



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



ESCUELA TÉCNICA
SUPERIOR INGENIERÍA
INDUSTRIAL VALENCIA

TRABAJO FIN DE GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

**SIMULACIÓN CINEMÁTICA EN
SOLIDWORKS Y CREACIÓN DE MODELO
GRÁFICO INTERACTIVO EN
MATHEMATICA® DE LOS MECANISMOS
DE ARTOBOLEVSKY A-Z-0701, A-9-1771 Y
A-E-0188**

AUTOR: GUSTAVO AVIÑÓ GÓMEZ-SENENT

TUTOR: JOSE LUIS OLIVER HERRERO

Curso Académico: 2020-21

Agradecimientos

“Quiero aprovechar la ocasión para agradecer el apoyo de mi familia, quienes me han acompañado durante todo el proceso y a mi tutor, quien me ha guiado y ayudado a ampliar mi conocimiento.”

Resumen

El estudio de las máquinas y los mecanismos ha sido foco de investigación y desarrollo durante décadas. El hecho de comprender los mecanismos de las máquinas mecánicas es fundamental para diseñar nuevas máquinas más eficientes y eficaces.

Hasta la actualidad se ha acostumbrado a estudiar el movimiento de un mecanismo de forma estática mediante diagramas o instantáneas que nos informan sobre una posición concreta del movimiento.

El trabajo consiste en la creación y simulación de mecanismos en un programa de diseño computacional (CAD), y la posterior simulación en un programa de ingeniería asistida por ordenador (CAE), con tal de ampliar la información disponible en el compendio de soluciones mecánicas “Mecanismos en la Técnica Moderna” del profesor Ivan Artobolevsky.

En primer lugar, se representará el mecanismo gráficamente en el programa SolidWorks para obtener un modelo móvil y comprensible. A continuación, se continuará con una de las extensiones del programa llamada COSMOS Motion para simular el movimiento del mecanismo. Después se realizará un análisis del mismo movimiento con instantes finitos en el programa Mathematica, utilizando su extensión “Mechanical System Pack”, obteniendo el mismo resultado que en COSMOS Motion.

Finalmente, en lugar de obtener un número finito de instantes, se resuelven las ecuaciones del movimiento asociadas a las restricciones de los pares cinemáticos del mecanismo, obteniendo una expresión matemática para cada pieza y coordenada. Después de este proceso es posible elaborar un modelo gráfico interactivo y crear el documento CDF del mecanismo. Este documento se puede abrir sin necesidad de programas específicos, únicamente con un navegador de internet, para mostrar cómo se mueve el mecanismo que se ha analizado

Palabras Clave: Mecanismos, CAD, CAE, diseño, Artobolevsky.

Resum

L'estudi de les màquines i els mecanismes ha sigut focus de recerca i desenvolupament durant dècades. El fet de comprendre els mecanismes de les màquines mecàniques és fonamental per a dissenyar noves màquines més eficients i eficaces.

Fins a l'actualitat s'ha acostumat a estudiar el moviment d'un mecanisme de manera estàtica mitjançant diagrames o instantànies que ens informen sobre una posició concreta del moviment.

El treball consisteix en la creació i simulació de mecanismes en un programa de disseny computacional (CAD), i la posterior simulació en un programa d'enginyeria assistida per ordinador (CAE), amb la condició d'ampliar la informació disponible en el compendi de solucions mecàniques "Mecanismes en la Tècnica Moderna" del professor Ivan Artobolevsky.

En primer lloc, es representarà el mecanisme gràficament en el programa SolidWorks per a obtenir un model mòbil i comprensible. A continuació, es continuarà amb una de les extensions del programa anomenada COSMOS Motion per a simular el moviment del mecanisme. Després es realitzarà una anàlisi del mateix moviment amb instants finits en el programa Mathematica, utilitzant la seua extensió "Mechanical *System *Pack", obtenint el mateix resultat que en COSMOS Motion.

Finalment, en lloc d'obtenir un nombre finit d'instants, es resolen les equacions del moviment associades a les restriccions dels parells cinemàtics del mecanisme, obtenint una expressió matemàtica per a cada peça i coordenada. Després d'aquest procés és possible elaborar un model gràfic interactiu i crear el document CDF del mecanisme. Aquest document es pot obrir sense necessitat de programes específics, únicament amb un navegador d'internet, per a mostrar com es mou el mecanisme que s'ha analitzat

Paraules Clau: Mecanismes, CAD, CAE, disseny, Artobolevsky.

Abstract

The study of machines and mechanisms has been a focus of research and development for decades. Understanding the mechanisms of mechanical machines is essential to design new machines more efficient and effective.

Until now, he has been accustomed to studying the movement of a mechanism statically by means of diagrams or snapshots that inform us about a specific position of the movement. Nowadays, with computers and their calculation capacity, it is possible to use programs to analyze the mechanisms in a broader and more complete way.

The present work is about creating and simulating mechanisms in a computational-aided design program (CAD) and the subsequent simulation in a computational-aided engineering program (CAE), with the objective of expanding the information available in the compendium of mechanical solutions of Professor Artobolevsky “Mechanisms in Modern Engineering Design”.

In first place, the mechanisms will be graphically represented in the program SolidWorks to obtain a mobile and understandable model. Then, the movement of the mechanisms will be simulated in an extension of the program called COSMOS Motion. After that an analysis of the same movement with finite frames will be created in the program Mathematica, using the extension “Mechanicak System Pack”, obtaining the same result as in COSMOS Motion.

Finally, instead of obtaining a finite number of frames, the equations of the movement associated to the constraints of the cinematic joints of the mechanism will be resolved, obtaining a mathematic expression to each part and coordinate. After this process it will be possible to create an interactive graphic model and to create the CDF document of the mechanisms. This document can be opened without the need of any specific program, only with an Internet browser, to show how the movement of the mechanisms analyzed.

Keywords: Mechanisms, CAD, CAE, design, Artobolevsky.

Lista de Tablas

2.1.	Tabla de especificaciones del Hardware	16
4.1.	Tabla de precios de la mano de obra	82
4.2.	Cuadro de materiales, hardware y software	82
4.3.	Presupuesto de ejecución por contrata	83

Lista de Figuras

1.1. Ejemplo de un mecanismo, concretamente el Adp-a-z-1111	2
1.2. Algunos de los tipos de componentes usados en este trabajo.	2
1.3. Pieza formada por los componentes 00 y 01	3
1.4. Instante o frame representado en COSMOS Motion. El panel de simulación de COSMOS permite saber en que instante se encuentra el mecanismo en todo momento y su posición	3
1.5. Imagen que muestra los Grados de libertad posibles en cada eje.	5
1.6. Tabla de pares cinemáticos del profesor Reshetov.	6
1.7. Imágenes de los pares utilizados en el presente trabajo y su representación en el programa SolidWorks.	7
1.8. Imagen del profesor Ivan Artobolevsky.	8
1.9. Imagen de la colección Mecanismos en la Técnica Moderna.	9
1.10. Imágenes de algunos de los cuadrilateros articulados de Artobolevsky estudiados durante la fase de prepatación del trabajo.	9
1.11. Imagen de un cuadrilatero articulado que sirve de ejemplo para explicar la ley de Grashof.	10
1.12. Imágenes de algunos de los mecanismos de cuatro cuerpos de Artobolevsky estudiados durante la fase de prepatación del trabajo.	10
1.13. Imágenes de algunos de los mecanismos del tipo trazador de Artobolevsky estudiados durante la fase de prepatación del trabajo.	11

1.14. Imagen del mecanismo Adp-a-9-1771 del tipo planetario estudiado en el presente trabajo.	12
2.1. Logo del programa SolidWorks	17
2.2. Logo del programa Wolfram Mathematica	18
3.1. Imagen del Componente 00	21
3.2. Imagen del Componente 01	21
3.3. Imagen del Componente 02	22
3.4. Imagen del Componente 03	22
3.5. Imagen del Componente 04	22
3.6. Imagen del Componente 05	23
3.7. Imagen del Componente 06	23
3.8. Imagen del Componente 07	23
3.9. Imagen del Componente 09	24
3.10. Imagen del Componente 10	24
3.11. Imágenes de los mecanismos Adp-a-c-0654, Adp-a-c-0658, Adp-a-c-0683 y Adp-a-c-0660 en ese orden.	25
3.12. Imágenes de los mecanismos Adp-a-4-0963, Adp-a-4-1553, Adp-a-4-1136 y en ese orden.	26
3.13. Imágenes de los mecanismos Adp-a-z-1111, Adp-a-z-1133, Adp-a-z-1190683, Adp-a-z-1196 y Adp-a-z-0701 en ese orden.	26
3.14. Imagen del mecanismo Adp-a-9-1771	27
3.15. Representación del mecanismo Adp-a-z-1133 en su diagrama de Artobolevsky y en el programa SolidWorks.	28
3.16. Imagen de la pieza 1 del mecanismo a-z-1133	29
3.17. Imagen de la pieza 2 del mecanismo a-z-1133	30
3.18. Imagen de la pieza 3 del mecanismo a-z-1133	30
3.19. Imagen de la pieza 4 del mecanismo a-z-1133	30
3.20. Imagen de la pieza 5 del mecanismo a-z-1133	31

3.21. Imagen de la pieza 6 del mecanismo a-z-1133	31
3.22. Imagen de la pieza 7 del mecanismo a-z-1133	32
3.23. Imagen de la pieza 8 del mecanismo a-z-1133	32
3.24. Todas las relaciones de posición que definen el Adp-a-z-1133	32
3.25. Modelado del mecanismo Adp-a-z-1133 en SolidWorks	33
3.26. Imágenes de algunos modelos de mecanismos de Artobolevsky estudiados durante la fase de prepatación del trabajo.	33
3.27. Definición de los pares y del motor del mecanismo a-z-1133	34
3.28. Imágen del panel de simulación y de los grados de libertad calculados totales antes y después de añadir el par motor.	35
3.29. Modelado del Adp-a-z-1133 con su trayectoria dibujada	36
3.30. Imagen de Artobolevsky del mecanismo Adp-a-z-0701 y su modelado en SolidWorks con ambas trayectorias definidas	37
3.31. Imagen que muestra por un lado la definición del par motro del a-z-0701 y por otro el cálculo de su movilidad en COSMOS	38
3.32. Imagen de Artobolevsky del mecanismo Adp-a-e-0188 y su modelado en SolidWorks con ambas trayectorias definidas	39
3.33. Imagen del modelado del mecanismo Adp-a-e-0188 en SolidWorks simulado y tanto sus trayectorias como el vector velocidad y aceleración representados para los dos puntos trazadores del mecanismo	39
3.34. Panel de estudio del movimiento de SolidWorks 2019	40
3.35. Imagen de Artobolevsky del mecanismo Adp-a-9-1771 y su modelado en SolidWorks.	40
3.36. Par motor definido en la pieza 2 del a-9-1771.	41
3.37. Imagen de la simulación en COSMOS del mecanismo a-9-1771, mostrando trayectorias, velocidades y aceleraciones.	41
3.38. Imagen de los apartados del primer documento de Mathematica, nombrado -Mechanica	42
3.39. Imagen del directorio de trabajo	43

3.40. Imágen del vector COOR y sus dimensiones y la definición de las piezas con ese vector multiplicadas por un factor de escala	43
3.41. Creación del vector DatosE[Escala]	44
3.42. Ejemplo de elementos gráficos definidos en Mathematica. <i>Se puede apreciar que el comando arm sirve para definir barras y slider, para deslizaderas.</i>	44
3.43. Procedimiento de creación de una pieza en Mathematica. <i>En este caso corresponde a la pieza 2 del mecanismo Adp-a-z-1133.</i>	45
3.44. Mecanismo Adp-a-z-1133 modelado en Mathematica.	45
3.45. Imagen de la aplicación de los valores numéricos para la pieza 2 del mecanismo a-z-1133	46
3.46. Imagen de la aplicación del comando Body	46
3.47. Imagen de la aplicación de los pares cinemáticos y del par motor del mecanismo Adp-a-z-1133 en Mathematica.	47
3.48. Imagen de la aplicación del comando SolveMech	47
3.49. Imagen de la trayectoria del mecanismo a-z-1133 obtenida en Mathematica	48
3.50. Comparación de la trayectoria obtenida en Mathematica con la obtenida en COSMOS	48
3.51. Vector Coor con las coordenadas de la posición 12	49
3.52. Imagen del mecanismo a-z-1133 en una posición similar al diagrama de Artobolevsky	49
3.53. Definición de los vectores Coor y DatosE en Mathematica	50
3.54. Modelado del mecanismo a-z-0701 en Mathematica	50
3.55. Definición del par motor del mecanismo a-z-0701 en Mathematica	50
3.56. Definición de los pares cinemáticos del mecanismo a-z-0701 en Mathematica	51
3.57. Comando para realizar el cálculo entre 0 y 1 segundo de 200 instantes distintos del mecanismo a-z-0701	51
3.58. Imagen del mecanismo a-z-0701 en su posición inicial en Mathematica	52

3.59. Definición del vector Coor Mathematica.	52
3.60. Definición de los DatosE y DatosEm.	52
3.61. Modelado del mecanismo a-e-0188 en Mathematica	53
3.62. Definición de los pares cinemáticos del mecanismo a-e-0188	53
3.63. Definición del par motor del mecanismo a-e-0188.	54
3.64. Comando para realizar el cálculo entre 0 y 1 segundo de 100 instantes distintos del mecanismo a-e-0188	54
3.65. Mecanismo a-e-0188 en su posición 40	54
3.66. Definición del vector Coor del a-9-1771 en Mathematica.	55
3.67. Definición de los DatosE y DatosEm del a-z.1771.	55
3.68. Modelado en Mathematica del a-z-1771	56
3.69. Definición de los pares cinemáticos del mecanismo a-e-0188	56
3.70. Definición del par motor del mecanismo a-z-1771.	57
3.71. Comando para realizar el cálculo entre 0 y 1 segundo de 100 instantes distintos del mecanismo a-z-1771	57
3.72. Mecanismo a-z-1771 en su posición 10	58
3.73. Apartados del documento de Mathematica	58
3.74. Matriz con las ecuaciones a resolver del mecanismo a-z-1133	60
3.75. Definición de las reglas trigonométricas utilizadas en Mathematica	60
3.76. Ejemplo del proceso requerido para resolver una coordenada en Mathe- matica	62
3.77. Matriz de restricciones con las ecuaciones restantes en función de más de una coordenada	62
3.78. Solución de la coordenada Y7 del mecanismo a-z-1133 en función de Θ_7 y la coordenada independiente Θ_2	63
3.79. Ejemplo de aplicación del método indirecto para resolver coordena- das	63
3.80. Matriz con las coordenadas resueltas	64

3.81. Proceso a realizar para conseguir la curva de la trayectoria en Mathematica	65
3.82. Curva de la trayectoria obtenida en Mathematica con las coordenadas resueltas en función de la coordenada independiente	65
3.83. Curvas de la velocidad y aceleración del punto trazador del mecanismo a-z-1133	66
3.84. Sistema de ecuaciones previa y posterior a su solución	66
3.85. Curva de la trayectoria del punto trazador 1 del punto a-z-0701 tanto en Mathematica como en COSMOS	67
3.86. Curva de la velocidad y aceleración del punto trazador 1 del punto a-z-0701 tanto en Mathematica como en COSMOS <i>No ha sido necesario mostrar la curva de la aceleración, puesto que al ser la trayectoria una línea recta, las curvas de la velocidad y aceleración coinciden.</i>	67
3.87. Curva de la trayectoria del punto trazador 2 del punto a-z-0701 tanto en Mathematica como en COSMOS	67
3.88. Curva de la velocidad y aceleración del punto trazador 2 del punto a-z-0701 tanto en Mathematica como en COSMOS <i>No ha sido necesario mostrar la comparación con COSMOS ya que, al coincidir el punto trazador 1 también coincidirá el punto 2.</i>	68
3.89. Sistema de ecuaciones previa y posterior a su solución	68
3.90. Comparación de las curvas de Trayectoria del punto trazador 1 del mecanismo a-e-0188	69
3.91. Comparación gráficas punto trazador 1 del a-e-0188	69
3.92. Comparación de las curvas de Trayectoria del punto trazador 2 del mecanismo a-e-0188	70
3.93. Comparación gráficas punto trazador 1 del a-e-0188	70
3.94. Ambas trayectorias de los puntos trazadores del mecanismo a-e-0188 en una misma gráfica	70
3.95. Apartados en el último documento de Mathematica de creación del CDF	71
3.96. Creación del nuevo vector Coor con las coordenadas en función de la coordenada independiente	72

3.97. Definición de la pieza 2 en función de la coordenada independiente	72
3.98. Elementos definidos con el comando Inset. <i>Se definen elementos como la imagen de Artobolevsky del mecanismo, el rango de la gráfica y todas las partes de las piezas que forman el mecanismo</i>	73
3.99. Imagen del comando Manipulate y del CDF final que se crea del mecanismo a-z-1133	73
3.100. Definición del nuevo vector Coor y de los elementos que van a formar parte del CDF del mecanismo a-z-0701	74
3.101. CDF del mecanismo a-z-0701 en posiciones distintas	74
3.102. Definición del nuevo vector Coor y de los elementos que van a formar parte del CDF del mecanismo a-e-0188	75
3.103. CDF del mecanismo a-e-0188 en posiciones distintas	75

Índice general

Agradecimientos	II
Resumen	III
Resum	V
Abstract	VII
Lista de Tablas	IX
Lista de Figuras	XI
Índice general	XIX
I MEMORIA	XXV
1. Introducción	1
1.1. Aspectos Generales	1
1.1.1. Definiciones	1
1.1.2. Grados de Libertad	4
1.1.3. Ecuación de Grübler	5
1.1.4. Pares cinemáticos	6

1.2.	Artobolevsky	8
1.2.1.	Biografía	8
1.2.2.	Mecanismos en la Técnica Moderna	8
1.2.3.	Tipos de Mecanismos	9
1.3.	Motivación y Justificación	12
1.4.	Objetivos	13
1.4.1.	Objetivo General	13
1.4.2.	Objetivos Específicos	14
2.	Materiales	16
2.1.	Hardware	16
2.2.	Software	17
2.2.1.	SolidWorks 2007	17
2.2.2.	SolidWorks 2019	17
2.2.3.	Wolfram Mathematica 8	18
3.	Desarrollo	20
3.1.	Introducción	20
3.1.1.	Componentes Predefinidos	20
3.1.2.	Mecanismos Utilizados	24
3.2.	Modelado Gráfico y Simulación Cinemática en SolidWorks	27
3.2.1.	Procedimiento	27
3.2.2.	Preparación	28
3.2.3.	Adp a-z-0701	36
3.2.4.	Adp a-e-0188	38
3.2.5.	Adp a-9-1771	40
3.3.	Simulación Cinemática en Mathematica	42

3.3.1. Procedimiento	42
3.3.2. Preparación	42
3.3.3. Adp a-z-0701	49
3.3.4. Adp a-e-0188	52
3.3.5. Adp a-9-1771	55
3.4. Análisis Cinemático Simbólico en Mathematica	58
3.4.1. Procedimiento	58
3.4.2. Preparación	59
3.4.3. Adp a-z-0701	66
3.4.4. Adp a-e-0188	68
3.5. Creación Modelo Gráfico Interactivo	71
3.5.1. Procedimiento	71
3.5.2. Preparación	71
3.5.3. Adp a-z-0701	74
3.5.4. Adp a-e-0188	75
4. Conclusiones	77
II PRESUPUESTO	79

Parte I

MEMORIA

Capítulo *1*

Introducción

En este capítulo se presenta el marco teórico que envuelve al proyecto desarrollado. Para ello, en primer lugar, se exponen conceptos teóricos que pueden resultar de interés en el presente trabajo, haciendo un breve resumen de la teoría de mecanismos y de la obra del profesor Artobolevsky para aportar contexto y facilitar el entendimiento del trabajo realizado. A continuación, se realiza una descripción sobre la motivación y justificación para realizar este proyecto y finalmente, se definen los objetivos, tanto el objetivo general del proyecto realizado, como los objetivos específicos que se han perseguido durante su desarrollo.

1.1. Aspectos Generales

1.1.1. Definiciones

En este subapartado se van a definir algunos conceptos de especial interés y que irán apareciendo a lo largo de la memoria.

- Mecanismo

Un mecanismo es un conjunto de elementos de una máquina que sirve para transmitir y transformar tanto movimientos como fuerzas desde un elemento motriz a uno conducido. Los mecanismos son ensamblajes de cuerpos sólidos conectados mediante uniones o articulaciones. Los mecanismos transfieren el movimiento y el trabajo mecánico desde uno o más actuadores (impulsores) hasta uno o más cuerpos seguidores. Desde el punto

de vista del diseño cinemático, se considera un mecanismo como un conjunto de cuerpos interconectados en el que todos sus componentes se suponen perfectamente rígidos y que están conectados mediante uniones o articulaciones cinemáticas.

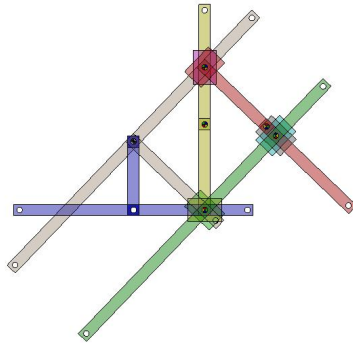
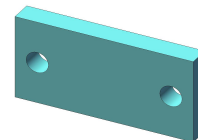
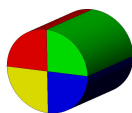


Figura 1.1: Ejemplo de un mecanismo, concretamente el Adp-a-z-1111

- **Componente**

Es la parte más básica que se necesita para la creación de un mecanismo. Se usan prismas de diferentes dimensiones para representar las piezas y cilindros para representar los ejes de coordenadas de cada pieza.



(a) Imagen del componente 00. (b) Imagen del componente 01. (c) Imagen del componente 04.

Figura 1.2: Algunos de los tipos de componentes usados en este trabajo.

- **Pieza**

Una pieza es cada una de las partes que forman un mecanismo. Están formadas por componentes y cada una de ellas tiene un eje de coordenadas local, el cual se necesita para realizar el cálculo del movimiento de la pieza. En este trabajo se define cada pieza de un color y con una nomenclatura concreta para poder diferenciarlas perfectamente, ya que es necesario que cada pieza esté formada por componentes propios en caso de tener que modificar algún componente de una pieza en concreto.

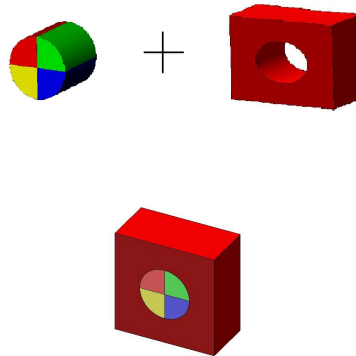


Figura 1.3: Pieza formada por los componentes 00 y 01

- Diagrama Cinemático

Representación simplificada del movimiento del mecanismo, donde se definen las uniones de las piezas y el tipo de par cinemático que forman. Además, permiten comprobar la movilidad del mecanismo calculando sus grados de libertad con la fórmula de Grübler.

- Instante

Un instante es cada posición que un mecanismo recorre durante el movimiento, ya que se calcula la curva de su trayectoria para un número de puntos finitos. Para el presente trabajo se realizarán la simulación para una cantidad del orden de 50 instantes y como parte del estudio se representará el instante en que la posición del mecanismo es lo más parecida posible a la posición de la imagen empleada en el compendio de mecanismos de Artobolevsky.

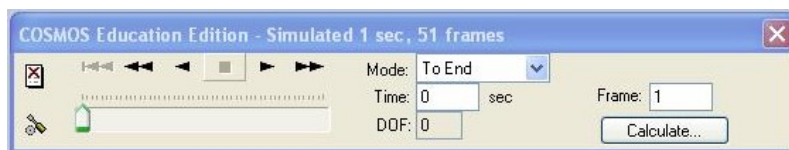


Figura 1.4: Instante o frame representado en COSMOS Motion. El panel de simulación de COSMOS permite saber en que instante se encuentra el mecanismo en todo momento y su posición

- Punto Trazador

Punto del mecanismo en el que se estudia la trayectoria. Cada mecanismo puede tener uno o varios puntos trazadores ya descritos por el profesor Artobolevsky. Son necesarios para obtener la trayectoria del movimiento y poder compararla con la trayectoria descrita en el compendio y corroborar los resultados.

- Trayectoria

Curva que define el punto trazador durante el movimiento del mecanismo. Es el objeto de estudio del movimiento de un mecanismo. Según el tipo de mecanismo y la disposición de sus piezas puede ser una curva cerrada o una curva finita.

- CDF

Son las siglas de formato de documento computable ("*Computable Document Format*"), es un formato de documento electrónico diseñado para permitir la creación de contenido interactivo generado dinámicamente. Fue creado por Wolfram Research y se pueden crear utilizando el programa Mathematica, se puede reproducir tanto en Mathematica como en algunos navegadores como Google Chrome o Firefox. El objetivo final de este trabajo es crear un CDF de cada mecanismo para poder representar su movimiento dinámicamente.

- ADP

Son las siglas de "*Artobolevsky Demonstration Project*", es decir, proyecto de demostración de Artobolevsky. Son unas siglas que se van a aparecer frecuentemente a lo largo de este trabajo puesto que es un proyecto liderado por el tutor del presente trabajo con el objetivo de analizar todos los mecanismos que aparecen en el compendio de soluciones de Artobolevsky, es por esto que cada mecanismo viene acompañado por esta expresión.

1.1.2. Grados de Libertad

El término Grado de Libertad (GDL) hace referencia al número de coordenadas independientes que son necesarias para definir la posición y el movimiento de un cuerpo en el espacio.

Un cuerpo aislado puede desplazarse libremente en un movimiento que se puede descomponer en 3 rotaciones y 3 traslaciones geométricas independientes (traslaciones y rotaciones respecto de ejes fijos en las 3 direcciones de una base referida a nuestro espacio de tres dimensiones).

Para un cuerpo unido mecánicamente a otros cuerpos (mediante pares cinemáticos), algunos de estos movimientos elementales desaparecen. Se conocen como grados de libertad los movimientos independientes que permanecen

Un cuerpo contenido en un plano (x, y) , como los que se estudian en el presente trabajo, únicamente tendrán 3 grados de libertad, desplazamientos en eje x e y , y giro alrededor del eje z .

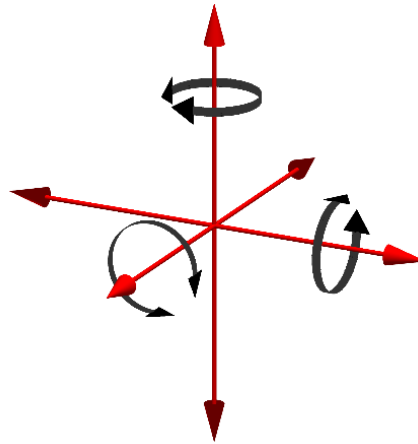


Figura 1.5: Imagen que muestra los Grados de libertad posibles en cada eje.

- Movilidad

La movilidad de un mecanismo hace referencia al número de grados libertad del mecanismo. Los mecanismos que aparecen en el presente trabajo siempre van a tener como par motor, un par de rotación o un par prismático, los cuales se definirán un poco más adelante, y que tienen en común que los dos tienen conectividad 1, es decir, solo tienen un grado de libertad cada uno respecto a la pieza base. De esta forma se podrá obtener todo el movimiento de todo el mecanismo y todas sus piezas, únicamente con una coordenada independiente. Por lo tanto, todos los mecanismos trabajados tienen movilidad 1.

- Mecanismo auto alineado

Un mecanismo auto alineado es aquel que no tiene restricciones en exceso, ya que al realizar el estudio de los mecanismos en 2D es posible que esto ocurra. Para solucionar este problema se podrán sustituir algunos pares cinemáticos por otros con una conectividad diferente con el objetivo de obtener una movilidad final de 1.

1.1.3. Ecuación de Grübler

La fórmula de Gruebler, también llamada de Kutzbach-Grübler es una expresión para la aplicación del criterio del mismo nombre que permite obtener el grado de libertad de un mecanismo, relacionando el número de piezas, de pares y el tipo de conectividad de estos pares.

$$M_{2D} = 3 * (N - P - 1) + \sum_{i=1} f_i$$

Esta ecuación hace referencia a la movilidad en el plano, de ahí el 3 del inicio, debido a los 3 grados de libertad de cualquier cuerpo en un plano. La N representa el número de piezas y la P al número de pares cinemáticos.

$$M_{3D} = 6 * (N - P - 1) + \sum_{i=1} f_i$$

Si se sustituye el 3 del inicio por un 6 se obtiene la fórmula de Gruebler en el espacio. Aunque en el presente trabajo se estudian los mecanismos en 2D, el software Cosmos Motion utilizará la fórmula en 3D para realizar el análisis de movilidad. Es por esto por lo que será necesario autoalinearse correctamente cada mecanismo, cambiando alguno de sus pares cinemáticos.

1.1.4. Pares cinemáticos

Un par cinemático es la unión entre dos piezas de un mecanismo. Hace referencia al comportamiento cinemático de una pieza respecto a la otra. Existen diferentes pares cinemáticos, con distintas movilidades y distintos grados de libertad.

Clase	1	2	3	4	5	Grado de libertad
I	q_x, q_z	q_x, q_z	q_x, q_z	q_x, q_z	q_x, q_z	5
II	q_x, q_y, q_z	q_x, q_z, M_y	q_x, q_z	q_x, q_z	q_x, M_y	4
III'	q_x, q_y, q_z	q_x, q_y, q_z	q_x, q_y, q_z	q_x, q_y, q_z	q_x, q_y, q_z	3
III''	q_x, q_y, q_z, M_y	q_x, q_y, q_z	q_x, q_z, M_y	q_x, q_z, M_y	q_x, q_z, M_y	3
IV	q_x, q_z, M_y, M_z	q_x, q_z, M_y, M_z	q_x, q_y, q_z, M_y	q_x, q_y, q_z, M_y	q_x, q_z, M_y	2
V	q_x, q_y, q_z, M_y, M_z	q_x, q_y, q_z, M_y, M_z	q_x, q_y, q_z, M_y, M_z	q_x, q_y, q_z, M_y, M_z	q_x, q_y, q_z, M_y, M_z	1

Figura 1.6: Tabla de pares cinemáticos del profesor Reshetov.

La tabla anterior está sacada del libro “Mecanismos Autoalineadores” del profesor Reshetov, se trata de un gráfico que relaciona cada tipo de par cinemático, en su forma física, con el número de restricciones que tiene (columna izquierda) y su grado de movilidad (derecha). De esta forma si el mecanismo queda sobre restringido, se puede cambiar un par por otro con mayor movilidad, según los grados que se necesiten.

Los pares cinemáticos utilizados en el presente trabajo son el par de revolución y el par prismático. Ambos pares son de clase I y tienen un solo grado de libertad, el primero solo permite el giro alrededor de un eje (en este caso eje z), y el segundo solo permite el desplazamiento en una dirección.

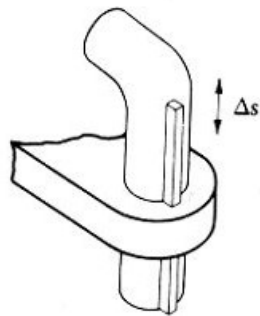
Para los mecanismos a-e-0188 y a-9-1771 se ha trabajado también con pares cinemáticos del tipo engranaje, estos pares son de clase II y tienen 2 grados de libertad.



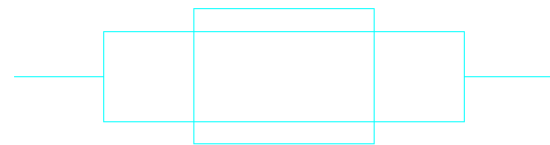
(a) Par de revolución o de rotación.



(b) Imagen del par en SolidWorks



(c) Par prismático o de traslación.



(d) Imagen del par en SolidWorks

Figura 1.7: Imágenes de los pares utilizados en el presente trabajo y su representación en el programa SolidWorks.

1.2. Artobolevsky

1.2.1. Biografía



Figura 1.8: Imagen del profesor Ivan Artobolevsky.

El profesor Ivan Ivanovich Artobolevsky (26 de septiembre de 1905, Moscú – 21 de septiembre de 1977, Moscú) fue un científico e ingeniero soviético especializado en la teoría de máquinas y mecanismos.

Fue miembro de la Academia de Ciencias de la Unión Soviética y durante la II Guerra Mundial fue presidente de la Sociedad Científica de Ingenieros Mecánicos de toda la Unión Soviética.

Entre sus publicaciones se encuentra su catálogo de mecanismos en la colección de libros “Mecanismos en la Técnica Moderna”, el cual será la base del presente estudio.

1.2.2. Mecanismos en la Técnica Moderna

Es una colección de tomos escritos por el profesor Ivan Artobolevsky en las que se detallan una gran cantidad de mecanismos espaciales. El autor nombra cada modelo con un código de entre tres y cuatro cifras y los clasifica según sus características. Cada mecanismo incluye un diagrama o dibujo y una descripción detallada de sus piezas y dimensiones, y del movimiento cinemático.

Los mecanismos que se van a analizar poseen una pieza base, una pieza motriz o impulsora (es a la que se le aplica movimiento) y una o varias piezas que contienen el punto trazador, del cual se estudiará la trayectoria. Los mecanismos se pueden clasificar en cuadriláteros articulados, cuatro cuerpos, trazadores y planetarios según sus características, sus piezas y funcionamiento.

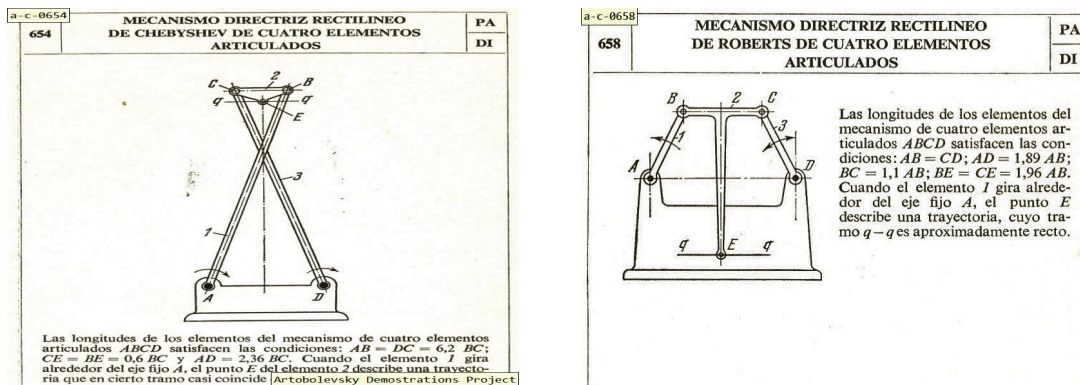


Figura 1.9: Imagen de la colección Mecanismos en la Técnica Moderna.

1.2.3. Tipos de Mecanismos

- Cuadriláteros Articulados

Los cuadriláteros articulados son mecanismos de cuatro barras rígidas, articuladas entre sí por los extremos para formar un cuadrilátero, con la característica en que, al mantener fija una de las barras y desplazar la otra, el movimiento de las dos restantes queda definido. Estos mecanismos contienen solamente pares de revolución en sus piezas. En el compendio de mecanismos llevan la nomenclatura a-c-XXXX.



(a) Imagen del mecanismo Adp-a-c-0654.

(b) Imagen del mecanismo Adp-a-c-0658.

Figura 1.10: Imágenes de algunos de los cuadriláteros articulados de Artobolevsky estudiados durante la fase de prepatación del trabajo.

Para este tipo de mecanismos se utiliza la ley de Grashof que permite conocer si una de las barras que forman el cuadrilátero realiza una rotación completa o parcial si cumple:

$$S + l \leq p + q$$

Siendo s (short) la barra más corta y l (long) la barra más larga.

La ley de Grashof es una regla sencilla que permite diseñar un mecanismo en el que se requiera rotación completa, ya sea porque se conectará un motor o, por el contrario, porque se quiere transformar un movimiento oscilatorio en rotatorio, de forma tal que sea matemática y físicamente viable.

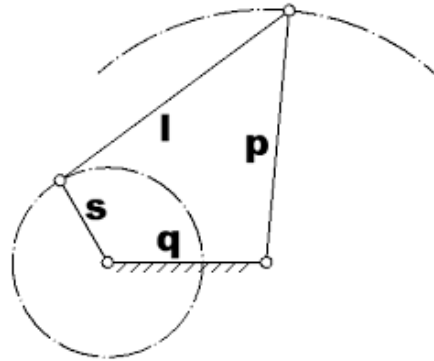
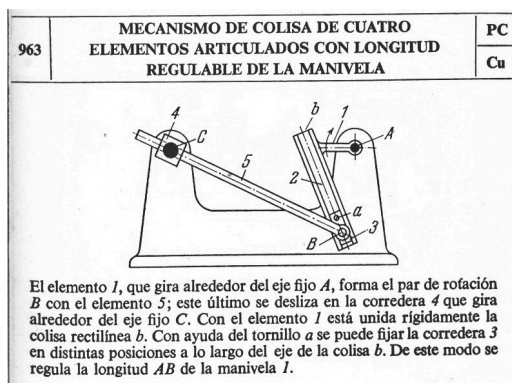


Figura 1.11: Imagen de un cuadrilátero articulado que sirve de ejemplo para explicar la ley de Grashof.

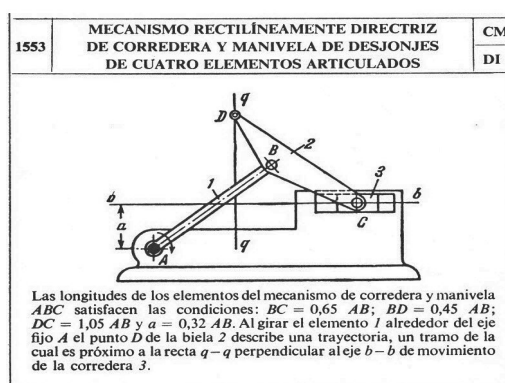
- Cuatro Cuerpos

Mecanismos de cuatro piezas que, a diferencia de los cuadriláteros articulados, pueden tener pares distintos a los de rotación, como por ejemplo un par prismático, por lo que suelen contener una pieza corredera o deslizadera.

En este grupo se encuentran los triángulos de lado variable, que se caracterizan por tener una pieza fija y tres móviles, entre ellas una deslizadera. Su nomenclatura es a-4-XXXX.



(a) Imagen del mecanismo Adp-a-4-0963.

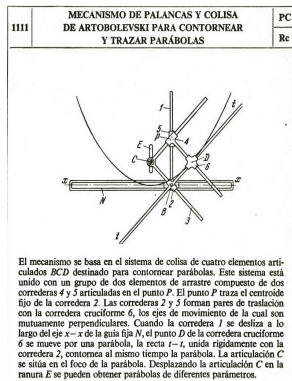


(b) Imagen del mecanismo Adp-a-4-1553.

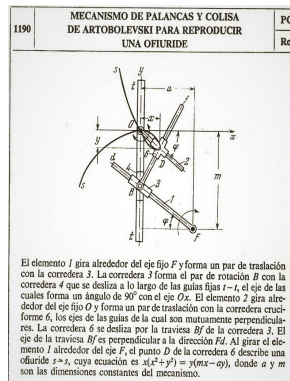
Figura 1.12: Imágenes de algunos de los mecanismos de cuatro cuerpos de Artobolevsky estudiados durante la fase de prepatación del trabajo.

- Trazadores

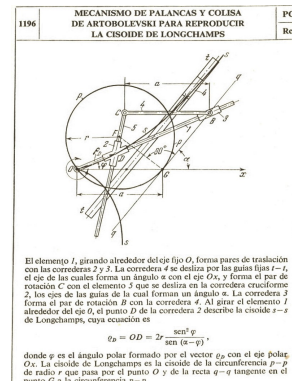
Mecanismos con más de cuatro piezas y sin un número de pares cinemáticos definido, entre los cuales se encuentran varios rotacionales y varios prismáticos. Son los mecanismos con más complejidad del compendio, ya que tienen un mayor número de piezas. Su nomenclatura es a-z-XXXX y dos de los mecanismos del presente trabajo pertenecen a este tipo, el a-z-0701 y el a-e-0188, destacando el a-e-0188 puesto que una de sus piezas es una rueda dentada que forman un par del tipo engranaje.



(a) Imagen del mecanismo Adp-a-z-1111.



(b) Imagen del mecanismo Adp-a-z-1190.



(c) Imagen del mecanismo Adp-a-z-1196.

Figura 1.13: Imágenes de algunos de los mecanismos del tipo trazador de Artobolevsky estudiados durante la fase de prepatación del trabajo.

- Planetarios

Mecanismos que consisten en uno o más engranajes externos o planetas que rotan sobre un engranaje central o sol. Los planetas se montan sobre un brazo móvil o portaplanetas que puede rotar con relación al engranaje central.

Para este tipo de mecanismos es necesario calcular su factor de Transmisión “T” que relaciona las velocidades de rotación de dos engranajes que se encuentran conectados entre sí.

$$T = W_s / W_e$$

$$T = Z_e / Z_s$$

El mecanismo de Artobolevsky a-9-1771 analizado en este trabajo pertenece a este grupo.

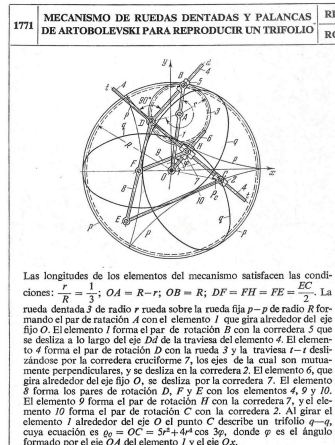


Figura 1.14: Imagen del mecanismo Adp-a-9-1771 del tipo planetario estudiado en el presente trabajo.

1.3. Motivación y Justificación

Muchos de los mecanismos, entre ellos los que forman parte del compendio de soluciones mecánicas de Artobolevsky, que fueron creados a mitad del siglo XX, no están correctamente representados con la tecnología correspondiente a la era actual, ya que, la explicación de su movimiento y funcionamiento es representada mediante una imagen acompañada, en algunas ocasiones, por un breve texto describiendo el movimiento que realiza dicho mecanismo, por lo que puede ser en ocasiones información insuficiente para comprender el mecanismo.

Por lo tanto, para poder conservar y mejorar la información de dichos mecanismos es necesario actualizar dicha información a la tecnología actual, es por esto que el uso de documentos interactivos (CDF) para representar dichos mecanismos son una buena alternativa, ya que con ellos se puede observar el movimiento completo y conocer las posiciones límites y la trayectoria que cada punto del mecanismo puede trazar a lo largo del movimiento. Con estos documentos se podrá confirmar y completar la información de cada mecanismo.

Ante esta situación, queda justificado el uso de programas CAD, como SolidWorks en este caso, para la simulación cinemática de mecanismos. Asimismo, empleando un programa CAE como es Wolfram Mathematica es posible realizar una simulación y análisis de resultados mucho más profunda y exhaustiva con la creación de un CDF.

En resumen, mediante la realización de este proyecto se pretende ampliar la información ya conocida y obsoleta de mecanismos de Artobolevsky con la finalidad de facilitar su entendimiento y su aplicación.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo General

El objetivo del presente trabajo es analizar el comportamiento cinemático de los mecanismos mediante el uso de programas de diseño CAD y de cálculo CAE. Los mecanismos escogidos forman parte del compendio de soluciones mecánicas “Mecanismos de la Técnica Moderna” del profesor Artobolevsky, donde se explican y ordenan un gran número de mecanismos. Para cada mecanismo del compendio se explica el movimiento de todas las piezas del mecanismo cuando se mueve la pieza motriz y la trayectoria que dibuja el punto trazador, colocado en una de las piezas del mecanismo. Además, cada mecanismo viene acompañado de una imagen que representa la posición de éstos en un instante de tiempo concreto.

Durante el proceso de aprendizaje de los programas informáticos y del desarrollo del trabajo se han realizado varios mecanismos del compendio nombrado previamente, siendo los escogidos para el siguiente estudio los mecanismos a-z-0701, del tipo trazador, a-e-0188, de piñón-cremallera y a-9-1771, de engranajes planetarios.

El objetivo es realizar una simulación cinemática, utilizando la extensión de SolidWorks COSMOS Motion de los mecanismos ya nombrados, partiendo de un modelo virtual y gráfico de SolidWorks proporcionado por el tutor de este trabajo. Para ello, será necesario definir los pares cinemáticos del mecanismo y comprobar que se encuentre correctamente alineado.

Una vez terminado este proceso, se empleará el programa CAE Mathematica, con su complemento “Mechanical System Pack”, para obtener un resultado similar donde se representarán las diferentes piezas y sus pares cinemáticos.

Una vez comparados ambos procedimientos y conociendo la trayectoria y funcionamiento del mecanismo, utilizando nuevamente el programa Mathematica, se resolverán las ecuaciones de movimiento asociadas a las restricciones de los pares cinemáticos para cada componente del movimiento de cada pieza. Con esto se podrá conocer el movimiento de cada pieza y del mecanismo para cada posición de la pieza motriz.

Por último, con todos los datos obtenidos se podrá crear un documento CDF interactivo donde se conseguirá representar el movimiento del mecanismo de manera completa, completando el estudio realizado en el compendio de mecanismos del profesor Artobolevsky y confirmando sus diagramas.

1.4.2. Objetivos Específicos

En la consecución del objetivo general, han surgido los siguientes objetivos específicos:

- Estudiar y comprender el movimiento de mecanismos y su diagrama cinemático
- Comprender y aprender el programa de diseño computacional SolidWorks y su extensión COSMOS Motion
- Mejorar las habilidades de programación en el programa Wolfram Mathematica 8.
- Evaluar y entender los resultados obtenidos, para poder posteriormente analizarlos y justificarlos.
- Aprender a construir un modelo metodológico de trabajo sólido.
- Mejorar las habilidades de programación en el programa LaTeX, donde se ha redactado trabajo.

Capítulo 2

Materiales

En el presente capítulo se detallan los materiales empleados, realizando una breve descripción de su función en el trabajo.

2.1. Hardware

En lo concerniente al hardware empleado para la realización del proyecto, se ha utilizado un ordenador portátil de la empresa taiwanesa Asus, modelo X550VX, con las características que se exponen en la tabla:

Especificaciones	Características
Procesador	Intel(R) Core(TM) i7-6700HQ, 8 núcleos, 2,6 Ghz
Memoria RAM	8192 MB
Sistema operativo	Windows 10 Home 64 bits
Almacenamiento (unidad de estado sólido,SSD)	256 GB
Tarjeta gráfica dedicada	Nvidia GeForce GTX 950M

Tabla 2.1: Tabla de especificaciones del Hardware

2.2. Software

2.2.1. SolidWorks 2007

SolidWorks es un programa tipo CAD (Computer-Aided Design) y CAE (Computer-Aided Engineering), es decir, de diseño y cálculo asistido por ordenador. Fue creado por la compañía D'assault Systemes en el año 1995. Este programa permite representar piezas o conjuntos tanto en 2D como en 3D mediante la creación de modelos y ensamblajes. Es un programa muy utilizado en el sector de la ingeniería del diseño por su gran variedad de opciones junto con un motor de cálculo potente y un sistema de aprendizaje intuitivo.

En el presente trabajo se empleará el complemento de SolidWorks COSMOS Motion, ya que permite realizar análisis y simulaciones cinemáticas.

Además, para poder realizar este estudio, es necesario el uso de la versión de 2007, ya que fue la última versión compatible con COSMOS Motion que incluía la fórmula de Gruebler, con la que se podrá calcular los grados de libertad del mecanismo.

Los componentes primarios de cada pieza y con los cuáles se comenzará a crear cada pieza y ensamblaje han sido creados previamente y proporcionado por el tutor de este trabajo.

Con este programa se creará un modelo gráfico similar al descrito por el profesor Artobolevsky y una representación cinemática del movimiento partiendo de una posición inicial con la que se podrá comprobar si la información detallada en los documentos de Artobolevsky está incompleta o no.



Figura 2.1: Logo del programa SolidWorks

2.2.2. SolidWorks 2019

Se ha utilizado esta versión más actualizada del programa SolidWorks para poder realizar el modelado gráfico y la simulación cinemática de los mecanismos Adp-a-e-0188 debi-

do a que por su complejidad la versión de 2007 presentaba serios problemas al intentar representar el comportamiento de este mecanismo.

El funcionamiento de este programa es similar a la versión de 2007 con la diferencia de que no contiene el complemento COSMOS Motion, por lo que no se puede calcular la movilidad de los mecanismos.

2.2.3. Wolfram Mathematica 8

Es un programa tipo CAE (Computer-Aided Engineering) desarrollado por la compañía estadounidense Wolfram Research.

Admirado tanto por su destreza técnica como su elegante facilidad de uso, Mathematica proporciona un único sistema integrado en continua expansión, que cubre todos los aspectos de la computación técnica y ahora se encuentra disponible de manera fluida en la nube desde cualquier navegador web, así como de manera nativa en todos los sistemas de escritorio modernos.

Este programa es necesario para, una vez obtenido un primer modelo cinemático del mecanismo en SolidWorks, crear un modelo gráfico interactivo del mecanismo y poder compararlo con el creado en SolidWorks. Se utilizará el complemento “Mechanical System Pack” para poder realizar el análisis del movimiento con instantes finitos.

Gracias a este programa se podrá representar y resolver las ecuaciones matemáticas asociadas al movimiento de los mecanismos y crear un documento interactivo tipo CDF, finalizando el estudio del mecanismo.



Figura 2.2: Logo del programa Wolfram Mathematica

Capítulo 3

Desarrollo

En este capítulo se presenta y explica el procedimiento que se ha realizado para la elaboración de este trabajo, el capítulo está dividido en cada una de las fases que formaban parte del proyecto y cada fase tiene un apartado específico para cada mecanismo, en la que se detalla individualmente el proceso que se ha llevado a cabo y los cambios necesarios para dicho mecanismo.

3.1. Introducción

A lo largo de este capítulo se va a explicar el procedimiento seguido para el análisis de los tres mecanismos de este trabajo, previamente en cada apartado del capítulo se mostrará fase por fase como se ha llegado al resultado final, explicado con un mecanismo de ejemplo, el Adp-a-z-1133, para más tarde mostrar los resultados obtenidos con el resto de mecanismos.

3.1.1. Componentes Predefinidos

Para el modelado gráfico de los modelos se utilizaron 9 componentes predefinidos diferentes. Como se ha explicado en el marco teórico los componentes pueden ser o prismas de diferentes dimensiones que sirven para representar las piezas o cilindros para representar los ejes de coordenadas. Estos componentes han sido predefinidos y proporcionados por el tutor, puesto que tienen un uso frecuente en las asignaturas que imparte. Cada compo-

nente se modifica y adapta para cada elemento del mecanismo. Se utiliza la nomenclatura 00, 01, 02, 03, 04, 05, 06, 07, 09 y 10 respectivamente.

Cada componente está nombrado de la siguiente forma XX-YY-ZZ, siendo XX el tipo de componente, YY el número de la pieza que forma y ZZ el número de veces que se ha incluido en esa pieza. Por ejemplo, para representar por segunda vez el componente tipo 5 en la pieza 3, la nomenclatura correcta sería: 05-03-02.

A continuación, se detallan los diferentes tipos de componentes.

- Componente tipo 00

Es un cilindro, por lo tanto, se utiliza para representar un eje de coordenadas, en este caso para los ejes de referencia local de cada pieza. Al necesitar todas las piezas un eje de coordenadas, todas las piezas, sin excepción, llevarán su componente 00.

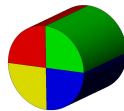


Figura 3.1: Imagen del Componente 00

- Componente tipo 01

Este componente representado por un prisma cuadrado sirve para albergar los ejes de coordenadas o los puntos trazadores, es decir, los componentes 00, 05 y 06 si la pieza en cuestión no tiene un agujero correcto para colocarlos, por ejemplo, si se quiere colocar el eje de coordenadas local en el centro de una barra será necesario definir un componente tipo 01 en el centro de esa barra para poder colocar el eje.

Además, sirven también para representar puntos fijos, por lo que suelen aparecer en la pieza 1 de todos los mecanismos, puesto que es la que representa la pieza fija.

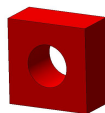


Figura 3.2: Imagen del Componente 01

- Componente tipo 02

Prisma alargado con dos agujeros en cada extremo, en los que se pueden colocar ejes o puntos trazadores, que se utiliza para la representación de barras.

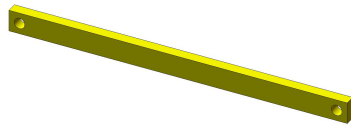


Figura 3.3: Imagen del Componente 02

- Componente tipo 03

Componente prismático rectangular con un agujero en el centro que sirve únicamente para representar deslizaderas. En el centro del agujero es donde se coloca el eje de coordenadas (00) y también sirve para unirla con otra pieza y que pueda rotar en torno a ella. En ocasiones, es necesario definir un plano medio que atraviese la pieza por el centro para poder unirla con otras piezas y poder definir los pares traslacionales.

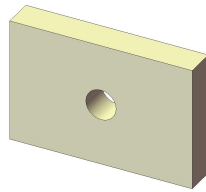


Figura 3.4: Imagen del Componente 03

- Componente tipo 04

Prisma que también representa una deslizadera, pero en este caso con dos agujeros en los laterales de la pieza. Tiene un uso menos frecuente y sirve para unir dos piezas diferentes o combinar con un elemento de barra.

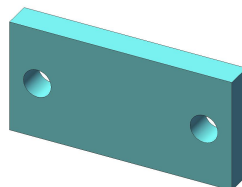


Figura 3.5: Imagen del Componente 04

- Componente tipo 05

Cilindro bicolor azul y amarillo cuyo centro representa el punto trazador. Se utiliza para representar el punto cuya trayectoria es analizada. Dependiendo del mecanismo puede

haber uno o varios componentes en función del número de trayectorias que representa el diagrama del mecanismo.

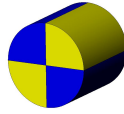


Figura 3.6: Imagen del Componente 05

- Componente tipo 06

Cilindro de color gris y negro que se utiliza únicamente para representar el eje de coordenadas global de todo el mecanismo, por lo que solamente hay un componente de este tipo por mecanismo y se sitúa en la pieza fija del mecanismo, la 01.



Figura 3.7: Imagen del Componente 06

- Componente tipo 07

Cilindro hueco de color gris y negro que representa el eje de coordenadas local de los discos utilizados para definir las piezas del tipo engranaje.



Figura 3.8: Imagen del Componente 07

- Componente tipo 09

Disco que se utiliza únicamente para representar piezas del tipo engranaje en los mecanismos. Suele ir acompañado por el componente 07 para formar piezas y tiene un pequeño hueco cerca del borde donde se puede unir con otro tipo de componentes.

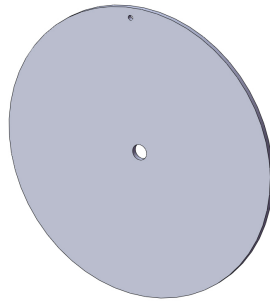


Figura 3.9: Imagen del Componente 09

- Componente tipo 10

Disco huevo que se utiliza para representar piezas del tipo engranaje que engranan por la parte interior con la otra pieza. En este trabajo se utilizará únicamente para representar una pieza del mecanismo Adp-a-9-1771.

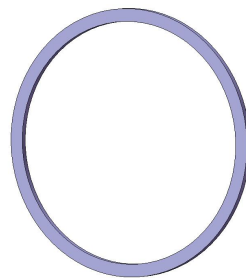


Figura 3.10: Imagen del Componente 10

Con estos 10 componentes se crean todas las piezas y mecanismos del presente trabajo. Un mecanismo puede tener hasta 12 piezas con sus distintos componentes, por eso es necesario utilizar una nomenclatura correcta y un orden concreto. Además, cada pieza del mecanismo tiene un color distinto, por lo que todos sus componentes, excepto los cilindros que tienen un color propio, también serán del mismo color que la pieza que forman.

3.1.2. Mecanismos Utilizados

En este apartado, se van a mostrar y explicar todos los mecanismos incluidos en el presente trabajo, junto con los mecanismos que se han estudiado en el periodo de aprendizaje.

Al principio se empezó a trabajar con mecanismos más sencillos, la mayoría cuadriláteros articulados, para posteriormente avanzar a mecanismos más complejos, como los cuatro

cuerpos o los trazadores.

- Mecanismos tipo cuadrilátero articulado

Son los mecanismos más sencillos con los que se ha trabajado, como ya se ha explicado previamente están formados por cuatro barras, una fija y tres móviles siendo una de ellas el impulsor o motor del mecanismo y otra el seguidor.

Estos mecanismos se han realizado durante la fase de preparación y son los mecanismos Adp-a-c-0654, Adp-a-c-0658, Adp-a-c-0683 y Adp-a-c-0660.

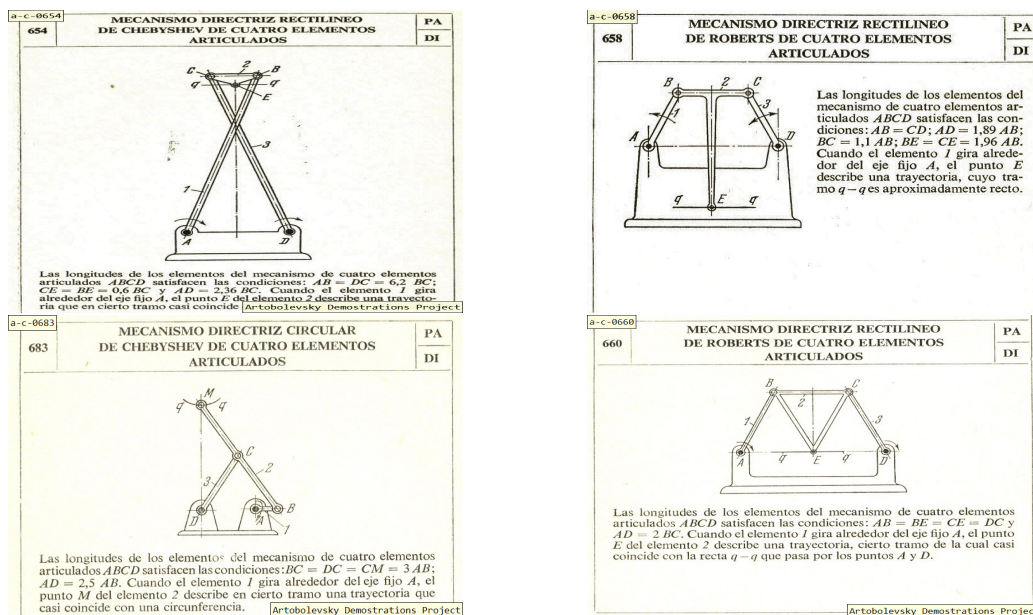


Figura 3.11: Imágenes de los mecanismos Adp-a-c-0654, Adp-a-c-0658, Adp-a-c-0683 y Adp-a-c-0660 en ese orden.

- Mecanismos de tipo cuatro cuerpos

Mecanismos algo más complicados, ya que pueden contener pares cinemáticos del tipo prismático, donde se incluyen deslizaderas o guías.

Estos mecanismos también han sido creados durante la fase de preparación y son el Adp-a-4-0963, Adp-a-4-1136 y Adp-a-4-1553.

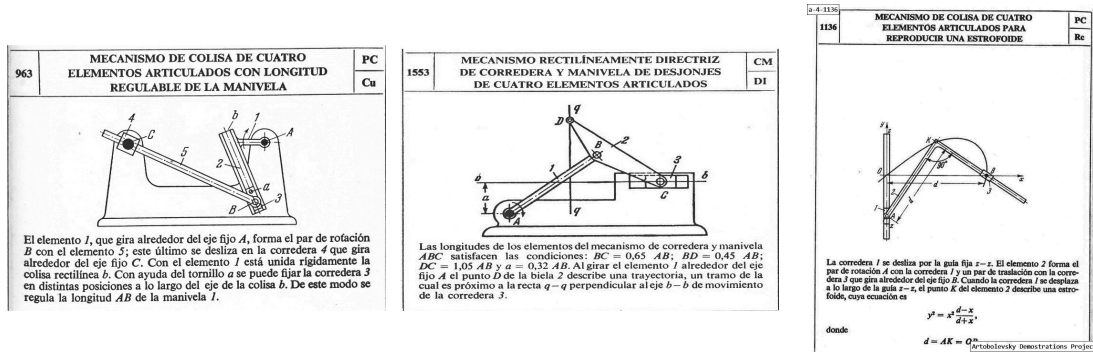


Figura 3.12: Imágenes de los mecanismos Adp-a-4-0963, Adp-a-4-1553, Adp-a-4-1136 y en ese orden.

- Mecanismos de tipo Trazadores

Este grupo contiene los mecanismos más complejos al tener mayor número de piezas y por lo tanto de pares cinemáticos. En la fase de preparación se han estudiado una gran cantidad de mecanismos de este tipo tales como los mecanismos Adp-a-z-1111, Adp-a-z-1133, Adp-a-z-1190 y Adp-a-z-1196.

Además, el mecanismo Adp-a-z-0701 es uno de los mecanismos que forma parte del trabajo final y pertenece a este grupo.

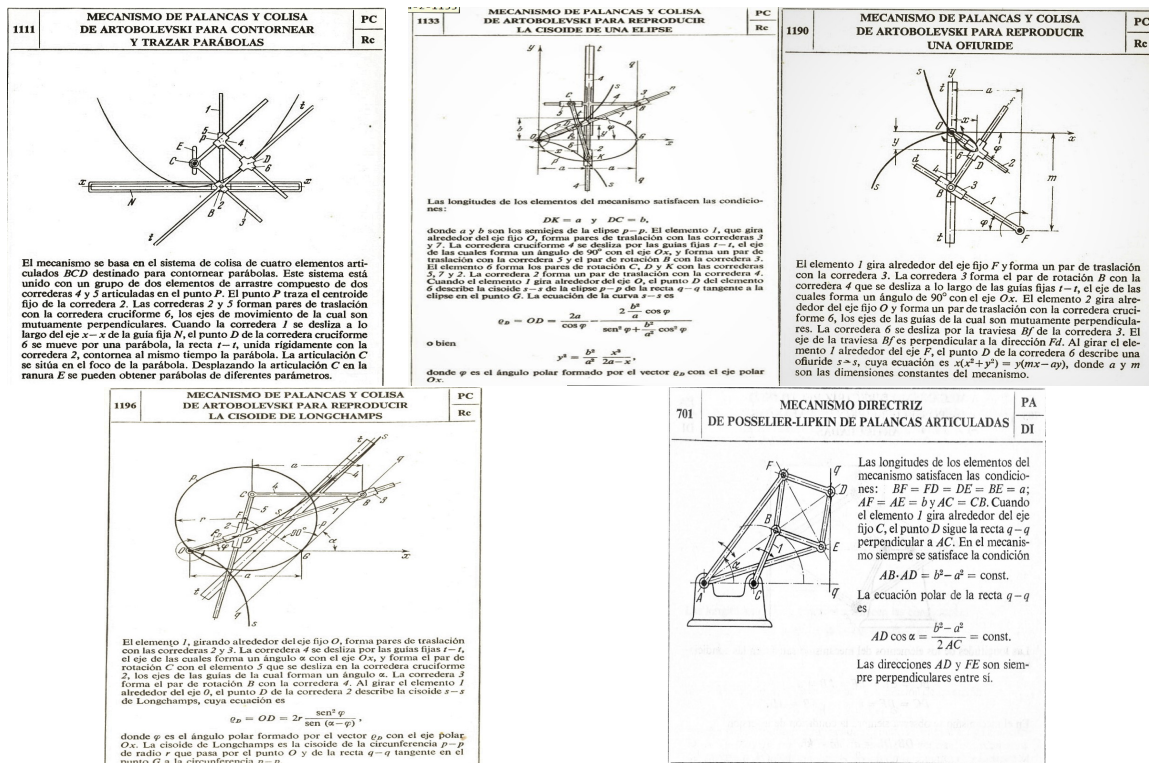


Figura 3.13: Imágenes de los mecanismos Adp-a-z-1111, Adp-a-z-1133, Adp-a-z-11900683, Adp-a-z-1196 y Adp-a-z-0701 en ese orden.

Otro de los mecanismos que ha sido estudiado en este trabajo, el Adp-a-e-0188 es también un mecanismo del tipo trazador pero con la característica que contiene una rueda dentada que forma un par de engranaje en la unión con otra pieza.

- Mecanismos tipo Planetarios

Son mecanismos que, como se ha explicado previamente consisten en uno o más engranajes externos o planetas que rotan sobre un engranaje central o sol. Los planetas se montan sobre un brazo móvil o portaplanetas que puede rotar con relación al engranaje central.

Uno de los mecanismos estudiados en el trabajo final, el Adp-a-9-1771 pertenece a este tipo de mecanismos.

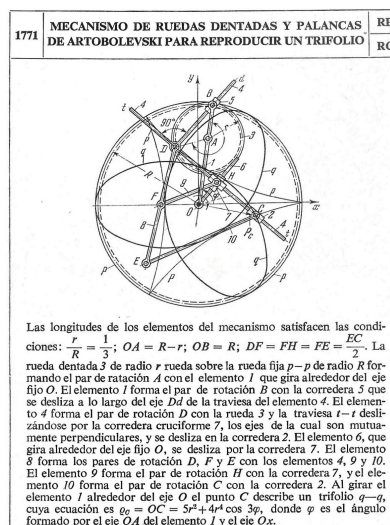


Figura 3.14: Imagen del mecanismo Adp-a-9-1771

3.2. Modelado Gráfico y Simulación Cinemática en SolidWorks

3.2.1. Procedimiento

En este apartado se va a realizar la representación gráfica de los mecanismos en SolidWorks y su respectiva simulación cinemática con el complemento COSMOS Motion.

Los modelados gráficos de los mecanismos han sido proporcionados por el tutor previamente de forma íntegra o con algún ajuste necesario que realizar, se explicará para cada mecanismo la metodología que se ha empleado para completar el modelado.

Una vez completados los modelados, se procede a realizar la simulación cinemática en COSMOS, donde se determinan y crean los pares cinemáticos, se comprueba que el me-

canismo se encuentre auto alineado y se dota al impulsor o pieza motriz un movimiento determinado consiguiendo representar el movimiento del mecanismo.

Es en este apartado donde se puede obtener la trayectoria del punto trazador, para compararla con el modelo descrito por el profesor Artobolevsky, y, además, obtener una solución discreta de la curva que servirá para el análisis y comparación con la curva obtenida en el programa Mathematica.

3.2.2. Preparación

En esta parte se va a explicar la metodología enseñada por el tutor para representar y modelar los mecanismos en SolidWorks.

Aunque los modelados de los mecanismos que se estudian en el presente trabajo han sido proporcionados por el tutor, se ha creído necesario la explicación de este proceso debido a que, durante la fase de preparación se ha representado una gran cantidad de mecanismos para familiarizarse con el programa SolidWorks y facilitar la elaboración y entendimiento de los siguientes pasos que ocupan este proyecto.

Por lo tanto, para detallar las fases de creación de un mecanismo en SolidWorks se va a utilizar como ejemplo uno de los mecanismos estudiados durante la fase de preparación, concretamente el mecanismo Adp-a-z-1133 del tipo trazador, puesto que presente la complejidad suficiente para que su explicación se acerque a la de los mecanismos estudiados.

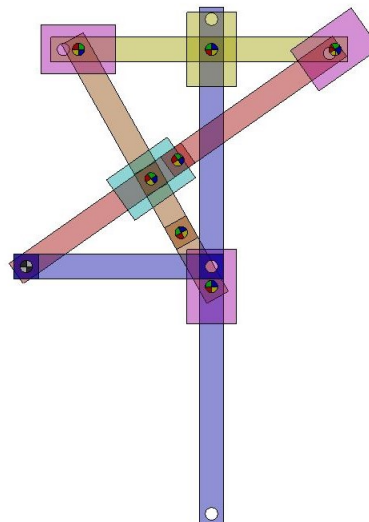
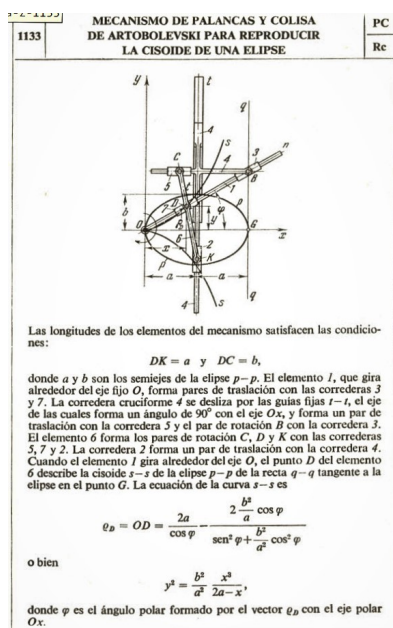


Figura 3.15: Representación del mecanismo Adp-a-z-1133 en su diagrama de Artobolevsky y en el programa SolidWorks.

La primera fase de la preparación del mecanismo es la creación de las piezas que forman el mecanismo. Para llevar a cabo este modelo, el profesor creó ensamblajes para cada una de las piezas. Cada pieza tenía diferentes componentes de un color. El primer paso será nombrar cada pieza correctamente, nombrar cada uno de sus componentes de forma adecuada, y eliminar los componentes que no eran necesarios. Este mecanismo tiene 8 piezas, así que se procederá a la creación de cada una.

- Pieza 1

Es la pieza fija del mecanismo, cada mecanismo contiene siempre una pieza fija y ésta se suele nombrar como la número 1.

En este mecanismo, la pieza 1 está formada por un punto fijo, que actúa como eje de coordenadas global del mecanismo, y por una barra vertical que servirá de guía para algunas de las piezas posteriores.

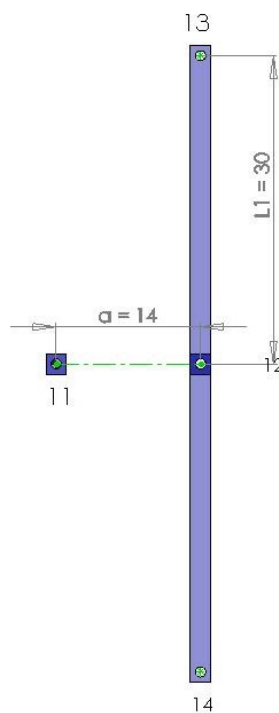


Figura 3.16: Imagen de la pieza 1 del mecanismo a-z-1133

- Pieza 2

Es una de las piezas conectadas a la pieza 1 y normalmente es la pieza motriz del mecanismo, es decir, la pieza que define el movimiento del resto de piezas y del mecanismo.

En este caso la pieza actúa como el impulsor del mecanismo y se trata de una barra

formada por 3 tipos distintos de componentes, el 00 y el 01 para representar el eje de coordenadas local de la pieza en el centro y el componente 02 que tiene forma de barra.

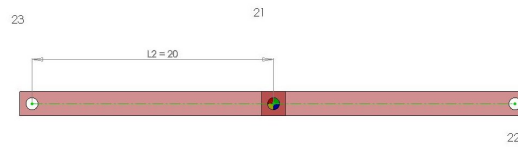


Figura 3.17: Imagen de la pieza 2 del mecanismo a-z-1133

- Pieza 3

La pieza 3 es una deslizadera, formada por los componentes 03 y 00, este tipo de piezas siempre van a formar como mínimo un par de revolución y un par prismático, puesto que siempre están conectadas a una barra por la que deslizarse.

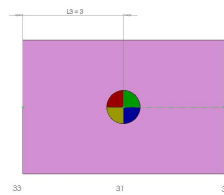


Figura 3.18: Imagen de la pieza 3 del mecanismo a-z-1133

- Pieza 4

Esta pieza es también una deslizadera por lo que no es necesario explicar su función.

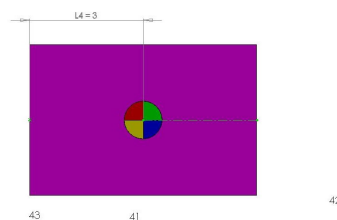


Figura 3.19: Imagen de la pieza 4 del mecanismo a-z-1133

- Pieza 5

Pieza formada por una barra vertical y una deslizadera, la cual está conectada a la guía del mecanismo y se desliza verticalmente.

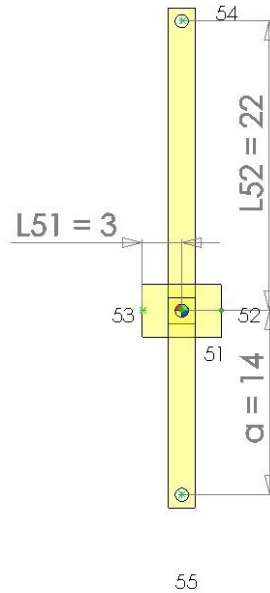


Figura 3.20: Imagen de la pieza 5 del mecanismo a-z-1133

- Pieza 6

Pieza del tipo deslizadera que ya se ha explicado previamente sus características y función.

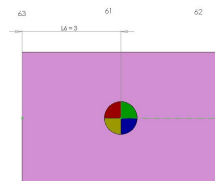


Figura 3.21: Imagen de la pieza 6 del mecanismo a-z-1133

- Pieza 7

Pieza en forma de barra por la que se mueve la pieza 8, deslizadera en la cual se encuentra el punto trazador.

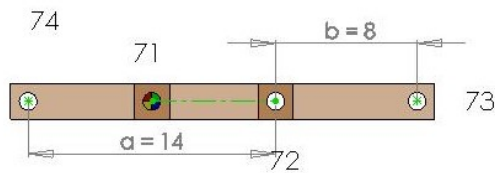


Figura 3.22: Imagen de la pieza 7 del mecanismo a-z-1133

- Pieza 8

Última pieza del mecanismo con forma de deslizadera, en la cual se encuentra el punto trazador, en este caso, el punto trazador está localizado en el mismo centro de coordenadas local de pieza, es por esto que está representado por el componente 00 y no por el 06.

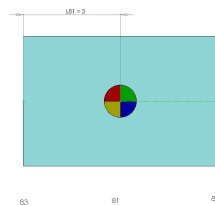


Figura 3.23: Imagen de la pieza 8 del mecanismo a-z-1133

Como se ha podido observar, todas las piezas tienen definidas sus dimensiones, puesto que es fundamental para poder realizar el estudio en Mathematica.

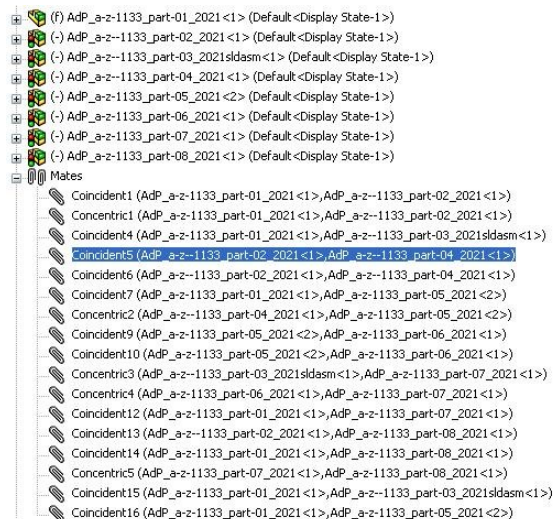


Figura 3.24: Todas las relaciones de posición que definen el Adp-a-z-1133

Una vez están creadas las piezas se procede al ensamblaje del mecanismo, donde se unirán todas las piezas utilizando relaciones de posición y se dejará el mecanismo preparado para su simulación.

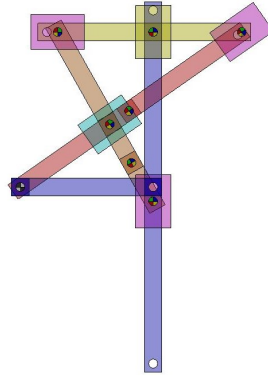


Figura 3.25: Modelado del mecanismo Adp-a-z-1133 en SolidWorks

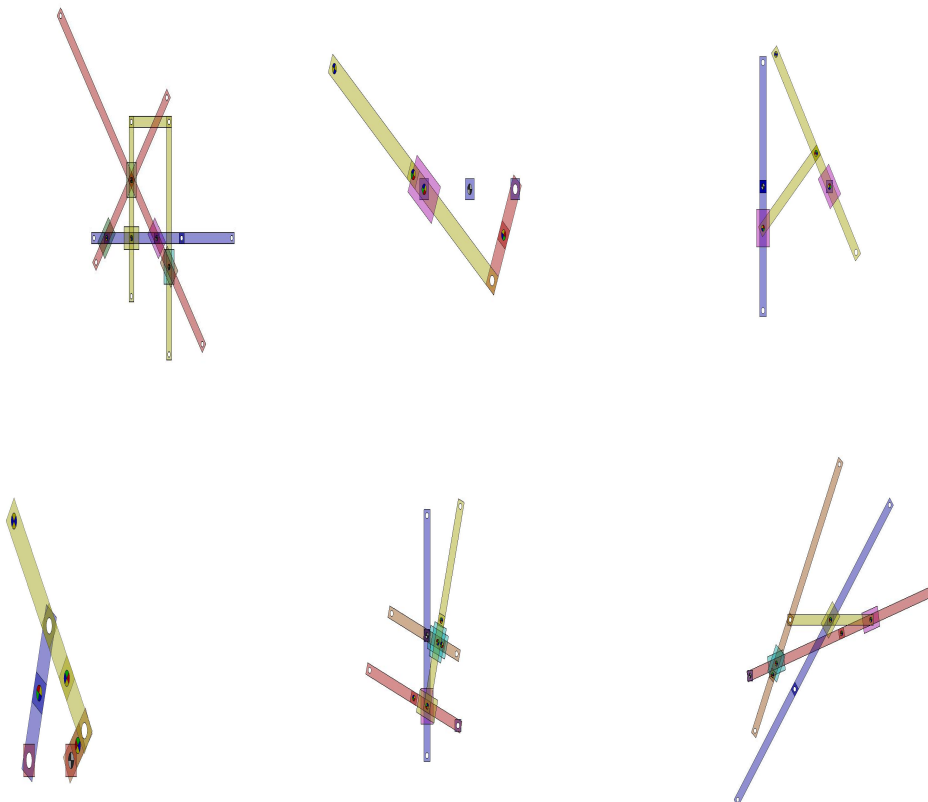


Figura 3.26: Imágenes de algunos modelos de mecanismos de Artobolevsky estudiados durante la fase de preparación del trabajo.

Cuando esta completado el modelado del mecanismo se realiza la simulación cinemática del mismo utilizando el complemento COSMOS Motion.

En primer lugar se define que cada pieza, si es fija o móvil, cuando todas las piezas están colocadas en respectivos apartados se procede a crear los pares cinemáticos en el lugar que les corresponde.

En el caso del Adp-a-c-1133, al tener varias deslizaderas, habrá que definir solamente pares de rotación y de traslación.

Para crear estos pares cinemáticos en el programa basta con ir a “Joints” “Add Revolute/Translational Joint” y seleccionar el punto donde está el par y las dos piezas que une.

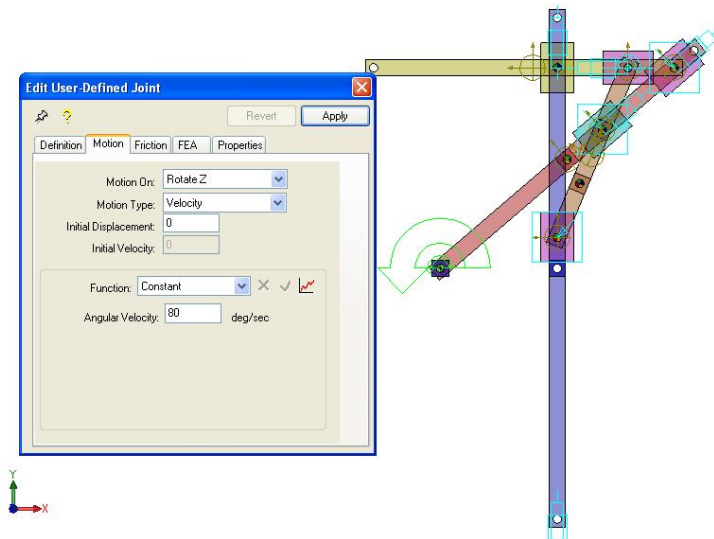


Figura 3.27: Definición de los pares y del motor del mecanismo a-z-1133

Después de definir todos los pares cinemáticos se ha de comprobar la movilidad del mecanismo utilizando la herramienta del complemento COSMOS Motion, accediendo desde el menú superior a "Show Simulation Panel". Con la opción de calcular automáticamente devuelve una ventana donde informa sobre el número de piezas, el número de pares, las restricciones en exceso y la movilidad del mecanismo. Para este ejemplo, se han tenido que sustituir algunos pares de revolución por pares In-Line para conseguir que el mecanismo esté auto-alineado.

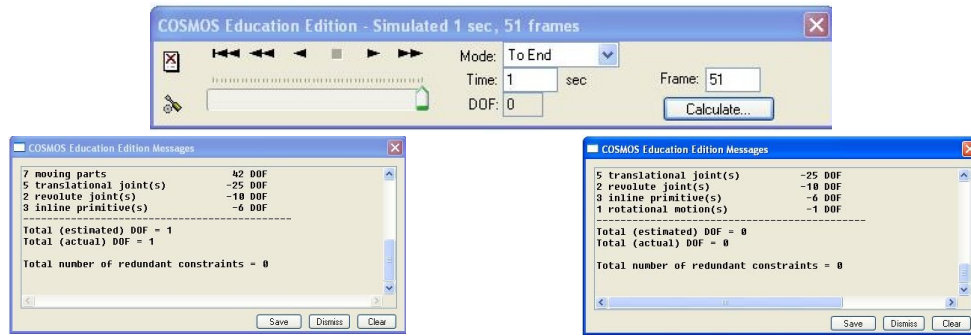


Figura 3.28: Imágen del panel de simulación y de los grados de libertad calculados totales antes y después de añadir el par motor.

Se puede observar que el mecanismo está auto alineado, puesto que tiene un único grado de libertad, a falta de añadir el movimiento de la pieza motriz.

El programa utiliza los principios de movilidad de Grübler en 3 dimensiones, mientras que el mecanismo está representado en 2 dimensiones. Es por esto que en algunos mecanismos es necesario modificar algunos pares para que obtener un solo grado de libertad. Consultando la Tabla de Reshetov, figura 1.6, y eligiendo un par con una restricción menor, o una movilidad mayor. Para este caso en concreto es necesario modificar algunos de los pares de revolución y convertirlos en pares In-Line para conseguir que el mecanismo se encuentre auto alineado.

Como se ha visto en la figura 3.36, se ha definido el movimiento del cuerpo impulsor. En este caso el cuerpo impulsor es la pieza 2. Se accede a modificar el par de revolución 1, entre la pieza 1 y 2 y en la pestaña “Motion” se añade un movimiento en el eje z, de velocidad y, puesto que es un movimiento de rotación, se definen los grados que debe girar por segundo. Además si se vuelve a calcular la movilidad se puede observar que la movilidad tendrá valor 0, ya que al incluir el movimiento el programa considera que el mecanismo ya no tiene movilidad libre.

Para obtener una simulación correcta es importa conocer las posiciones límite, en caso de que las haya, del mecanismo, dado que si definimos el movimiento fuera de esos límites el programa dará error.

Para acabar con este apartado se debe representar la trayectoria del punto trazador. Para eso el programa proporciona la herramienta adecuada a la que se puede acceder desde la parte inferior del menú. Para determinar el punto que traza la trayectoria se debe definir el punto y la pieza a la que pertenece.

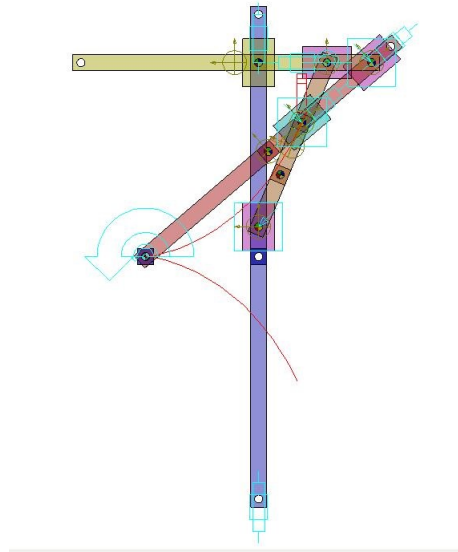


Figura 3.29: Modelado del Adp-a-z-1133 con su trayectoria dibujada

Tanto la curva de la trayectoria, como de la velocidad y aceleración del punto trazador se pueden exportar como un archivo .CSV que se utilizará más tarde en Mathematica para comparar la curva obtenida en Mathematica con la obtenida en COSMOS. En este caso solo se ha exportado la curva de la trayectoria.

3.2.3. Adp a-z-0701

El primer mecanismo a estudiar en el presente trabajo es el a-z-0701. Como se ha comentado previamente, se trata de un mecanismo del tipo trazador con únicamente pares de rotación. El modelado del mecanismo fue proporcionado por el tutor y la tarea del alumno era terminar la simulación cinemática en COSMOS y realizar el análisis en Mathematica.

El motivo por el cual este es el primer mecanismo en ser desarrollado es que tiene una menor dificultad, debido a su menor número de piezas y tener únicamente pares rotacionales.

Para la realización de este apartado, el tutor facilitó previamente el ensamblaje del modelo en SolidWorks y su simulación en COSMOS Motion completada, siendo tarea del alumno el comprobar su correcto funcionamiento y crear las trayectorias y curvas de velocidad y aceleración para poder exportarlas para las actividades posteriores.

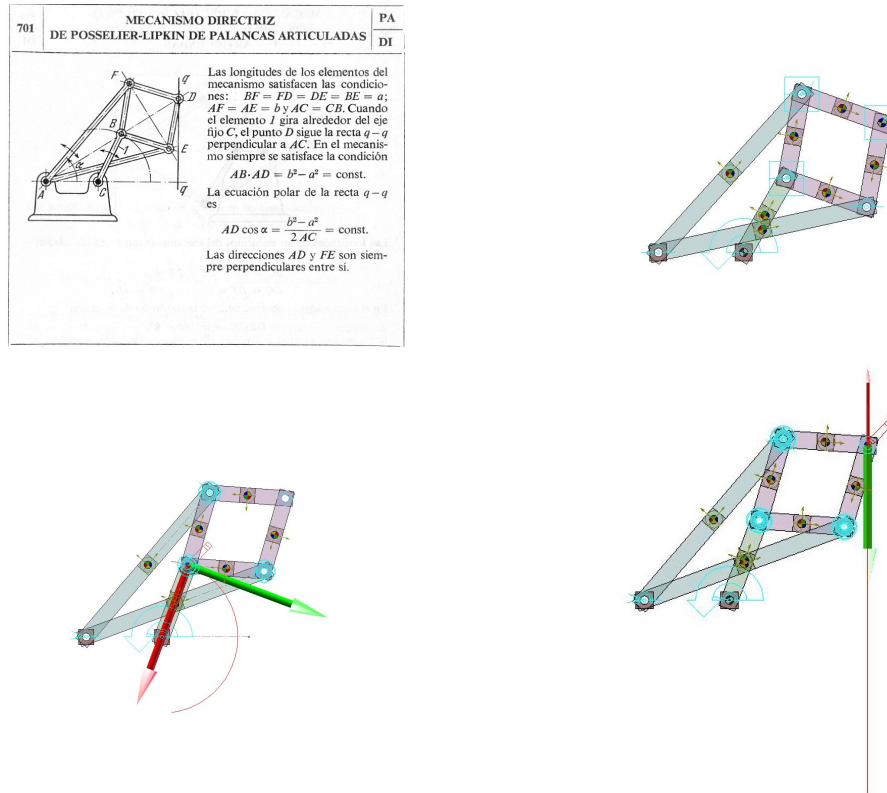


Figura 3.30: Imagen de Artobolevsky del mecanismo Adp-a-z-0701 y su modelado en SolidWorks con ambas trayectorias definidas

Para este mecanismo no ha sido necesario definir las cotas de las posiciones inicial y final ni de las piezas, puesto que al haberlas realizado el tutor, ya se encontraban previamente definidas.

A continuación, se dota al par de la pieza motriz de movimiento, creando así el par motor, necesario para poder realizar la simulación tanto en COSMOS como en Mathematica.

Por último se ha comprobado la movilidad del mecanismo utilizando el panel de simulación explicado previamente dando como resultado que el mecanismo tiene 0 Grados de Libertad, por lo tanto el mecanismo se encuentra correctamente auto alineado y se puede continuar a la siguiente fase.

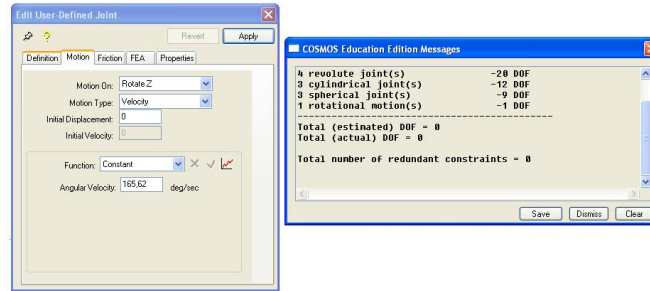


Figura 3.31: Imagen que muestra por un lado la definición del par motor del a-z-0701 y por otro el cálculo de su movilidad en COSMOS

3.2.4. Adp a-e-0188

El siguiente mecanismo es el Adp-a-e-0188. Es un mecanismo complejo ya que se trata de un mecanismo tipo trazador con una rueda dentada que forma un par cinemático de piñón y cremallera con la guía fija horizontal.

Para la realización del modelado de este mecanismo el tutor proporcionó al alumno las piezas necesarias ya definidas y algunos modelados de mecanismos con cierta similaridad con el a-e-0188, la tarea del alumno era completar el modelado con las piezas proporcionadas y ajustarlo al diagrama de Artobolevsky.

Además, para este mecanismo se ha trabajado en la versión de SolidWorks de 2019, puesto que era debido al par de piñón y cremallera la versión de 2007 presentaba serios problemas de funcionamiento, por lo que a la hora de la simulación no se han podido calcular la movilidad del mecanismo.

Por último, cabe destacar que el par motor de este mecanismo se encuentra en la pieza 2, que es la pieza que une el centro del disco (pieza 3) con la pieza fija una, es un par del tipo prismático, es decir la coordenada independiente del mecanismo será la coordenada X de la pieza 2, X2.

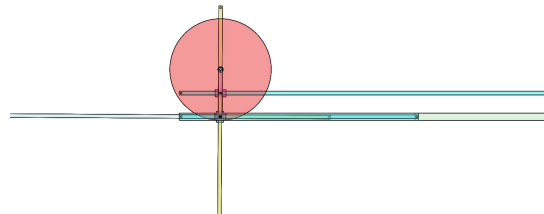
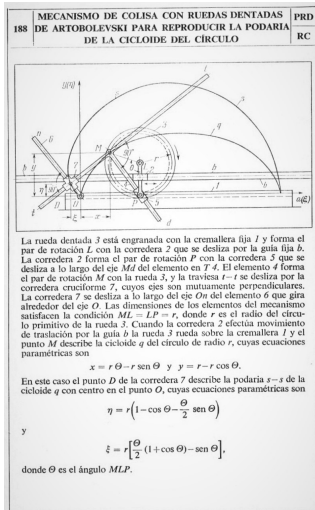


Figura 3.32: Imagen de Artobolevsky del mecanismo Adp-a-e-0188 y su modelado en SolidWorks con ambas trayectorias definidas

Después de este paso, es necesario simular el mecanismo en SolidWorks y definir tanto las curvas de la trayectoria de los dos puntos trazadores como sus curvas de velocidad y aceleración.

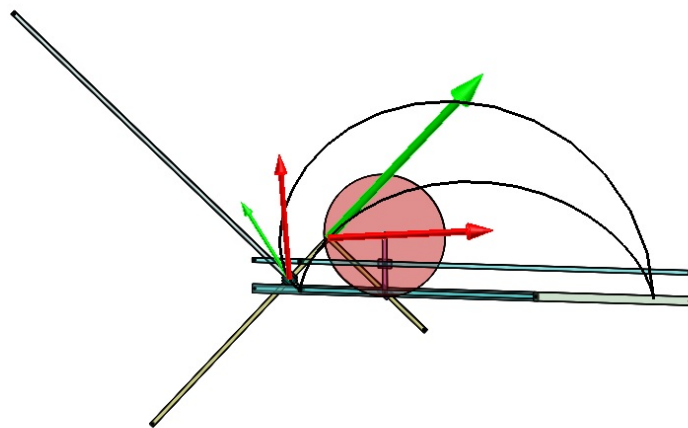


Figura 3.33: Imagen del modelado del mecanismo Adp-a-e-0188 en SolidWorks simulado y tanto sus trayectorias como el vector velocidad y aceleración representados para los dos puntos trazadores del mecanismo

Para realizar el análisis de movimiento en SolidWorks 2019 es necesario activar el complemento Motion previamente, una vez activado, se acude al apartado estudio del movimiento y se escoge la opción de análisis del movimiento. Con el panel mostrado en la

siguiente figura se controla el movimiento del mecanismo, donde se puede definir un par motor y las curvas a exportar.

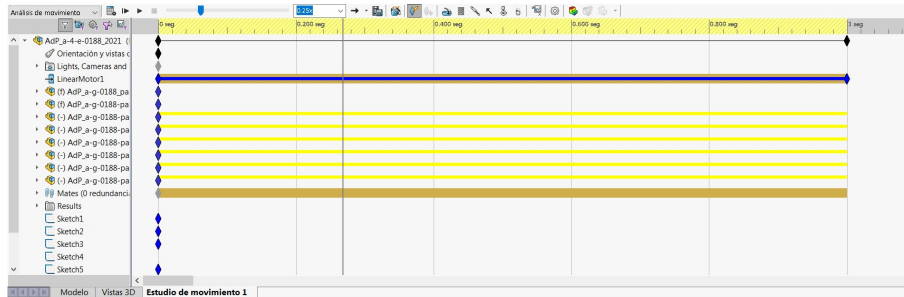


Figura 3.34: Panel de estudio del movimiento de SolidWorks 2019

3.2.5. Adp a-9-1771

El último mecanismo que se va a estudiar es el Adp-a-9-1771, es un mecanismo del tipo engranaje de 11 piezas, con la característica que las piezas engranan en el interior de una de ellas. Es el mecanismo más complejo debido a la gran cantidad de piezas y pares distintos que lo forman.

Al ser un mecanismo tan complejo, el tutor también ha proporcionado el modelado completo en SolidWorks y su respectiva simulación además de la simulación cinemática en Mathematica del documento parcialmente completa.

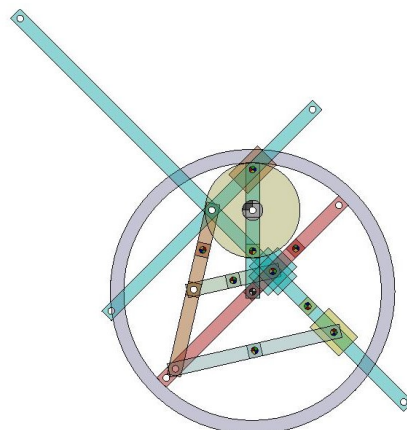
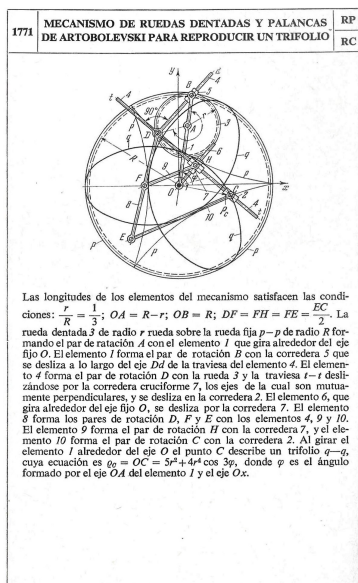


Figura 3.35: Imagen de Artobolevsky del mecanismo Adp-a-9-1771 y su modelado en SolidWorks.

En COSMOS se ha definido tanto la trayectoria de los dos puntos trazadores, como su velocidad y aceleración y se han exportado a documentos CSV para su uso en fases del trabajo posteriores.

Para ello es necesario definir un par motor en la pieza impulsora, en este caso la pieza 2. Este mecanismo no tiene posiciones límites por lo que el movimiento de la pieza impulsora será de 360°.

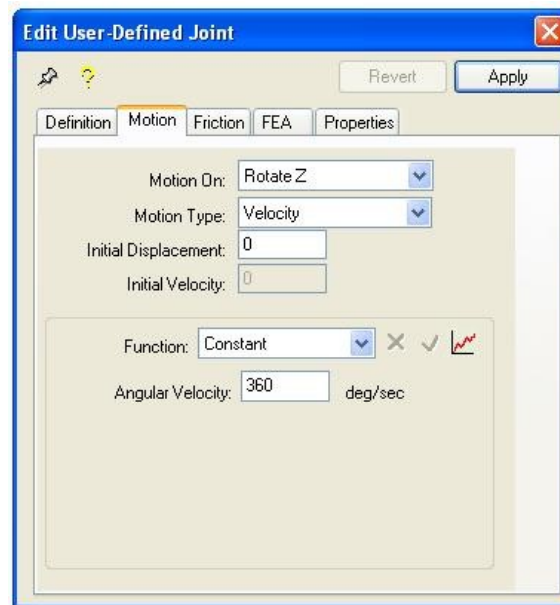


Figura 3.36: Par motor definido en la pieza 2 del a-9-1771.

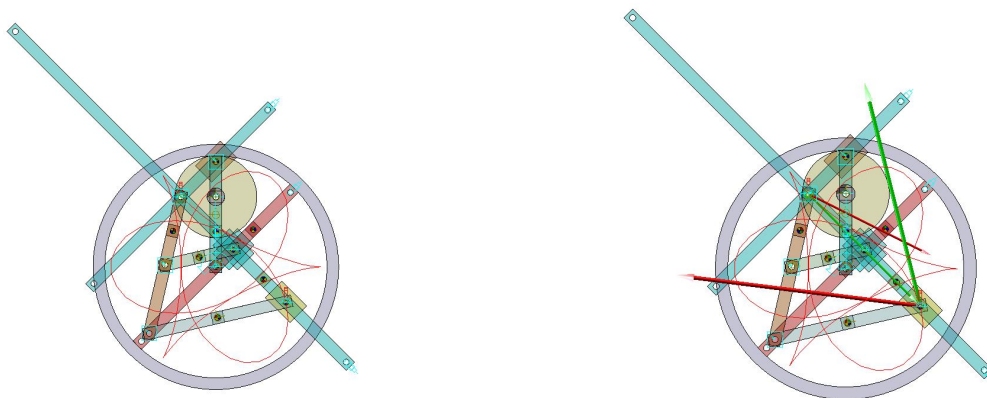


Figura 3.37: Imagen de la simulación en COSMOS del mecanismo a-9-1771, mostrando trayectorias, velocidades y aceleraciones.

3.3. Simulación Cinemática en Mathematica

Figura 3.38: Imagen de los apartados del primer documento de Mathematica, nombrado -Mechanica

3.3.1. Procedimiento

Esta fase es donde se representa el mecanismo en el programa Mathematica, para ello es necesario definir las coordenadas locales de cada pieza respecto a las coordenadas globales y obtener los puntos importantes de cada pieza y sus dimensiones.

Para este apartado, se necesita la herramienta Mechanical System Pack de Mathematica con la que se puede definir cada punto y coordenada de cada pieza para obtener la representación del mecanismo.

A continuación, se definirán los pares cinemáticos y el par motriz, con el que se controlará el movimiento del mecanismo. Por último, se obtendrá la curva de la trayectoria del punto trazador para poder compararla con la obtenida en COSMOS y se averiguará el instante en que el mecanismo se encuentra en la misma posición que en el documento de Artobolevsky.

Como en el apartado anterior, primero se ha practicado con varios mecanismos, siguiendo las explicaciones del tutor, mostrando como ejemplo el mecanismo Adp-a-z-1133, para posteriormente realizar los tres mecanismos del presente trabajo por parte del alumno, algunos con ayuda del tutor debido a su complejidad.

3.3.2. Preparación

Para representar el mecanismo a-z-1133 en Mathematica se deben conocer todas las coordenadas, puntos y dimensiones de las piezas del mecanismo. Para eso es necesario realizar

croquis individuales para la posición de partida de cada pieza y realizar las acotaciones convenientes. Además, se capturará la imagen de cada croquis para poder mostrarla en el documento de Mathematica.

Con esta información, ya se pueden representar las coordenadas de cada pieza en la posición inicial en coordenadas globales.

Para complementar la explicación de esta fase se van a incluir algunas capturas del documento de Mathematica mostrando el proceso a seguir.

Primero de todo, es necesario definir un directorio de trabajo donde están todos los archivos necesarios para elaborar la simulación (Trayectorias importadas de COSMOS, imágenes de los croquis...). También es necesario introducir el complemento Mechanical System Pack que como se ha explicado previamente es imprescindible para este proceso.

```
SetDirectory["C:\\mecanismos\\m4-a4a\\mecha"]
C:\\mecanismos\\m4-a4a\\mecha
```

Figura 3.39: Imagen del directorio de trabajo

A continuación, se han de definir las coordenadas obtenidas en los croquis en un vector denominado Coor, para luego poder trabajar con esos valores utilizando un factor de escala.

```
Coor = {{x2, 15.19}, {y2, 13.02}, {o2, 40.60}, {x3, 14.0}, {y3, 3.69}, {o3, 90.0}, {x4, 28.0}, {y4, 24.0}, {o4, 40.60}, {x5, 14.0}, {y5, 24.0}, {o5, 90.0}, {x6, 22.46}, {y6, 24.0}, {o6, 0.0}, {x7, 16.69}, {y7, 10.15}, {o7, 67.39}, {x8, 19.38}, {y8, 16.61}, {o8, 40.60}};
Dimensions[Coor]
Coor // MatrixForm
Coor[[6, 2]]
```

■ Coordenadas Generalizadas - Piezas Moviles - Posicion Inicial .

- Pieza 2 - #
 $X2n = \text{Coor}[[1, 2]] * \text{Escala};$
 $Y2n = \text{Coor}[[2, 2]] * \text{Escala};$
 $\phi 2n = \text{Coor}[[3, 2]] * \pi / 180$
- Pieza 3 - #
- Pieza 4 - #
- Pieza 5 - #
- Pieza 6 - #
- Pieza 7 - #
- Pieza 8 - #

Figura 3.40: Imágen del vector COOR y sus dimensiones y la definición de las piezas con ese vector multiplicadas por un factor de escala

Es necesario además definir cada pieza con los valores obtenidos en SolidWorks, multiplicándolos por la variable Escala.

```
• Definición: Valores Numericos Parametros a Escala - @
Clear[Escala, DatosE];
DatosE[Escala_] := {L1 + 30.0 * Escala, L2 + 20.0 * Escala, L3 + 3.0 * Escala, L4 + 3.0 * Escala, L51 + 3.0 * Escala, L52 + 22.0 * Escala, L6 + 3.0 * Escala, L8 + 3.0 * Escala, a + 14.0 * Escala, b + 8.0 * Escala}
```

Figura 3.41: Creación del vector DatosE[Escala]

Con esta información ya es posible representar el modelo en Mathematica, definiendo la posición de cada punto de cada pieza y, una vez definidos, al estar introducidos respecto al sistema de coordenadas local, es necesario adecuarlos al sistema de coordenadas globales del mecanismo. Para ello se tiene que utilizar una matriz de transformación, tal y como se muestra en la imagen 3.76.

Para conseguir referenciarlos al sistema global, se ha de utilizar el vector de posición global del origen del sistema de referencia local de la pieza, y sumarlo al producto de la matriz de transformación por el vector de posición local del punto. Se hace para cada punto definido.

Después de esto ya se tienen los puntos de la pieza en su posición correcta respecto al eje de coordenadas global. Para esto se han definido con anterioridad una serie de elementos gráficos, entre los que se encuentran barras, prismas y puntos de diferentes formas, a los cuales habrá que introducirle únicamente los puntos para crear la pieza.

```
o Cuerpos Moviles
arm[a_, b_] := Module[{d},
  d = 0.04 Normalize[{{0, -1}, {1, 0}}].(b - a);
  {Gray, EdgeForm[Thick], Polygon[{a + d, b + d, b - d, a - d}], Disk[a, 0.1], Disk[b, 0.1], LightBlue, Disk[a, 0.04], Disk[b, 0.04]}]

armf[a_, b_] := Module[{d},
  d = 0.04 Normalize[{{0, -1}, {1, 0}}].(b - a);
  {Gray, EdgeForm[Thick], Polygon[{a + d, b + d, b - d, a - d}], Disk[b, 0.1], LightBlue, Disk[a, 0.04], Disk[b, 0.04]}]

armff[a_, b_] := Module[{d},
  d = 0.04 Normalize[{{0, -1}, {1, 0}}].(b - a);
  {Gray, EdgeForm[Thick], Polygon[{a + d, b + d, b - d, a - d}], LightBlue, Disk[a, 0.04], Disk[b, 0.04]}]

slider[a_, b_] := Module[{d},
  d = 0.11 Normalize[{{0, -1}, {1, 0}}].(b - a);
  {Gray, EdgeForm[Thick], Polygon[{a + d, b + d, b - d, a - d}], LightBlue, Disk[(a + b) / 2, 0.04]}]
```

Figura 3.42: Ejemplo de elementos gráficos definidos en Mathematica. Se puede apreciar que el comando arm sirve para definir barras y slider, para deslizaderas.

Cuando el mecanismo está formado por un gran número de piezas, como los mecanismos objeto de estudio de este trabajo, es necesario definir piezas con colores diferentes para facilitar la diferenciación entre ellas. De esta forma la pieza base siempre será de color gris, la impulsora tendrá un color verde claro y la pieza que contenga el punto trazador será de un color rojizo.

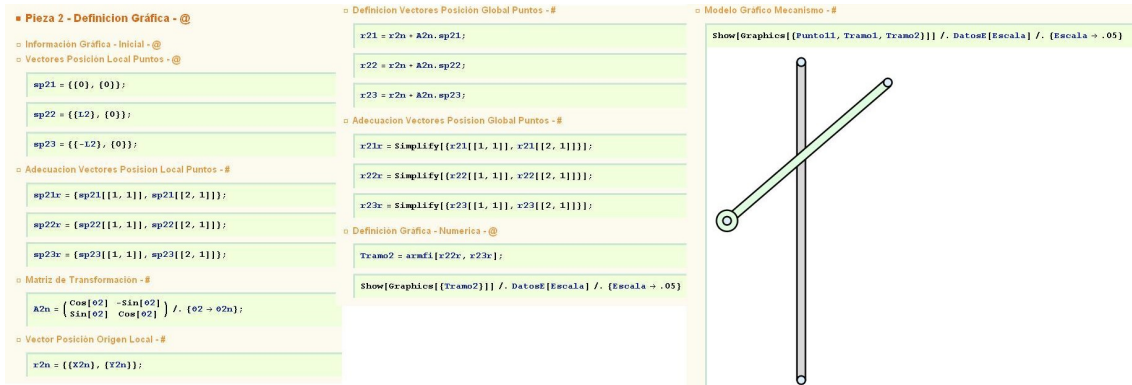


Figura 3.43: Procedimiento de creación de una pieza en Mathematica. *En este caso corresponde a la pieza 2 del mecanismo Adp-a-z-1133.*

Una vez todas las piezas están definidas y representadas, siguiendo el mismo procedimiento, se representan en una misma función todas juntas, y si no ha habido ningún error, se completa el modelo gráfico del mecanismo completo.

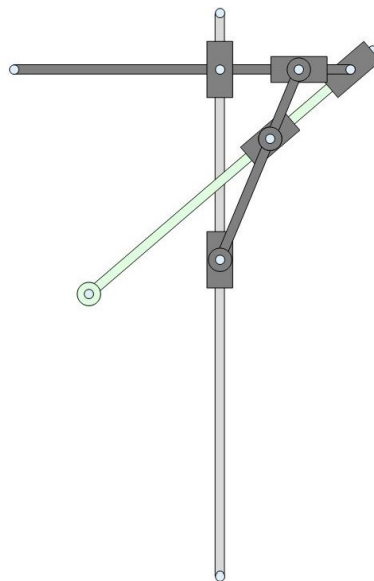


Figura 3.44: Mecanismo Adp-a-z-1133 modelado en Mathematica.

Después de obtener el modelo gráfico, ya se pueden introducir los pares cinemáticos, para ello es necesario asignar un valor numérico a cada dimensión de cada pieza. Para ello, cada cota es multiplicada por el parámetro Escala con valor 1.

```
1. Datos: Asignacion Valores Numericos Pаметros y Escala - @
DatosE[Escala]
Escala = 1;
L1 = L1 /. DatosE[Escala]; L2 = L2 /. DatosE[Escala]; L3 = L3 /. DatosE[Escala]; L4 = L4 /. DatosE[Escala]; L6 = L6 /. DatosE[Escala];
a = a /. DatosE[Escala];
L51 = L51 /. DatosE[Escala]; L52 = L52 /. DatosE[Escala]; L8 = L8 /. DatosE[Escala];
b = b /. DatosE[Escala];
```

Figura 3.45: Imagen de la aplicación de los valores numéricos para la pieza 2 del mecanismo a-z-1133

Con el comando Body el programa asociará los puntos a cada una de las piezas, así como las coordenadas, este comando será necesario ejecutarlo para cada una de las piezas.

```
■ Pieza 2 - Impulsor
GraphicsGrid[Transpose[{{Show[p2]}, {Show[p2p]}}], ImageSize -> 850]
sp21r
{0, 0}
sp22r
{20., 0}
sp23r
{-20., 0}
Piezas[pieza2] = Body[pieza2, PointList -> {sp21r, sp22r, sp23r},
InitialGuess -> {{X2n, Y2n}, 02n}];
X2n
15.19
Y2n
13.02
02n * 180 / N[Pi]
40.6
```

Figura 3.46: Imagen de la aplicación del comando Body

Terminada esta parte, se procede a definir cada uno de los pares cinemáticos. Como Mathematica entiende el mecanismo en 2D solo habrá que definir pares de rotación y traslación, con la excepción del par piñón y cremallera que será introducido más adelante.

```

Definición: Pares Cinematicos - @
ParesC[1] = Revolute2[1, Point[pieza1, 1], Point[pieza2, 3]];
ParesC[2] = Revolute2[2, Point[pieza3, 1], Point[pieza7, 4]];
ParesC[3] = Revolute2[3, Point[pieza7, 2], Point[pieza8, 1]];
ParesC[4] = Revolute2[4, Point[pieza4, 1], Point[pieza5, 5]];
ParesC[5] = Revolute2[5, Point[pieza6, 1], Point[pieza7, 3]];
ParesC[6] = Translate2[6, Line[pieza1, 2, 3], Line[pieza5, 1, 2]];
ParesC[7] = Translate2[7, Line[pieza1, 2, 3], Line[pieza3, 1, 2]];
ParesC[8] = Translate2[8, Line[pieza2, 3, 2], Line[pieza8, 1, 2]];
ParesC[9] = Translate2[9, Line[pieza2, 3, 2], Line[pieza4, 1, 2]];
ParesC[10] = Translate2[10, Line[pieza5, 1, 5], Line[pieza6, 1, 2]];

Definición: Par de Conducción - Motor - @
motor = Import["adp_a-z-1133_2021-motion-mecha-motion.jpg"];
Show[motor, ImageSize -> 850];

o2n = 100 / # [Pi];
o2n = -80 * # [Pi] / 180;
angulo[?] = o2n * o2n * T;
ParesC[11] = RotationLock[11, pieza2, angulo[T]];

Validación - #
SetConstraints[ParesC[1], ParesC[2], ParesC[3], ParesC[4], ParesC[5], ParesC[6], ParesC[7], ParesC[8], ParesC[9], ParesC[10], ParesC[11]]
    
```

Figura 3.47: Imagen de la aplicación de los pares cinemáticos y del par motor del mecanismo Adp-a-z-1133 en Mathematica.

Para definir un par **Revolute2** hay que introducir entre qué puntos y de qué piezas son. Por otra parte, para definir un par **Translate2**, hay que introducir las dos piezas y dos rectas definidas por dos puntos de cada pieza.

Para concluir, será necesario definir el par motriz, usualmente entre las piezas 1 y 2, como en este ejemplo. Para ello se define la velocidad angular utilizada en COSMOS en el apartado anterior, pasándola a radianes para crear la variable **ángulo**, en función del tiempo que relacione la velocidad introducida con el parámetro del ángulo de la pieza 2. Por último, utilizando el comando **RotationLock** se define el último par, en este caso el 11, que realciona la pieza motriz, la 2 para este ejemplo, con la variable **ángulo(T)**.

Para poder obtener la curva del mecanismo se procede a simular el movimiento. Con el comando **SolveMech**, con el que se pueden obtener un número finito de instantes para 1 segundo y asignarlo a una variable.

Para este ejemplo y los mecanismos analizados en el presente trabajo se han obtenido 50 instantes entre 0 y 1 segundo.

```

Solucion - SolveMech - #
solucion = SolveMech[{0.0, 1}, 50, Solution -> Acceleration];
Dimensions[solucion]
solucion // MatrixForm
    
```

Figura 3.48: Imagen de la aplicación del comando **SolveMech**

Con la solución ya se puede representar en una gráfica la posición del punto trazador para cada uno de los instantes de tiempo, es decir, la trayectoria del punto trazador.

Para poder comparar la trayectoria obtenida con la trayectoria de COSMOS se importa el documento CSV que se ha exportado previamente. Tras adecuarlo en un archivo de texto se ejecuta en Mathematica y se representa en una gráfica igual que la obtenida en Mathematica.

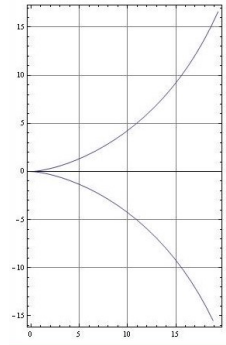


Figura 3.49: Imagen de la trayectoria del mecanismo a-z-1133 obtenida en Mathematica

De esta forma se incluyen en nuestro documento de Mathematica las dos graficas de las dos trayectorias, una calculada con SolidWorks COSMOS MOTION, y otra calculada con Mathematica. Se comparan una respecto a la otra y se certifica que ambas coinciden prácticamente como se muestra en la ilustración de abajo. Cómo se puede observar, si se ha modelado correctamente ambas trayectorias coinciden y no hay diferencia alguna entre ellas.

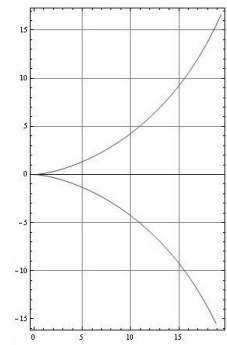
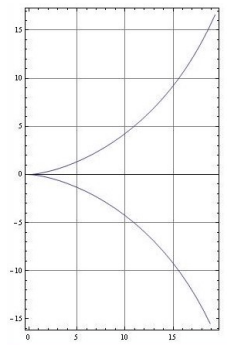


Figura 3.50: Comparación de la trayectoria obtenida en Mathematica con la obtenida en COSMOS

Como última parte de esta fase se representa gráficamente el mecanismo en la misma posición que la representada en los libros del profesor Artobolevsky.

Para conocer la posición se utilizó la herramienta "Show Simulation Panel" en COSMOS para saber en que instante está el mecanismo cuando es idéntico al diagrama de Artobolevsky.

Después se define la variable **Posicion** con el valor del instante, en este caso 12, y en el vector **Coor** definido al principio, se incluye el valor de **solucion** sacada anteriormente con el comando SolveMech.

```
Dimensions[solucion]
x2 /. solucion[[12, 2]]
solucion // MatrixForm
posicion = 12;
Coor = {{x2, x2 /. solucion[[posicion, 2]]}, {y2, y2 /. solucion[[posicion, 3]]}, {o2, o2 /. solucion[[posicion, 4]]}, {x3, x3 /. solucion[[posicion, 5]]}, {y3, y3 /. solucion[[posicion, 6]]},
{o3, o3 /. solucion[[posicion, 7]]}, {x4, x4 /. solucion[[posicion, 8]]}, {y4, y4 /. solucion[[posicion, 9]]}, {o4, o4 /. solucion[[posicion, 10]]}, {x5, x5 /. solucion[[posicion, 11]]},
{y5, y5 /. solucion[[posicion, 12]]}, {o5, o5 /. solucion[[posicion, 13]]}, {x6, x6 /. solucion[[posicion, 14]]}, {y6, y6 /. solucion[[posicion, 15]]}, {o6, o6 /. solucion[[posicion, 16]]},
{x7, x7 /. solucion[[posicion, 17]]}, {y7, y7 /. solucion[[posicion, 18]]}, {o7, o7 /. solucion[[posicion, 19]]}, {x8, x8 /. solucion[[posicion, 20]]}, {y8, y8 /. solucion[[posicion, 21]]},
{o8, o8 /. solucion[[posicion, 22]]}};
```

Figura 3.51: Vector Coor con las coordenadas de la posición 12

Se vuelven a definir las piezas con el mismo procedimiento explicado anteriormente, pero esta vez las piezas se encuentran en la posición 12.

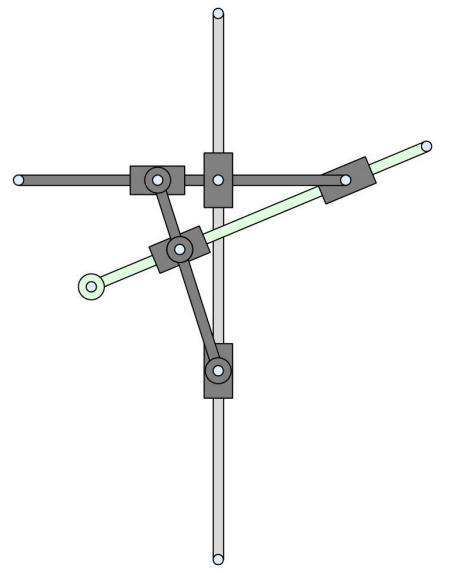


Figura 3.52: Imagen del mecanismo a-z-1133 en una posición similar al diagrama de Artobolevsky

3.3.3. Adp a-z-0701

En este subapartado se explicará la simulación cinemática en Mathematica del mecanismo Adp-a-z-0701. El documento Mathematica fue parcialmente realizado por el tutor y proporcionado al alumno, siendo tarea del alumno comprobar que el modelado se encontraba correctamente definido y calcular las curvas de la trayectoria, velocidad y aceleración para poder compararlas con las curvas exportadas de COSMOS.

Este mecanismo cuenta con una gran cantidad de pares cinemáticos, 10 concretamente, siendo todos ellos de rotación, ya que como se ha explicado antes, Mathematica trabaja con mecanismos en un plano 2D.

```
ParesC[10] = Revolute2[10, Point[pieza8, 2], Point[pieza4, 2]];
ParesC[9] = Revolute2[9, Point[pieza7, 2], Point[pieza8, 3]];
ParesC[8] = Revolute2[8, Point[pieza6, 2], Point[pieza7, 3]];
ParesC[7] = Revolute2[7, Point[pieza1, 2], Point[pieza6, 3]];
ParesC[6] = Revolute2[6, Point[pieza5, 2], Point[pieza6, 2]];
ParesC[5] = Revolute2[5, Point[pieza2, 2], Point[pieza5, 3]];
ParesC[4] = Revolute2[4, Point[pieza1, 2], Point[pieza4, 3]];
ParesC[3] = Revolute2[3, Point[pieza3, 2], Point[pieza4, 2]];
ParesC[2] = Revolute2[2, Point[pieza2, 2], Point[pieza3, 3]];
ParesC[1] = Revolute2[1, Point[pieza1, 1], Point[pieza2, 3]];
```

Figura 3.56: Definición de los pares cinemáticos del mecanismo a-z-0701 en Mathematica

Ahora ya es posible calcular la solución entre 0 y 1 segundo para, en este caso, 200 instantes.

```
solucion = SolveMech[{0.0, 1.0}, 200, Solution -> Acceleration];
Dimensions[solucion]
{200, 64}
```

Figura 3.57: Comando para realizar el cálculo entre 0 y 1 segundo de 200 instantes distintos del mecanismo a-z-0701

A continuación, ya se puede calcular la curva de la trayectoria en mathematica, pero como es un proceso que se repite en la siguiente fase, con el objetivo de no ser redundantes, se mostrará más adelante.

Para terminar, faltaría mostrar el mecanismo en una posición semejante a la del diagrama de Artobolevsky, pero como ya es bastante similar se definirá en la posición inicial del mecanismo.

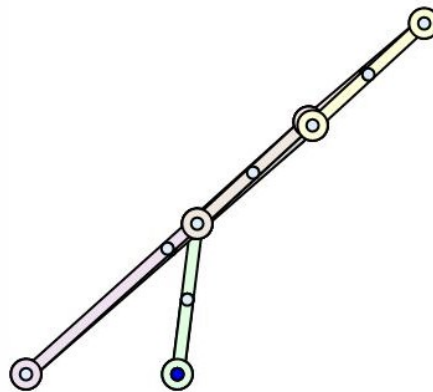


Figura 3.58: Imagen del mecanismo a-z-0701 en su posición inicial en Mathematica

3.3.4. Adp a-e-0188

Una vez se ha definido el directorio adecuado utilizando el comando de la imagen 3.39 se procede a realizar el modelado en Mathematica del mecanismo, para ello el primer paso será definir el vector Coor explicado en la fase de preparación.

```
Coor = {{x2, 0.0}, {y2, 13.0}, {e2, 0.0}, {x3, 0.0}, {y3, 26.0}, {e3, 180.0}, {x4, 0.0}, {y4, 0.0}, {e4, 0.0}, {x5, 0.0}, {y5, 0.0}, {e5, 90.0}, {x6, 0.0}, {y6, 0.0}, {e6, 0.0}, {x7, 0.0}, {y7, 0.0}, {e7, 90.0}};
```

```
Coor >> Coor
```

Figura 3.59: Definición del vector Coor Mathematica.

Una vez obtenido el vector Coor se han de definir el vector DatosE y el vector Datos para poder aplicar la escala si es necesario.

```
Clear[Escala, DatosE];
```

```
DatosE[Escala_] = {L11 -> 108.68 * Escala, L12 -> 13.0 * Escala, L13 -> 180.0 * Escala, L14 -> (201.32 - 180.0) * Escala, L21 -> 13.0 * Escala, L22 -> 3.0 * Escala, L3 -> 26.0 * Escala, D3 -> 52.0 * Escala, L4 -> 3.0 * Escala, L51 -> 60.0 * Escala, L52 -> 120.0 * Escala, L6 -> 180.0 * Escala, L7 -> 3.0 * Escala};
```

```
DatosE[Escala] >> DatosE
```

```
Datos = {L11 -> a, L12 ->  $\frac{1}{2} * r$ , L13 ->  $\frac{90}{13} * r$ , L14 ->  $\frac{41}{209} * a$ , L21 ->  $\frac{1}{2} * r$ , L22 ->  $\frac{3}{26} * r$ , L3 ->  $1 * r$ , D3 ->  $2 * r$ , L4 ->  $\frac{3}{26} * r$ , L51 ->  $\frac{30}{13} * r$ , L52 ->  $\frac{60}{13} * r$ , L6 ->  $\frac{90}{13} * r$ , L7 ->  $\frac{3}{26} * r$ };
```

```
Datos /. {a -> 108.68, r -> 26.0}
```

```
DatosEm[Escala_] = {a -> 108.68 * Escala, r -> 26.0 * Escala};
```

Figura 3.60: Definición de los DatosE y DatosEm.

Con esta información ya se puede definir cada pieza en función de las coordenadas globales y representar el mecanismo en Mathematica siguiendo los mismos pasos realizados en la fase de preparación.

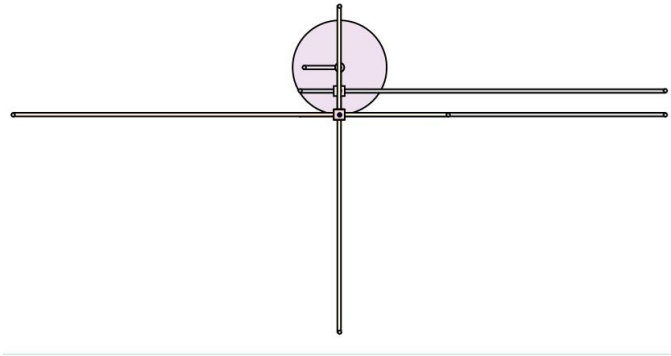


Figura 3.61: Modelado del mecanismo a-e-0188 en Mathematica

El siguiente paso es definir tanto los pares cinemáticos como el par motor. Destacar que el par cinemático piñón y cremallera se define con el comando RackandPinion1 de Mathematica.

```
■ Definición: Pares Cinematicos
ParesC[1] = Translate2[1, Line[pieza1, 3, 4], Line[pieza2, 4, 5]];
ParesC[2] = Revolute2[2, Point[pieza2, 2], Point[pieza3, 1]];
ParesC[3] = RackAndPinion1[3, Point[pieza3, 1], D3/2, Line[pieza1, 1, 7], Pi * D3/2];
■ Definición: Par de Conducción - Motor
■ Definición: Pares Cinematicos
ParesC[5] = Revolute2[5, Point[pieza4, 1], Point[pieza2, 3]];
ParesC[6] = Revolute2[6, Point[pieza5, 1], Point[pieza3, 2]];
ParesC[7] = Translate2[7, Line[pieza5, 1, 3], Line[pieza4, 3, 2]];
ParesC[8] = Revolute2[8, Point[pieza1, 2], Point[pieza6, 1]];
ParesC[9] = Translate2[9, Line[pieza5, 1, 2], Line[pieza7, 1, 2]];
ParesC[10] = Translate2[10, Line[pieza6, 1, 2], Line[pieza7, 5, 4]];
```

Figura 3.62: Definición de los pares cinemáticos del mecanismo a-e-0188

Para definir el par motor, se ha de partir de la posición inicial X_{2o} y sumarle la distancia recorrida por la pieza 2 hasta la posición final, que debe coincidir con la distancia determinada en SolidWorks. La posición inicial no puede ser 0 puesto que es una posición única del mecanismo y cambia la disposición de todas las piezas.

```
X2o = 0.000001;  
v2n = 163.4;  
Distancia[T_] = (X2o + v2n * T)  
1. × 10-6 + 163.4 T  
  
ParesC[4] = RelativeX1[4, Point[pieza2, 2], distancia[T]];
```

Figura 3.63: Definición del par motor del mecanismo a-e-0188.

Cabe destacar que cuando la coordenada independiente no es un ángulo, se ha de crear la variable **distancia[T]** y para definir el par motor en vez de utilizar el comando **RotationLock** se ha de utilizar el comando **RelativeX**.

Ahora ya se puede calcular la solución entre 0 y 1 segundo para, en este caso, 100 instantes.

```
solucion = SolveMech[{0, 1.0}, 100]
```

Figura 3.64: Comando para realizar el cálculo entre 0 y 1 segundo de 100 instantes distintos del mecanismo a-e-0188

Por último se va a definir el mecanismo para una posición distinta a la inicial, que se parezca a la posición representada en el diagrama de Artobolevsky, para este caso es la posición 40 y después de redefinir las coordenadas para esa posición el mecanismo queda de la siguiente forma:

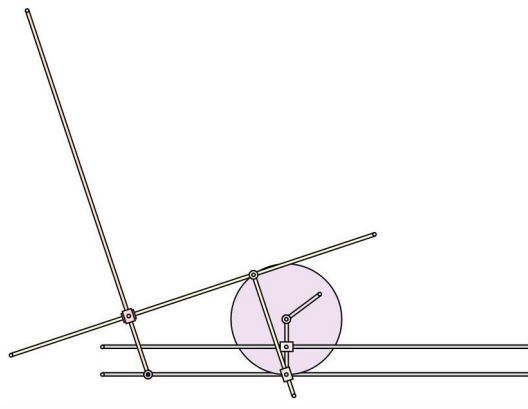


Figura 3.65: Mecanismo a-e-0188 en su posición 40

3.3.5. Adp a-9-1771

Una vez se ha definido el directorio adecuado con el comando de la imagen 3.39 se procede a realizar el modelado en Mathematica del mecanismo, como en los mecanismos previos, el primer paso es definir el vector Coor con las posiciones de los ejes locales respecto al eje global.

```
Coor = {{(X2, 0.0), (Y2, 6.0), (o2, 90.0), (X3, 0.0), (Y3, 12.0), (o3, 90.0), (X4, 6.364), (Y4, 6.364), (o4, 45.0), (X5, 3.0), (Y5, 3.0), (o5, 315.00), (X6, 0.0), (Y6, 18.0),
(o6, 45.0), (X7, 8.142), (Y7, -2.142), (o7, 135.00), (X8, 12.00), (Y8, -6.0), (o8, 315.0), (X9, -7.347), (Y9, 6.153), (o9, 257.03), (X10, -2.847), (Y10, 1.653), (o10, 12.97),
(X11, 0.306), (Y11, -8.694), (o11, 12.97)}};

Coor >> Coor

Dimensions[Coor]

{30, 2}
```

Figura 3.66: Definición del vector Coor del a-9-1771 en Mathematica.

Una vez obtenido el vector Coor se han de definir el vector DatosE y el vector Datos para poder aplicar la escala si es necesario.

```
Clear[Escala, DatosE];

DatosE[Escala_] = {D0 -> 38 * Escala, D3 -> 28 * Escala, L2 -> 6 * Escala, L3 -> 6 * Escala, L4 -> 9 * Escala, L5 -> 3 * Escala, L6 -> 3 * Escala, L71 -> 20 * Escala, L72 -> 21 * Escala, L8 -> 3 * Escala,
L9 -> 6 * Escala, L10 -> 6 * Escala, L11 -> 12 * Escala};

DatosE[Escala] >> DatosE

Datos = {D0 ->  $\frac{19}{3} * x$ , D3 ->  $\frac{14}{3} * x$ , L2 ->  $1 * x$ , L3 ->  $1 * x$ , L4 ->  $\frac{3}{2} * x$ , L5 ->  $\frac{1}{2} * x$ , L6 ->  $\frac{1}{2} * x$ , L71 ->  $\frac{10}{3} * x$ , L72 ->  $\frac{7}{2} * x$ , L8 ->  $\frac{1}{2} * x$ , L9 ->  $1 * x$ , L10 ->  $1 * x$ , L11 ->  $2 * x$ };

DatosEm[Escala_] = {x -> 6 * Escala};

Datos >> Datos

DatosEm[Escala] >> DatosEm
```

Figura 3.67: Definición de los DatosE y DatosEm del a-z.1771.

Con todo esto, siguiendo los pasos explicados previamente ya se puede representar el mecanismo en Mathematica, teniendo que definir previamente las piezas en función del eje global del mecanismo.

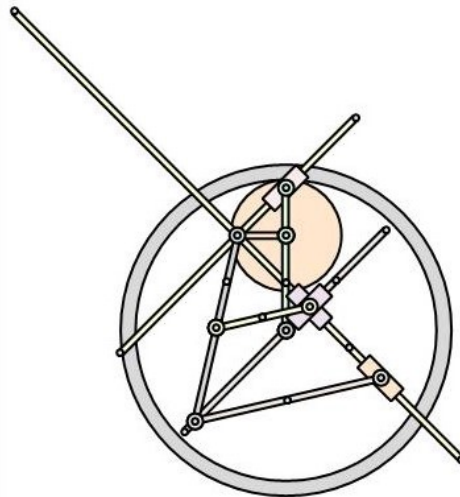


Figura 3.68: Modelado en Mathematica del a-z-1771

El siguiente paso es definir tanto los pares cinemáticos como el par motor. Destacar que el par cinemático piñón y cremallera se define con el comando RackandPinion1 de Mathematica.

```

ParesC[1] = Revolute2[1, Point[pieza1, 1], Point[pieza2, 4]];
ParesC[2] = Revolute2[2, Point[pieza2, 2], Point[pieza3, 1]];
ParesC[3] = TwoGears1[3, Point[pieza1, 1], D0 / 2, Point[pieza3, 1], D3 / 2, -D0 / 2 * 90 * N[Pi] / 180 - D3 / 2 * 0 * N[Pi] / 180];
ParesC[3] = Constraint[3, 0 == X3 Cos[7/33 (π - 2 θ3)] + Y3 Sin[7/33 (π - 2 θ3)];
ParesC[4] = Revolute2[4, Point[pieza1, 1], Point[pieza4, 3]];
ParesC[5] = Translate2[5, Line[pieza4, 1, 3], Line[pieza5, 4, 5]];
ParesC[6] = Translate2[6, Line[pieza5, 1, 2], Line[pieza7, 2, 1]];
ParesC[7] = Translate2[7, Line[pieza6, 1, 2], Line[pieza7, 2, 6]];
ParesC[8] = Revolute2[8, Point[pieza2, 3], Point[pieza6, 1]];
ParesC[9] = Revolute2[9, Point[pieza3, 2], Point[pieza7, 2]];
ParesC[10] = Revolute2[10, Point[pieza7, 2], Point[pieza9, 4]];
ParesC[11] = Revolute2[11, Point[pieza9, 2], Point[pieza10, 3]];
ParesC[12] = Revolute2[12, Point[pieza5, 1], Point[pieza10, 2]];
ParesC[13] = Revolute2[13, Point[pieza9, 3], Point[pieza11, 3]];
ParesC[14] = Revolute2[14, Point[pieza8, 1], Point[pieza11, 2]];
ParesC[15] = Translate2[15, Line[pieza7, 1, 2], Line[pieza8, 2, 1]];

```

Figura 3.69: Definición de los pares cinemáticos del mecanismo a-e-0188

Cabe destacar el par número 3 que, utilizando el comando `TwoGears` se define el par engranaje interior entre las dos ruedas dentadas.

Para definir el par motor, se ha de utilizar el valor en negativo, ya que en Mathematica los giros en sentido horario son negativos y en sentido antihorario positivos.

```
θ2n * 180 / N[Pi]
90.

ω2n = -360 * N[Pi] / 180;

angulo[ϕ_] = θ2n + ω2n * T;

ParesC[16] = RotationLock1[16, pieza2, angulo[T]];
```

Figura 3.70: Definición del par motor del mecanismo a-z-1771.

Ahora ya se puede calcular la solución entre 0 y 1 segundo para, en este caso, 50 instantes.

```
solucion = SolveMech[{0.0, 1}, 50, Solution -> Acceleration];

Dimensions[solucion]

{50, 91}

solucion // MatrixForm
```

Figura 3.71: Comando para realizar el cálculo entre 0 y 1 segundo de 100 instantes distintos del mecanismo a-z-1771

Por último se va a definir el mecanismo para una posición distinta a la inicial, que se parezca a la posición representada en el diagrama de Artobolevsky, como en este caso la primera posición representada en Mathematica ya se asemeja a la del diagrama de Artobolevsky se ha escogido la posición 10 y después de redefinir las coordenadas para esa posición el mecanismo queda de la siguiente forma:

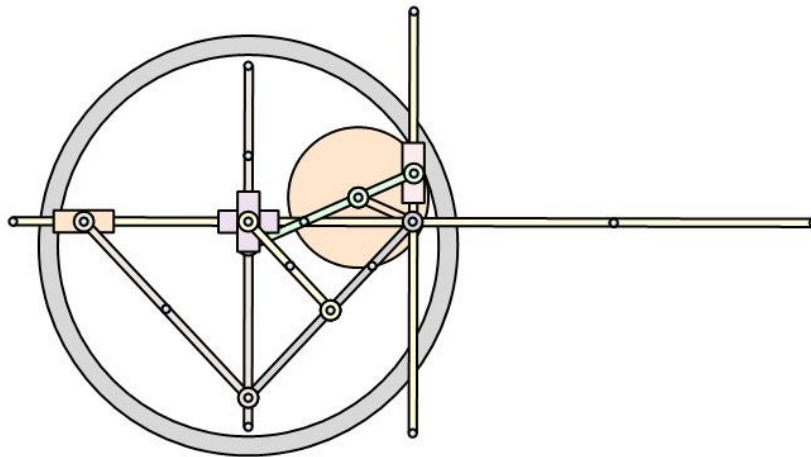


Figura 3.72: Mecanismo a-z-1771 en su posición 10

3.4. Análisis Cinemático Simbólico en Mathematica

1a Parte: Creación Modelo Gráfico Mecanismo - Posición Inicial
1. Datos: Directorio - Descripción - Diagrama Cinemático - Diagrama de Puntos
2. Datos: Modelo Cinemático Numérico - Solidworks - 1 Forma - Posición Inicial
3. Definición: Modelo Gráfico Piezas - 1 Forma - Posición Inicial
4. Resultado: Modelo Gráfico Mecanismo - Solidworks - 1 Forma - Posición Inicial
2a Parte: Modelo Cinemático en "Mechanica" - Simbólico
1. Datos: Asignación Valores Numéricos Parámetros y Escala
2. Definición: Piezas
3. Definición: Pares Cinemáticos
4. Comprobación - CheckSystem - False
3a Parte: Planteamiento Modelo Cinemático - "Mathematica"
1. Datos: Coordenadas Generalizadas y Ecuaciones de Restricción
2. Desarrollo: Ecuaciones de Restricción - Solución Simbólica
3. Resultados: Coordenadas Generalizadas - Solución Simbólica
4. Resultados: Trayectoria Punto Trazador - Comparación "Mathematica" y "Cosmos"
5. Resultados VELOCIDADES GENERALIZADAS : Solución simbólica
6. Resultados ACELERACIONES GENERALIZADAS : Solución simbólica comparación

Figura 3.73: Apartados del documento de Mathematica

3.4.1. Procedimiento

En el siguiente apartado se realizará un análisis simbólico utilizando el programa Mathematica. Con los datos del apartado anterior se obtendrá un sistema de ecuaciones e incógnitas relacionadas con las piezas del mecanismo.

El objetivo es resolver las ecuaciones para que cada una de las coordenadas se pueda definir en función del ángulo de la pieza motriz, es decir la 2.

Como ya se ha explicado previamente, antes de abordar el análisis de los mecanismos estudiados en este trabajo, se ha tenido que trabajar con varios mecanismos, de los cuales se va a seguir utilizando el a-z-1133 para explicar esta fase.

Aún así, debido a la complejidad de los mecanismos de este proyecto, la solución de las ecuaciones de restricción han sido resueltas con la ayuda del tutor, utilizando un algoritmo desarrollado por él que, con los datos previamente obtenidos, proporciona las soluciones para cada coordenada. Una vez resuelto este paso, el resto de la fase ha sido desarrollada íntegramente por el alumno.

Dicho esto, cabe indicar que durante la fase de preparación, al trabajar con mecanismos de menos complejidad que los del presente trabajo, las ecuaciones de restricción se podían resolver sin necesidad del algoritmo, por lo se explicará, indicándolo previamente, el procedimiento llevado a cabo pese a que no se vaya a utilizar para el estudio de los mecanismos del proyecto.

3.4.2. Preparación

Se procede a mostrar el método de trabajo para el mecanismo a-z-1133. Los tres primeros apartados del documento son los mismos apartados que en la fase anterior, por lo tanto se han copiado y pegado, con la excepción de que se debe suprimir la asignación a variables de los valores numéricos de los parametros y se debe suprimir la definición de **ángulo**, ya que se pretende utilizar Θ_2 como coordenada independiente.

En Mathematica, para suprimir algún comando o línea de input se considera mejor opción convertirla en un comentario, por si es necesario recuperar dicho comando para más adelante, para realizar un comentario basta con añadir (* al comienzo del comando y *) al final.

*(*Esto sería un comentario en Mathematica*)*

Una vez realizado este paso, se ha de crear una matriz que incluya las coordenadas globales de cada pieza y las ecuaciones asociadas a las restricciones del movimiento del mecanismo.

Se obtienen las coordenadas mediante el comando **Location** y las ecuaciones con **Constraints**. De esta forma se almacenan los datos en los vectores Cgs y Eqs. Finalmente se incluyen en una matriz denomina sistema.

```

Sistema // MatrixForm
{
  1 X2          0 == -X2 + L2 Cos[θ2]
  2 Y2          0 == -Y2 + L2 Sin[θ2]
  3 θ2          0 == X3 - X7 +  $\frac{1}{2}$  a Cos[θ7]
  4 X3          0 == Y3 - Y7 +  $\frac{1}{2}$  a Sin[θ7]
  5 Y3          0 == X7 - X8 +  $\frac{1}{2}$  a Cos[θ7]
  6 θ3          0 == Y7 - Y8 +  $\frac{1}{2}$  a Sin[θ7]
  7 X4          0 == X4 - X5 - a Sin[θ5]
  8 Y4          0 == Y4 - Y5 + a Cos[θ5]
  9 θ4          0 == X6 - X7 -  $\frac{1}{2}$  (a + 2 b) Cos[θ7]
 10 X5          0 == Y6 - Y7 -  $\frac{1}{2}$  (a + 2 b) Sin[θ7]
 11 Y5          0 == -L1 L51 Cos[θ5]
 12 θ5          0 == -L51 Y5 Cos[θ5] + L51 (-a + X5) Sin[θ5]
 13 X6          0 == -L1 L3 Cos[θ3]
 14 Y6          0 == -L3 Y3 Cos[θ3] + L3 (-a + X3) Sin[θ3]
 15 θ6          0 == -2 L2 L8 Sin[θ2 - θ8]
 16 X7 0 == L8 Cos[θ8] (Y2 - Y8 - L2 Sin[θ2]) + L8 (-X2 + X8 + L2 Cos[θ2]) Sin[θ8]
 17 Y7 0 == -2 L2 L4 Sin[θ2 - θ4]
 18 θ7 0 == L4 Cos[θ4] (Y2 - Y4 - L2 Sin[θ2]) + L4 (-X2 + X4 + L2 Cos[θ2]) Sin[θ4]
 19 X8          0 == a L6 Cos[θ5 - θ6]
 20 Y8          0 == L6 ((Y5 - Y6) Cos[θ6] + (-X5 + X6) Sin[θ6])
 21 θ8          0 == θ2 - angulo[T]
}

```

Figura 3.74: Matriz con las ecuaciones a resolver del mecanismo a-z-1133

Dicha matriz se exporta en un documento llamado System que será enviado al tutor cuyo algoritmo resolverá y aportará las soluciones de las coordenadas en función de θ_2 .

Antes de importar las soluciones proporcionadas por el tutor es necesario definir una serie de reglas trigonométricas que pueden ser de utilidad en etapas posteriores, como son el seno y coseno del ángulo medio.

```

arcTan[x_, y_] = If[x > 0, If[y >= 0, ArcTan[x, y], ArcTan[x, y] + 2 * N[Pi]],
               If[y < 0, If[x != 0, ArcTan[x, y] + 2 * N[Pi], 3 * N[Pi] / 2],
               If[x != 0, ArcTan[x, y], N[Pi] / 2]];

cos[Th_] = (1 - Tan[Th / 2]^2) / (1 + Tan[Th / 2]^2)


$$\frac{1 - \tan\left[\frac{\text{Th}}{2}\right]^2}{1 + \tan\left[\frac{\text{Th}}{2}\right]^2}$$


sin[Th_] = 2 * Tan[Th / 2] / (1 + Tan[Th / 2]^2)


$$\frac{2 \tan\left[\frac{\text{Th}}{2}\right]}{1 + \tan\left[\frac{\text{Th}}{2}\right]^2}$$


```

Figura 3.75: Definición de las reglas trigonométricas utilizadas en Mathematica

- Como resolver las ecuaciones de restricción sin el uso del algoritmo

Esta etapa del proceso de ha realizado durante la fase de preparación y simulación de otros mecanismos, como el a-z-1133, pero no ha sido necesaria para los trabajos que se estudian en este trabajo.

Pese a todo, se va a explicar el procedimiento, puesto que puede facilitar y complementar el contenido del trabajo.

Para resolver cada una de las coordenadas en función de Θ_2 se pueden emplear dos métodos, uno directo y otro indirecto, siendo siempre más conveniente utilizar el método directo al ser más simple y fácil.

En el método directo se resuelve una coordenada en cada ecuación, dando el resultado en función de Θ_2 o cualquier otra coordenada. Una vez resuelta, se elimina del sistema tanto la ecuación como la coordenada.

El primer paso es resolver la coordenada independiente Θ_2 . Localizando en la matriz la fila de la coordenada y la ecuación que la contenga. Como se puede observar en la imagen 3.74, la ecuación de la coordenada independiente se encuentra en la fila número 21 y su solución es **angulo[T]**

Una vez resuelta la coordenada independiente, se han de resolver las coordenadas con ecuaciones que únicamente están en función de la coordenada independiente Θ_2 , como es el caso de la coordenada X2.

A continuación se resuelve la ecuación mediante el comando **Solve**, y se asigna una nueva variable X2s

Una vez resuelta, tanto la coordenada como la ecuación se sustituyen por 0 en su posición en la matriz.

Por último, se escribe la solución de cada coordenada en un fichero que se podrá recuperar en el siguiente apartado. Por ejemplo, si la coordenada resuelta ha sido X2, el fichero se ha de guardar con la denominación "X2s".

```

□ Solucion Simbolica: Coordenada de Ecuacion
Solve[Eqs[[1, 2]], Cgs[[1, 2]]]
{{X2 -> L2 Cos[θ2]}}

□ Asignacion: Solucion Simbolica para Coordenada
X2s = X2 /. Solve[Eqs[[1, 2]], Cgs[[1, 2]]][[1]]
L2 Cos[θ2]

□ Eliminacion: Coordenada y Ecuacion del Sistema
Eqs[[1, 2]] = 0; Cgs[[1, 2]] = 0;

Eqs = Simplify[Eqs /. {X2 -> X2s}];

SistemaM = Table[{k, Cgs[[k, 2]], Eqs[[k, 2]]}, {k, Dimensions[PHI][[1]]}];
SistemaM // MatrixForm
    
```

Figura 3.76: Ejemplo del proceso requerido para resolver una coordenada en Mathematica

Este es el procedimiento a seguir con cada coordenada, hasta obtener una matriz con todas las ecuaciones y coordenadas sustituidas por 0. Llega un momento en que las ecuaciones restantes de la matriz contienen más de una coordenada en la ecuación, a parte de θ_2 y para resolverlas se tiene que realizar el método indirecto nombrado previamente.

Después de haber resuelto algunas coordenadas se llega a un punto donde no quedan ecuaciones con una única coordenada, el proceso consiste en resolver una coordenada en función de la otra coordenada no independiente que aparece en la ecuación.

```

SistemaM // MatrixForm
(
  1  0      0
  2  0      0
  3  0      0
  4  0      Y7 == Y3 + 1/2 a Sin[θ7]
  5  Y3     0
  6  0      Y8 == Y7 + 1/2 a Sin[θ7]
  7  0      0
  8  0      0
  9  0      0
 10  0      Y7 + (a/2 + b) Sin[θ7] == 2 a Tan[θ2]
 11  0      0
 12  0      0
 13  0      0
 14  0      0
 15  0      0
 16  0  L8 Y8 Cos[θ2] == a L8 (1 + Cos[θ7]) Sin[θ2]
 17  Y7     0
 18  θ7     0
 19  0      0
 20  Y8     0
 21  0      0
)
    
```

Figura 3.77: Matriz de restricciones con las ecuaciones restantes en función de más de una coordenada

Por ejemplo, resolviendo la coordenada Y7 y utilizando la ecuación de la fila 10 se llega a esta solución:

```
Y7m = Y7 /. Solve[Eqs[[10, 2]], Cgs[[17, 2]]][[1]]

$$\frac{1}{2} (-a \sin[\theta_7] - 2 b \sin[\theta_7] + 4 a \tan[\theta_2])$$

```

Figura 3.78: Solución de la coordenada Y7 del mecanismo a-z-1133 en función de Θ_7 y la coordenada independiente Θ_2

Por lo tanto, ahora se debe hallar la solución de Θ_7 para poder resolver Y7.

Si se intenta utilizar el mismo método, el método directo, para solucionar Y7 se obtienen 4 soluciones de la ecuación. Por lo tanto, se debe emplear el método indirecto.

El método indirecto consiste en sustituir las funciones trigonométricas de seno y coseno utilizando la tangente del ángulo medio que se ha definido anteriormente. De esta forma en lugar de resolver con la coordenada, resolvemos con la tangente del ángulo medio de dicha coordenada, reduciendo de 4 soluciones a 2. De estas dos soluciones solo una es la correcta, y será en función de la forma de montaje del mecanismo. Para advertir cual es la solución correcta se comparan con la solución del comando SolveMech del apartado anterior para un solo instante.

```
eq100m = Eqs[[16, 2]] /. {Sin[θ7] -> sin[θ7], Cos[θ7] -> cos[θ7]}
S8  $\left( \frac{2 b \cos[\theta_2] \tan\left[\frac{\theta_7}{2}\right] + a \sin[\theta_2] \left( -1 + \frac{1 - \tan\left[\frac{\theta_7}{2}\right]^2}{1 + \tan\left[\frac{\theta_7}{2}\right]^2} \right)}{1 + \tan\left[\frac{\theta_7}{2}\right]^2} \right) = 0$ 
solucion = Solve[eq100m, Tan[θ7/2]]
{{Tan[θ7/2] -> 0}, {Tan[θ7/2] ->  $\frac{b \cot[\theta_2]}{a}$ }}
SolveMech0 = {r -> 0., X2 -> 15.185426146697615, Y2 -> 13.015484345317018, θ2 -> 0.7086036763096978, X3 -> 14., Y3 -> 3.6908530379201197, θ3 -> 1.5707963267948966, X4 -> 28., Y4 -> 23.998902510097164, θ4 -> 0.7086036763096978, X5 -> 14., Y5 -> 23.998902510097164, θ5 -> 1.5707963267948966, X6 -> 22.46068121581293, Y6 -> 23.998902510097164, θ6 -> 0., X7 -> 16.692034932304114, Y7 -> 10.152505142703724, θ7 -> 1.1760474195816164, X8 -> 19.38406986460823, Y8 -> 16.61415724748733, θ8 -> 0.7086036763096978 }
{r -> 0., X2 -> 15.1854, Y2 -> 13.0155, θ2 -> 0.708604, X3 -> 14., Y3 -> 3.69085, θ3 -> 1.5708, X4 -> 28., Y4 -> 23.9989, θ4 -> 0.708604, X5 -> 14., Y5 -> 23.9989, θ5 -> 1.5708, X6 -> 22.4607, Y6 -> 23.9989, θ6 -> 0., X7 -> 16.692, Y7 -> 10.1525, θ7 -> 1.17605, X8 -> 19.3841, Y8 -> 16.6142, θ8 -> 0.708604}
Datos[Escala]
{L1 -> 30, Escala, L2 -> 20, Escala, L3 -> 3, Escala, L4 -> 3, Escala, L51 -> 3, Escala, L52 -> 22, Escala, L6 -> 3, Escala, L8 -> 3, Escala, a -> 14, Escala, b -> 8, Escala}
solucion /. Datos[Escala] /. {Escala -> 1} /. SolveMech0
{{0.66697 -> 0}, {0.66697 -> 0.66697}}
```

Figura 3.79: Ejemplo de aplicación del método indirecto para resolver coordenadas

De esta forma se averigua que la solución para la tangente del ángulo medio que coincide con la solución del SolveMech es la primera.

Tras resolver Θ_7 se guarda en un fichero como las anteriores y también su seno y su coseno para facilitar el proceso.

Para acabar se ha de resolver la coordenada Y7, ya que ahora se conoce el valor tanto de Θ_7 como de la coordenada independiente Θ_2 .

Este proceso se ha de repetir en todas las ecuaciones que contienen más de una coordenada además de la independiente.

Finalmente, se crea una matriz con todas las coordenadas resueltas en función de la coordenada independiente $\Theta 2$

MatrixForm[Transpose[SCgs]]

$$\begin{pmatrix} X2 & L2 \text{ Cos}[\Theta 2] \\ Y2 & L2 \text{ Sin}[\Theta 2] \\ \Theta 2 & \Theta 2 \\ X3 & a \\ Y3 & \frac{2 a^2 (-b \text{ Cot}[\Theta 2] + a \text{ Tan}[\Theta 2])}{a^2 + b^2 \text{ Cot}[\Theta 2]^2} \\ \Theta 3 & \frac{\pi}{2} \\ X4 & 2 a \\ Y4 & 2 a \text{ Tan}[\Theta 2] \\ \Theta 4 & \Theta 2 \\ X5 & a \\ Y5 & 2 a \text{ Tan}[\Theta 2] \\ \Theta 5 & \frac{\pi}{2} \\ X6 & \frac{a^2 (2 a + b) - b^3 \text{ Cot}[\Theta 2]^2}{a^2 + b^2 \text{ Cot}[\Theta 2]^2} \\ Y6 & 2 a \text{ Tan}[\Theta 2] \\ \Theta 6 & 0 \\ X7 & \frac{3 a^3 + a b^2 \text{ Cot}[\Theta 2]^2}{2 a^2 + 2 b^2 \text{ Cot}[\Theta 2]^2} \\ Y7 & \frac{a^2 (-b \text{ Cot}[\Theta 2] + 2 a \text{ Tan}[\Theta 2])}{a^2 + b^2 \text{ Cot}[\Theta 2]^2} \\ \Theta 7 & 2 \text{ ArcTan}\left[\frac{b \text{ Cot}[\Theta 2]}{a}\right] \\ X8 & \frac{2 a^3}{a^2 + b^2 \text{ Cot}[\Theta 2]^2} \\ Y8 & \frac{2 a^3 \text{ Tan}[\Theta 2]}{a^2 + b^2 \text{ Cot}[\Theta 2]^2} \\ \Theta 8 & \Theta 2 \end{pmatrix}$$

Figura 3.80: Matriz con las coordenadas resueltas

FIN DE LA EXPLICACIÓN

Al tener todas las coordenadas representadas en función de $\Theta 2$, ya se puede obtener la curva de la trayectoria de los puntos trazadores de forma continua, es decir con un número finito de puntos.

El primer paso es identificar el punto trazador, para este ejemplo se encuentra en la pieza 8, punto 1. Es necesario obtener la matriz de transformación a partir de la solución angular de la pieza, $\Theta 8$. De esta forma se consigue definir las coordenadas globales del punto trazador.

Se vuelve a definir la variable ángulo[T] al ser la solución de $\Theta 2$ y se definen las coordenadas X e Y del punto trazador en función del tiempo T y se sustituye por un parámetro numérico.

```
A8s = Simplify[{{Cos[θ8] -Sin[θ8] } / {θ8 → θ8s}}
A8s // MatrixForm
r8s = {{X8s}, {Y8s}};
A8s.sp81
r81s = r8s + A8s.sp81
Xt = r81s[[1, 1]]
Yt = r81s[[2, 1]]
Xtr[_] = Xt /. DatosE[Escala] /. {θ2 -> angulo[T]} /. {Escala -> 1}
Ytr[_] = Yt /. DatosE[Escala] /. {θ2 -> angulo[T]} /. {Escala -> 1}
```

Figura 3.81: Proceso a realizar para conseguir la curva de la trayectoria en Mathematica

Después de esto, se obtiene la curva realizada en Mathematica y se observa que coincide con la curva obtenida en COSMOS mostrada en la figura 3.50

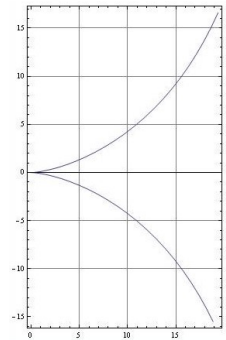
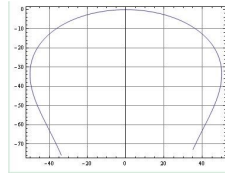


Figura 3.82: Curva de la trayectoria obtenida en Mathematica con las coordenadas resueltas en función de la coordenada independiente

También es posible obtener las curvas tanto de la velocidad como de la aceleración del punto trazador, el proceso es el mismo que el usado para definir la curva de la trayectoria pero para el caso de la velocidad, se ha de usar la derivada de la coordenada independiente y para el caso de la aceleración se trabaja con la segunda derivada de la coordenada independiente.

$$dX_{tr}[T] = dX_t / \text{DatosE}[\text{Escala}] / \{\theta_2 \rightarrow \text{angulo}[T]\} / \{d\theta_2 \rightarrow d\theta_2s\} / \{\text{Escala} \rightarrow 1\}$$

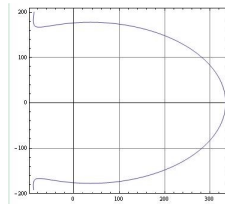
$$dY_{tr}[T] = dY_t / \text{DatosE}[\text{Escala}] / \{\theta_2 \rightarrow \text{angulo}[T]\} / \{d\theta_2 \rightarrow d\theta_2s\} / \{\text{Escala} \rightarrow 1\}$$



(a) Curva de la velocidad del punto trazador

$$ddX_{tr}[T] = ddX_t / \text{DatosE}[\text{Escala}] / \{\theta_2 \rightarrow \text{angulo}[T]\} / \{d\theta_2 \rightarrow d\theta_2s\} / \{dd\theta_2 \rightarrow dd\theta_2s\} / \{\text{Escala} \rightarrow 1\}$$

$$ddY_{tr}[T] = ddY_t / \text{DatosE}[\text{Escala}] / \{\theta_2 \rightarrow \text{angulo}[T]\} / \{d\theta_2 \rightarrow d\theta_2s\} / \{dd\theta_2 \rightarrow dd\theta_2s\} / \{\text{Escala} \rightarrow 1\}$$



(b) Curva de la aceleración del punto trazador

Figura 3.83: Curvas de la velocidad y aceleración del punto trazador del mecanismo a-z-1133

3.4.3. Adp a-z-0701

Continuando con el mecanismo a-z-0701, se ha de conseguir las ecuaciones de restricción e importarlas en forma de matriz a un documento llamado "System" que se le entregará al profesor para que resuelva el sistema y devuelva la matriz con las coordenadas en función de la coordenada independiente, en este caso θ_2 .

Eqs // MatrixForm

$$\begin{aligned} 1 & 0 = -X_2 + a \cos[\theta_2] \\ 2 & 0 = -Y_2 + a \sin[\theta_2] \\ 3 & 0 = X_2 - X_3 + a (\cos[\theta_2] + \cos[\theta_3]) \\ 4 & 0 = Y_2 - Y_3 + a (\sin[\theta_2] + \sin[\theta_3]) \\ 5 & 0 = X_3 - X_4 + a \cos[\theta_3] - \frac{a}{2} \cos[\theta_4] \\ 6 & 0 = Y_3 - Y_4 + a \sin[\theta_3] - \frac{a}{2} \sin[\theta_4] \\ 7 & 0 = -2a - X_4 + \frac{a}{2} \cos[\theta_4] \\ 8 & 0 = -Y_4 + \frac{a}{2} \sin[\theta_4] \\ 9 & 0 = X_2 - X_5 + a (\cos[\theta_2] + \cos[\theta_5]) \\ 10 & 0 = Y_2 - Y_5 + a (\sin[\theta_2] + \sin[\theta_5]) \\ 11 & 0 = X_5 - X_6 + a \cos[\theta_5] - \frac{a}{2} \cos[\theta_6] \\ 12 & 0 = Y_5 - Y_6 + a \sin[\theta_5] - \frac{a}{2} \sin[\theta_6] \\ 13 & 0 = -2a - X_6 + \frac{a}{2} \cos[\theta_6] \\ 14 & 0 = -Y_6 + \frac{a}{2} \sin[\theta_6] \\ 15 & 0 = X_6 - X_7 + \frac{a}{2} \cos[\theta_6] + a \cos[\theta_7] \\ 16 & 0 = Y_6 - Y_7 + \frac{a}{2} \sin[\theta_6] + a \sin[\theta_7] \\ 17 & 0 = X_7 - X_8 + a (\cos[\theta_7] + \cos[\theta_8]) \\ 18 & 0 = Y_7 - Y_8 + a (\sin[\theta_7] + \sin[\theta_8]) \\ 19 & 0 = -X_4 + X_8 - \frac{a}{2} \cos[\theta_4] + a \cos[\theta_8] \\ 20 & 0 = -Y_4 + Y_8 - \frac{a}{2} \sin[\theta_4] + a \sin[\theta_8] \\ 21 & 0 = \theta_2 - \text{angulo}[T] \end{aligned}$$

MatrixForm[Transpose[SCys1]]

$$\begin{aligned} X_2 & a \cos[\theta_2] \\ Y_2 & a \sin[\theta_2] \\ \theta_2 & \theta_2 \\ X_3 & 2a \cos[\theta_2] + \frac{a(1-\frac{1}{2})}{1+\frac{1}{2}} \frac{(\sqrt{-73+336 \cos[\theta_2]} - 32 \cos[2\theta_2] - 8 \sin[\theta_2])^2}{(-73+336 \cos[\theta_2]) - 32 \cos[2\theta_2] - 8 \sin[\theta_2]} \\ Y_3 & -\frac{1}{16} a (\sqrt{-73+336 \cos[\theta_2]} - 32 \cos[2\theta_2] - 24 \sin[\theta_2] - 21 \tan[\frac{\theta_2}{2}]) \\ \theta_3 & 2 \text{ArcTan}[\frac{1}{21} (-\sqrt{-73+336 \cos[\theta_2]} - 32 \cos[2\theta_2] + 8 \sin[\theta_2])] \\ X_4 & \frac{a(45-28 \cos[\theta_2] + 248 \cos[2\theta_2] + 36 \sqrt{-73+336 \cos[\theta_2]} - 32 \cos[2\theta_2] - 8 \sin[\theta_2])}{8(75+77 \cos[\theta_2] + 4 \cos[2\theta_2] - \sqrt{-73+336 \cos[\theta_2]} - 32 \cos[2\theta_2] - 8 \sin[\theta_2])} \\ Y_4 & -\frac{1}{16} a (\sqrt{-73+336 \cos[\theta_2]} - 32 \cos[2\theta_2] - 8 \sin[\theta_2] - 21 \tan[\frac{\theta_2}{2}]) \\ \theta_4 & -2 \text{ArcTan}[\frac{\sqrt{-73+336 \cos[\theta_2]} - 32 \cos[2\theta_2] - 20 \sin[\theta_2]}{49+28 \cos[\theta_2]}] \\ X_5 & 2a \cos[\theta_2] + \frac{a(1-\frac{1}{2})}{1+\frac{1}{2}} \frac{(\sqrt{-73+336 \cos[\theta_2]} - 32 \cos[2\theta_2] + 8 \sin[\theta_2])^2}{(-73+336 \cos[\theta_2]) - 32 \cos[2\theta_2] + 8 \sin[\theta_2]} \\ Y_5 & \frac{1}{16} a (\sqrt{-73+336 \cos[\theta_2]} - 32 \cos[2\theta_2] + 24 \sin[\theta_2] + 21 \tan[\frac{\theta_2}{2}]) \\ \theta_5 & 2 \text{ArcTan}[\frac{1}{21} (\sqrt{-73+336 \cos[\theta_2]} - 32 \cos[2\theta_2] + 8 \sin[\theta_2])] \\ X_6 & \frac{a(45-28 \cos[\theta_2] + 248 \cos[2\theta_2] + 36 \sqrt{-73+336 \cos[\theta_2]} - 32 \cos[2\theta_2] - 8 \sin[\theta_2])}{8(75+77 \cos[\theta_2] + 4 \cos[2\theta_2] - \sqrt{-73+336 \cos[\theta_2]} - 32 \cos[2\theta_2] - 8 \sin[\theta_2])} \\ Y_6 & \frac{1}{16} a (\sqrt{-73+336 \cos[\theta_2]} - 32 \cos[2\theta_2] + 8 \sin[\theta_2] + 21 \tan[\frac{\theta_2}{2}]) \\ \theta_6 & 2 \text{ArcTan}[\frac{\sqrt{-73+336 \cos[\theta_2]} - 32 \cos[2\theta_2] - 20 \sin[\theta_2]}{49+28 \cos[\theta_2]}] \\ X_7 & X_7 \\ Y_7 & Y_7 \\ \theta_7 & \theta_7 \\ X_8 & X_8 \\ Y_8 & Y_8 \\ \theta_8 & \theta_8 \end{aligned}$$

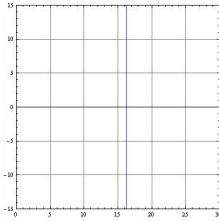
(a) Sistema de ecuaciones de restricción del mecanismo a-z-0701 (b) Coordenadas en función de la coordenada independiente del mecanismo a-z-0701

Figura 3.84: Sistema de ecuaciones previa y posterior a su solución

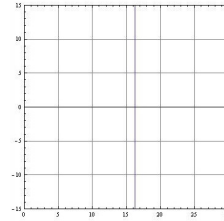
Con las coordenadas en función de la coordenada independiente Θ_2 ya se pueden calcular las curvas tanto de la trayectoria, como de la velocidad y aceleración y compararlas con las obtenidas en COSMOS.

Al haber dos puntos trazadores en el mecanismo, se tendrá que mostrar las curvas para cada punto en concreto y compararlas con su curva en COSMOS.

-Punto Trazador 1

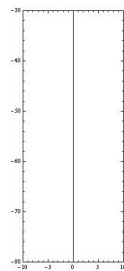


(a) Trayectoria en Mathematica

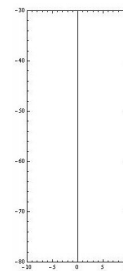


(b) Trayectoria en COSMOS

Figura 3.85: Curva de la trayectoria del punto trazador 1 del punto a-z-0701 tanto en Mathematica como en COSMOS



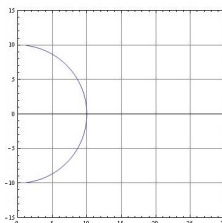
(a) Velocidad en Mathematica



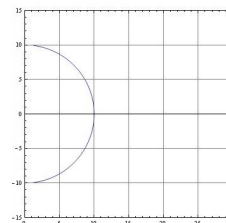
(b) Velocidad en COSMOS

Figura 3.86: Curva de la velocidad y aceleración del punto trazador 1 del punto a-z-0701 tanto en Mathematica como en COSMOS *No ha sido necesario mostrar la curva de la aceleración, puesto que al ser la trayectoria una línea recta, las curvas de la velocidad y aceleración coinciden.*

-Punto Trazador 2

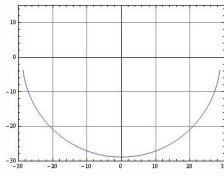


(a) Trayectoria en Mathematica

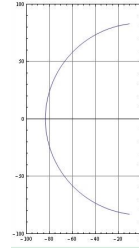


(b) Trayectoria en COSMOS

Figura 3.87: Curva de la trayectoria del punto trazador 2 del punto a-z-0701 tanto en Mathematica como en COSMOS



(a) Velocidad en Mathematica



(b) Aceleración en Mathematica

Figura 3.88: Curva de la velocidad y aceleración del punto trazador 2 del punto a-z-0701 tanto en Mathematica como en COSMOS. No ha sido necesario mostrar la comparación con COSMOS ya que, al coincidir el punto trazador 1 también coincidirá el punto 2.

3.4.4. Adp a-e-0188

Siguiendo con el mecanismo a-e-0188, se ha de conseguir las ecuaciones de restricción e importarlas en forma de matriz a un documento llamado "System" que se le entregará al profesor para que resuelva el sistema y devuelva la matriz con las coordenadas en función de la coordenada independiente, en este caso X2.

```
Sistema // MatrixForm
1 X2 0 == 270 r^2 Sin[ø2]
2 Y2 0 == 3/26 r ((r - 2 Y2) Cos[ø2] + 2 X2 Sin[ø2])
3 ø2 0 == X2 - X3 - 1/2 r Sin[ø2]
4 X3 0 == Y2 - Y3 + 1/2 r Cos[ø2]
5 Y3 0 == 30/13 r (X3 - sqrt(r^2) (pi - ø3))
6 ø3 0 == X2 - distancia[T] - 1/2 r Sin[ø2]
7 X4 0 == -X2 + X4 - 1/2 r Sin[ø2]
8 Y4 0 == -Y2 + Y4 + 1/2 r Cos[ø2]
9 ø4 0 == -X3 + X5 + r Sin[ø3]
10 X5 0 == -Y3 + Y5 - r Cos[ø3]
11 Y5 0 == 30/169 r^2 Cos[ø4 - ø5]
12 ø5 0 == 3/13 r ((-Y4 + Y5) Cos[ø4] + (X4 - X5) Sin[ø4])
13 X6 0 == -X6
14 Y6 0 == -Y6
15 ø6 0 == -45/169 r^2 Sin[ø5 - ø7]
16 X7 0 == 3/26 r ((Y5 - Y7) Cos[ø7] + (-X5 + X7) Sin[ø7])
17 Y7 0 == -270/169 r^2 Cos[ø6 - ø7]
18 ø7 0 == 3/13 r ((-X6 + X7) Cos[ø7] + (-Y6 + Y7) Sin[ø7])
```

(a) Sistema de ecuaciones de restricción del mecanismo a-e-0188

```
MatrixForm[Transpose[SCgs1]]
X2 X2
Y2 r/2
ø2 ø2
X3 X2
Y3 r
ø3 pi - X2/sqrt(r^2)
X4 X2
Y4 0
ø4 2 ArcCot[2 (-1 + Cos[X2/r]) / (8 - 8 Cos[X2/r] - 2 r Sin[X2/r] / sqrt(r^2))]
X5 X2 - r Sin[X2/sqrt(r^2)]
Y5 r - r Cos[X2/r]
ø5 2 ArcTan[Sec[X2/2r] - r Tan[X2/2r] / sqrt(r^2)]
X6 0
Y6 0
ø6 2 ArcTan[r Cot[X2/2r] / sqrt(r^2) - Csc[X2/2r]]
X7 1/2 (X2 + X2 Cos[X2/r] - 2 sqrt(r^2) Sin[X2/r])
Y7 r - r Cos[X2/r] - X2 Sin[X2/r] / (2 sqrt(r^2))
ø7 2 ArcTan[Sec[X2/2r] - r Tan[X2/2r] / sqrt(r^2)]
```

(b) Coordenadas en función de la coordenada independiente del mecanismo a-e-0188

Figura 3.89: Sistema de ecuaciones previa y posterior a su solución

Con las coordenadas en función de la coordenada independiente X2 ya se pueden calcular las curvas tanto de la trayectoria, como de la velocidad y aceleración y compararlas con las obtenidas en SolidWorks 2019.

Al haber dos puntos trazadores en el mecanismo, se tendrá que mostrar las curvas para cada punto en concreto y compararlas con su curva en SolidWorks.

-Punto trazador 1

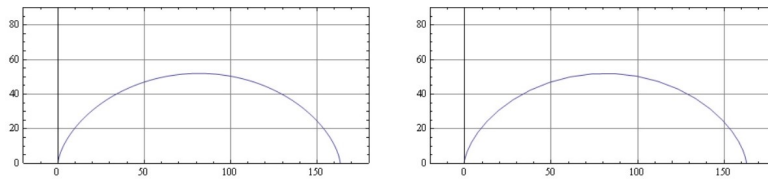
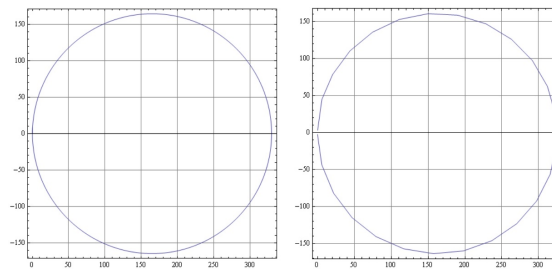
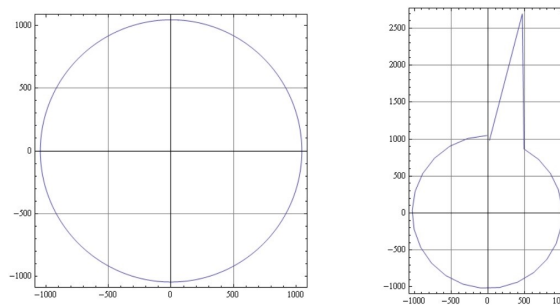


Figura 3.90: Comparación de las curvas de Trayectoria del punto trazador 1 del mecanismo a-e-0188



(a) Comparación velocidades entre Mathematica y SolidWorks



(b) Comparación aceleraciones entre Mathematica y SolidWorks

Figura 3.91: Comparación gráficas punto trazador 1 del a-e-0188

Se puede observar que las curvas de aceleración presentan una grave diferencia en un punto, esto se debe a que la simulación en SolidWorks no se ha realizado con los instantes necesarios para representar correctamente la aceleración, la solución sería aumentar los instantes pero se ha decidido no modificarlo para mostrar el error.

-Punto trazador 2

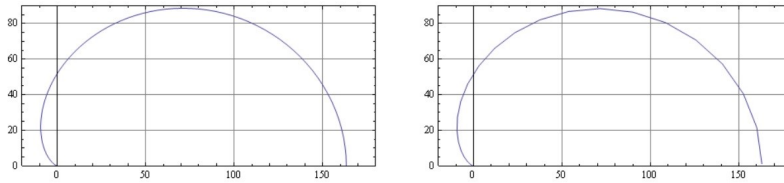
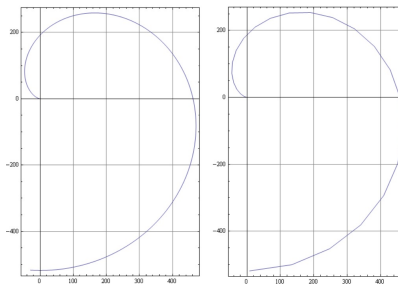
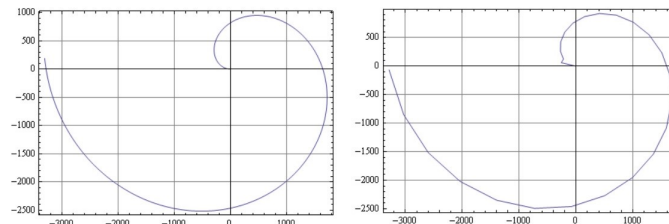


Figura 3.92: Comparación de las curvas de Trayectoria del punto trazador 2 del mecanismo a-e-0188



(a) Comparación velocidades entre Mathematica y SolidWorks



(b) Comparación aceleraciones entre Mathematica y SolidWorks

Figura 3.93: Comparación gráficas punto trazador 1 del a-e-0188

-Trayectoria ambos puntos trazadores

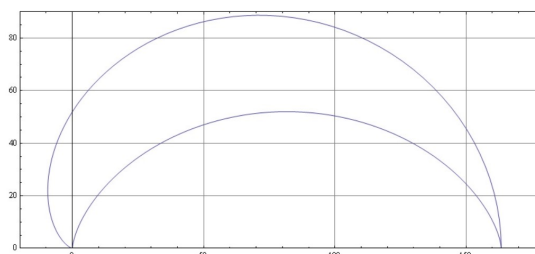
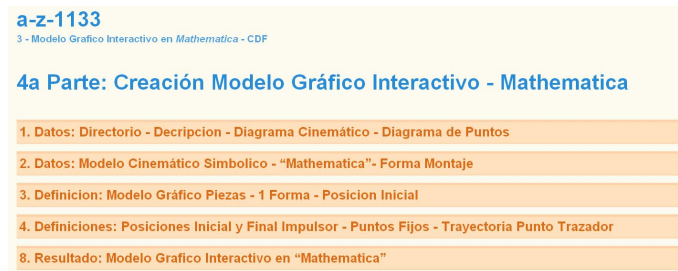


Figura 3.94: Ambas trayectorias de los puntos trazadores del mecanismo a-e-0188 en una misma gráfica

3.5. Creación Modelo Gráfico Interactivo



a-z-1133
3 - Modelo Grafico Interactivo en Mathematica - CDF

4a Parte: Creación Modelo Gráfico Interactivo - Mathematica

1. Datos: Directorio - Descripción - Diagrama Cinemático - Diagrama de Puntos
2. Datos: Modelo Cinemático Simbólico - "Mathematica"- Forma Montaje
3. Definición: Modelo Gráfico Piezas - 1 Forma - Posición Inicial
4. Definiciones: Posiciones Inicial y Final Impulsor - Puntos Fijos - Trayectoria Punto Trazador
8. Resultado: Modelo Grafico Interactivo en "Mathematica"

Figura 3.95: Apartados en el último documento de Mathematica de creación del CDF

3.5.1. Procedimiento

En este último apartado del proceso se utilizan los datos obtenidos en apartados anteriores, modelos gráficos y soluciones simbólicas con los cuales se podrá crear un documento CDF, mediante el cual con una barra interactiva se podrá modificar la coordenada independiente de la pieza motriz y conocer el movimiento del mecanismo para cada instante. El objetivo de este documento es complementar la descripción de los mecanismos realizada por Artobolevsky y comprobar la veracidad de sus diagramas.

Como en anteriores apartados, primero se ha realizado una fase de preparación con varios mecanismos de Artobolevsky, de los cuales se va a seguir utilizando el a-z-1133 como ejemplo.

En este apartado es necesario crear un nuevo archivo de Mathematica, guardándolo en la misma carpeta que el resto para poder importar los datos obtenidos en otros documentos.

3.5.2. Preparación

Como se puede observar en la imagen superior, los dos primeros puntos del documento coinciden con los de la fase anterior, por lo tanto, bastaría con copiarlos del fichero de Mathematica anterior.

A continuación, se deben leer los ficheros del apartado anterior, donde se han guardado las coordenadas en función de la coordenada independiente y se crea con un vector Coor con dichas coordenadas.

```
Coor = {{X2, << "X2s"}, {Y2, << "Y2s"}, {Θ2, << "Th2s"}, {X3, << "X3s"}, {Y3, << "Y3s"}, {Θ3, << "Th3s"}, {X4, << "X4s"}, {Y4, << "Y4s"},  
{Θ4, << "Th4s"}, {X5, << "X5s"}, {Y5, << "Y5s"}, {Θ5, << "Th5s"}, {X6, << "X6s"}, {Y6, << "Y6s"}, {Θ6, << "Th6s"}, {X7, << "X7s"},  
{Y7, << "Y7s"}, {Θ7, << "Th7s"}, {X8, << "X8s"}, {Y8, << "Y8s"}, {Θ8, << "Th8s"}};
```

Figura 3.96: Creación del nuevo vector Coor con las coordenadas en función de la coordenada independiente

El siguiente paso es definir las coordenadas generalizadas de cada pieza asignando la coordenada correspondiente del vector Coor.

Una vez definidas las coordenadas generalizadas en todas las piezas. Se procede a crear el modelo gráfico del mecanismo con la diferencia que las coordenadas de cada pieza están definidas en función de la coordenada independiente, para el caso de este ejemplo la Θ_2 .

Es necesario ajustar la matriz de transformación eliminando el comando que reemplaza la coordenada independiente por su solución en función del tiempo, puesto que el mecanismo se ha de manipular en función de la coordenada independiente del impulsor y no del tiempo.

Es por esto que para representar el modelo gráfico se debe asignar un valor determinado a la coordenada independiente.

```
Show[Graphics[{Punt01, Tramo1, Tramo2}]] /. {Θ2 → 30 + N[Pi] / 180} /. DatosE[Escala] /. {Escala → .05}
```

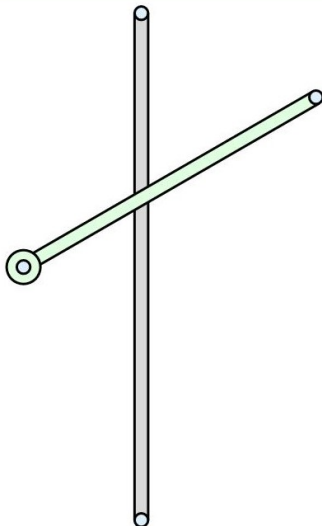


Figura 3.97: Definición de la pieza 2 en función de la coordenada independiente

Es necesario además, representar el mecanismo en sus posiciones límites, es decir la inicial y la final, para comprobar un correcto funcionamiento y la ausencia de errores en el programa.

Finalmente se crean y recopilan los elementos necesarios que se incluirán en el documento CDF final.

```

Todo[@2] =
Show[Graphics[{{Inset[Artobo, {-2.0, .1}, Center, 3.3], Puntoll1, Tramo1, Tramo2, Tramo3, Tramo4, Tramo51, Tramo52, Tramo6, Tramo8, Tramo71, Tramo72},
  Axes -> True, AxesLabel -> {x, y}, AxesOrigin -> Automatic, GridLines -> {{-3, -2, -1, 1, 2, 3, 4}, {-4, -3, -2, -1, 1, 2, 3, 4}},
  GridLineStyle -> Directive[Black, Dotted], PlotRange -> {{-3.9, 2.5}, {-2.5, 2.5}}, ImageSize -> 700], Trayectoria, PuntosFijos[Escala] /. DatosE[Escala] /.
{Escala -> .07});
    
```

Figura 3.98: Elementos definidos con el comando Inset. Se definen elementos como la imagen de Artobolevsky del mecanismo, el rango de la gráfica y todas las partes de las piezas que forman el mecanismo

En algunos mecanismos, pueden existir dos formas de montaje diferentes y por lo tanto dos trayectorias, para crear el documento CDF se han de crear dos funciones distintas para cada forma y una función con los elementos de ambas formas.

Por último, con el comando **Manipulate** se crean los iconos y barras mediante las cuales se puede modificar el mecanismo, pudiendo modificar la coordenada independiente y elegir la forma de montaje. Para ello previamente es necesario indicar la función sobre la que tiene que actuar, las posiciones límite y el rango de movimiento. Además se pueden añadir títulos anotaciones y el nombre del autor.

```

Manipulate[Todo[@2], {{@2, Th2i, "Angulo Impulsor"}, Th2f},
FrameLabel -> {"Trazador con Deslizaderas - Artobolevsky No. 1133 - Artobolevsky - Cisoides Longchamps a-z-1133", "© Gustavo, 2021"},
TrackedSymbols -> Manipulate, SaveDefinitions -> True]
    
```

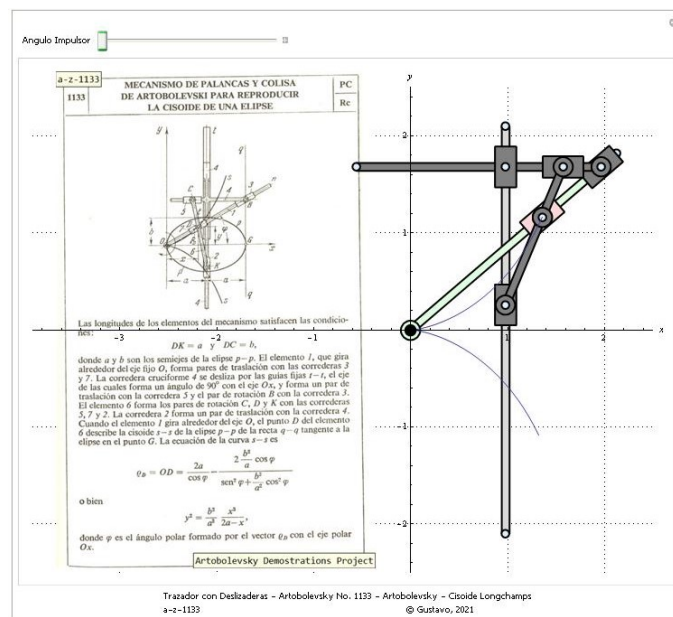


Figura 3.99: Imagen del comando Manipulate y del CDF final que se crea del mecanismo a-z-1133

Con esto, se da por terminado el proceso de explicación de preparación de un CDF, la metodología a aplicar es similar para los tres mecanismos que se estudian en este trabajo.

3.5.3. Adp a-z-0701

Para el mecanismo a-z-0701 y siguientes se va a mostrar como se define el nuevo vector Coor con las coordenadas en función de la coordenada independiente y el comando que define todos los elementos que van a aparecer en el CDF finalmente.

```
Coor = {{X2, << 'X2a'}, {Y2, << 'Y2a'}, {o2, << 'Th2a'}, {X3, << 'X3a'}, {Y3, << 'Y3a'}, {o3, << 'Th3a'}, {X4, << 'X4a'}, {Y4, << 'Y4a'}, {o4, << 'Th4a'}, {X5, << 'X5a'}, {Y5, << 'Y5a'}, {o5, << 'Th5a'}, {X6, << 'X6a'}, {Y6, << 'Y6a'}, {o6, << 'Th6a'}, {X7, << 'X7a'}, {Y7, << 'Y7a'}, {o7, << 'Th7a'}, {X8, << 'X8a'}, {Y8, << 'Y8a'}, {o8, << 'Th8a'}};
```

```
Forma[oz_] =
{Inset[Artoho, {-2.2, 1.9}, Center, 4], Puntolla, Punto12, Tramo21, Tramo22, Tramo22, Tramo31, Tramo32, Puntollb, Tramo41, Tramo42, Tramo51, Tramo52, Tramo61, Tramo62, Tramo51, Tramo52, Tramo71, Tramo72, Tramo81, Tramo82, PuntoFijo1[11], PuntoFijo2[11], TrayectoriaE1[11], TrayectoriaE2[11]} /. Datos /. DatosEm[Escala] /. {Escala -> EscalaE};
```

Figura 3.100: Definición del nuevo vector Coor y de los elementos que van a formar parte del CDF del mecanismo a-z-0701

Para terminar, se muestra el documento CDF con el mecanismo en 4 posiciones distintas para mostrar que ha sido correctamente creado.

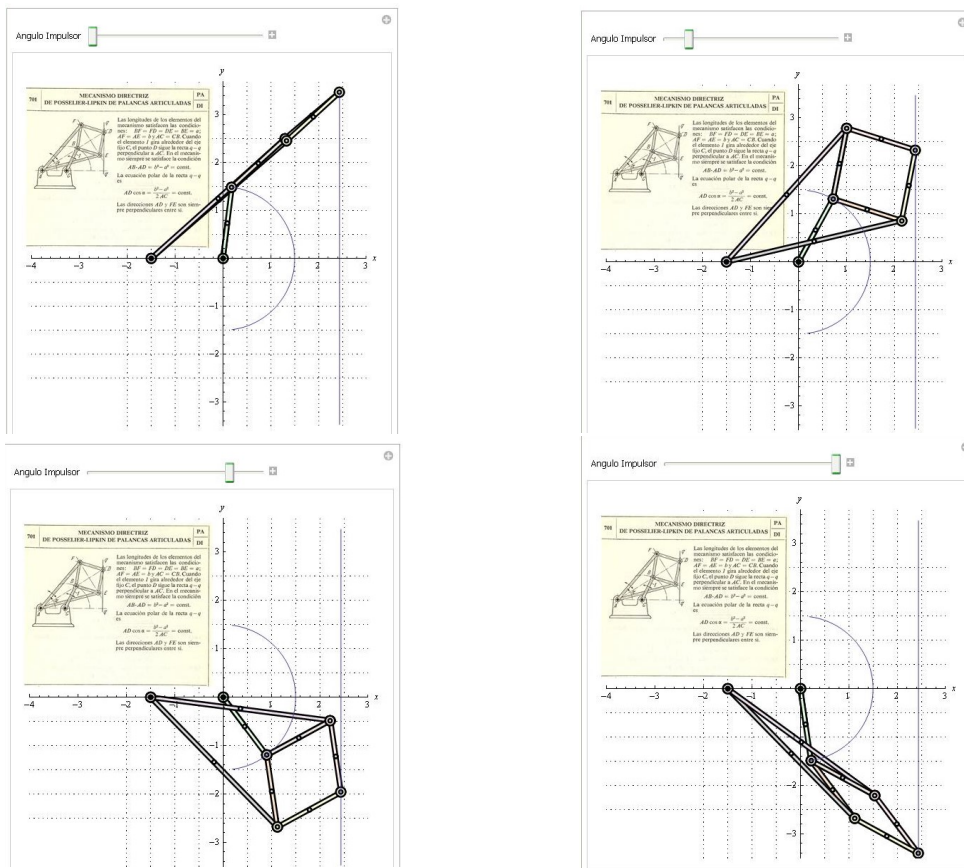


Figura 3.101: CDF del mecanismo a-z-0701 en posiciones distintas

3.5.4. Adp a-e-0188

Para el mecanismo a-e-0188, como se ha explicado previamente, se va a mostrar como se define el nuevo vector Coor con las coordenadas en función de la coordenada independiente y el comando que define todos los elementos que van a aparecer en el CDF finalmente.

```
Coor = {{X2, <<'X2a'>, {Y2, <<'Y2a'>}, {θ2, <<'Th2a'>}, {X3, <<'X3a'>, {Y3, <<'Y3a'>, {θ3, <<'Th3a'>}, {X4, <<'X4a'>, {Y4, <<'Y4a'>, {θ4, <<'Th4a'>}, {X5, <<'X5a'>, {Y5, <<'Y5a'>, {θ5, <<'Th5a'>}, {X6, <<'X6a'>, {Y6, <<'Y6a'>, {θ6, <<'Th6a'>}, {X7, <<'X7a'>, {Y7, <<'Y7a'>, {θ6, <<'Th7a'>}};

Coor =
{{X2, X2}, {Y2,  $\frac{r}{2}$ }, {θ2, 0}, {X3, X2}, {Y3, r}, {θ3,  $\pi - \frac{X2}{\sqrt{r^2}}$ }, {X4, X2}, {Y4, 0}, {θ4,  $2 \text{ArcCot}\left[\frac{2(-1 + \text{Cos}\left[\frac{X2}{r}\right])}{\sqrt{8 - 8 \text{Cos}\left[\frac{X2}{r}\right]} - \frac{2r \text{Sin}\left[\frac{X2}{r}\right]}{\sqrt{r^2}}}\right]}$ }},
{{X5,  $X2 - r \text{Sin}\left[\frac{X2}{\sqrt{r^2}}\right]$ }, {Y5,  $r - r \text{Cos}\left[\frac{X2}{r}\right]$ }, {θ5,  $2 \text{ArcTan}\left[\text{Sec}\left[\frac{X2}{2r}\right] - \frac{r \text{Tan}\left[\frac{X2}{2r}\right]}{\sqrt{r^2}}\right]}$ }, {X6, 0}, {Y6, 0}, {θ6,  $2 \text{ArcTan}\left[\frac{r \text{Cot}\left[\frac{X2}{2r}\right]}{\sqrt{r^2}}\right] - \text{Cos}\left[\frac{X2}{2r}\right]}$ }},
{{X7,  $\frac{1}{2}\left[X2 + X2 \text{Cos}\left[\frac{X2}{r}\right] - 2\sqrt{r^2} \text{Sin}\left[\frac{X2}{r}\right]\right]}$ }, {Y7,  $r - r \text{Cos}\left[\frac{X2}{r}\right] - \frac{r X2 \text{Sin}\left[\frac{X2}{r}\right]}{2\sqrt{r^2}}\right]}$ }, {θ6,  $2 \text{ArcTan}\left[\text{Sec}\left[\frac{X2}{2r}\right] - \frac{r \text{Tan}\left[\frac{X2}{2r}\right]}{\sqrt{r^2}}\right]}$ }}

Todo[X2_] =
Show[Graphics[{{Inset[Artobol, {-2.5, 4}, Center, 4], Tramo12, Tramo13, Punto12, Disco32, Tramo32, Punto31, Punto32, Tramo11, Tramo21, Tramo22, Tramo23, Tramo51, Tramo53, Tramo52, Tramo61, Tramo71, Tramo72, Punto1b}, Axes -> True, AxesLabel -> {x, y}, AxesOrigin -> Automatic, GridLines -> {{-1, -2, -3, -4, -5, -6, 1, 2, 3, 4, 5, 6}, {-3, -2, -1, 1, 2, 3}}, GridLineStyle -> Directive[Black, Dotted], PlotRange -> {{-10, 0, 10, 0}, {-3.5, 7, 0}}, ImageSize -> 1200], Trayectoria51, Trayectoria71, PuntosFijos[Escala]] /. Datos /. DatosEm[Escala] /. {Escala -> 0.05};
```

Figura 3.102: Definición del nuevo vector Coor y de los elementos que van a formar parte del CDF del mecanismo a-e-0188

Para terminar, se muestra el documento CDF con el mecanismo en 4 posiciones distintas para mostrar que ha sido correctamente creado.

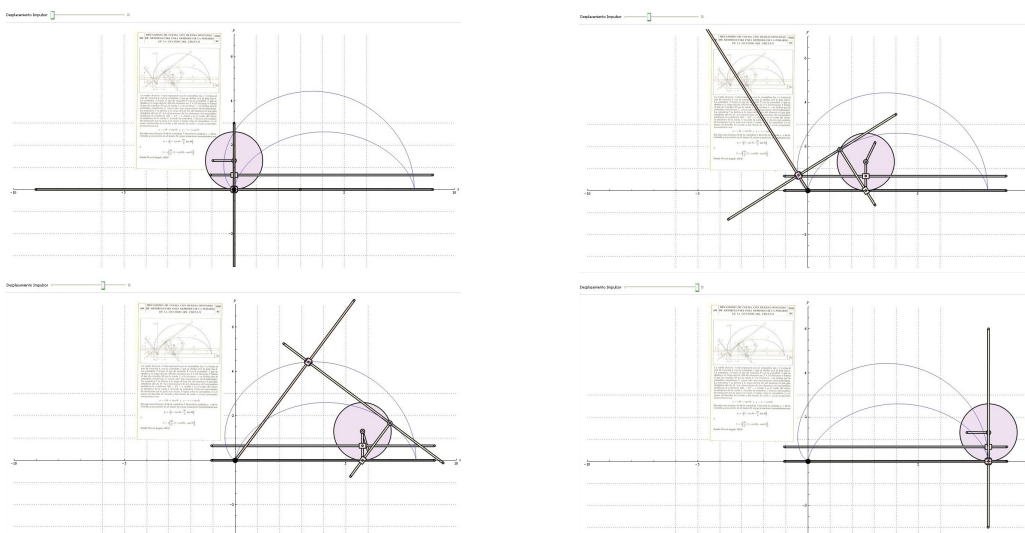


Figura 3.103: CDF del mecanismo a-e-0188 en posiciones distintas

Capítulo 4

Conclusiones

Como se ha podido observar en el desarrollo de este trabajo, la creación de un CDF para representar el comportamiento de mecanismos supone una gran ventaja frente a representarlos únicamente como un diagrama, esto permite conocer el movimiento de los mecanismos previamente, lo que supone tanto un ahorro de tiempo, puesto que la elección de un mecanismo en concreto se puede hacer de manera más rápida gracias a poder observar el movimiento de sus piezas, como un ahorro de dinero y material puesto que no es necesario crear los mecanismos para poder conocer su comportamiento, ahorrando tanto en mano de obra como en material.

También se puede observar que la metodología empleada para la creación de estos documentos, aunque sea un proceso que exige una gran atención en cada paso a realizar, sobretodo en Mathematica, para evitar errores que posteriormente pueden hacerse complicados de resolver o detectar, es un proceso fácil de aprender y que permite mejorar y aumentar tus conocimientos de manera autodidacta.

Además se ha demostrado, con el estudio y análisis de estos mecanismos, que el resultado es prácticamente idéntico al mecanismo que se ha querido representar, por lo que es un método con un gran porcentaje de fiabilidad y que permite comprobar si el diagrama inicial del mecanismo era correcto.

Por último cabe resaltar la labor del profesor Artobolevsky, puesto que realizó este compendio de soluciones hace más de 50 años y definió correctamente tanto las trayectorias de los puntos trazadores como del movimiento del mecanismo completo. Además, los mecanismos estudiados son totalmente funcionables y utilizables en la actualidad.

Parte II

PRESUPUESTO

Presupuesto

En el presente capítulo se expone la valoración económica asociada al coste del proyecto realizado. De esta forma, se detalla en primer lugar las consideraciones necesarias para elaborar dicho documento y a continuación se muestran los diversos cuadros presupuestados.

En relación a la mano de obra necesaria para la realización del proyecto se ha contado con un ingeniero industrial junior (estudiante), el cual realiza la mayor parte del trabajo total y un ingeniero superior (tutor), quien ha llevado a cabo la planificación y supervisión de las tareas a realizar.

Con el fin de calcular el coste por hora del alumno se ha recurrido a la disposición 14977 del Boletín Oficial del Estado (BOE) número 251 de 2019 para los ingenieros. En este documento se dispone que los trabajadores “Nivel 1. Licenciados y titulados 2º y 3º ciclo universitario y Analista” tendrán un salario de 1.687€ mensuales en 14 pagas. Este salario se dividirá por el número de horas invertidas en el proyecto.

$$1.687 \text{ €/mes} / 20 \text{ días laborables} / 8 \text{ horas laborales} = 10,54 \text{ €/h}$$

Las cantidades reflejadas corresponden a salarios base mínimos y, consecuentemente, habría que sumarle el coste en concepto de seguridad social, el cual es de:

- 23,6 % de contingencias comunes.
- 5,5 % de seguro de desempleo.
- 1,50 % de accidentes de trabajo y enfermedades profesionales.
- 0,60 % de formación profesional.

- 0,20 % del Fondo de garantía salarial (FOGASA).

Por lo tanto el salario hora del estudiante será de 14,06 €/h

Por otro lado, para el cálculo del coste por hora del tutor, se ha acudido a los costes indicativos de personal en proyectos, convenios y contratos del ejercicio 2017 marcados por la Universidad Politécnica de Valencia (UPV) donde establece que un catedrático de Universidad realiza 1650 horas facturables al año con un coste directo por hora de 51,4 €/h

Respecto a los costes asociados al hardware y software empleado, cabe mencionar que no se ha considerado el precio de compra, sino que se ha aplicado el factor de amortización correspondiente a la duración del proyecto, es decir, se ha multiplicado el precio de compra de los productos por el periodo en el que se ha llevado a cabo el proyecto (4 meses), y se ha dividido entre la vida útil estimada de cada uno de tales productos. Además, se debe destacar que los recursos asignados como hardware y software se han incluido en el capítulo 2, ya que especificar la utilización y el precio por hora de cada material en cada una de las tareas realizadas resulta demasiado complejo y carece de interés real para este trabajo.

Finalmente, para calcular el presupuesto por contrata se ha incrementado en un 13 %, asociado a gastos generales, el presupuesto de ejecución material (el cual es la suma de los presupuestos parciales) y en un 6 %, en concepto de beneficio industrial. A continuación, a dicho presupuesto incrementado, se le ha aplicado el Impuesto de Valor Agregado (IVA) de tipo general del 21 % según la Agencia Tributaria, correspondiente a proyectos como el presentado, obteniendo de esta forma el presupuesto por contrata. Cabe destacar que, al estar aplicando el IVA al final, los costes de los distintos recursos y tareas que se muestran en los diversos apartados no incluyen dicho impuesto.

A continuación se muestran en orden el cuadro de mano de obra, el cuadro de materiales, hardware y software y el presupuesto de ejecución por contrata.

- Cuadro de mano de obra

Nº	Código	Denominación de la mano de obra	Precio	Horas	Total
1	MO.IIJ	Ingeniero Industrial Junior	14,06€/h	420h	5905,2
2	MO.TU	Tutor catedrático de universidad	51,4€	20h	1028€
Total mano de obra:					6933,2€

Tabla 4.1: Tabla de precios de la mano de obra

- Cuadro de materiales, hardware y software

Nº	Código	Denominación del Material	Precio	Cantidad	Factor Amortización	Total
1	MHS.P	Portátil ASUS	800€	1u	4/60	53,34€
2	MHS.W 10	Windows 10 home	135€	1u	4/48	11,25€
3	MHS. SW	SolidWorks	60€	1u	4/12	20€
4	MHS. C	COSMOS Motion	0€	1u	-	0€
5	MHS.M	Wolfram Mathematica	159€	1u	4/12	53€
6	MHS.MEC	Mechanical System Pack	23,50€	1u	4/12	7,84€
Total materiales, hardware y software:						145,63€

Tabla 4.2: Cuadro de materiales, hardware y software

- Presupuesto de ejecución por contrata

Capítulo	Importe (€)
Coste de mano de obra	6933,2 €
Coste de materiales, hardware y software	145,63 €
Total	7078,83 €
Gastos generales (13 %)	920,25 €
Beneficio industrial (6 %)	424,73 €
Suma	8423,81 €
IVA (21 %)	1769,00 €
Presupuesto de ejecución por contrata	10192,81 €

Tabla 4.3: Presupuesto de ejecución por contrata

El presupuesto de ejecución por contrata asciende a **diez mil ciento noventa y dos euros con ochenta y un céntimos**

Bibliografía

Bibliografía

Apuntes del profesor:

-Oliver, J. L. (2014). Módulo 2 – Creación Virtual de Mecanismos Planos En Maquinas. Universidad Politécnica de Valencia.

-Oliver, J. L. (2014). Módulo 2 – Actividad 1 – *Creación Virtual de Cuadriláteros Articulados de Artobolevsky*. Universidad Politécnica de Valencia.

-Oliver, J. L. (2014). Módulo 2 – Actividad 2 – *Mecanismos de Artobolevsky de 4 Cuerpos con Deslizaderas*. Universidad Politécnica de Valencia.

-Oliver, J. L. (2014). Módulo 2 – Actividad 4 – *Mecanismos de Artobolevsky Trazadores con Deslizaderas*. Universidad Politécnica de Valencia.

-Oliver, J. L. (2014). Módulo 3 – *Simulación Cinemática y Dinámica de Mecanismos Planos en Máquinas*. Universidad Politécnica de Valencia.

-Oliver, J. L. (2014). Módulo 3 – Actividad 1 – *Simulación Cinemática de Cuadriláteros Articulados – Formas de Montaje*. Universidad Politécnica de Valencia.

-Oliver, J. L. (2014). Módulo 3 – Actividad 2 – *Simulación de Mecanismos de 4 Cuerpos con Deslizaderas – Impulsores*. Universidad Politécnica de Valencia.

-Oliver, J. L. (2014). Módulo 3 – Actividad 4 – *Simulación de Mecanismos Trazadores con Deslizaderas – Lazos Cinemáticos*. Universidad Politécnica de Valencia.

-Oliver, J. L. (2014). Módulo 4 – *Análisis Cinemático y Dinámico Computacional de Mecanismos Planos*. Universidad Politécnica de Valencia.

-Oliver, J. L. (2014). Módulo 4 – Actividad 1 – *Análisis Cinemático con Mechanica de Cuadriláteros Articulados*. Universidad Politécnica de Valencia.

-Oliver, J. L. (2014). Módulo 4 – Actividad 2 – *Análisis Cinemático con Mathematica de Cuadriláteros Articulados*. Universidad Politécnica de Valencia.

- Oliver, J. L. (2014). Módulo 4 – Actividad 3 – *Análisis Cinemático de Cuadriláteros Articulados – Creación CDF en Mathematica. Universidad Politécnica de Valencia.*
- Oliver, J. L. (2014). Módulo 4 – Actividad 4 – *Análisis Cinemático con Mecánica de Trazadores con Deslizaderas. Universidad Politécnica de Valencia.*
- Oliver, J. L. (2014). Módulo 4 – Actividad 5 – *Análisis Cinemático con Mathematica de Trazadores con Deslizaderas. Universidad Politécnica de Valencia.*
- Oliver, J. L. (2014). Módulo 4 – Actividad 6 – *Análisis Cinemático de Trazadores con Deslizaderas – Creación CDF en Mathematica. Universidad Politécnica de Valencia.*
- Oliver, J. L. (2014). Módulo 4 – Actividad 7 – *Análisis Cinemático de Trazadores con Deslizaderas – Creación CDF en Mathematica Ampliado. Universidad Politécnica de Valencia.*
- Oliver, J. L. (2014). Módulo 2 – Actividad 1b – *MODELO VIRTUAL en Solidworks 2007 del MECANISMO Adp-a-c-0660. Universidad Politécnica de Valencia.*
- Oliver, J. L. (2014). Módulo 3 – Actividad 1b – *MODELO CINEMÁTICO VIRTUAL (mcv) en Cosmos Motion 2007 del MECANISMO Adp-a-c-0660. Universidad Politécnica de Valencia.*
- Oliver, J. L. (2014). Módulo 4 – Actividad 1b – *Análisis Cinemático con Mecánica del MECANISMO Adp-a-c-0660. Universidad Politécnica de Valencia.*
- Oliver, J. L. (2014). Módulo 4 – Actividad 2b – *Análisis Cinemático con Mathematica del MECANISMO Adp-a-c-0660. Universidad Politécnica de Valencia.*
- Oliver, J. L. (2014). Módulo 4 – Actividad 3b – *Análisis Cinemático con Mathematica del MECANISMO Adp-a-c-0660-Creación CDF en Mathematica. Universidad Politécnica de Valencia.*
- Oliver, J. L. (2014). Módulo 5 – Actividad 1 – *Simulación en “Cosmos Motion 2007” de modelos virtuales Lego Technic. Universidad Politécnica de Valencia.*
- Oliver, J. L. (2014). Módulo 5 – Actividad 2 – *Creación de un modelo cinemático virtual operativo en Solidworks 2007 y simulable en Cosmos 2007 del Modelo Básico Lego Technic Virtual 8459-2. Universidad Politécnica de Valencia.*
- Oliver, J. L. (2014). Módulo 5 – Actividad p1 – *Simulación Cinemática en Recurdyn de algunos de los modelos de Thang. Universidad Politécnica de Valencia.*
- Oliver, J. L. (2014). Módulo 5 – Actividad p4 – *Simulación Dinámica en Recurdyn del modelo de Pala Cargadora Volvo L70C. Universidad Politécnica de Valencia.*
- Oliver, J. L. (2014). Módulo 5 – Actividad p5 – *Simulación Dinámica en Solidworks Motion del modelo de Pala Cargadora Volvo L70C. Universidad Politécnica de Valencia.*

- Oliver,J.L. Clases de teoría Máquinas y mecanismos v2021 - <http://www.upv.es/vltmodels/index.html>
- Artobolevsky, I. I. (1976). Mecanismo en la técnica moderna tomo I (mecanismos de palancas)
- Artobolevsky, I. I. (1977). Mecanismo en la técnica moderna tomo II primera parte (mecanismos de palancas)
- Artobolevsky, I. I. (1978). Mecanismo en la técnica moderna tomo II segunda parte (mecanismos de palancas)
- Iván Artobolevsky. En Wikipedia. Recuperado el 11 de septiembre de 2018 de - https://en.wikipedia.org/wiki/Ivan_Artobolevsky
- Ministerio de Trabajo, Migraciones y Seguridad Social (2019a). XIX convenio colectivo nacional de empresas de ingeniería y oficinas de estudios técnicos- <https://www.boe.es/boe/dias/2019/10/18/pdfs/BOE-A-2019-14977.pdf>

