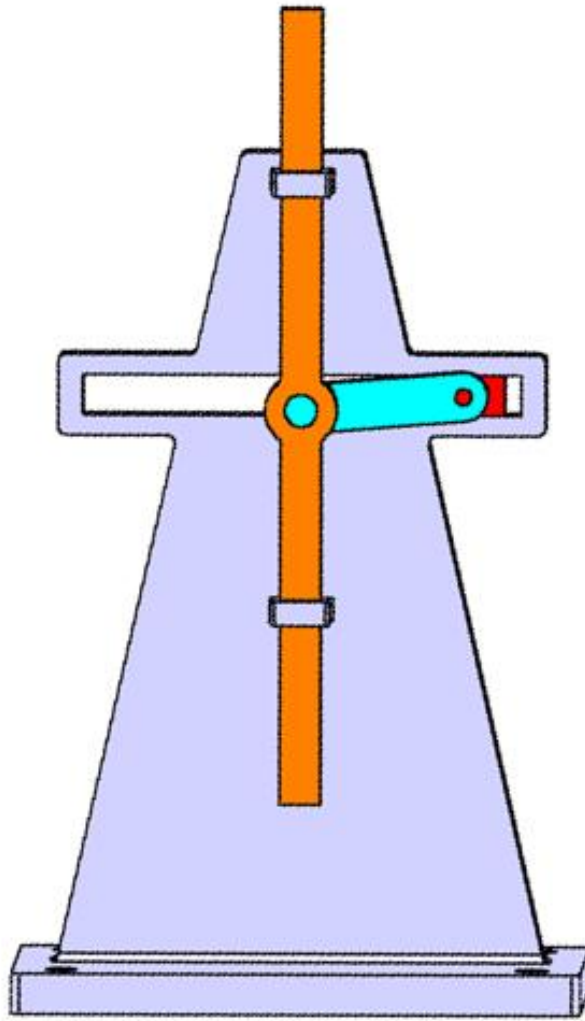


Figura 4.35 – Mecanismo 947 en posición 2

4.3 Mecanismo 962

MECANISMO DE CUATRO ELEMENTOS ARTICULADOS CON COLISA ANGULAR.

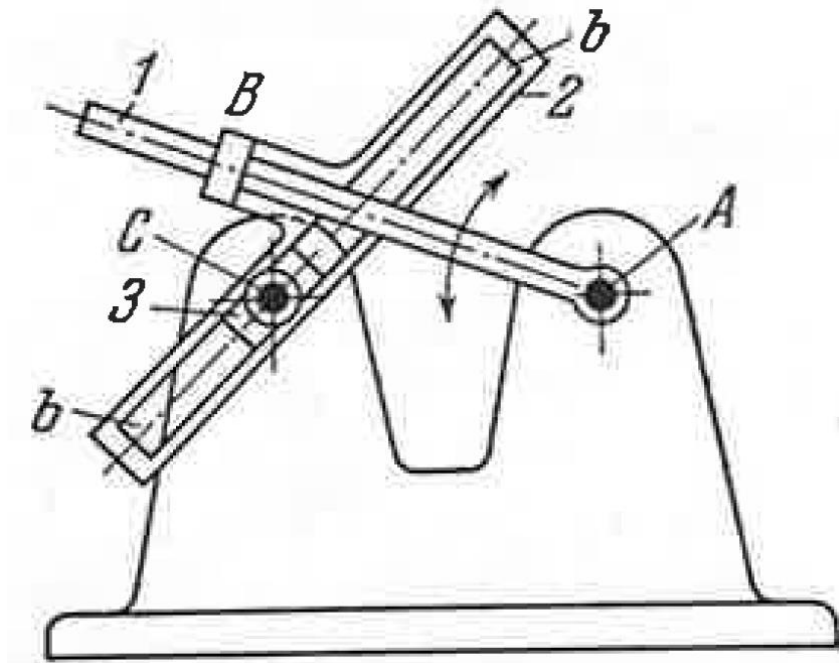


Figura 4.36 – Croquis del mecanismo 962

El elemento 1 gira alrededor del eje fijo A y forma el par de traslación B con la colisa angular 2 que tiene una ranura b – b. La corredera 3 gira alrededor del eje fijo C. Al oscilar el elemento 1 el elemento 2 se desliza sobre la corredera 3. Las velocidades angulares de todos los elementos son idénticas. (Artobolevski, 1983)

4.3.1 Análisis

El mecanismo 962 se puede tratar en su análisis como un mecanismo plano de cuatro barras que está formado por un cuerpo, que está anclado a tierra y tres elementos que se mueven respecto a este cuerpo. Dichos elementos son la barra 1, la colisa angular 2 y la corredera 3. Entre todos estos elementos se encuentran los siguientes pares: dos pares de rotación A y C (cuerpo – barra 1 y cuerpo – corredera 3) y dos pares prismáticos (barra 1 – corredera 3 y cuerpo – corredera 3). Tras el cálculo del grado de libertad, se obtiene que este es igual a uno.

Por otro lado, se puede apreciar que el mecanismo cuenta con un balancín en el movimiento entre la barra 1 y el cuerpo, es decir, el ángulo que se formará en este giro será menor a 360° .

4.3.2 Modelado

De nuevo el enunciado no aporta ningunas especificaciones en cuanto a las dimensiones de los elementos, por lo tanto, estos se han diseñado con medidas del mismo orden que los mecanismos previos. Al ser este mecanismo en parte a prueba y error, cuando se da el caso de que al ensamblar o poner en movimiento el mecanismo se dan errores de diseño, se modifican las piezas hasta que finalmente encajen correctamente.

- Cuerpo

El cuerpo sirve de soporte para el mecanismo y debe ir fijado al suelo. Para ello se le han hecho unos agujeros en los que se pondrá la pertinente sujeción. Además, se ha tratado de diseñar su forma lo más similar posible a la del croquis del enunciado, aunque al no tener dimensiones del mecanismo, se ha ido reajustando con el objetivo de que se permita su movimiento y finalmente no coincide exactamente.

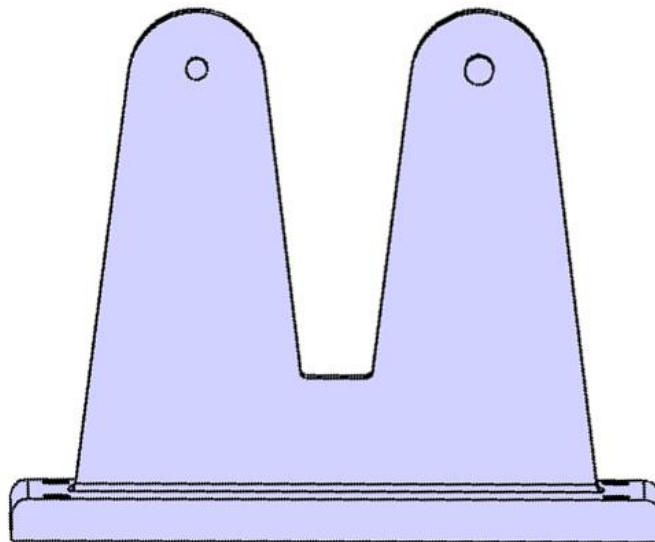


Figura 4.37 – Vista frontal del cuerpo del mecanismo 962

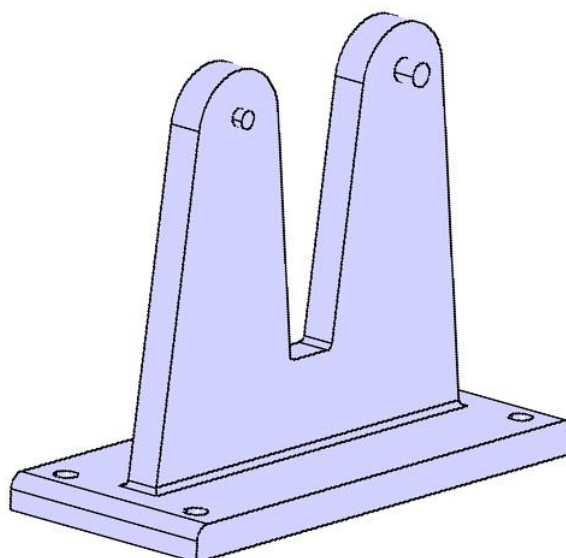


Figura 4.38 – Vista lateral del cuerpo del mecanismo 962

- Barra 1

La barra 1 es como su nombre indica una barra con base rectangular excepto en uno de los extremos en el que incluye una zona circular con un agujero. La zona rectangular irá deslizando en el agujero de la colisa angular 2 y en el agujero se insertará el cilindro que se encuentra en el cuerpo.

Para evitar colisiones, es necesario que en la parte trasera la zona circular sea más ancha. Esto se puede apreciar en la Figura 4.41.



Figura 4.39 – Vista frontal de la barra 1 del mecanismo 962

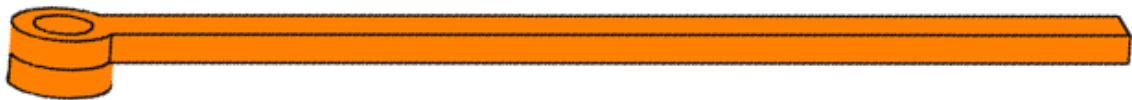


Figura 4.40 – Vista lateral de la barra 1 del mecanismo 962



Figura 4.41 – Detalle de la barra 1 del mecanismo 962

- Colisa angular 2

Este elemento consta de una ranura rectangular en la que en su interior desliza la corredera 3 y un agujero también rectangular en el que desliza la barra 1. Entre ambas ranuras debe haber un ángulo y este se ha tomado de 60° . Además, para evitar colisiones, el agujero está a una cota diferente al resto de la pieza.

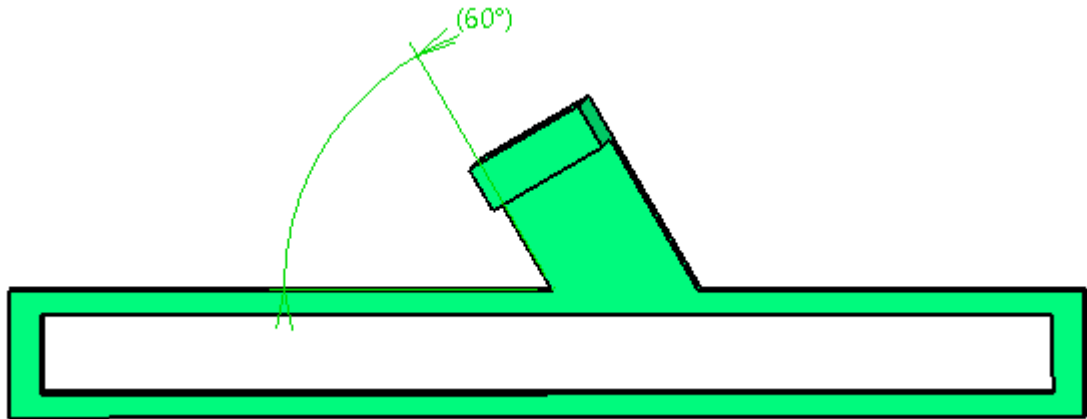


Figura 4.42 – Vista frontal de la colisa angular 2 del mecanismo 962

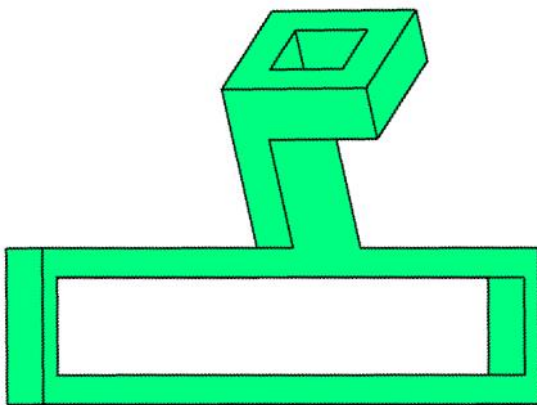


Figura 4.43 – Vista lateral de la colisa angular 2 del mecanismo 962

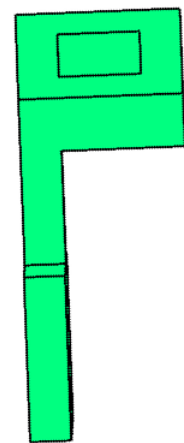


Figura 4.44 – Detalle de la colisa angular 2 del mecanismo 962

- Corredera 3

La corredera 3 se inserta en el cilindro saliente del cuerpo, por lo que debe incluir un agujero para que se pueda materializar dicha unión. Además, desliza por la ranura rectangular de la colisa angular 2 por lo que su forma debe ser adecuada para ello. Con esto, se ha diseñado un prisma rectangular que contiene un agujero en su interior.

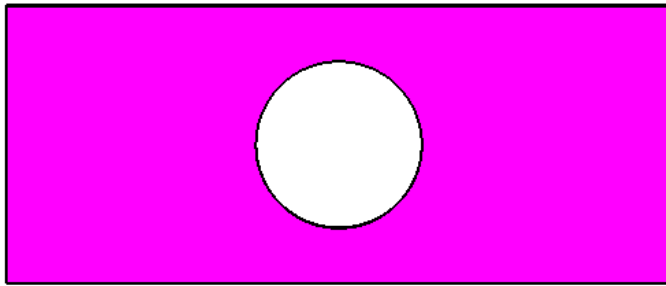


Figura 4.45 – Vista lateral de la corredera 3 del mecanismo 962

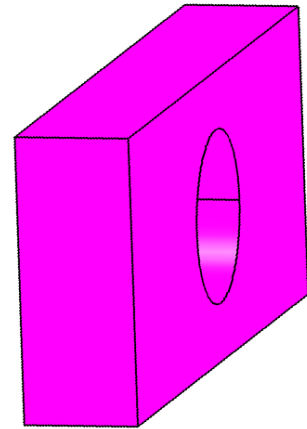


Figura 4.46 – Vista lateral de la corredera 3 del mecanismo 962

4.3.3 Ensamblaje y cinemática

Una vez se tienen todos los elementos modelados, se procede a ensamblarlos aplicando nuevamente restricciones. Lo primero es fijar el cuerpo y posteriormente, usando restricciones de contacto y de coincidencia entre los elementos, se obtiene el mecanismo.

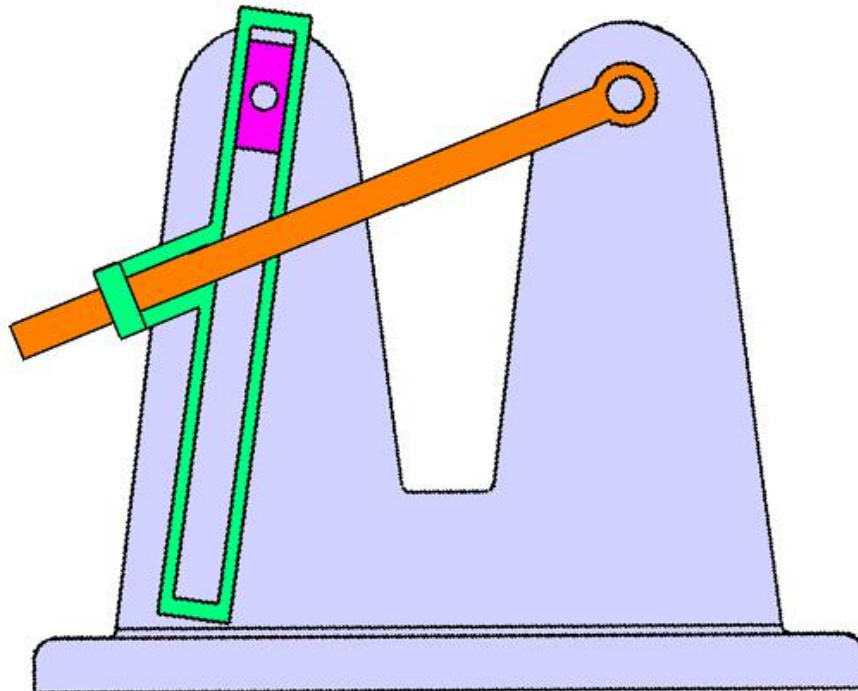


Figura 4.47 – Mecanismo 962

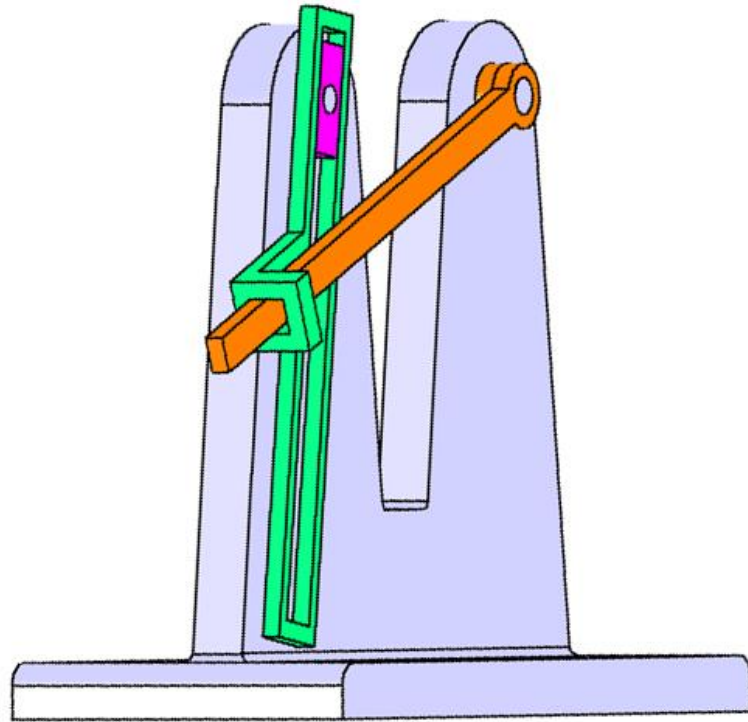


Figura 4.48 – Detalle 1 del mecanismo 962

Este mecanismo contiene situaciones en las que aparentemente podría haber un choque entre elementos. Para comprobar que no es así, se han capturado los momentos más críticos. Entre ellos hay que destacar el posible choque entre el cuerpo y la colisa angular 1 y que la corredera 3 o la barra 1 se saliesen de dicha colisa.

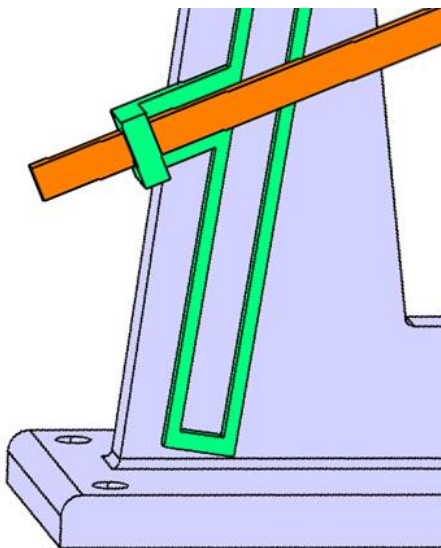


Figura 4.49 – Detalle 2 del mecanismo 962

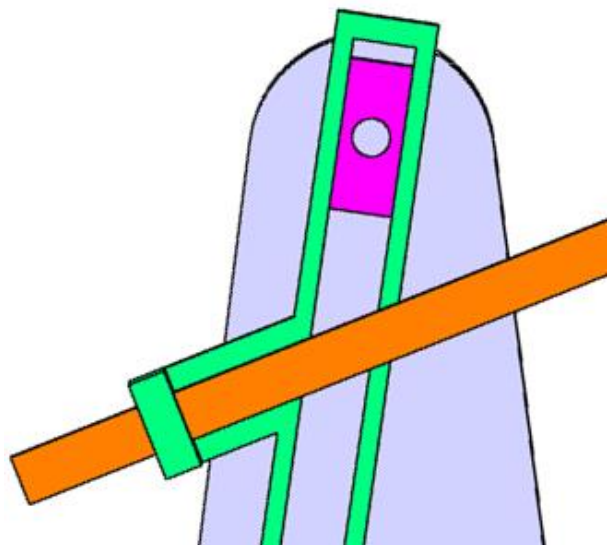


Figura 4.50 – Detalle 3 del mecanismo 962

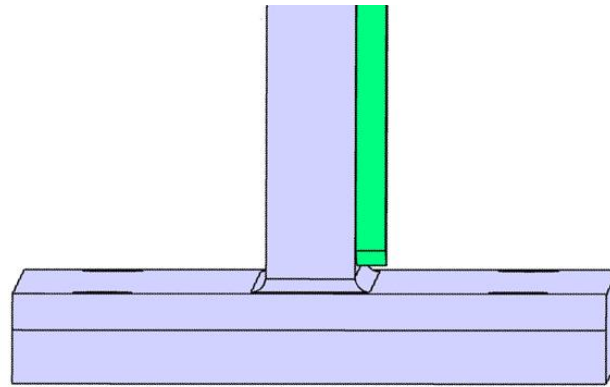


Figura 4.51 – Detalle 4 del mecanismo 962

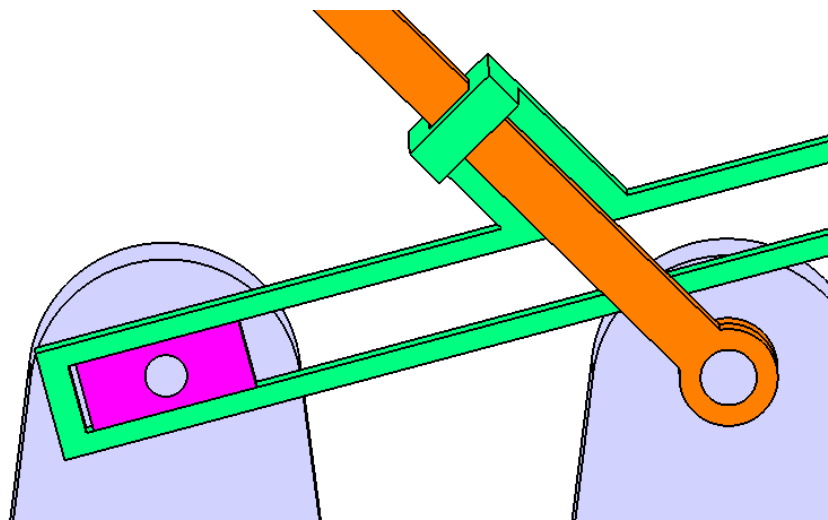


Figura 4.52 – Detalle 5 del mecanismo 962

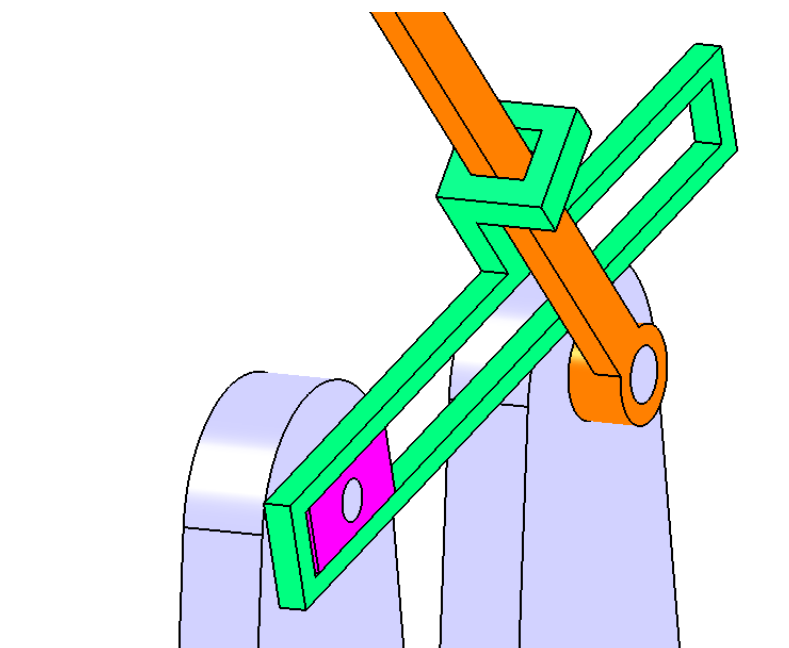


Figura 4.53 – Detalle 6 del mecanismo 962

De nuevo se puede usar el árbol para comprobar que los pares cinemáticos que se vieron en el análisis coinciden con los que aporta CATIA V5. En este caso, aparece un par más entre el cuerpo y la colisa angular 2. Esto es necesario ya que, aunque teóricamente se estudia el mecanismo como un mecanismo plano, en realidad es en tres dimensiones por lo que si no restringimos ese movimiento no se garantiza que la colisa vaya exactamente pegada al cuerpo.



Figura 4.54 – Pares cinemáticos del mecanismo 962

Por otro lado, el mecanismo tiene un grado de libertad, por lo que necesita una restricción de movimiento. Como se sabe por el enunciado que la barra 1 oscila, se le aplicará la restricción a dicha barra. Para ello, se prueban diferentes valores de giro de esta respecto al cuerpo hasta obtener que el mecanismo funciona para los valores comprendidos entre -64° y 3° .

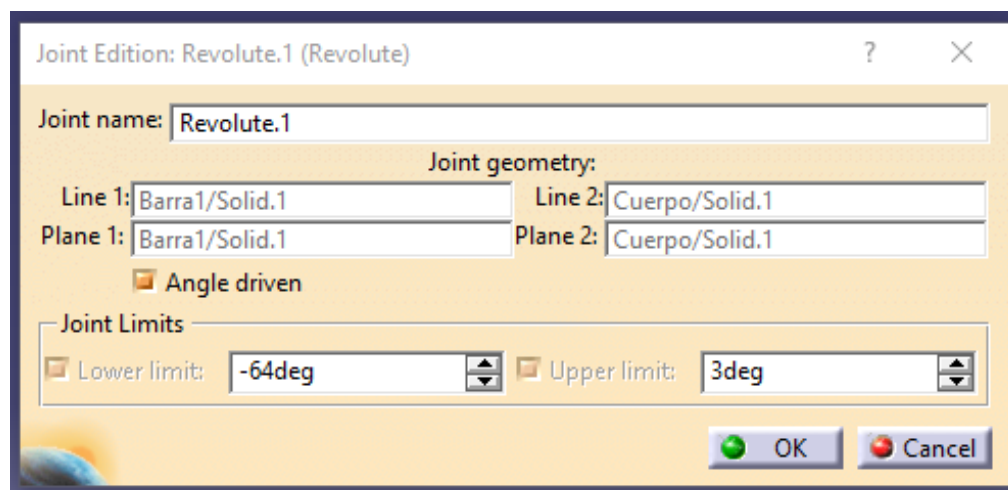


Figura 4.55 – Restricción de movimiento del mecanismo 962

En este mecanismo, el enunciado indica que las velocidades angulares de todos los elementos son idénticas. Para comprobarlo se han obtenido los valores de los ángulos de los pares de revolución 1 y 3 en diferentes

instantes mediante el uso de CATIA V5 y se obtienen los resultados de la gráfica que se muestra a continuación. De esta gráfica se puede interpretar que los ángulos de giro respecto al cuerpo (que es el sólido fijo y de referencia) son completamente iguales para los dos pares, por lo que la velocidad angular de estos elementos también lo será. Además, aunque no se muestra en la gráfica, se puede asumir que el elemento colisa angular también tiene la misma velocidad angular ya que su giro está directamente asociado con el de la corredera 3 y la barra 1.



Figura 4.56 – Ángulos de giro de los pares de rotación 1 y 3

4.3.4 Resultado

El diseño, si bien es aceptable y el mecanismo cuando se pone en movimiento funciona correctamente, genera que el mecanismo tenga un rango de movimiento muy reducido. Esto se debe a la falta de especificaciones de diseño o dimensiones por parte del documento fuente.

Por otro lado, se puede apreciar que la suposición de tomar el mecanismo como plano para analizarlo no es correcta ya que los diferentes elementos colisionarían entre ellos, pero es válida a la hora de realizar un análisis previo.

Por otro lado, el enunciado indica que las velocidades angulares de todos los elementos son idénticas, y tras conocer los valores de los ángulos en diferentes instantes y comprobar que son exactamente iguales, se comprueba que la afirmación del enunciado es correcta.

Puesto que el mecanismo funciona correctamente, se ha creado una animación en forma de video del movimiento que no es posible adjuntar al documento, y varias imágenes en diferentes posiciones que se muestran a continuación.

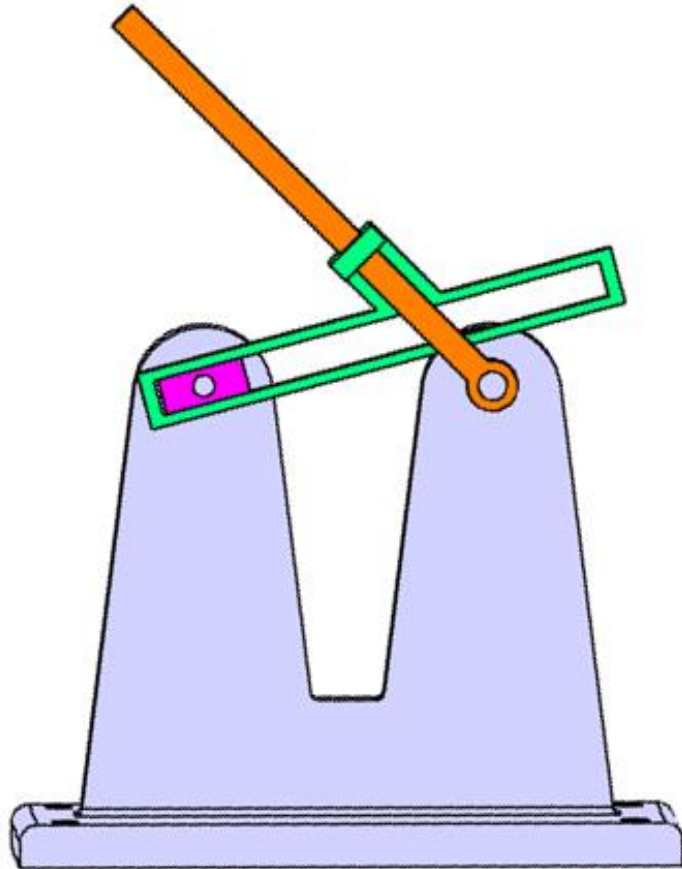


Figura 4.57 – Mecanismo 962 en posición 1

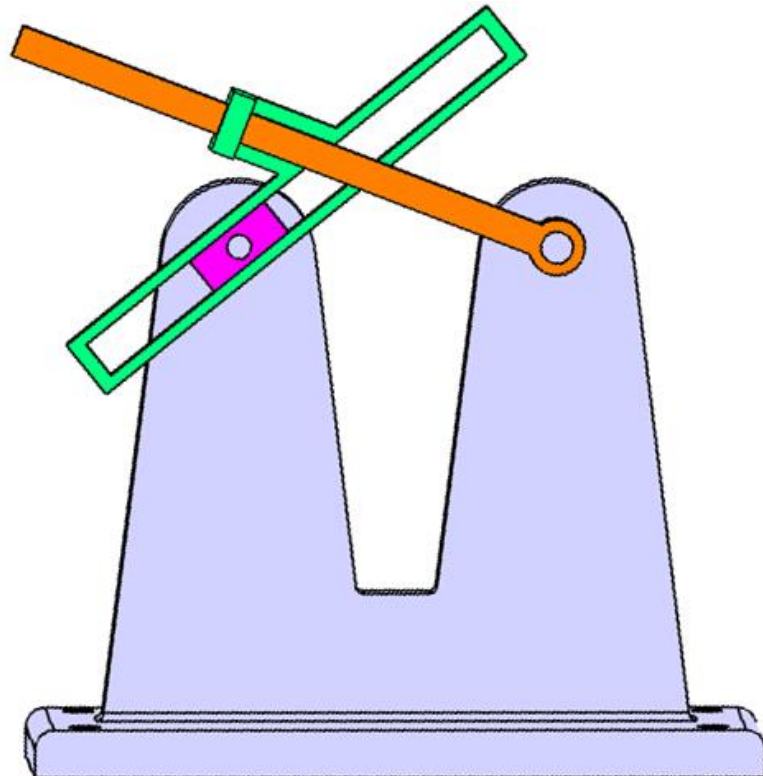


Figura 4.58 – Mecanismo 962 en posición 2

4.4 Mecanismo 963

MECANISMO DE COLISA DE CUATRO ELEMENTOS ARTICULADOS CON LONGITUD REGULABLE DE LA MANIVELA.

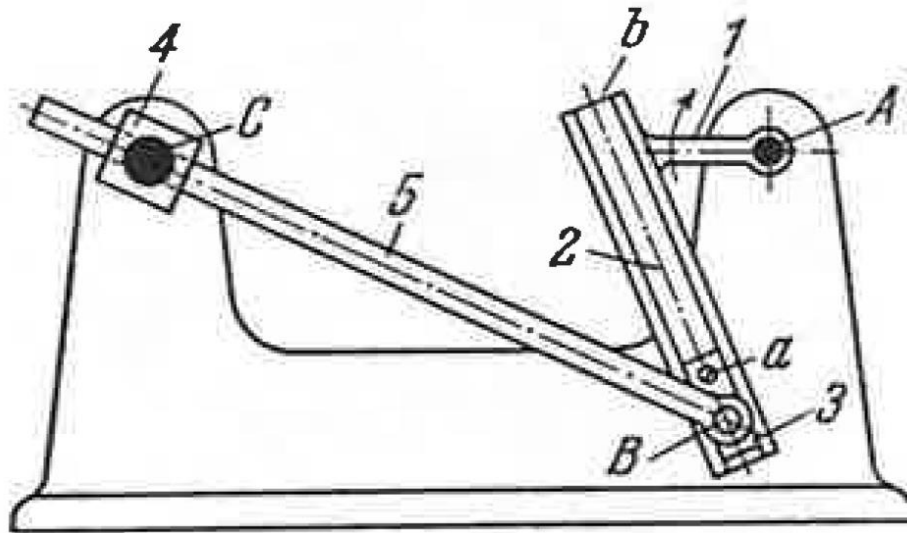


Figura 4.59 – Croquis del mecanismo 963

El elemento 1, que gira alrededor del eje fijo A, forma el par de rotación B con el elemento 5; este último se desliza en la corredera 4 que gira alrededor del eje fijo C. Con el elemento 1 está unida rígidamente la colisa rectilínea b. Con ayuda del tornillo a se puede fijar la corredera 3 en distintas posiciones a lo largo del eje de la colisa b. De este modo se regula la longitud AB de la manivela 1.

4.4.1 Análisis

Si bien todos los mecanismos estudiados hasta ahora eran mecanismos de cuatro barras, en el caso de este se puede observar que cuenta en realidad con 6 que serían el cuerpo, la colisa angular 1, el tornillo 2, la corredera 3, la corredera 4 y la barra 5. Sin embargo, al ir la colisa, el tornillo y la corredera 3 fijas entre sí, se pueden tomar analíticamente como una sola y, por tanto, se puede tomar como un mecanismo de cuatro barras.

Por otro lado, aparentemente todo el movimiento está contenido en el mismo plano y se observan los siguientes pares cinemáticos: tres pares de rotación (cuerpo – colisa angular 1, corredera 3 – barra 5 y corredera 4 – cuerpo) y un par prismático (barra 5 – corredera 4). Para el cálculo de los grados de libertad, al estar las piezas 1, 2 y 3 fijas entre ellas se toman como una y finalmente se obtiene que el mecanismo tiene un único grado de libertad.

Otro aspecto para tener en cuenta es que la colisa angular 1 actúa como una manivela, es decir, su giro es de 360°.

4.4.2 Modelado

- Cuerpo

El cuerpo, que sirve como soporte del mecanismo referencia del movimiento, se ha diseñado de manera muy similar al aportado en el croquis del documento fuente, aunque no exacta por la falta de dimensiones. Entre sus elementos se encuentran cuatro agujeros en la base para insertar algún elemento de fijación de este al suelo y dos cilindros salientes en los que se insertarán la colisa angular 1 y la corredera 4.

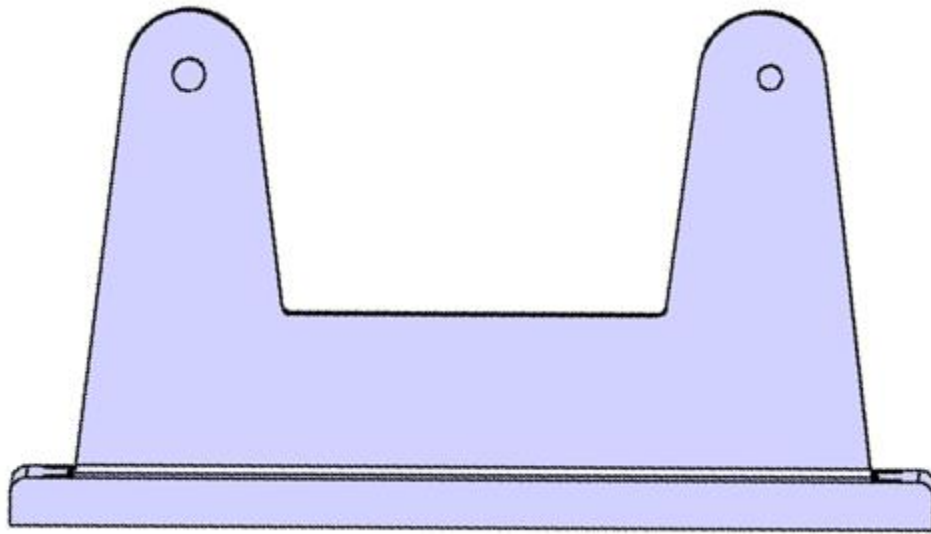


Figura 4.60 – Vista frontal del cuerpo del mecanismo 963

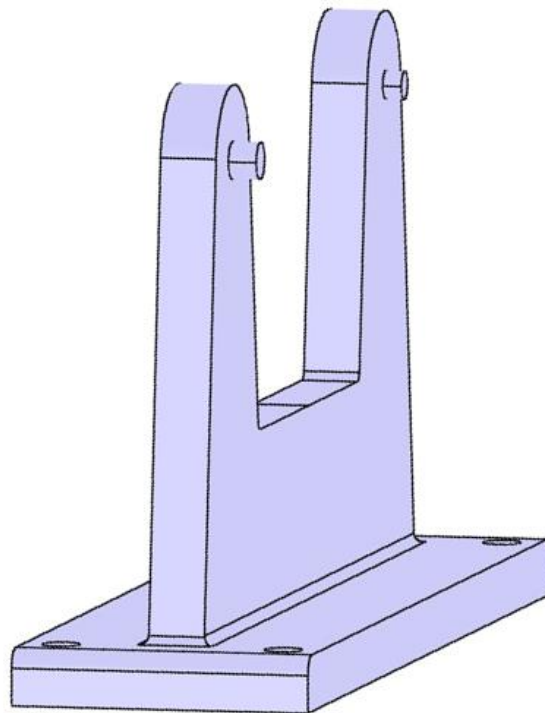


Figura 4.61 – Vista lateral del cuerpo del mecanismo 963

- Colisa angular 1

La colisa angular 1 consiste en dos barras unidas en un ángulo de 60° . Si bien este dato no lo aporta el enunciado, se ha comprobado que el mecanismo para este funciona correctamente. En cuanto a las barras que componen esta pieza se tiene que:

Una de las barras consiste en un cuerpo rectangular que tiene una zona circular con un agujero en el cual se insertará uno de los cilindros salientes del cuerpo.

La otra barra consiste igualmente en un cuerpo rectangular, pero en este caso contiene una ranura en su interior en la que se han hecho agujeros con el fin de que la corredera 3 se pueda fijar en diferentes de ellos. El número de agujeros igualmente está sin especificar en la fuente por lo que se ha tomado como cinco.

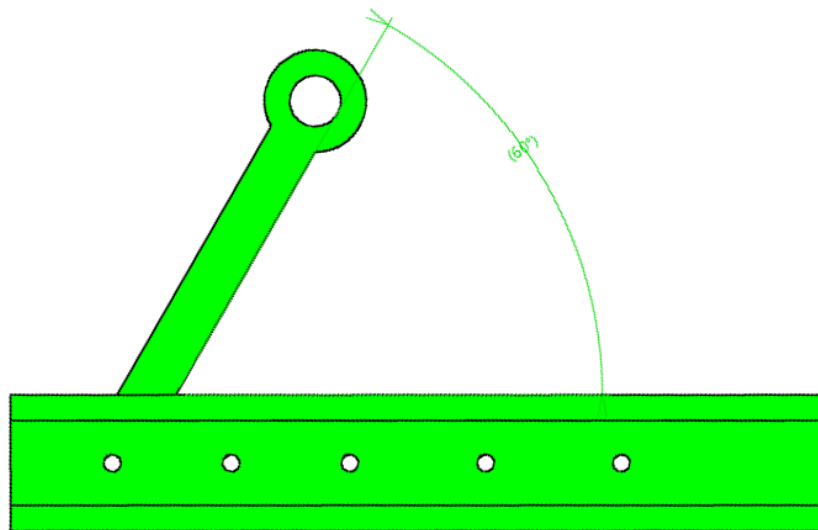


Figura 4.62 – Vista frontal de la colisa angular 1 del mecanismo 963

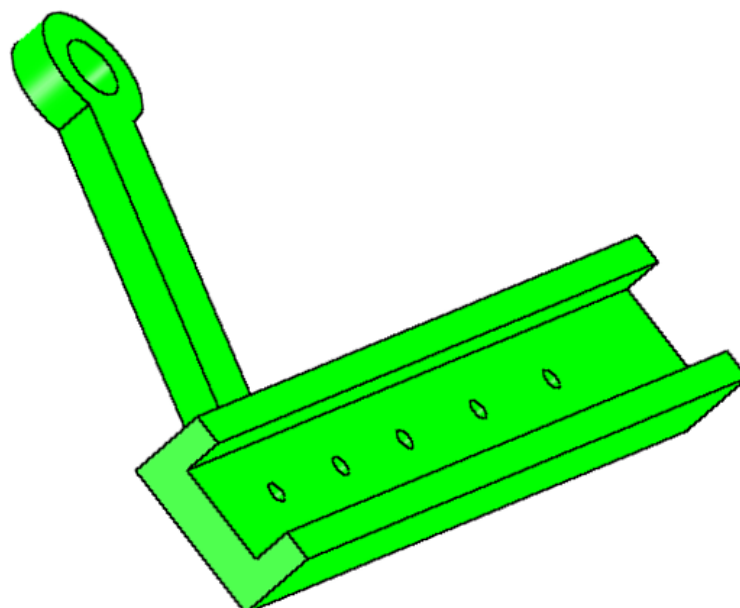


Figura 4.63 – Vista lateral de la colisa angular 1 del mecanismo 963

- Corredera 3

La corredera 3 desliza por la ranura rectangular de la colisa 1 por lo tanto, su forma debe ser rectangular. Además, cuenta con un agujero cilíndrico en el que va insertado el tornillo que fija ambas piezas y con un cilindro saliente que conecta dicha corredera con la barra 5.

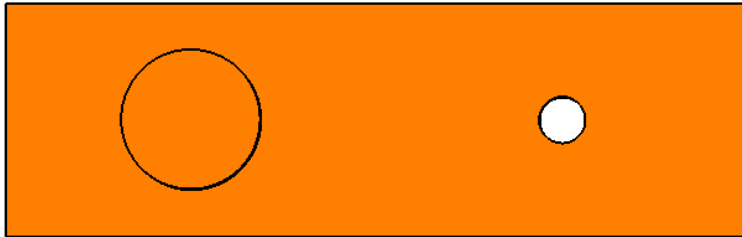


Figura 4.64 – Vista frontal de la corredera 3 del mecanismo 963

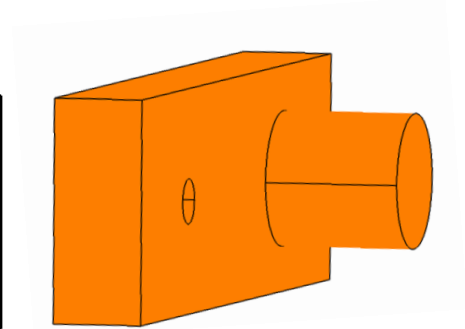


Figura 4.65 – Vista lateral de la corredera 3 del mecanismo 963

- Corredera 4

La corredera 4 cuenta con una forma ligeramente diferente a la de las demás correderas de este documento. Si bien tiene forma de prisma rectangular como las demás, en este caso particular cuenta con un agujero circular ciego por el que se conecta al cuerpo y así mismo cuenta también con un agujero rectangular que atraviesa la pieza y es perpendicular al ciego. Hay que tener particular cuidado con las dimensiones de ambos porque podría haber choques.

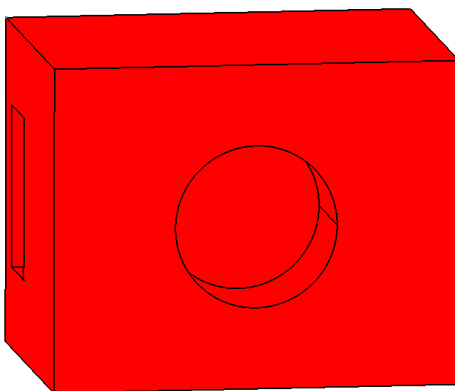


Figura 4.66 – Vista frontal de la corredera 4 del mecanismo 963

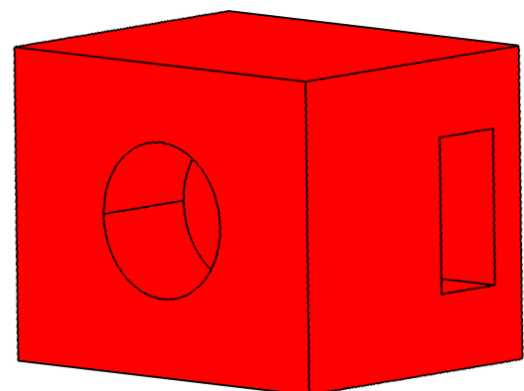


Figura 4.67 – Vista lateral de la corredera 4 del mecanismo 963

- Barra 5

La barra 5 es simplemente una barra rectangular en la que en un extremo cuenta con una zona circular con un agujero en su centro. Su longitud es especialmente delicada en el diseño puesto que si no tiene longitud suficiente se sale de la corredera y el mecanismo falla.

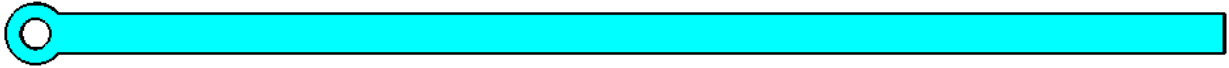


Figura 4.68 – Vista frontal de la barra 5 del mecanismo 963



Figura 4.69 – Vista lateral de la barra 5 del mecanismo 963

- Tornillo 2

El tornillo fija la corredera 3 a la colisa angular 1. Para su diseño se ha usado una versión muy simplificada de un tornillo en el que la cabeza es circular al igual que el cuerpo.

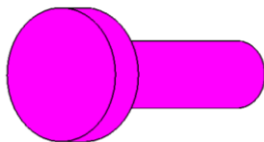


Figura 4.70 – Vista frontal del tornillo 2 del mecanismo 963



Figura 4.71 – Vista lateral del tornillo 2 del mecanismo 963

4.4.3 Ensamblaje y cinemática

Se proceden a ensamblar las piezas ya diseñadas. Para ello se usan restricciones de contacto y coincidencia, pero para el caso de mecanismo, también la restricción *Fix Together* que será de gran utilidad a la hora de fijar las piezas unidas por el tornillo.

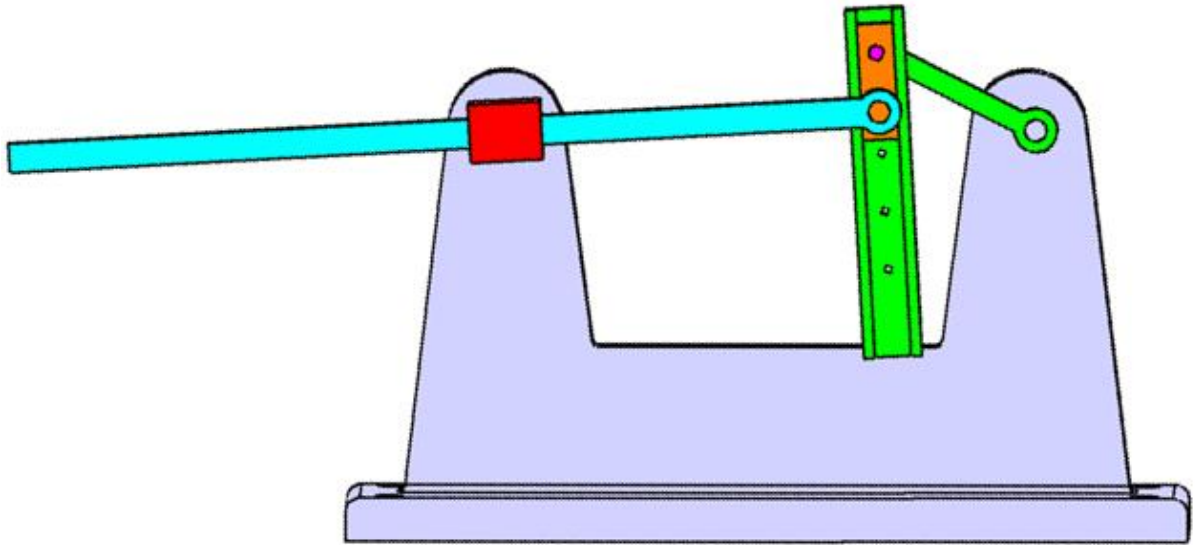


Figura 4.72 – Vista frontal del mecanismo 963

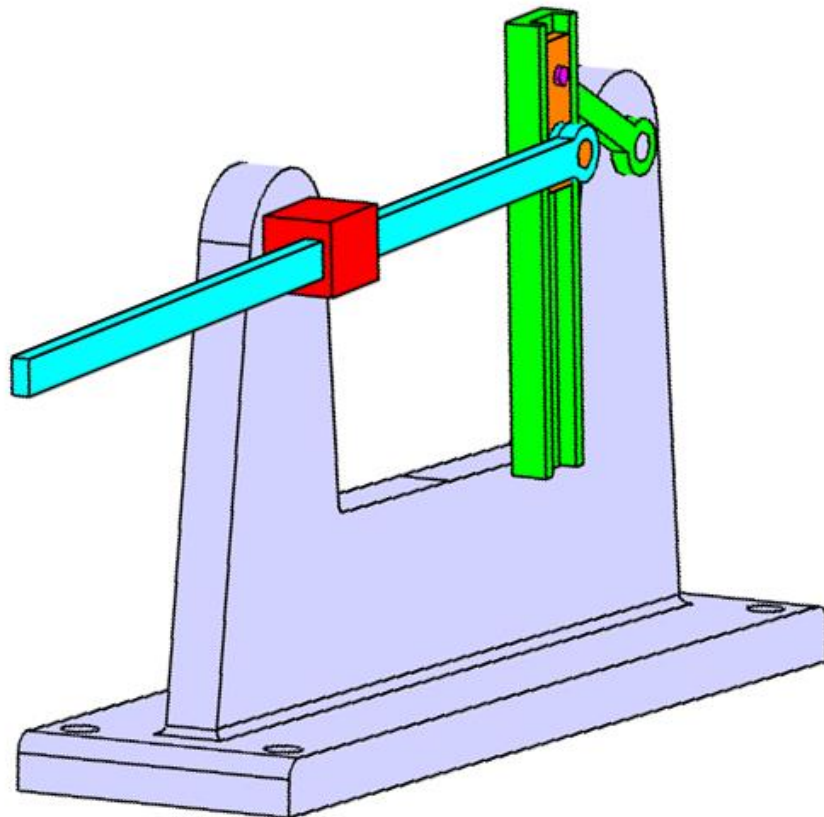


Figura 4.73 – Vista lateral del mecanismo 963

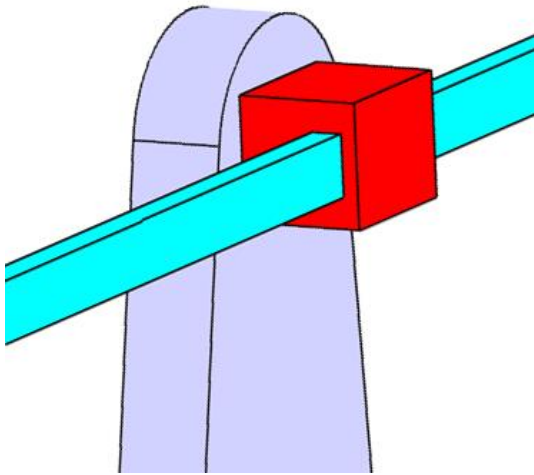


Figura 4.74 – Detalle 1 del mecanismo 963

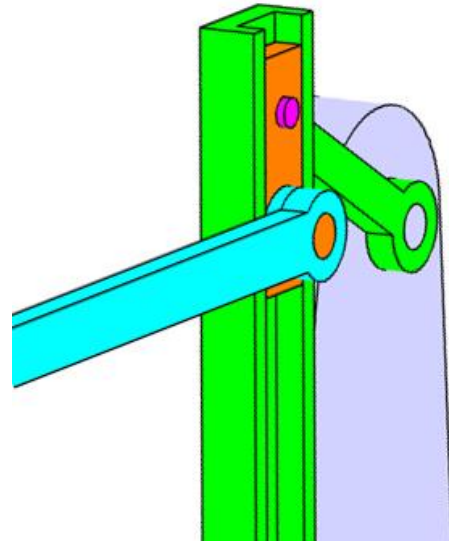


Figura 4.75 – Detalle 2 del mecanismo 963

Para comprobar que los pares cinemáticos son los mismos en CATIA V5 que en el análisis del mecanismo se debe observar el árbol. En este caso, se comprueba que están los tres pares de rotación (*revolute*) y además tenemos el par prismático. Cabe destacar, que además de estos aparecen más ya que, si bien se ha tomado la suposición de mecanismo de cuatro para simplificar el cálculo del grado de libertad analíticamente, a la hora de ensamblar las piezas es necesario tener todas las barras en cuenta para que el mecanismo funcione. Entre los que aparecen se encuentra el par prismático entre la corredera 3 y la colisa, el par de fijación del tornillo y la corredera 3 y un par cilíndrico entre la colisa y el tornillo.

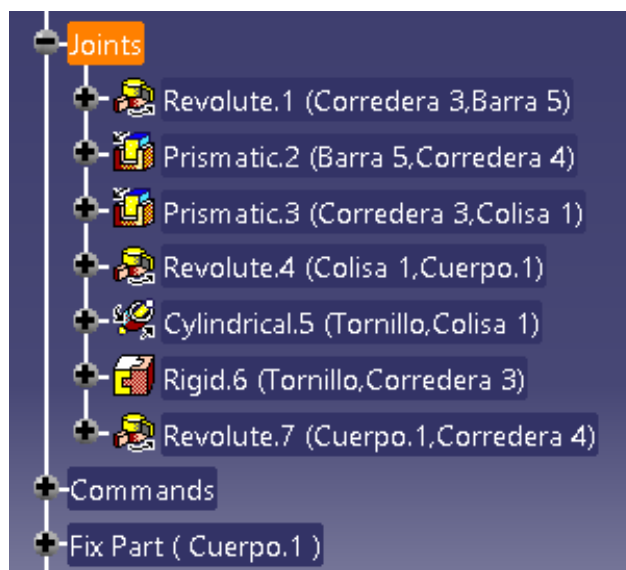


Figura 4.76 – Pares cinemáticos del mecanismo 963

Al tener el mecanismo un grado de libertad, es imposible simular su movimiento en CATIA V5 sin una restricción de movimiento, por lo tanto, se debe aplicar una. Como el movimiento de la colisa angular 1 es el de una manivela según el enunciado, la restricción se le aplicará al par que regula este movimiento, en particular, al par de rotación entre dicho elemento y el cuerpo. La restricción correspondiente a la manivela es que tiene permitido el giro de 0° a 360°.

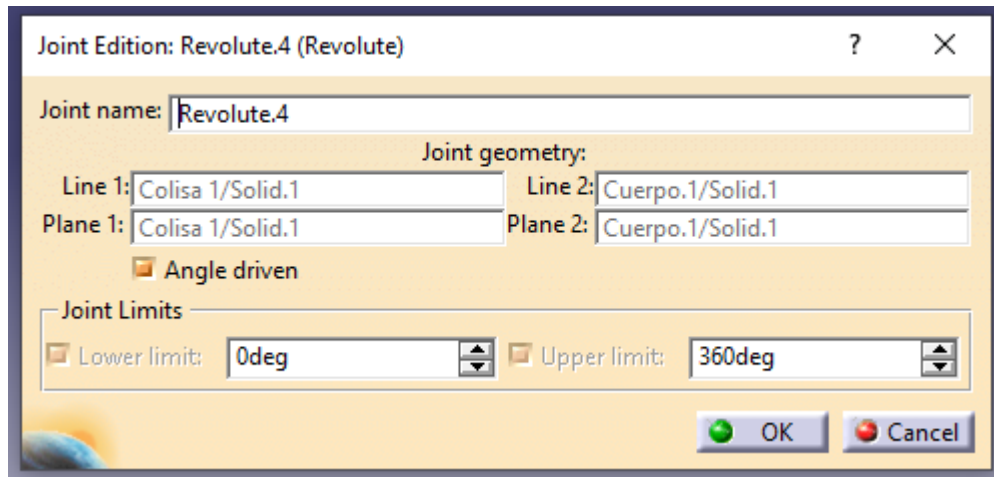


Figura 4.77 – Restricción de movimiento del mecanismo 963

4.4.4 Resultado

No tener especificaciones de diseño supone que haya varios incidentes debidos al diseño. Entre ellos se tiene, por ejemplo, que la barra 5 si bien era de longitud adecuada para este mecanismo cuando la corredera 3 está en la posición mostrada en las figuras anteriores, cuando se fija esta en otra posición de la colisa angular 1, la barra 5 se sale de la corredera 4 por no tener la suficiente longitud. Otro problema es la falta de profundidad de los elementos mostrados en el boceto que, si no se analizan uno a uno, algunos chocarán entre ellos.

Una vez se solucionan estos problemas de diseño y se reajusta el ensamblaje de los elementos, se activa el módulo de simulación del mecanismo y se obtiene que se mueve correctamente y ninguno de sus elementos colisiona con otro.

Además de las imágenes mostradas, se ha realizado una animación en forma de video de este mecanismo que no se adjunta en este documento.

Cabe destacar que, si bien hasta ahora solo se ha mostrado el mecanismo para la misma posición de la corredera 3 respecto a la colisa 1, en particular en uno de los extremos, también se ha realizado su estudio en otras posiciones que se mostrarán a continuación. Con el fin de no alargar excesivamente este documento solo se mostrará el mecanismo cuando la corredera se encuentra en mitad de la colisa y en el otro extremo.

- Caso 1: mecanismo 963 con corredera 4 en el primer extremo de la colisa angular 1.

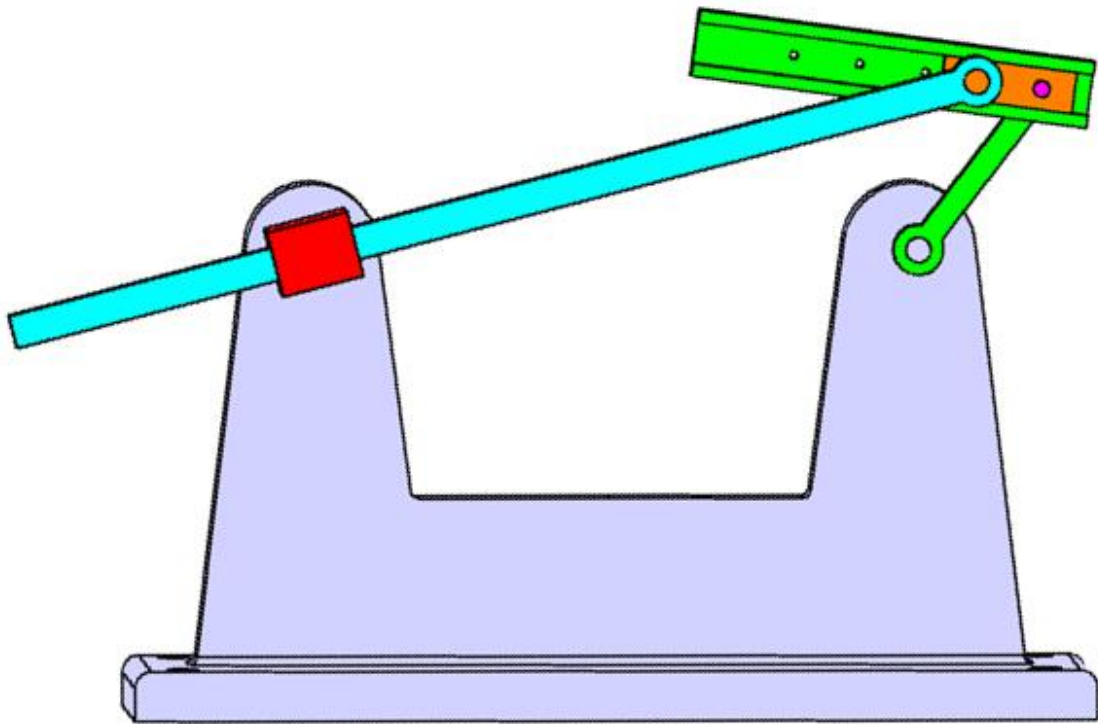


Figura 4.78 – Caso 1 del mecanismo 963 en posición 1

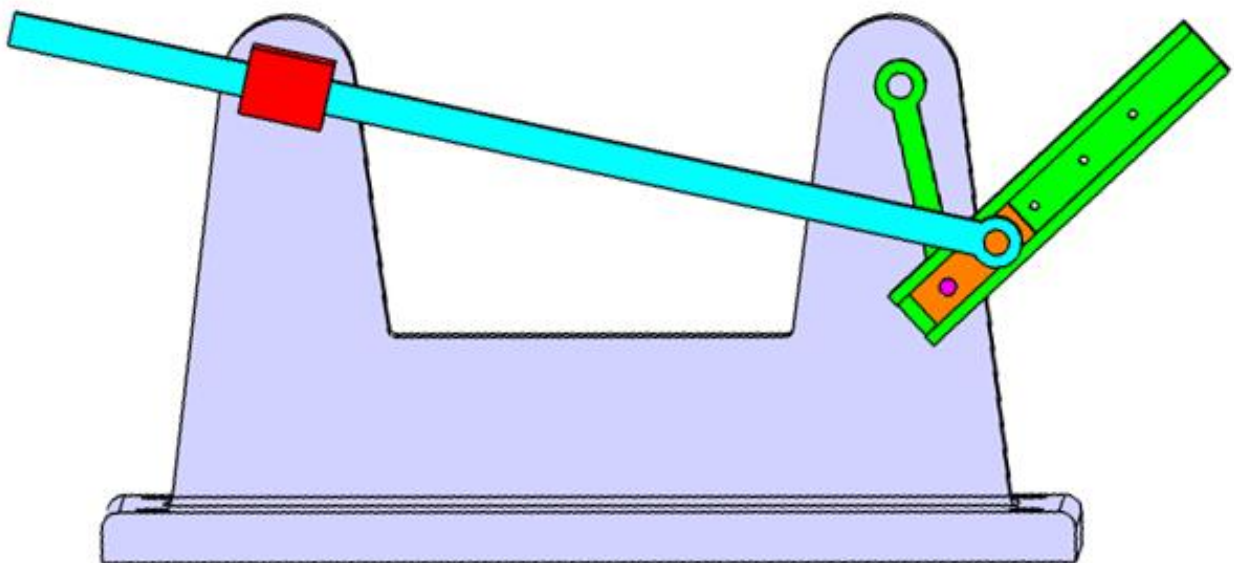


Figura 4.79 – Caso 1 del mecanismo 963 en posición 2

- Caso 2: mecanismo 963 con corredera en la mitad de la colisa angular 1.

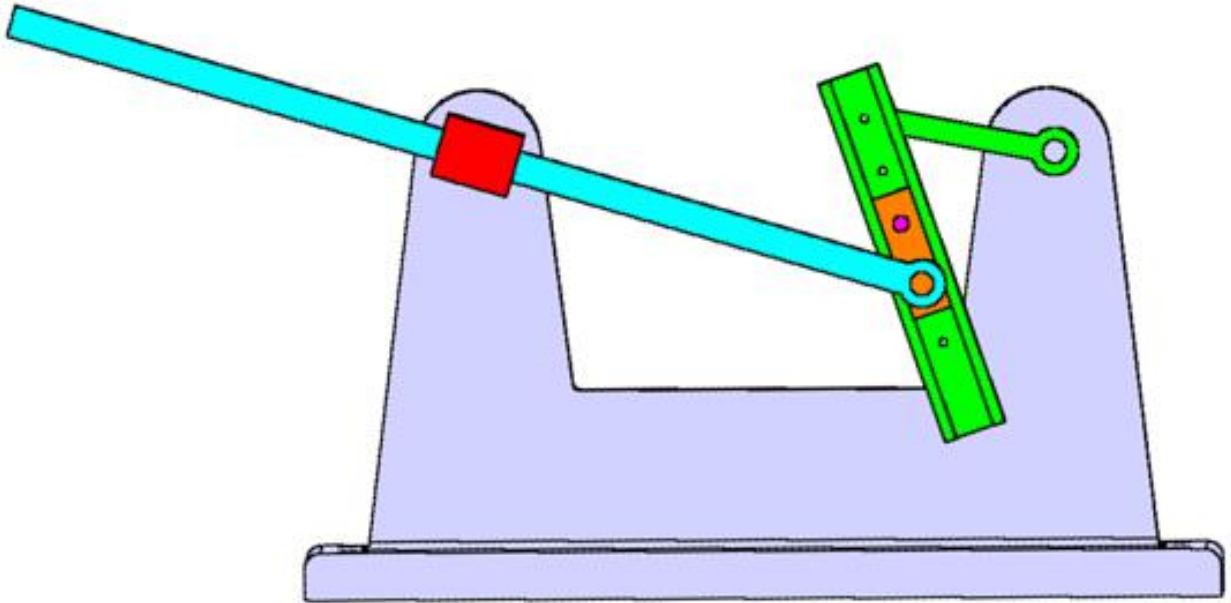


Figura 4.80 – Caso 2 del mecanismo 963 en posición 1

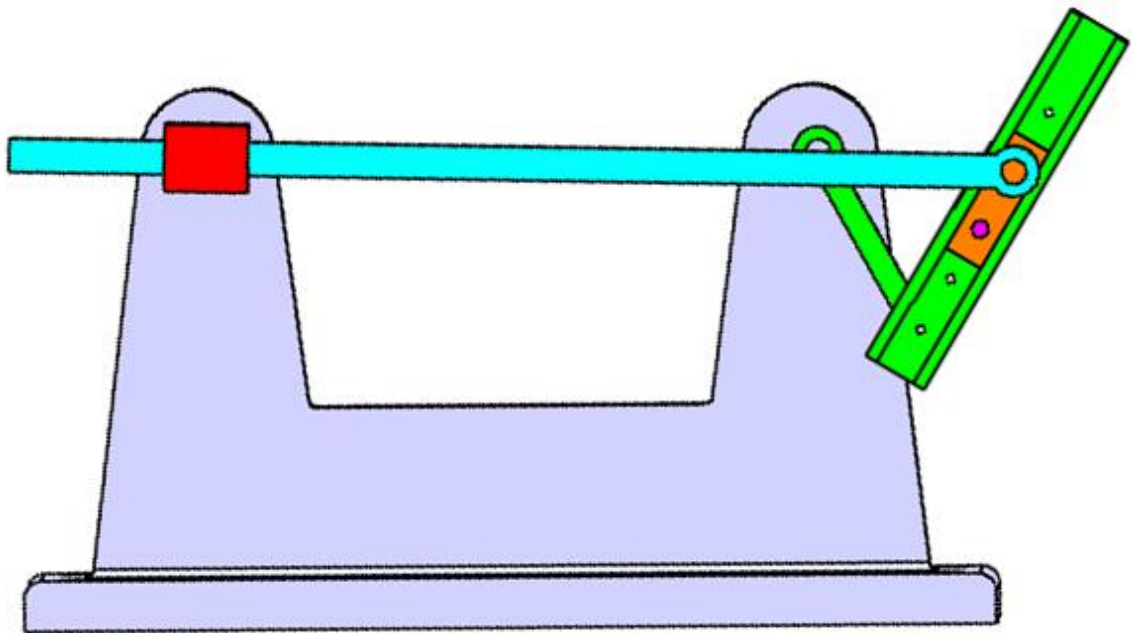


Figura 4.81 – Caso 2 del mecanismo 963 en posición 2

- Caso 3: mecanismo 963 con corredera 3 en el segundo extremo de la colisa angular 1.

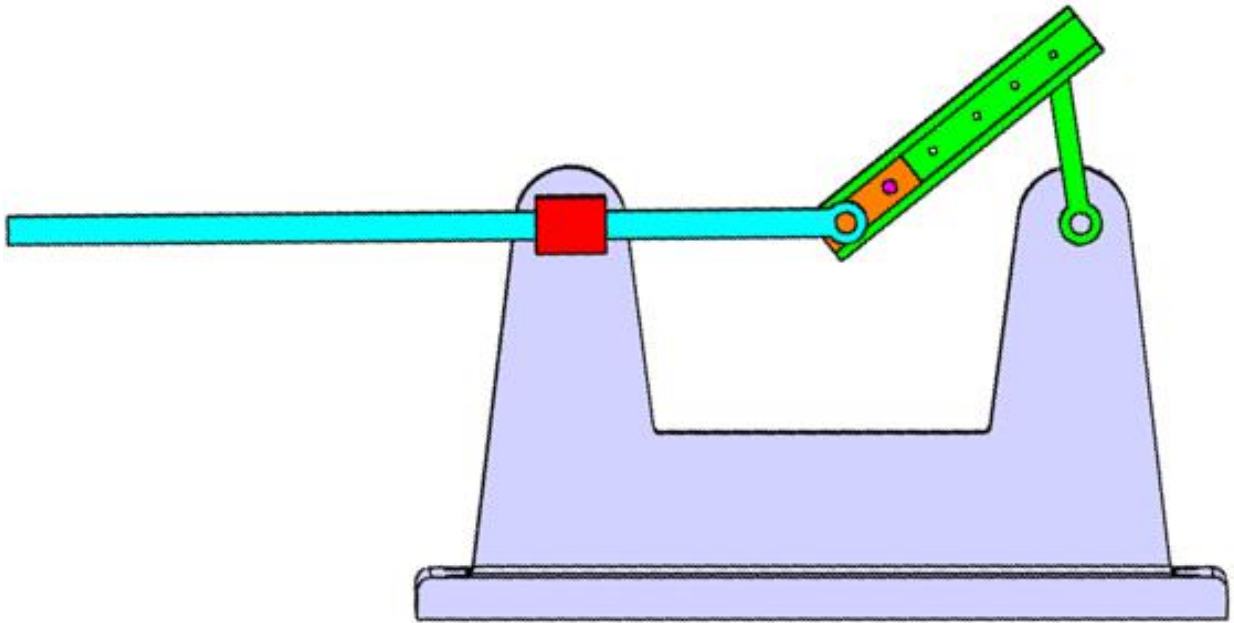


Figura 4.82 – Caso 3 del mecanismo 963 en posición 1

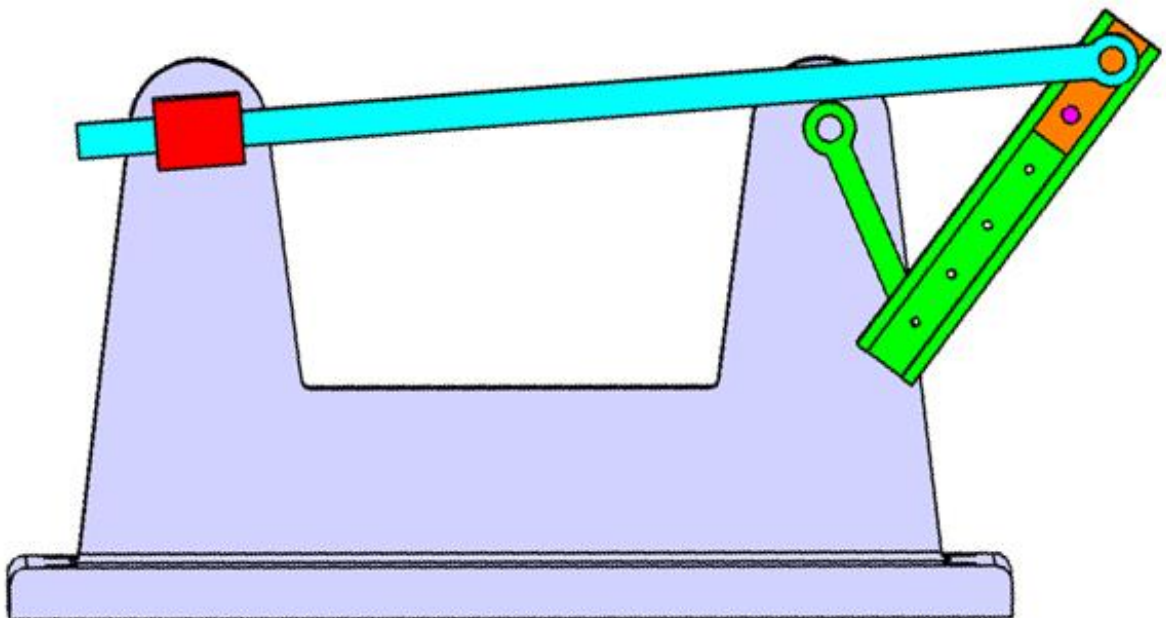


Figura 4.83 – Caso 3 del mecanismo 963 en posición 2

5. Conclusiones

Este proyecto, que consiste en el estudio y modelado de los mecanismos 946, 947, 962 y 963 del libro *Mecanismos de la Técnica Moderna* de Iván Artobolevski mediante el uso de CATIA V5, finaliza con éxito. Lo que quiere decir que los mecanismos una vez diseñados, ensamblados y puestos en movimiento funcionan correctamente y están libre de fallos de diseño o choques.

Para ello ha sido necesario adaptar los enunciados y los bocetos de 2D a 3D, lo que conlleva tener especial cuidado con las profundidades de las piezas así como con sus dimensiones. Por otro lado, si bien los pares cinemáticos son prácticamente iguales en 2D y 3D también hay que revisar que estos se cumplen en esta dimensión.

De entre todos los mecanismos, el mecanismo 962 es especial porque todas sus barras cuentan con la misma velocidad angular. Esto se ha comprobado y ha resultado que la afirmación de Artobolevski es correcta.

Cabe mencionar que si bien el proyecto ha finalizado correctamente, la falta de especificaciones de diseño o planos con dimensiones supone que este proceso sea iterativo y, por consiguiente, más duradero. Esto se debe a que, si las piezas no cuentan con un diseño adecuado o bien el ensamblaje es incorrecto, el mecanismo no realizará movimiento o este será incorrecto y será necesario rediseñar o bien las piezas o el ensamblaje.

Por otro lado, este es un proyecto enormemente didáctico, especialmente por el uso de una de las herramientas de CAD más actuales y usadas, CATIA V5. El uso de esta me ha permitido ampliar mis conocimientos en el ámbito de diseño por ordenador y en particular aprender a manejar dicho programa.

Por último, quiero destacar el maravilloso trabajo de Iván Artobolevski y su enorme aportación a la ingeniería. Es muy interesante conocer la obra de ingenieros importantes ya que no suelen ser tan conocidos como otros científicos y más aún, poder adaptarla a las tecnologías actuales.

6. Desarrollos futuros

Si bien el objetivo de este proyecto se ha cumplido, hay varios ámbitos en los que se podría estudiar y desarrollar en mayor profundidad los mecanismos estudiados.

En primer lugar, sería interesante fabricar los mecanismos. Para ello es necesario estudiar qué proceso de fabricación se usará y cuáles son los materiales necesarios y más adecuados por sus propiedades y acabados. Además, en algunos casos será también necesario rediseñar algunas piezas para adaptarla al proceso de fabricación elegido. Entre los procesos de fabricación, se destaca la fabricación aditiva mediante el uso de impresoras 3D por ser una opción muy actual.

Otra mejora es dimensionalizar las piezas o crear especificaciones de diseño como las del mecanismo 946. Ello generaría que el diseño fuera un proceso más rápido y evitaría que pudieran aparecer fallos en los mecanismos por errores en el diseño.

Además, si bien los mecanismos por si mismos son muy útiles para aprender sobre teoría de máquinas y mecanismos y para su enseñanza, sería de gran utilidad buscarles además una función más ingenieril o incluirlos en alguna máquina.

Por último, por ser la obra de I. Artobolevski tremendamente extensa, es imposible recoger en este proyecto todos sus mecanismos, pero como un desarrollo futuro sería muy interesante adaptar un mayor número de estos mecanismos a las nuevas tecnologías, que pueden ser herramientas de CAD u otras.

7. Bibliografía

- [1] Artobolevski, I. I. (1983). *Mecanismos en la técnica moderna*. Editorial Mir.
- [2] Egorova, O. V., & Umnov, N. V. (2010). Ivan Ivanovich Artobolevski (1905--1977). In M. Ceccarelli (Ed.), *Distinguished Figures in Mechanism and Machine Science: Their Contributions and Legacies*, Part 2 (pp. 23–42). Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-90-481-2346-9_2
- [3] Chih-Ching, H., Chin-Hsing, K., Daisuke, M., & Yukio, T. (2019). *Advances in Mechanism and Machine Science* (Vol. 73, Issue 16). Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-20131-9>
- [4] Domínguez Abascal, J., y Acosta Muñoz, M. (Eds.). (2020). *Teoría de máquinas y mecanismos* (3ª edición). Editorial Universidad de Sevilla,.
- [5] Uicker, J. J., Pennock, G. R., Shigley, J. E., & McCarthy, J. M. (2003). *Theory of Machines and Mechanisms. Journal of Mechanical Design*. <https://doi.org/10.1115/1.1605769>
- [6] DASSAULT SYSTÉMES. <https://www.3ds.com/es/productos-y-servicios/catia/>
- [7] del Río Cidoncha, M. G., Martínez Lomas, M. E., Martínez Palacios, J., & Pérez Díaz, S. (2007). *El libro de CATIA V5*.
- [8] Zamani, N. G. (2011). *CATIA V5 Tutorials: mechanism design and animation: release 20* (J. M. Weaver (ed.)). Schroff Development Corporation.
- [9] *Capítulo 6 PART DESIGN II (DISEÑO EN 3D AVANZADO)*. 161–221.
<http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/4789/fichero/Memoria%252FCap%C3%ADtulo+6-Part+Design+2.pdf>
- [10] *Capítulo 8 ASSEMBLY DESIGN (DISEÑO DE MONTAJES)*.
<http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/4789/fichero/Memoria%252FCapítulo+8-Assembly+Design.pdf>
- [11] Śliwa Z. (2017). *Laboratory Manual. Lab. 11 - DMU Kinematics*.
- [12] Delgado Jiménez, M. V. (2019). Proyecto Fin de Grado Ingeniería de las Tecnologías Industriales. *Modelado y recreación virtual con CATIA V5 de varios mecanismos para el trazado de elipses Modelado y*

recreación virtual con CATIA V5 de varios mecanismos para el trazado de elipses.

- [13] Zaldívar López, P. (2015). Proyecto Fin de Carrera. Ingeniería Aeronáutica. *Modelado y estudio con CATIA V5R19 de diversos dispositivos de aterrizaje de Artobolevski.*
- [14] Rodríguez González, J. (2018). Proyecto Fin de Carrera. Ingeniería Aeroespacial. *Modelado del turborreactor WREN MW54 en CATIA V5R19.*

