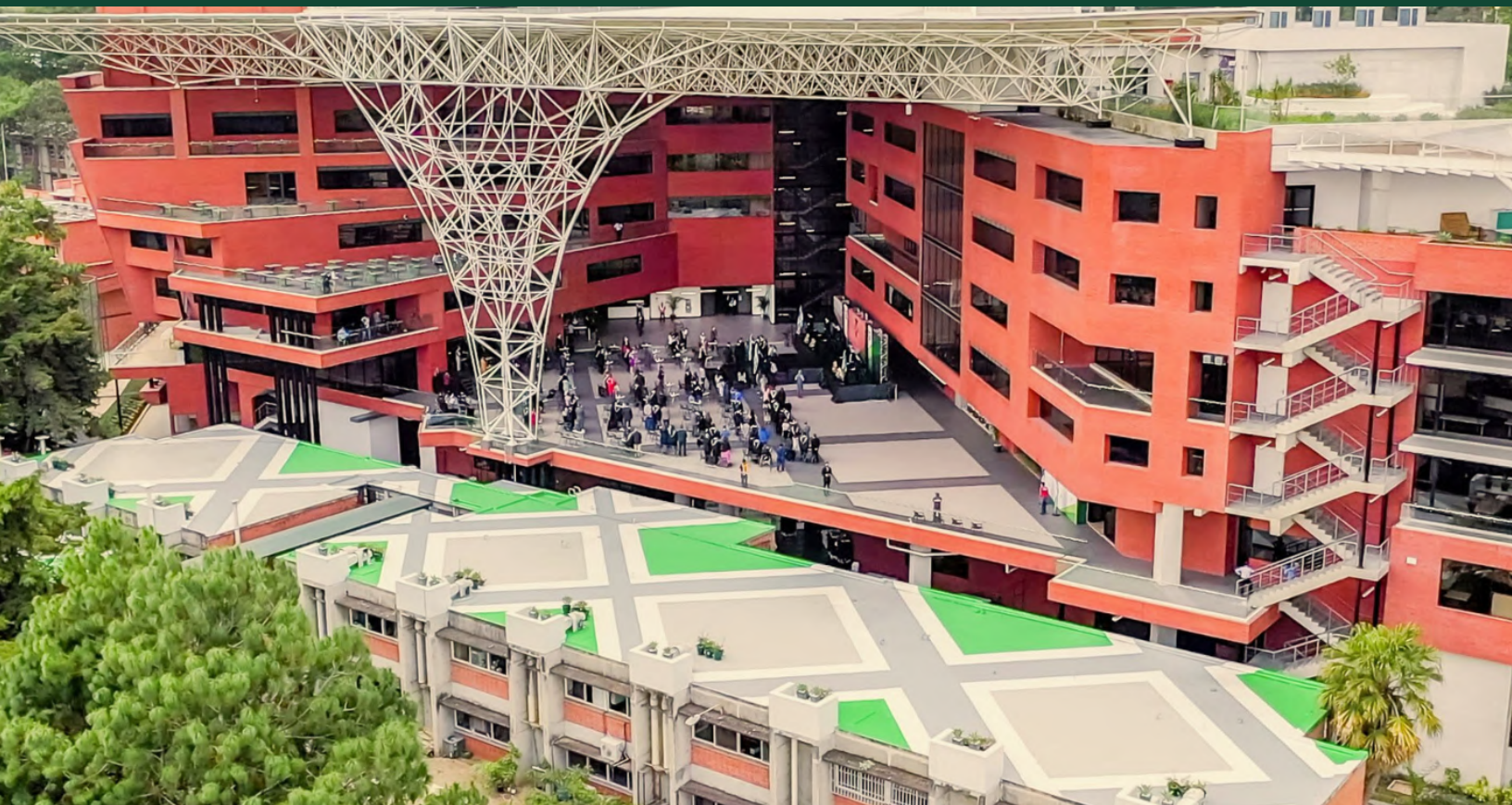

Diseño e implementación de una plataforma didáctica para el análisis cinemático de mecanismos de 4 barras

Mónica Estefania Alfaro Samayoa



UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA
Facultad de Ingeniería



**Diseño e implementación de una plataforma didáctica para el
análisis cinemático de
mecanismos de 4 barras**

Trabajo de graduación presentado por Mónica Estefanía Alfaro Samayoa
para optar al grado académico de Licenciada en Ingeniería Mecatrónica

Guatemala,

2025

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA
Facultad de Ingeniería



**Diseño e implementación de una plataforma didáctica para el
análisis cinemático de
mecanismos de 4 barras**


Trabajo de graduación presentado por Mónica Estefanía Alfaro Samayoa
para optar al grado académico de Licenciada en Ingeniería Mecatrónica

Guatemala,

2025

Vo.Bo.:

(f) 
MBA Pedro Castillo

(f) 
M.Sc. Carlos Esquit

Fecha de aprobación: Guatemala, 20 de noviembre de 2025.

Este trabajo constituye la consolidación de mi trayectoria académica, hecho que no habría sido posible gracias al respaldo de múltiples personas a quienes deseo expresar mi gratitud.

Primero quiero agradecer a Jehová, quien ha sido la principal razón por la que he alcanzado mis metas. Agradezco su guía, conexión espiritual y la esperanza que le ofrece propósito a mi vida. Espero que cada acción que tome honren su nombre y sean dignas de una fiel servidora.

A mis padres, Dinora y Danilo quiero agradecerles su apoyo y la oportunidad de una educación superior. Dinora, *mami*, gracias por acompañarme día con día, ser el hombro en el que pude desahogarme y ser testigo de mis momentos más vulnerables. Gracias por apoyarme incondicionalmente y sacrificar tanto por mí. Danilo, *papi*, gracias por animarme siempre a seguir a pesar de que en muchos momentos quise rendirme. Sin ti no podría haber accedido a una educación de este nivel. Su respaldo ha sido clave para cumplir esta meta.

Deseo dedicar este trabajo a mi abuela, *Mamachela*, cuyas enseñanzas permanecen grabadas en mi memoria a pesar de ya no estar con nosotros. Le agradezco profundamente haberme motivado a seguir adelante sin importar los estereotipos. El orgullo que demostraba por mí fue una fuente constante de motivación para avanzar y superar obstáculos.

A mi hermano, Danilo Alejandro, quien es mi ejemplo a seguir. Gracias por haber creído más en mí que yo misma y nunca dudar en tenderme una mano para brindarme tu apoyo.

Extiendo mi gratitud al resto de mi familia: tías, primas y primos, cuyo ánimo, palabras de aliento y muestras de apoyo tuvieron un impacto más grande del que imaginarían.

A mis asesores, los Ingenieros Pedro Castillo Coronado y Fredy España Capilla, quiero agradecerles su apoyo incondicional para desarrollar este trabajo. Agradezco su tiempo para orientarme pacientemente y animarme constantemente. Son ustedes personas de excelencia que como futura profesional aspiro a ser.

A los amigos, compañeros, catedráticos y demás personas que conocí quiero agradecerles porque fueron parte indispensable para lograr atravesar este desafiante camino. A todos les deseo el mejor de los éxitos.

Prefacio	I
Índice de figuras	VI
Índice de cuadros	VII
Resumen	VIII
Abstract	IX
1. Introducción	1
2. Antecedentes	2
2.1. Maquetas didácticas para la enseñanza de Teoría de Máquinas y Mecanismos: análisis comparativo del diseño, la fabricación, el control y el coste	2
2.2. TecQuipment: Bar Linkages Kit (ES15)	3
2.3. Gunt Hamburg: KI 130 Kinematic model: four-joint link	4
3. Justificación	5
4. Objetivos	7
4.1. Objetivo general	7
4.2. Objetivos específicos	7
5. Alcance	8
6. Marco teórico	10
6.1. Cinemática	10
6.2. Condiciones límite	11
6.3. Movilidad	11
6.4. Partes de un mecanismo	12
6.5. Pares cinemáticos o juntas	13
6.6. Mecanismo de 4 barras	14
6.7. Transformación de eslabonamientos	15

6.8.	Condición de Grashof	16
6.9.	Clasificación de Barker del eslabonamiento de cuatro barras	17
6.10.	Disposiciones geométricas de un mecanismo	19
6.11.	Síntesis analítica de posición de mecanismos de 4 barras convencional	20
6.12.	Síntesis analítica de posición de mecanismo manivela-corredera y corredera- manivela	22
6.13.	Eficiencia	24
6.14.	Ángulos de agarrotamiento	24
6.15.	Onshape	25
7.	Una propuesta de diseño	26
7.1.	Plataformas didácticas	26
7.2.	Competencias del estudiante	27
7.3.	Parámetros de diseño de la plataforma	27
7.4.	Módulo de mecanismos de cuatro barras	29
7.5.	Módulo de mecanismos manivela corredera	30
7.6.	Módulo de juntas	32
8.	Diseño de una plataforma interactiva	33
8.1.	Junta revoluta	33
8.2.	Eslabones	34
8.3.	Bosquejo de proyecto	37
8.4.	Diseño CAD	37
9.	Análisis cinemático	41
9.1.	Inicio	41
9.2.	Simulación	42
9.3.	Mecanismos de 4 barras	42
9.4.	Mecanismos manivela-corredera	43
9.5.	Mecanismos corredera-manivela	44
9.6.	Conexión con plataforma física	45
10.	Implementación electrónica	47
10.1.	Implementación física	47
10.2.	Control de motores	47
10.3.	Medición de ángulos	48
10.4.	Sensor de corriente	49
10.5.	Integración	49
11.	Construcción de plataforma	50
11.1.	Selección de materiales	50
11.2.	Manufactura	50
12.	Pruebas experimentales	54
12.1.	Medición y ajustes	54
12.2.	Comparativa plataforma física vs. análisis teórico	54
13.	Conclusiones	58

14.Recomendaciones	59
15.Referencias	60
16.Anexos	62
16.1. Bosquejo de proyecto	62
16.2. Recorrido por la aplicación	63
16.3. Plataforma física	66
16.4. Componentes	67
16.5. Complemento de resultados	72
17.Glosario	76

1.	Mecanismos desarrollados en CAD por David Ponsa [1]	3
2.	Kit de mecanismos de barras ES15	4
3.	Kits de mecanismos de 4 barras KI130	4
4.	Notación esquemática de diagramas cinemáticos	13
5.	Juntas o pares cinemáticos de distintos tipos [6]	14
6.	Aplicaciones de mecanismos de 4 barras en la industria [12]	15
7.	Lazo vectorial de posición de un mecanismo de cuatro barras [6]	16
8.	Las 4 inversiones para mecanismos Grashof	17
9.	Las 4 inversiones para mecanismos No Grashof	18
10.	Las 4 inversiones para mecanismos Especial de Grashof	18
11.	Configuraciones abierta y cruzada del mecanismos de 4 barras	20
12.	Lazo vectorial de posición de un mecanismo manivela-corredera o corredera-manivela	20
13.	Lazo vectorial de posición de un mecanismo manivela-corredera	22
14.	Las 4 inversiones de un mecanismo manivela corredera desarrollada en Motiongen.	31
15.	Ejemplo de mecanismo manivela corredera	32
16.	Modelo para junta revoluta	34
17.	Método para cambio de eslabones propuesto por Teaching Tech [16]	34
18.	Diseño de eslabones	36
19.	Ensamble de eslabones	36
20.	Sección modular de juntas superficiales	38
21.	Explosión de ensamblaje de diseño CAD	38
22.	Sección modular de juntas superficiales	39
23.	Uniones guía lineales de corredera de cola de milano (<i>Dovetail Slide</i>)	39
24.	Módulo de 4 barras	40
25.	Módulo manivela-corredera	40
26.	Pestaña de <i>Simulación > 4 barras > valores personalizados</i> en interfaz gráfica	42
27.	Pestaña de <i>Simulación > 4 barras > valores personalizados</i> en interfaz gráfica	43

28.	Pestaña de <i>Simulación</i> > <i>manivela corredera</i> > <i>valores personalizados</i> en interfaz gráfica	44
29.	Pestaña de <i>Simulación</i> > <i>corredera manivela</i> > <i>valores personalizados</i> en interfaz gráfica	45
30.	Plataforma física modular	51
31.	Sección modular de juntas superficiales	52
32.	Mecanismo de 4 barras reconfigurable en vista frontal	52
33.	Mecanismo manivela corredera reconfigurable en vista frontal	53
34.	Prueba mecanismo Tipo 2 de la Clasificación de Barker manivela-balancín	55
35.	Pestaña de conexión con plataforma física	55
36.	Prueba manivela corredera	57
37.	Bosquejo para el diseño de la plataforma	62
38.	Pestaña de <i>Inicio</i> > <i>Ejemplos</i> en interfaz gráfica	63
39.	Pestaña de <i>Inicio</i> > <i>Introducción</i> en interfaz gráfica	63
40.	Pestaña de <i>Inicio</i> > <i>juntas</i> en interfaz gráfica	64
41.	Pestaña de <i>Inicio</i> > <i>Movilidad</i> en interfaz gráfica	64
42.	Pestaña de <i>Conexión con la plataforma física</i> > <i>4 barras</i> en interfaz gráfica	65
43.	Pestaña de <i>Conexión con la plataforma física</i> > <i>manivela corredera</i> en interfaz gráfica	65
44.	Pestaña de <i>Conexión con la plataforma física</i> > <i>Movimiento libre</i> en interfaz gráfica	66
45.	Plataforma física vista frontal	66
46.	Juegos de eslabones acoplables a los puntos de la bancada del mecanismo de 4 barras	67
47.	Disposición de pines CNC Shield V3	67
48.	Disposición de pines Encoder AS5600 3.3V	68
49.	Disposición de pines multiplexor Adafruit I2C TCA9548A	68
50.	Medición de ángulos con plataforma física	69
51.	Prueba mecanismo Tipo 3 de la Clasificación de Barker	69
52.	Prueba mecanismo Tipo 4 de la Clasificación de Barker	70
53.	Prueba mecanismo Tipo 5 de la Clasificación de Barker	70
54.	Prueba mecanismo Tipo 10 de la Clasificación de Barker	70
55.	Prueba mecanismo Tipo 11 de la Clasificación de Barker	71
56.	Prueba mecanismo Tipo 12 de la Clasificación de Barker	71
57.	Prueba mecanismo Tipo 13 de la Clasificación de Barker	71
58.	μ en una revolución en el mecanismo manivela balancín	72
59.	μ en una revolución en el mecanismo doble balancín	72
60.	μ en una revolución en el mecanismo balancín manivela	73
61.	μ en una revolución en el mecanismo triple balancín	73
62.	μ en una revolución en el mecanismo manivela balancín sc	74
63.	μ en una revolución en el mecanismo doble balancín sc	74
64.	μ en una revolución en el mecanismo doble balancín sc	75
65.	μ en una revolución en el mecanismo paralelogramo	75

Índice de cuadros

1.	Clasificación de juntas completas (pares inferiores) según su grado de libertad	14
2.	Clasificación completa de Barker de mecanismos planos de cuatro barras [6]	19
3.	Competencias	27
4.	Mecanismos a simular en la plataforma física	30
5.	Rangos de longitud de los eslabones utilizados en la plataforma didáctica . . .	37
6.	Listado de componentes principales de la plataforma didáctica	48

El estudio de mecanismos es esencial en la ingeniería; sin embargo, en la iniciativa académica de Mecanismos de la Universidad del Valle de Guatemala la enseñanza suele enfocarse en el área teórica, lo que reduce las oportunidades de aprendizaje experimental. Este trabajo propone una plataforma de aprendizaje didáctica reconfigurable compuesta por una plataforma física y una aplicación desarrollada en Matlab. La plataforma física integra tres módulos principales que le ayudan al estudiante en la comprensión de conceptos como condición de Grashof, clasificación de Barker, síntesis de posición y tipos de juntas. El sistema electrónico implementado permite la comunicación entre la aplicación y la plataforma física para el control de motores y lectura de sensores de posición angular. Los resultados evidencian correspondencia entre simulación y mediciones físicas, validando el potencial de la plataforma como una herramienta académica eficaz y replicable.

Palabras clave: mecanismos de 4 barras, plataforma educativa, cinemática, diseño mecánico.

The study of mechanisms is essential in engineering; however, within the Mechanisms academic program at Universidad del Valle de Guatemala, instruction is often focused on theoretical aspects, limiting opportunities for experimental learning. This work proposes a reconfigurable didactic learning platform composed of a physical platform and an application developed in MATLAB. The physical platform integrates three main modules that support students in understanding concepts such as the Grashof condition, Barker classification, position synthesis and types of joints. The electronic system implemented enables communication between the application and the physical platform for motor control and angular position sensing. The results demonstrate strong correspondence between simulation and physical measurements, validating the platform's potential as an effective and replicable academic tool.

Keywords: four-bar linkage, educational platform, kinematics, mechanical design.

CAPÍTULO 1

Introducción

El estudio de la teoría de mecanismos es una parte fundamental para la fabricación de maquinaria o sistemas mecánicos complejos. Los mecanismos más complejos pueden reducirse a una interconexión de mecanismos más simples; entre ellos, el mecanismo de cuatro barras.

La enseñanza de conceptos para el análisis cinemático en el diseño de mecanismos suele enfrentarse a la dificultad de trasladar teorías abstractas a experiencias tangibles. En este contexto, las plataformas didácticas en mecánica se consolidan como un recurso valioso, ya que pueden facilitar la visualización del movimiento relativo entre eslabones y permitir la validación práctica de modelos matemáticos. La incorporación de criterios como la modularidad, la facilidad de reconfiguración, junto con el uso de códigos visuales y herramientas digitales interactivas mejora la experiencia de aprendizaje, favoreciendo la comprensión del funcionamiento de los mecanismos y mejorando el aprendizaje de carácter práctico y aplicado.

El presente trabajo está orientado a estudiantes de ingeniería mecánica y mecatrónica en búsqueda de expandir sus conocimientos a través de recursos visuales. Su finalidad es proporcionar recursos útiles y didácticos a los estudiantes e interesados de temas afines a mecánica para alcanzar los conocimientos de manera simple y práctica.

La plataforma integra herramientas de fabricación accesibles, como impresión 3D y corte láser, junto con un sistema de control implementado en Arduino complementado con una interfaz desarrollada en Matlab 2023b. Estas características garantizan no solo la viabilidad en entornos universitarios, sino también la posibilidad de comparar la teoría con la práctica mediante la adquisición y análisis de datos en tiempo real.

Finalmente, este trabajo no solo se limita a una propuesta de carácter académico, sino que plantea la base para futuras aplicaciones hacia escenarios industriales. De esta forma, la plataforma se concibe como un puente entre el aprendizaje universitario y la práctica profesional en ingeniería.

Las plataformas didácticas ofrecen diversas perspectivas de aprendizaje, adaptándose a diferentes estilos de enseñanza y niveles de complejidad. En el estudio de mecanismos de n barras, estas pueden desarrollarse tanto en entornos virtuales, donde es posible modificar parámetros en sistemas ideales y observar mediante simulación la relación entre eslabones, como en entornos físicos, que permiten experimentar e identificar las implicaciones de construcción y diseño en un modelo real y su influencia en el comportamiento respecto a la relación entre entrada y salida de los mecanismos.

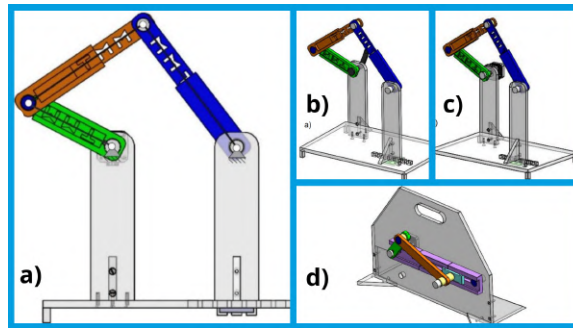
2.1. Maquetas didácticas para la enseñanza de Teoría de Máquinas y Mecanismos: análisis comparativo del diseño, la fabricación, el control y el coste

El objetivo del trabajo de David Ponsa de la Universitat Politècnica de Catalunya [1] consistió en analizar las características de diseño, funcionales y el coste de adquisición de maquetas comerciales para la enseñanza de la iniciativa académica Teoría de Máquinas y Mecanismos. El segundo objetivo fue aportar diseños novedosos y de bajo costo para la fabricación de maquetas de mecanismos básicos - el cuadrilátero articulado de Grashof y el mecanismo de manivela-biela-pistón-, además de incluir su motorización y control mediante Arduino.

Ponsa desarrolló dos prototipos modulares de 4 barras en 3D para ser fabricados mediante impresión 3D y corte láser. Estos prototipos tienen la capacidad de representar todas las inversiones cinemáticas propias de cada mecanismo, utilizando un único eslabón de referencia fija o bancada, la cual es reconfigurable mediante la modificación de la configuración o la posición de las barras. Este sistema facilita la variación de la configuración sin requerir estructuras adicionales, optimizando el proceso de cambio de inversión. La Figura 1 muestra los prototipos presentados por Ponsa.

La entrega final incluyó los modelos CAD de los mecanismos, simulaciones de su funcionamiento y una estimación detallada de los costes de producción con el objetivo de evaluar viabilidad técnica y económica frente a modelos comerciales. Para ello se analizaron y cotizaron maquetas de fabricantes como Tecquipment, Edibon y Gunt, de los cuales dos se analizarán posteriormente. Los resultados de la comparativa indicaron que la alternativa de desarrollo propio reduce notablemente el presupuesto, cumpliendo con las características necesarias que le permitan al usuario alcanzar las mismas competencias con la posibilidad de incorporar sistemas de control y actuadores eléctricos. Las maquetas diseñadas fueron más económicas, versátiles y permitieron representar múltiples configuraciones con una única estructura. Además, su fabricación con tecnologías accesibles como la impresión 3D y el corte láser, junto con la posibilidad de controlarlas mediante Arduino, las convirtió en una opción más didáctica y sostenible para la enseñanza de la asignatura.

Figura 1. Mecanismos desarrollados en CAD por David Ponsa [1]



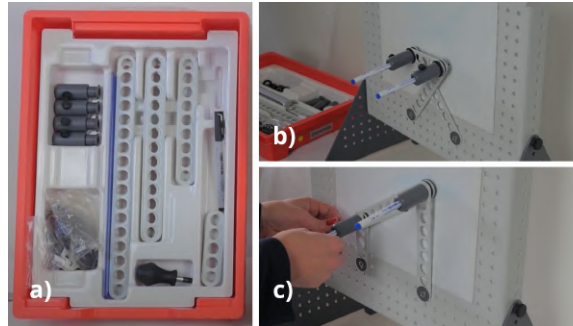
Nota. Subfiguras: a) Partes del mecanismo cuadrilátero articulado Grashof, b) cuadrilátero articulado Grashof con controlador manual, c) Cuadrilátero articulado Grashof con controlador *motor stepper* y d) Manivela-corredera.

2.2. TecEquipment: Bar Linkages Kit (ES15)

TecEquipment es una compañía procedente de Inglaterra enfocada en la fabricación de kits de sistemas experimentales modulares de ingeniería. La línea Engineering Science provee plataformas educativas de los mecanismos con kits de los mecanismos de manivela-balancín, manivela-corredera, mecanismos de retorno rápido, etc. Al ensamblar manualmente los mecanismos y trazar las trayectorias de movimiento ajustando un rotulador al panel, los estudiantes pueden observar la conversión de movimiento angular a lineal, así como analizar el comportamiento de los mecanismos clásicos de ingeniería a través del análisis de trayectorias, pares cinemáticos y configuraciones Grashof. La Figura 2 muestra el kit ES15 cuyos objetivos de aprendizaje consisten en fomentar la comprensión mediante la variación de las relaciones entre eslabones y su influencia en las trayectorias de mecanismos de cuatro barras, de línea recta (línea recta de Watt, de Chebyshev, de Peaucellier-Lipkin, inversor de Hart, de Robert y de Hoeken), mecanismo pantógrafo y mecanismo de dirección de Ackermann. La Figura 2-a muestra el contenido del kit, el cual consta de un panel de trabajo ES1, 20 barras perforadas con diferentes longitudes, hojas magnéticas borrables para trazar movimientos, así como pivotes o juntas. De esta forma es posible observar las gráficas de posición de forma

manual conectando un marcador a las juntas [2].

Figura 2. Kit de mecanismos de barras ES15



Nota. Subfiguras: a) Contenido del Kit ES15, b) Mecanismo de Chebyshev y c) Mecanismo de 4 barras.

2.3. Gunt Hamburg: KI 130 Kinematic model: four-joint link

Gunt Hamburg es una empresa alemana [3] dedicada a la fabricación de productos enfocados en ingeniería. En la Figura 3 se observa el kit KI130 fabricado de aluminio en una estructura de metacrilato transparente en la que se varían longitudes de manivela y balancín en los radios de los discos. Los objetivos de aprendizaje de este kit son: investigación de las relaciones mecánicas en el mecanismo de cuatro articulaciones; estudio del principio de funcionamiento de mecanismo manivela-balancín, doble-balancín, doble-manivela y verificación de la condición de Grashof. Los estudiantes alcanzan estos aprendizajes mediante la variación del radio de la manivela, el del balancín y la longitud del acoplador. Al realizar reconfiguraciones de los eslabones, los estudiantes pueden comprender cómo la parametrización de los mismos influye en la salida del mecanismo.

Figura 3. Kits de mecanismos de 4 barras KI130



Nota. Modelo comercial de Gunt Hamburg.

La enseñanza de la iniciativa académica de Mecanismos de la Universidad del Valle de Guatemala enfrenta desafíos significativos debido a la falta de herramientas didácticas físicas que complementen la teoría y la práctica. Si bien la literatura en mecánica y diseño de maquinaria es amplia, gran parte de ella se orienta a análisis avanzados, como: esfuerzos, factores de seguridad o transmisión de potencia; por lo que existe mayor variedad de contenido didáctico orientado a estos temas, mientras que la literatura referente a mecanismos presenta la particularidad de que el contenido suele abordarse mediante formulaciones geométricas y matemáticas que, aun acompañadas de diagramas, no siempre resultan suficientes para apoyar su comprensión desde una perspectiva didáctica o visualmente intuitiva.

El reto principal, por lo tanto, no reside en la ausencia de teoría, sino en la carencia de recursos visuales o físicos que permitan materializar estos conceptos en el aula. Esta limitación dificulta el aprendizaje de conceptos cinemáticos, como el criterio de Grashof, las inversiones de mecanismos de cuatro barras y la clasificación de los tipos de juntas en un mecanismo. Dicha carencia limita las opciones de los estudiantes para conectar conceptos teóricos con aplicaciones reales.

Actualmente, en la Iniciativa Académica de Mecanismos de la Universidad del Valle de Guatemala los docentes dependen de la imaginación espacial de los estudiantes y algunas simulaciones para explicar conceptos. No obstante, la interacción directa con modelos físicos le puede permitir al estudiante la comprensión de temas a partir de la observación de la teoría aplicada, gracias al empleo de múltiples sentidos en el proceso de aprendizaje. Dentro de la iniciativa académica, el primer y único contacto de los estudiantes con un sistema físico ocurre hasta el desarrollo de su proyecto final. Es en esta etapa donde pueden comparar por primera vez el comportamiento real del mecanismo con el modelo teórico, evidenciando diferencias derivadas de condiciones no ideales. Esto limita la oportunidad de incorporar experiencias que consoliden los temas durante las primeras fases del aprendizaje. Por lo tanto, es crucial desarrollar herramientas didácticas que integren teoría y práctica para optimizar el aprendizaje de los mecanismos y fomentar una comprensión más profunda de conceptos importantes desde las primeras sesiones del curso. Aunque existen diversas

soluciones orientadas a apoyar la enseñanza de estos conceptos, estas presentan restricciones importantes que se abordan a continuación.

Los trabajos mostrados en la sección de Antecedentes en el Capítulo 2 presentan limitaciones que aún no se han abordado. Por ejemplo, el trabajo de Ponsa [1] carece de mediciones experimentales, ya que se basa únicamente en una propuesta CAD, sin un desarrollo práctico que documente las problemáticas que surgen al construir y manufacturar el proyecto. Otros recursos de aprendizaje, como Motiongen o la página web de la Universidad del Illinois destinada a la simulación de mecanismos [4], se limitan exclusivamente al uso de software, de modo que los estudiantes no pueden observar el comportamiento de los mecanismos en un sistema físico real.

De manera similar, los modelos comerciales presentan limitaciones importantes. Una de las más críticas es la ausencia de sistemas de control que permitan accionar los mecanismos mediante actuadores eléctricos. A pesar de sus precios elevados, productos como el Bar Linkages Kit (ES15), descrito en el Capítulo 2.2, y el KI 130 Kinematic Model: Four-Joint Link, presentado en el Capítulo 2.3, dependen exclusivamente del accionamiento manual. Esta característica impide la automatización y la repetitividad de los experimentos, y dificulta la reconfiguración rápida de los eslabones, restringiendo la exploración de múltiples configuraciones cinemáticas en una sola sesión de clase. Como consecuencia, los estudiantes disponen de menos oportunidades para realizar prácticas sistemáticas que les permitan contrastar la teoría con el comportamiento real del mecanismo.

La iniciativa académica mencionada utiliza una integración de MotionGen y Onshape para el diseño geométrico y la simulación del mecanismo. MotionGen es especialmente útil para generar gráficos de velocidad entre juntas; sin embargo, esta funcionalidad resulta de mayor utilidad hacia el final del curso cuando se abordan dichos temas. Además, la herramienta presenta limitaciones al modelar ciertos tipos de mecanismos y exhibe errores en simulaciones específicas, como el caso especial III de Grashof, lo que dificulta la enseñanza y comprensión de conceptos cinemáticos fundamentales. Asimismo, se usan como recursos hojas de cálculo y plataformas como Matlab para desarrollar el análisis numérico. Sin embargo, el uso simultáneo de múltiples herramientas incrementa la complejidad del proceso de aprendizaje, ya que cada plataforma emplea convenciones, interfaces y representaciones distintas. Este cambio constante entre entornos puede dispersar la atención del estudiante y fragmentar el flujo de información, dificultando la continuidad y coherencia del proceso de estudio.

Ante estas limitaciones, se propone desarrollar una plataforma didáctica *plug & play* que integre diseño modular, fabricación accesible mediante impresión 3D y corte láser y un control automatizado con Arduino para el beneficio de los estudiantes de la iniciativa académica de Mecanismos para comprensión de temas. Asimismo, el impacto de este proyecto beneficiará a estudiantes de la iniciativa académica de Robótica para el repaso de conceptos, estudiantes de la iniciativa académica de Introducción a la ingeniería mecánica, así como ferias demostrativas de la Universidad del Valle de Guatemala dirigidas a aspirantes o interesados en las carreras afines.

4.1. Objetivo general

Diseñar y construir una plataforma didáctica para el análisis de síntesis de posición de mecanismos de cuatro barras.

4.2. Objetivos específicos

- Definir los parámetros de diseño basado en las competencias de la iniciativa académica de Mecanismos.
- Diseñar una plataforma didáctica reconfigurable basada en las competencias de la iniciativa académica de Mecanismos.
- Integrar análisis de cinemática paramétrica del modelo de cuatro barras reconfigurable.
- Construcción de la plataforma de cuatro barras reconfigurable.
- Realizar una serie de pruebas con mecanismos específicos y validar el comportamiento cinemático teórico vs. experimental.

El proyecto se centró en el diseño y construcción de una plataforma didáctica interactiva compuesta de una parte física y una interfaz de usuario integradas de manera complementaria. El diseño de esta plataforma fue delimitada por los modelos de plataformas didácticas comerciales abordados en la sección de Antecedentes en el Capítulo 2. La construcción de la misma fue posible a través de los recursos que la Universidad del Valle de Guatemala proporciona a sus estudiantes, como el MakerLab y el D-Hive, los cuales proporcionan servicios como: corte láser, impresión 3D y talleres de manufactura. Para el desarrollo del proyecto se estableció un margen de tiempo de ocho meses, desde la fase de diseño hasta la materialización de la idea.

El diseño se limitó a una arquitectura sencilla y replicable con los recursos institucionales, permitiendo cubrir la necesidad de construcción de múltiples modelos en caso de ser necesario. La plataforma se dimensionó de forma que el transporte no requiera el uso de equipo especializado.

En cuanto al alcance funcional, basado en las competencias de la iniciativa académica de Mecanismos, se delimitó el tipo de mecanismos a específicamente de cuatro barras. Dado que la clasificación de Barker, o clasificación por tipo de inversión, ofrece catorce tipos de configuraciones de mecanismos de cuatro barras, se seleccionaron ocho para replicar en la plataforma física. A estos se añadió el mecanismo manivela corredera, variante del mecanismo de cuatro barras. El análisis se centró en síntesis de posición a través de la integración de una aplicación desarrollada en Matlab. Se seleccionó dicho programa debido a su frecuente integración en otras iniciativas académicas de la facultad de ingeniería.

Los resultados incluyen: (I) una plataforma física conformada por tres módulos: (a) un módulo reconfigurable de mecanismos de cuatro barras, (b) un módulo reconfigurable de manivela-corredera y (c) un módulo demostrativo de seis tipos de juntas de superficie, dividido en secciones asociadas a los grados de libertad; y (II) una interfaz de usuario estructurada en tres apartados: (1) un módulo de inicio para la identificación de tipos de juntas y cálculo de movilidad, (2) un módulo de simulación de mecanismos de 4 barras con valores predefinidos, vinculados a las dimensiones de la plataforma física, y la opción de

ingresar valores específicos y (3) un módulo de conexión en tiempo real con la plataforma física que permite controlar los motores y comparar los valores de los ángulos obtenidos en la plataforma física con los resultados teóricos.

6.1. Cinemática

La cinemática es la rama de la mecánica que estudia el movimiento de cuerpos excluyendo las fuerzas presentes en el sistema. En el análisis de mecanismos, la cinemática permite describir cómo cambian la posición, la velocidad y la aceleración de los eslabones.

En un cuerpo rígido hay cinco tipos generales de movimiento: traslación, rotación en torno a un eje fijo, movimiento plano general, rotación en torno a un punto fijo y movimiento general [5].

Una cadena cinemática es un sistema compuesto por varios eslabones interconectados por juntas que permiten la transmisión de un movimiento controlado en función de un movimiento de entrada. Cuando en dicha cadena existe al menos un eslabón fijado al marco de referencia, denominado convencionalmente tierra o bancada, la cadena se convierte en un mecanismo [6].

Los mecanismos son dispositivos diseñados para transformar un movimiento de entrada en un movimiento de salida angular o lineal definido por su configuración geométrica, generalmente bajo condiciones de fuerza y potencia limitadas [7]. Las máquinas están compuestas por conjuntos de mecanismos que permiten transmitir, modificar o transformar el movimiento y el esfuerzo mecánico según la aplicación.

La cinemática permite describir matemáticamente la posición de un mecanismo mediante distintos enfoques de síntesis. La síntesis de tipo consiste en seleccionar el mecanismo más adecuado según la tarea y el comportamiento deseado; la síntesis cualitativa explora configuraciones posibles mediante esquemas preliminares y herramientas CAD; la síntesis cuantitativa o analítica determina los parámetros necesarios para cumplir con posiciones, velocidades o trayectorias específicas; y la síntesis dimensional define las longitudes y proporciones de los eslabones para lograr el movimiento requerido, incluyendo métodos gráficos basados en construcciones geométricas como intersecciones de arcos o trazado de líneas [6].

La síntesis de posición constituye un caso particular de la síntesis cuantitativa y tiene como objetivo definir las configuraciones que debe adoptar un mecanismo para pasar por un conjunto específico de posiciones deseadas. Este tipo de problema puede resolverse mediante métodos analíticos o como parte de la síntesis dimensional.

6.2. Condiciones límite

Los mecanismos, al estar sujetos a restricciones geométricas, poseen condiciones límite en las que existen particularidades en el comportamiento del mismo. Estas condiciones límite representan configuraciones que, en muchos casos, determinan alcances o limitaciones funcionales del sistema [6]. Entre ellos se encuentran:

- **Ángulos de agarrotamiento o centro muerto:** se presentan cuando dos o más eslabones adoptan una disposición colineal. En esta configuración, el mecanismo pierde movilidad debido a la alineación de los eslabones, lo que provoca un bloqueo en la transmisión del movimiento de entrada. Se trata de ángulos críticos que deben considerarse en el diseño, ya que limitan el rango de operación continuo y afectan la seguridad de los elementos del mecanismo. Es posible atravesar estas posiciones mediante sistemas mecánicos [8], sistemas eléctricos que proporcionen la inercia necesaria o la desconexión del mecanismo [9]. En la Sección 6.14 se aborda el cálculo de estos ángulos.
- **Posición estacionaria:** corresponde a una situación derivada de una condición de agarrotamiento, en la cual uno de los eslabones queda temporalmente restringido y no puede continuar su movimiento aun cuando se aplica un torque en el eslabón de entrada. Estas posiciones comprometen la funcionalidad del mecanismo y pueden provocar fallos de operación. Para superarlas sin depender de la inercia acumulada, se utilizan controles activos que suministran el torque adicional requerido para atravesar el punto muerto.

El estudio se limitará a mecanismos planos, entendidos como sistemas cinemáticos bidimensionales o mecanismos planares.

6.3. Movilidad

La movilidad se expresa como M y se conoce como grados de libertad GDL posibles. Se refiere a la cantidad de parámetros que se necesitan para definir la posición en el espacio de un cuerpo rígido o eslabón sin considerar su variación en el tiempo. Estos parámetros dependen del marco de referencia y representan la cantidad de coordenadas independientes requeridas para describir la posición de dicho cuerpo rígido [6]. Un objeto en el mundo tridimensional puede tener 6 GDL, de los cuales 3 corresponden a traslaciones (x, y, z) y a 3 rotaciones (θ, ϕ, ρ). Los cinco tipos de movimiento de un cuerpo rígido [5] mencionados en la Sección 6.1 de Cinemática están dados por estos parámetros. En los mecanismos planares hay dos traslaciones y una rotación, por lo que tienen 3 GDL.

La condición de Grübler [10] establece que un eslabón libre en el plano posee 3 grados de libertad. Cuando dos eslabones libres se conectan mediante una junta completa, esta unión impone dos restricciones que resultan en la eliminación de 2 GDL. Por tanto, un par de eslabones con 6 GDL en total pasa a tener 4 GDL una vez unidos por un par inferior. De forma análoga, conectar un eslabón a tierra elimina sus tres GDL, ya que queda completamente fijo respecto al marco de referencia.

Por definición, todos los mecanismos tienen al menos un eslabón conectado a tierra, y dado que solo existe un plano de tierra, $G=1$. Por otro lado, el tipo de junta puede imponer la restricción de 2 GDL si se trata de una junta completa, o 1 si es una semijunta, por lo tanto las semijuntas cuentan como 1/2 de una junta completa.

Considerando estas restricciones, la movilidad de un mecanismo planar puede determinarse mediante la ecuación de Kutzbach, también conocida como el criterio de Gruebler [11]:

$$M = 3(L - 1) - 2J_1 - J_2 \quad (1)$$

donde:

- M = grado de libertad o movilidad
- L = número de eslabones
- J_1 = número de juntas completas
- J_2 = número de semijuntas

Es posible predecir la naturaleza de una cadena cinemática a partir de sus grados de libertad. Si los GDL son positivos, corresponde a un *mecanismo*, si son negativos se trata de una *estructura precargada* y, si es cero, es una *estructura*.

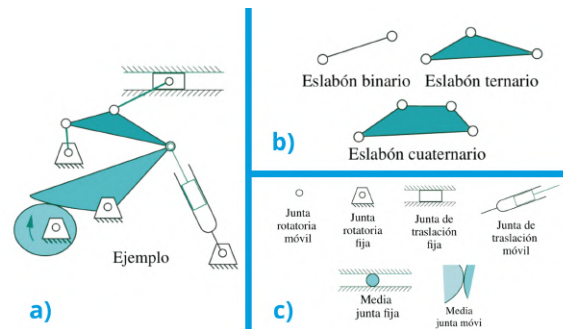
6.4. Partes de un mecanismo

Los mecanismos están compuestos por los elementos ilustrados en la Figura 4. Para su análisis, es común emplear diagramas cinemáticos que representan eslabones y juntas mediante líneas y círculos, siguiendo la convención estándar mostrada en la figura. Esta notación esquemática permite simplificar la geometría real del mecanismo.

6.4.1. Eslabones

Los mecanismos pueden presentar diferentes tipos de eslabonamientos. Se conoce como eslabón o barra a un cuerpo rígido que posee como mínimo 2 nodos que le permiten conectarse a otros eslabones. Según la cantidad de nodos que presente, un eslabón puede clasificarse como binario, ternario o de orden superior, tal como se ilustra en la Figura 4-b.

Figura 4. Notación esquemática de diagramas cinemáticos



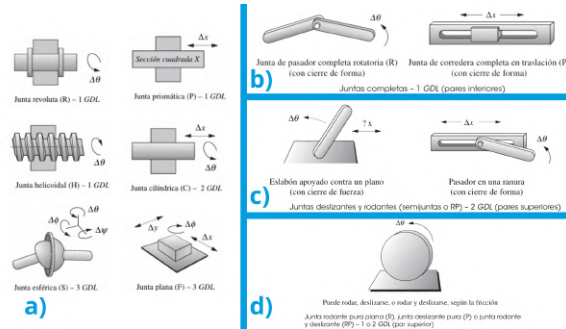
Nota. Subfigura: a) Ejemplo de un mecanismo, b) representación de eslabones y c) representación de juntas [6].

6.5. Pares cinemáticos o juntas

En un mecanismo, los eslabones se unen mediante pares cinemáticos que permiten el movimiento relativo entre ellos. Se clasifican en *pares superiores* y *pares inferiores*, como los que se observan en la Figura 5. El término *pares inferiores* describe juntas con contacto superficial en contraste con el término *pares superiores* que refiere un contacto de punto o línea.

En la Figura 5-a se aprecian los seis pares inferiores. Dentro de esta clasificación se encuentran las juntas de un grado de libertad (1 GDL) en donde está la revoluta, que permite la rotación relativa de dos eslabones alrededor de un eje común; la prismática, que posibilita un desplazamiento lineal o traslación; y la helicoidal, que combina traslación y rotación en forma de tornillo o rosca. En el caso de las juntas de dos grados de libertad (2 GDL), la cilíndrica admite simultáneamente una rotación y una traslación a lo largo de un mismo eje. Finalmente, las juntas de tres grados de libertad (3 GDL) incluyen la esférica, que permite rotaciones independientes en torno a un punto común, y la plana, que posibilita dos traslaciones en el plano y una rotación perpendicular al mismo. Cabe destacar que las juntas de tres grados de libertad no forman parte de los mecanismos planares, pues exceden las restricciones necesarias para el movimiento en dos dimensiones y su aplicación es propia de sistemas espaciales o tridimensionales, como rótulas de suspensión, articulaciones biomecánicas o robots.

Figura 5. Juntas o pares cinemáticos de distintos tipos [6]



Nota. Subfiguras: a) Los seis pares inferiores, b) juntas completas- 1 GDL (pares inferiores), c) juntas deslizantes y rodantes (semijuntas o RP) - 2 GDL (pares superiores) y d) junta rodante pura plana (R), junta deslizante pura (P) o junta rodante y deslizante (RP) - 1 o 2GDL (par superior).

El Cuadro 1 presenta en forma sintetizada los pares inferiores utilizados en teoría de mecanismos, indicando para cada uno su grado de libertad y su construcción elemental a partir de movimientos básicos de las juntas revoluta (R) y prismática (P). Pares como la helicoidal (H), cilíndrica (C), esférica (S) o planar (F) pueden interpretarse como combinaciones específicas de estos movimientos fundamentales, por lo que los pares R y P constituyen los elementos básicos a partir de los cuales se derivan los demás tipos de juntas empleados en mecanismos espaciales.

Cuadro 1. Clasificación de juntas completas (pares inferiores) según su grado de libertad

Nombre (símbolo)	GDL	Combinación elemental
Revoluta (R)	1	R
Prismática (P)	1	P
Helicoidal (H)	1	RP
Cilíndrica (C)	2	RP
Esférica (S)	3	RRR
Plana (F)	3	RPP

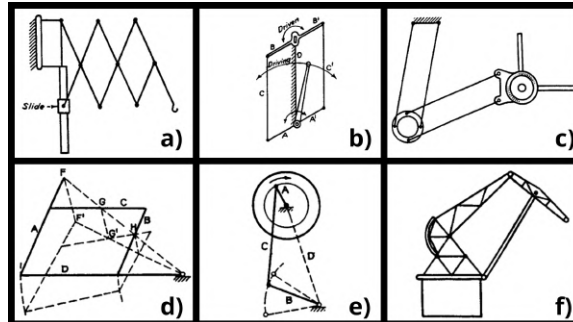
Nota. Construcción de los 6 pares cinemáticos a partir de juntas R y P [6].

6.6. Mecanismo de 4 barras

Dentro del estudio cinemático, los mecanismos de cuatro barras son conocidos por ser la estructura elemental a partir de la cual se pueden modelar sistemas mecánicos complejos. Una gran variedad de mecanismos planos pueden descomponerse en eslabonamientos equivalentes de cuatro barras, convirtiéndolo en un recurso esencial en múltiples aplicaciones de la industria y fundamental en el diseño [12]. En la Figura 6 se presentan ejemplos de aplicaciones de mecanismos de cuatro barras. Tal como indica Norton [6], este mecanismo

es el más común en maquinaria, y la figura ofrece una representación ilustrativa de dicha afirmación.

Figura 6. Aplicaciones de mecanismos de 4 barras en la industria [12]



Nota. Subfiguras: a) Mecanismo de tijera isósceles, b) Manivela paralela en sistemas de vapor, c) Mecanismo de doble manivela paralela, d) Pantógrafo, e) Mecanismo de máquina de coser impulsado por pedal de balancín, f) Mecanismo de doble palanca.

Un mecanismo de cuatro barras está conformado por los siguientes eslabones [6]:

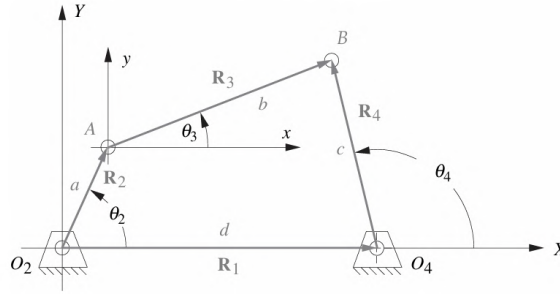
- Tierra o bancada: eslabón fijado al marco de referencia. No tiene movilidad.
- Manivela: eslabón que puede realizar una revolución completa y está pivotado al eslabón fijo.
- Acoplador o biela: eslabón que conecta dos eslabones pivotados al eslabón fijo.
- Balancín: eslabón que tiene rotación oscilante y está pivotado al eslabón fijo.

En la Figura 7 se muestran las partes de un mecanismos de 4 barras, así como las variables asociadas al mismo en un marco de referencia global X, Y y con sistemas de referencias auxiliares x, y . Las variables a, b, c y d representan la longitud del eslabón de entrada, acoplador, manivela y tierra, respectivamente. Las variables θ_2, θ_3 y θ_4 representan el ángulo de entrada, ángulo del acoplador y ángulo de salida respectivo. O_2 y O_4 son puntos fijos en el plano (soporte izquierdo y derecho) correspondiente al pivote fijo donde se unen los eslabones de entrada y salida .

6.7. Transformación de eslabonamientos

Según Norton [6], las reglas de transformación de eslabonamientos se describen de la siguiente manera: 1) Las juntas revolutas de un lazo pueden sustituirse por prismáticas siempre que al menos dos revolutas permanezcan en el lazo; 2) cualquier junta completa puede reemplazarse por una semijunta, aumentando el GDL en uno; 3) eliminar un eslabón reduce el GDL en uno; 4) aplicar las reglas 2) y 3) mantiene el GDL; 5) un eslabón ternario o de mayor orden puede contraerse parcialmente formando una junta múltiple sin modificar el GDL; y 6) la contracción completa de un eslabón de orden superior equivale a eliminarlo, creando una junta múltiple y reduciendo el GDL.

Figura 7. Lazo vectorial de posición de un mecanismo de cuatro barras [6]



Nota. Lazo vectorial para el análisis de síntesis de posición.

Al aplicar la regla 4 a un mecanismo de cuatro barras se obtiene la configuración de manivela-corredera, ya que una semijunta puede sustituirse por el acoplador. Al realizar esta transformación, se genera un acoplador efectivo que puede interpretarse como “pivotado en el infinito”. Estas equivalencias geométricas demuestran que la manivela-corredera no constituye un mecanismo independiente, sino una variante del mecanismo de cuatro barras que se obtiene mediante transformaciones válidas sin alterar su grado de libertad.

6.8. Condición de Grashof

La condición de Grashof es un criterio geométrico que permite predecir si, en un mecanismo de cuatro barras, alguno de sus eslabones podrá realizar una revolución, haciéndolo un criterio a considerar para el diseño y selección de diferentes configuraciones del mecanismo [6]. Este método de evaluación se basa únicamente en las longitudes de los eslabones, que se clasifican como:

- S : eslabón más corto,
- L : eslabón más largo,
- P, Q : los dos eslabones restantes.

La condición establece que:

$$S + L \leq P + Q \quad (2)$$

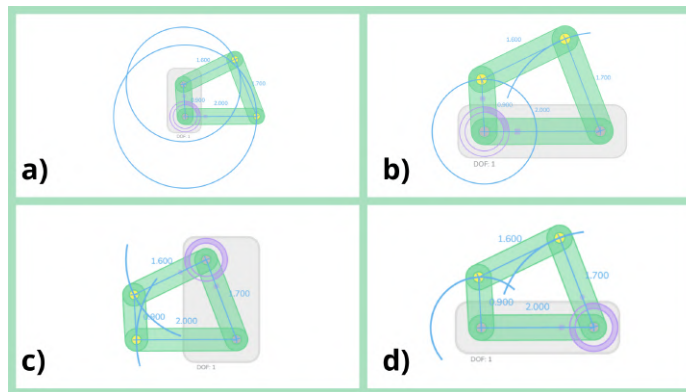
Si la desigualdad se cumple, el eslabonamiento se denomina *Clase I - Grashof* y al menos un eslabón podrá realizar una revolución completa con respecto a la bancada. En caso contrario, el mecanismo es *Clase II - No Grashof*, y ningún eslabón puede girar completamente. Cuando ambas sumas son iguales, el mecanismo es *Clase III - Especial de Grashof* y se considera un caso límite en el que existen puntos de cambio cuando los eslabones son colineales, produciendo que el mecanismo asuma cualquier configuración o disposición geométrica mencionada más adelante en la Sección 6.10.

6.9. Clasificación de Barker del eslabonamiento de cuatro barras

Barker desarrolló un esquema de clasificación que permite predecir el tipo de movimiento que puede esperarse de un eslabonamiento de cuatro barras únicamente a partir de las relaciones de longitud entre los eslabones. Esto es posible porque las características de movimiento angular del mecanismo no dependen del tamaño exacto de cada eslabón, sino de qué tan largos son unos respecto a otros, es decir, de sus proporciones [6]. Por esta razón, el movimiento no cambia si el mecanismo se escala, siempre que las relaciones entre las longitudes se mantengan.

Para comprender esta clasificación es necesario introducir el concepto de *inversión*, que consiste en alternar cuál eslabón se toma como bancada. Es importante destacar que el movimiento relativo entre los eslabones se conserva independientemente de la inversión realizada [9].

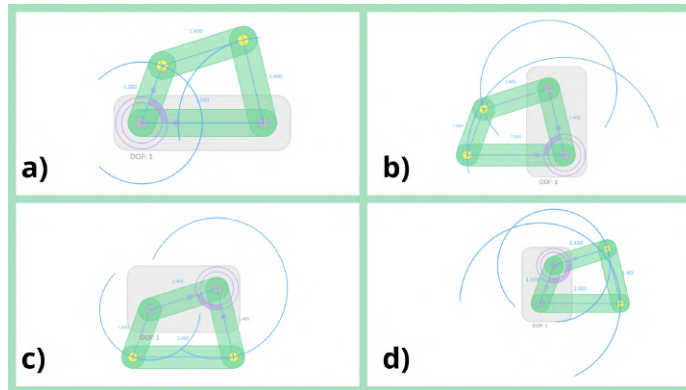
Figura 8. Las 4 inversiones para mecanismos Grashof



Nota. Designaciones según la clasificación de Barker: a) Tipo 1 - doble manivela, a) Tipo 2 - manivela-balancín, a) Tipo 3 - doble balancín, a) Tipo 4 - balancín-manivela. Revisar Cuadro 2.

A cada inversión de los mecanismos para cada una de las 3 clases de Grashof se le designa un código. El código se construye con la unión de varias letras. El eslabón se designa con una letra según su comportamiento, designado como *C* (*crank*, manivela) y *R* (*rocker*, balancín). Las condiciones de Grashof se designan como *G* (Grashof), *S* (Especial de Grashof) y sin prefijo para No Grashof. Las Figuras 8, 9 y 10 contienen las 4 posibles inversiones de las tres clases de Grashof. En el Cuadro 2 se resume esta clasificación, incluyendo la designación más común para cada tipo de mecanismo. La tercera columna indica la inversión correspondiente para cada configuración.

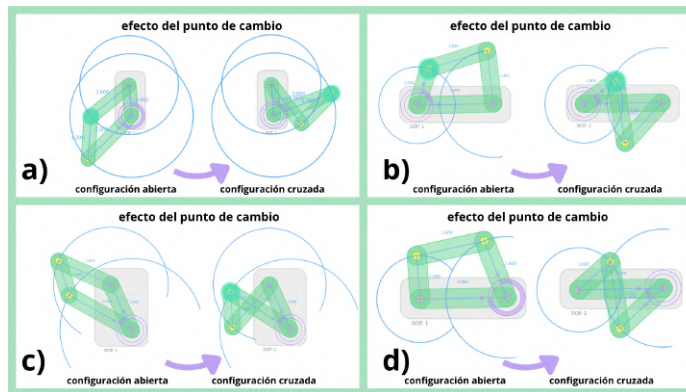
Figura 9. Las 4 inversiones para mecanismos No Grashof



Nota. Designaciones según la clasificación de Barker: a) Tipo 5 - triple balancín, b) Tipo 6 - triple balancín, c) Tipo 7 - triple balancín, d) Tipo 8 - triple balancín. Revisar Cuadro 2.

De esta manera, la clasificación de Barker constituye un criterio geométrico sistemático y completo para los mecanismos de cuatro barras, abarcando tanto los casos Grashof como los no Grashof y los casos especiales.

Figura 10. Las 4 inversiones para mecanismos Especial de Grashof



Nota. Designaciones según la clasificación de Barker: a) Tipo 9 - doble manivela SC, b) Tipo 10 - manivela-balancín SC, c) Tipo 11 - doble balancín SC, d) Tipo 12 - balancín-manivela SC. Revisar Cuadro 2.

Cuadro 2. Clasificación completa de Barker de mecanismos planos de cuatro barras [6]

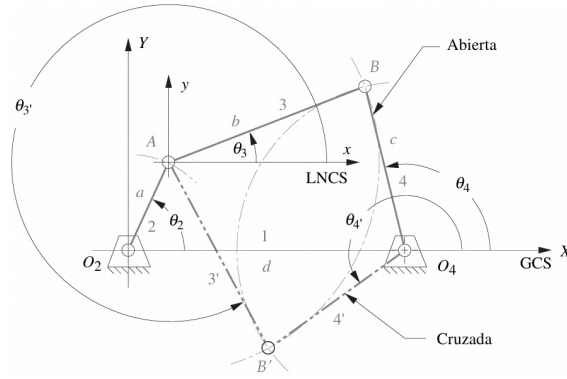
Tipo	$S + L$ vs. $P + Q$	Inversión	Clase	Código	También conocido como
1	<	$L_1 = s =$ bancada	I-1	GCCC	doble manivela
2	<	$L_2 = s =$ entrada	I-2	GCRR	manivela–balancín
3	<	$L_3 = s =$ acoplador	I-3	GRCR	doble balancín
4	<	$L_4 = s =$ salida	I-4	GRRC	balancín–manivela
5	>	$L_1 = l =$ bancada	II-1	RRR1	triple balancín
6	>	$L_2 = l =$ entrada	II-2	RRR2	triple balancín
7	>	$L_3 = l =$ acoplador	II-3	RRR3	triple balancín
8	>	$L_4 = l =$ salida	II-4	RRR4	triple balancín
9	=	$L_1 = s =$ bancada	III-1	SCCC	doble manivela SC
10	=	$L_2 = s =$ entrada	III-2	SCRr	manivela–balancín SC
11	=	$L_3 = s =$ acoplador	III-3	SRCR	doble balancín SC
12	=	$L_4 = s =$ salida	III-4	SRRC	balancín–manivela SC
13	=	dos pares iguales	III-5	S2X	paralelogramo o deltoide
14	=	$L_1 = L_2 = L_3 = L_4$	III-6	S3X	cuadrado

Nota. s = eslabón más corto, l = eslabón más largo, Gxxx = Grashof, RRRx = no Grashof, Sxx = caso especial.

6.10. Disposiciones geométricas de un mecanismo

Las configuraciones abierta y cruzada representan las dos disposiciones geométricas posibles de un mismo mecanismo. Estas disposiciones geométricas [9] corresponden a las dos soluciones del cierre vectorial del mecanismo y, aunque no modifican su movilidad, sí alteran la trayectoria y la orientación relativa de los eslabones. Un mecanismo se encuentra en configuración abierta o cruzada dependiendo de si el acoplador atraviesa la línea que une los centros de rotación O_2 y O_4 , como se observa en la Figura 11. Mecanismos de manivela-corredera y corredera-manivela presentan el cambio de estas configuraciones como una reflexión (efecto espejo) de la geometría del eslabonamiento, tal como se aprecia en la Figura 12.

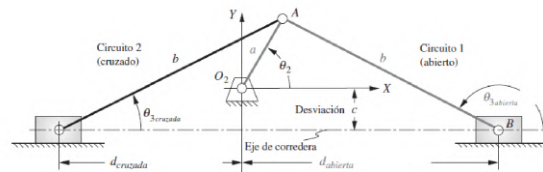
Figura 11. Configuraciones abierta y cruzada del mecanismos de 4 barras



Nota. Imagen extraída de [6].

El intercambio entre estas inversiones geométricas sólo puede ocurrir al atravesar una posición de punto de cambio o centro muerto, en la cual los eslabones se alinean y el mecanismo pierde temporalmente su capacidad de transmitir par [9]. La existencia de estos puntos de cambio depende directamente de la geometría del mecanismo. En particular, algunos mecanismos clasificados como Grashof poseen configuraciones donde se presentan estas posiciones singulares [6], mientras que otros nunca las alcanzan.

Figura 12. Lazo vectorial de posición de un mecanismo manivela-corredera o corredera-manivela



Nota. Lazo vectorial para el análisis de síntesis de posición. Fuente [6].

6.11. Síntesis analítica de posición de mecanismos de 4 barras convencional

Para mecanismos con un grado de libertad, como es el de cuatro barras, es suficiente con un parámetro de entrada para definir el resto de posiciones, en este caso θ_2 .

El *Lazo vectorial* que muestra la Figura 7 es una ecuación vectorial cerrada que relaciona todos los eslabones, donde R_i representa cada eslabón como un vector. La convención vectorial sirve para representar los vectores en sus coordenadas cartesianas para resolver la ecuación del lazo. Un mecanismo de cuatro barras se puede representar como un polígono cerrado en donde se recorren todos los eslabones de punta a cola, regresando al punto de inicio. La condición de cierre se expresa como una ecuación vectorial. Para ello, se parte del

punto fijo O_2 y se recorren los eslabones de entrada a , acoplador b , salida c y, finalmente, el eslabón fijo d que llega al punto fijo O_4 . Este cierre geométrico se expresa como

$$R_2 + R_3 - R_4 - R_1 = 0 \quad (3)$$

donde:

- R_1 = vector del eslabón fijo (longitud d)
- R_2 = vector del eslabón de entrada (longitud a , ángulo θ_2)
- R_3 = vector del eslabón acoplador (longitud b , ángulo θ_3)
- R_4 = vector del eslabón fijo (longitud c , ángulo θ_4)

Resolviendo el lazo vectorial en su forma compleja y transformando a coordenadas cartesianas, se obtiene la ecuación de Freudenstein [6], a partir de la cual se derivan las expresiones que permiten calcular las posiciones de los eslabones b y c para un valor dado del ángulo de entrada θ_2 . Las constantes geométricas se definen como:

$$K_1 = \frac{d}{a}, \quad K_2 = \frac{d}{c}, \quad K_3 = \frac{a^2 - b^2 + c^2 + d^2}{2ac}, \quad K_4 = \frac{d}{b}, \quad K_5 = \frac{c^2 - d^2 - a^2 - b^2}{2ab} \quad (4)$$

A partir de estas constantes, la solución para θ_4 se obtiene mediante la ecuación cuadrática:

$$A = \cos \theta_2 - K_1 - K_2 \cos \theta_2 + K_3, \quad B = -2 \sin \theta_2, \quad C = K_1 - (K_2 + 1) \cos \theta_2 + K_3 \quad (5)$$

$$\theta_{4,1,2} = 2 \arctan \left(\frac{-B \pm \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A} \right) \quad (6)$$

De forma análoga, la expresión para θ_3 resulta:

$$D = \cos \theta_2 - K_1 + K_4 \cos \theta_2 + K_5, \quad E = -2 \sin \theta_2, \quad F = K_1 + (K_4 - 1) \cos \theta_2 + K_5 \quad (7)$$

$$\theta_{3,1,2} = 2 \arctan \left(\frac{-E \pm \sqrt{E^2 - 4DF}}{2D} \right) \quad (8)$$

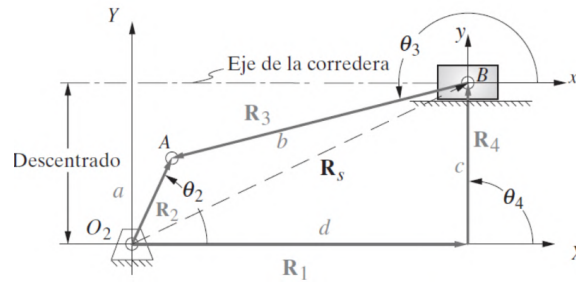
Tanto θ_3 , como θ_4 presentan dos soluciones, las cuales corresponden a las dos configuraciones geométricas del mecanismo: *abierta* y *cruzada*.

6.12. Síntesis analítica de posición de mecanismo manivela-corredera y corredera-manivela

Manivela-corredera

El método de lazo vectorial, previamente aplicado al mecanismo de cuatro barras, también puede extenderse a configuraciones con correderas. En este caso, se analiza un mecanismo de manivela-corredera excéntrico. En la Figura 13 se aprecia el lazo vectorial correspondiente. El término *excéntrico* indica que el eje de la corredera extendido no pasa por el pivote de la manivela, lo que representa el caso más general.

Figura 13. Lazo vectorial de posición de un mecanismo manivela-corredera



Nota. Lazo vectorial para el análisis de síntesis de posición. Fuente [6].

Para su modelado, el mecanismo se representa únicamente con tres vectores de posición: R_2 , R_3 y R_s , mientras que R_4 es un vector perpendicular al eje de deslizamiento que define el desplazamiento constante c . El lazo vectorial queda entonces expresado como:

$$R_2 - R_3 - R_4 - R_1 = 0 \quad (9)$$

donde:

- R_1 = vector del eslabón corredera (longitud d)
- R_2 = vector del eslabón de entrada (longitud a , ángulo θ_2)
- R_3 = vector del eslabón acoplador (longitud b , ángulo θ_3)
- R_4 = vector ortogonal a R_1 que define el descentrado (longitud c , ángulo θ_4)

La posición angular del acoplador se obtiene aplicando la relación trigonométrica derivada del triángulo formado por estos elementos:

$$\theta_{31} = \arcsin\left(\frac{a \sin \theta_2 - c}{b}\right), \quad \theta_{32} = \arcsin\left(\frac{-(a \sin \theta_2 - c)}{b}\right) + \pi \quad (10)$$

Las dos soluciones corresponden a las configuraciones geométricas *abierta* y *cruzada* del mecanismo.

La posición del deslizador se obtiene aplicando la ley del coseno al mismo triángulo:

$$d = a \cos \theta_2 - b \cos \theta_3 \quad (11)$$

Estas expresiones permiten determinar completamente la posición del mecanismo a partir del ángulo de entrada θ_2 .

Existen consideraciones a tomar en cuenta en el análisis y diseño de mecanismos de manivela-corredera. De acuerdo a Erdman[9] las restricciones geométricas son inherentes a la transformación de movimiento angular-lineal propia del mecanismo, en donde la proporción entre manivela y acoplador condiciona tanto la amplitud de la carrera como el esfuerzo requerido para su operación. Asimismo, Sclatter [12] señala que la correcta selección de dimensiones debe buscar un equilibrio entre la extensión de la trayectoria y la compactación estructural, evitando configuraciones que comprometan la movilidad o generen colisiones internas.

Corredera-manivela

Para el mecanismo corredera-manivela, la ecuación de lazo vectorial puede reorganizarse para obtener una expresión cuadrática en función del ángulo de entrada θ_2 . Para simplificar la notación, se definen las constantes geométricas:

$$d = a \cos \theta_2 - b \cos \theta_3 \quad (12)$$

A partir de estas constantes se construyen los coeficientes del polinomio:

$$A = K_1 - K_3, \quad B = 2K_2, \quad C = K_1 + K_3 \quad (13)$$

La solución del problema de posición resulta en la ecuación cuadrática:

$$\theta_{2,2} = 2 \arctan \left(\frac{-B \pm \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A} \right) \quad (14)$$

cuyas dos raíces corresponden a las configuraciones *abierta* y *cruzada*. Una vez determinado θ_2 , el ángulo del acoplador se obtiene mediante:

$$\theta_{3_1} = \arcsin \left(\frac{a \sin \theta_2 - c}{b} \right), \quad \theta_{3_2} = \arcsin \left(\frac{-(a \sin \theta_2 - c)}{b} \right) + \pi \quad (15)$$

Estas expresiones permiten definir completamente la posición del mecanismo para un desplazamiento en d como parámetro de entrada.

6.13. Eficiencia

El ángulo de transmisión [9] es una medida de capacidad de transmisión de movimiento desde el eslabón acoplador hacia el de salida sin reflejar la acción de gravedad ni las fuerzas dinámicas. Este valor cambia durante el movimiento y le ofrece al diseñador un parámetro para determinar los requerimientos de torque de la cadena cinemática en todo el rango de operación del mecanismo y en cada punto del mismo. De la ecuación 16 se infiere que para un μ de 90 grados se obtiene la mayor eficiencia, pues la fuerza generada por el torque se maximiza porque $\sin 90=1$. Por el contrario, cuando $\mu \rightarrow 0^\circ$, la eficiencia de transmisión disminuye drásticamente y la fuerza útil tiende a 0, lo que incrementa de manera significativa el torque requerido para mantener el movimiento.

$$T_{\text{salida}} = F r \sin(\mu) \quad (16)$$

La expresión 17 para el ángulo de transmisión captura el ángulo instantáneo que se forma entre el acoplador y el eslabón de salida en su junta común. Este parámetro es fundamental porque determina la eficiencia con la que se transmite fuerza a través de dicha unión.

$$\theta_{\text{trans}} = |\theta_3 - \theta_4| \quad (17)$$

En un mecanismo manivela-balancín, existen dos posiciones críticas donde el acoplador y el eslabón de salida se vuelven colineales. En estas posiciones, el ángulo de transmisión llega a uno de sus valores extremos y la capacidad del mecanismo para transmitir fuerza se ve significativamente afectada.

La Ecuación 18 corresponde al caso de traslape, en el cual la manivela y el acoplador quedan alineados y orientados en la misma dirección (superpuestos). Por otro lado, la Ecuación 19 describe el caso de extendido, donde ambos eslabones se encuentran también colineales, pero extendidos en direcciones opuestas formando una línea recta continua.

Caso de traslape (a): Eslabones 1 y 2 colineales y traslapados.

$$\mu_1 = \gamma_1 = \arccos\left(\frac{b^2 + c^2 - (d - a)^2}{2bc}\right) \quad (18)$$

Caso de extendido (b): Eslabones 1 y 2 colineales y extendidos.

$$\mu_2 = \pi - \gamma_2 = \pi - \arccos\left(\frac{b^2 + c^2 - (d + a)^2}{2bc}\right) \quad (19)$$

6.14. Ángulos de agarrotamiento

Los límites de movimiento del mecanismo se conocen como posiciones de agarrotamiento. Estas posiciones ocurren cuando dos de los eslabones móviles se vuelven colineales, condición

geométrica que impide la continuidad del movimiento desde determinados eslabones.

El número de estas posiciones depende del tipo de mecanismo. Un eslabonamiento No Grashof triple balancín presenta cuatro posiciones de agarrotamiento, mientras que un mecanismo Grashof posee dos. En todas estas configuraciones, el mecanismo adopta una geometría triangular en la que el eslabón impulsor ya no puede generar movimiento, quedando bloqueado. Por ello, una vez que el mecanismo entra en una posición de agarrotamiento, no es posible continuar el movimiento desde ese eslabón, siendo necesario accionar un eslabón diferente para salir de la configuración.

$$\theta_{2,\text{agarrotamiento}} = \arccos\left(\frac{a^2 + d^2 - b^2 - c^2}{2ad}; \pm; \frac{b,c}{ad}\right), \quad 0 \leq \theta_{2,\text{agarrotamiento}} \leq \pi \quad (20)$$

6.15. Onshape

Onshape es una plataforma CAD basada en la nube que permite crear, editar y gestionar modelos 3D de forma colaborativa y en tiempo real. A diferencia del CAD tradicional, no requiere instalaciones locales ni manejo de archivos, ya que centraliza toda la información del proyecto y elimina conflictos de versiones. Su entorno multiusuario permite que diseñadores, equipos, clientes y colaboradores trabajen simultáneamente desde cualquier dispositivo con acceso a internet [13].

Una propuesta de diseño

El presente capítulo describe el planteamiento preliminar de la plataforma didáctica de mecanismos de cuatro barras. El prototipo se concibió bajo un enfoque modular y reconfigurable, fundamentado en criterios de diseño que permitan la reproductibilidad mediante el uso de materiales y procesos de manufactura disponibles en los espacios de fabricación de la UVG mencionados anteriormente; versatilidad a través de intercambio de configuraciones para facilitar la demostración y facilidad en el transporte a salones de clase sin equipo especializado.

7.1. Plataformas didácticas

Las plataformas didácticas constituyen un recurso esencial en la enseñanza de la ingeniería, ya que permiten trasladar conceptos abstractos a experiencias tangibles que refuerzan el aprendizaje [14]. Para que cumplan su función pedagógica, deben diseñarse con base en criterios de accesibilidad, modularidad y facilidad de uso, de modo que el estudiante pueda concentrarse en la comprensión de los fenómenos sin distracciones derivadas de la complejidad técnica del dispositivo.

En este sentido, la plataforma propuesta se concibe bajo un enfoque *plug and play*, lo que permite una reconfiguración rápida y segura de sus módulos sin necesidad de herramientas adicionales. Este enfoque favorece la exploración autónoma por parte del estudiante y garantiza que la plataforma pueda adaptarse a distintos escenarios de aprendizaje en laboratorio.

Se implementará un sistema de código de colores tanto en los eslabones como en las juntas, con el propósito de facilitar la identificación visual de cada componente y su función dentro del mecanismo. Esta estrategia pedagógica busca reducir la carga cognitiva en las etapas iniciales de aprendizaje y potenciar la correlación entre la teoría (modelos matemáticos

y cinemáticos) y la práctica (observación experimental).

7.2. Competencias del estudiante

La competencia 2 de la iniciativa académica de Mecanismos es: *Analiza la cinemática de mecanismos para reproducir el movimiento deseado*. Esta competencia está conformada por las competencias específicas contenidas en el Cuadro 3. La plataforma propuesta se orienta a satisfacer estas competencias, articulando el aprendizaje conceptual con la experimentación práctica. En este sentido, los parámetros de diseño de la plataforma desarrollados en el Capítulo 7.3 se establecieron tomando como referencia dichas competencias, de manera que cada decisión de diseño contribuyera directamente al desarrollo de las habilidades que el estudiante debe adquirir durante el curso.

Cuadro 3. Competencias de la iniciativa académica

Saberes conceptuales	Saberes procedimentales
El estudiante comprende las juntas y sus efectos	El estudiante visualiza y analiza los distintos tipos de juntas (revoluta, prismática, cilíndrica, etc.) mostrando cómo influyen en el comportamiento cinemático y dinámico del mecanismo.
El estudiante aplica teoría de transformación y equivalencias	El estudiante logra la transformación de mecanismos y las equivalencias entre diferentes configuraciones, facilitando el estudio comparativo.
El estudiante comprende las configuraciones Grashof e implicaciones	El estudiante comprende los criterios de Grashof, los requerimientos para su cumplimiento y su impacto en la selección de actuadores.
El estudiante analiza fenómenos físicos del mecanismo	El estudiante identifica, en la dinámica del mecanismo, fenómenos físicos como velocidades, aceleraciones y fuerzas en tiempo real. Además, analiza los efectos de fricción, resistencia e inercia para evaluar el comportamiento del mecanismo bajo condiciones prácticas.

Nota. Competencias específicas de la Competencia 2 de la iniciativa académica de Mecanismos.

7.3. Parámetros de diseño de la plataforma

A partir de las limitaciones identificadas en la revisión de soluciones existentes presentada en el Capítulo 2, así como de las competencias de la iniciativa académica de Mecanismos definidas en el Capítulo 7.2, se establecieron los parámetros de diseño que guían el diseño de la plataforma. Estos parámetros determinan cómo el usuario puede modificar el mecanismo, explorar distintas configuraciones y operar el sistema de forma segura y didácticamente efectiva.

El diseño de la plataforma didáctica responde a un conjunto de requisitos definidos en tres aspectos principales: funcionales, pedagógicos y técnicos.

Requisitos funcionales

- **Reconfiguración rápida del mecanismo:** la plataforma debe permitir modificar las longitudes de los eslabones mediante un sistema modular basado en acoplamiento magnético. Esto facilita representar diferentes inversiones y configuraciones (Grashof, no Grashof y casos especiales).
- **Ajuste de la bancada y puntos fijos:** la estructura base debe permitir modificar la distancia entre los puntos fijos del mecanismo; es decir, la longitud de la bancada. Esto con el fin de ajustar la disposición geométrica completa del mecanismo de cuatro barras.
- **Visualización en tiempo real:** el sistema debe proporcionar la visualización inmediata de variables cinemáticas relevantes, permitiendo el análisis simultáneo entre el modelo teórico y la medición física.
- **Automatización parcial:** el sistema debe integrar motores y controladores que permitan automatizar el movimiento de entrada del mecanismo, así como la lectura de sensores para obtener un movimiento preciso.

Requisitos pedagógicos

- **Comparación teoría vs experimentación:** la plataforma debe permitir contrastar el modelo matemático con los datos obtenidos experimentalmente durante la operación de la plataforma.
- **Desarrollo de competencias:** el diseño debe facilitar el cumplimiento de las Competencias definidas por la iniciativa académica de Mecanismos especificadas en el Capítulo 7.2.
- **Ajuste intuitivo de configuraciones:** la estructura debe incluir guías y sistemas que permitan modificar las relaciones de tamaño entre eslabones del mecanismo sin herramientas especializadas.
- **Identificación visual:** se debe aplicar un código de colores que permita reconocer de forma inmediata la función de cada eslabón y la configuración del mecanismo.

Requisitos técnicos

- **Modularidad tipo plug-and-play:** el sistema debe permitir la sustitución rápida de piezas mecánicas para el cambio de configuraciones.
- **Compatibilidad con herramientas de ingeniería:** el diseño debe integrar un sistema compatible con Matlab para simulación y procesamiento; así como con Arduino para control y lectura de datos.

- **Ajuste del ángulo de entrada:** el torque de entrada puede ajustarse desde ambos extremos de la bancada mediante un sistema de acoplamiento entre dos motores. Esto posibilita modificar el punto de aplicación del torque dentro del mecanismo, de modo que pueden generarse configuraciones espejo o establecerse entradas alternativas sin alterar la estructura demostrativa estándar empleada en el análisis cinemático (manivela, acoplador, balancín y tierra, de izquierda a derecha). Esta flexibilidad facilita la observación del comportamiento cinemático ante diferentes disposiciones de entrada de torque.
- **Medidas de seguridad integradas:** debe incluir:
 - Sensor de corriente para detectar picos de corriente derivado de bloqueos mecánicos o problemas de operación.
 - Aislamiento eléctrico adecuado tanto para los componentes electrónicos, así como para la sección de alimentación AC, utilizando un código de colores estandarizado conforme a la normativa NEC [15].
- **Operación manual segura:** se debe proporcionar un juego de eslabones alternos con rodamientos en los puntos de acople al motor, permitiendo la manipulación manual sin transmitir torque a los motores y generar corrientes inducidas. El acople al motor funcionará únicamente como referencia de tierra.
- **Consideraciones energéticas:** el sistema debe dimensionarse para soportar variaciones de torque ocasionadas por los cambios en la longitud de los eslabones, tal como se explicó en el Capítulo 6.13 de Eficiencia. Para ello se deben seleccionar motores capaces de operar de forma confiable bajo distintas cargas.
- **Sistema motriz confiable:** se deben emplear motores paso a paso NEMA 17, dado que su ángulo de paso de 1.8° permite un control preciso y su torque es suficiente para accionar las distintas configuraciones del mecanismo. Los motores deben acoplarse mediante rodamientos y elementos mecánicos que aseguren una transmisión estable y compatible con el sistema de sensado.

7.4. Módulo de mecanismos de cuatro barras

Se estudió la configuración geométrica de distintos eslabonamientos, verificando la condición de Grashof para definir la movilidad de cada mecanismo. Adicionalmente, se construyó un prototipo preliminar de un mecanismo de cuatro barras con el fin de realizar pruebas físicas que permitieran identificar posibles interferencias cinemáticas, tales como colisiones entre eslabones en ciertas inversiones o configuraciones. Estas observaciones experimentales sirvieron para descartar mecanismos cuya operación pudiera verse limitada por contactos no deseados en la estructura propuesta.

Para la selección final de mecanismos, se consideraron las restricciones geométricas del prototipo con el objetivo de evitar redundancias entre configuraciones que presentan comportamientos cinemáticos equivalentes. Se priorizaron configuraciones con trayectorias claramente diferenciadas y que cumplieran con la condición de que la bancada fuese el eslabón de mayor longitud, a fin de minimizar interferencias y colisiones durante la operación.

En particular, para el caso II de Grashof, todos los tipos son triple balancín, por lo que se seleccionó únicamente uno, ya que su trayectoria describe el mismo comportamiento que el resto de clasificaciones de su clase. El conjunto final de mecanismos seleccionados se presenta en el Cuadro 4, el cual resume las configuraciones consideradas adecuadas para su implementación en la plataforma física.

Cuadro 4. Mecanismos a simular en la plataforma física

Tipo	$p + q$ vs.	Inversión	Clas	Designación de Barker	Código	También conocido como (español)
2	<	$L_2 = s$ (entrada)	I-2	manivela-balancín-balancín de Grashof	GRRR	manivela-balancín
3	<	$L_3 = s$ (acoplador)	I-3	balancín-manivela-balancín de Grashof	GCRC	dobles balancín
4	<	$L_4 = s$ (salida)	I-4	balancín-balancín-manivela de Grashof	GRCC	balancín-manivela
5	>	$L_1 = 1$ (bancada)	II-1	balancín-balancín-balancín clase 1	RRR1	triple balancín
10	=	$L_2 = s$ (entrada)	III-2	manivela-balancín-balancín con punto de cambio	SCRR	manivela-balancín SC
11	=	$L_3 = s$ (acoplador)	III-3	balancín-manivela-balancín con punto de cambio	SRCR	dobles balancín SC
12	=	$L_4 = s$ (salida)	III-4	balancín-balancín-manivela con punto de cambio	SRRC	balancín-manivela SC
13	=	dos pares iguales	III-5	punto de cambio doble	S2X	paralelogramo o deltoides

Nota. Los ocho mecanismos de cuatro barras seleccionados para implementar en la plataforma según la Clasificación de Barker.

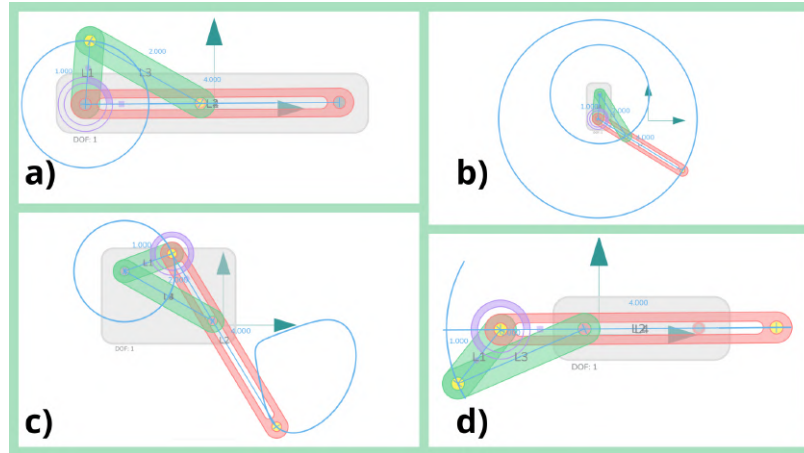
7.5. Módulo de mecanismos manivela corredera

Se seleccionó el mecanismo manivela–corredera (*slider–crank*) para implementarlo en la plataforma, ya que constituye una variante particular del mecanismo de cuatro barras. Su inclusión también permite reforzar en el aula el análisis presentado en el Capítulo 6.7, donde se estudia la transformación de eslabonamientos mediante la consideración de un balancín de longitud infinita para representar la corredera.

Las consideraciones analizadas en el Capítulo 6.12 son especialmente relevantes en un entorno didáctico, donde el prototipo debe permitir la observación clara de la transmisión de movimiento sin comprometer su integridad ni la de los demás módulos.

En la Figura 14 se ilustran las posibles inversiones del mecanismo manivela–corredera. Aunque cada configuración ofrece un comportamiento cinemático distinto, la inversión a representar en la plataforma corresponde a la presentada en la Figura 14-a. Esta elección responde a criterios prácticos de diseño, ya que las demás inversiones implican condiciones espaciales no acotadas que resultan poco viables en el entorno físico de la plataforma. Además, modelar las trayectorias asociadas a cada inversión demandaría sistemas de accionamiento más complejos, requiriendo actuadores capaces de adaptarse a ejes de rotación

Figura 14. Las 4 inversiones de un mecanismo manivela corredera desarrollada en Motiogen.



Nota. Subfiguras: a) inversión número 1, eslabón d como tierra; b) inversión número 2, eslabón manivela como tierra; c) inversión número 3, eslabón acoplador como tierra y d) inversión número 4, eslabón corredera como tierra.

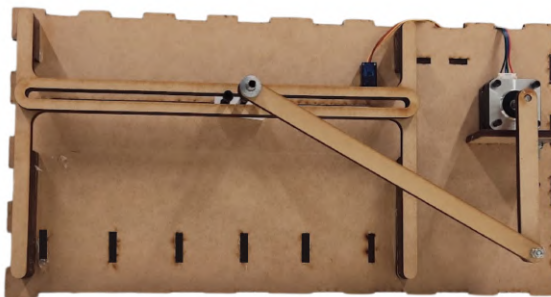
no coincidentes, lo que incrementaría significativamente la dificultad de implementación. De esta manera, concentrar el análisis en una sola inversión permite garantizar la claridad didáctica del módulo y asegurar la compatibilidad con el sistema de actuadores previsto para la plataforma.

A diferencia del módulo de cuatro barras convencional, este mecanismo presenta un menor número de configuraciones geométricas posibles, por lo que es pertinente restringir la cantidad de dimensiones reconfigurables en el prototipo. El principal interés didáctico de esta disposición radica en el estudio de la trayectoria generada por la corredera y en la relación existente entre la longitud de la manivela y el desplazamiento lineal obtenido. Dicho análisis permite al estudiante comprender cómo la variación de la manivela incide en la proporcionalidad con el acoplador y, en consecuencia, en la transmisión angular–lineal del movimiento, aspecto ampliamente abordado en la literatura clásica de análisis y síntesis de mecanismos [6]. En la Figura 15 se muestra un ejemplo del mecanismo de manivela–corredera, donde existen limitaciones de espacio que deben ser consideradas, pues a medida que mayor sea la trayectoria que se debe alcanzar, el acoplador debe incrementarse, así como el espacio disponible para el desplazamiento de la corredera.

A partir de esta disposición, es posible generar dos configuraciones didácticas según el eslabón de entrada. Cuando la manivela recibe el torque de entrada, se obtiene la forma clásica del mecanismo manivela–corredera; mientras que, al aplicar un desplazamiento lineal en la corredera, se reproduce el comportamiento corredera–manivela, en el que la manivela actúa como salida rotacional. De esta forma, utilizando una misma inversión es posible explorar ambas variantes de funcionamiento, siempre que se respeten las condiciones geométricas que aseguren la movilidad del sistema y eviten bloqueos cinemáticos [6].

El caso de manivela–corredera, debido al eslabonamiento efectivo y que se cuenta con un eslabón de largo infinito, siempre quedará Grashof. Si la longitud de la manivela es mayor

Figura 15. Ejemplo de mecanismo manivela corredera



Nota. Prototipo desarrollado como proyecto final en la iniciativa académica de Mecanismos.

que la de la biela, el mecanismo puede no permitir una rotación completa, convirtiéndose en un mecanismo oscilante (no Grashof). Es por ello que no es necesario tener múltiples cambios de longitud, ya que el comportamiento del mecanismo será igual y las diferencias estarán en las diferentes posiciones o trayectorias. Por esta razón, no resulta necesario implementar múltiples variaciones de longitud en el prototipo, ya que el principio de funcionamiento se mantiene invariable. Lo que sí se modifica al variar las dimensiones es la amplitud de la carrera de la corredera y los ángulos de trabajo de la manivela, aspectos que pueden observarse experimentalmente sin alterar la naturaleza del mecanismo.

7.6. Módulo de juntas

El módulo de juntas se selecciona para proporcionar un espacio didáctico en el que el estudiante puede reconocer y manipular físicamente los principales tipos de uniones cinemáticas y explorar la movilidad o GDL de los diferentes tipos de juntas. Para ello, se propuso el diseño de modelos en impresión 3D que representan las distintas juntas superficiales o pares cinemáticos, priorizando el uso de materiales con buena resistencia al desgaste y condiciones de fricción. La selección de materiales para este módulo se aborda en el Capítulo 11.2 con el fin de garantizar que los prototipos mantengan la durabilidad necesaria para su uso en laboratorio.

En la sección 6.1 se presentó la Figura 5 que muestra las tipologías más comunes de juntas según su número de grados de libertad. En el presente trabajo se decidió implementar únicamente los pares inferiores, ya que son los más representativos en mecanismos planares básicos como el de cuatro barras y el manivela–corredera.

En la Figura 5 de la Sección 6.4 se muestra que cada par superior, como las juntas deslizantes o rodantes, pueden expresarse en términos de combinaciones de pares inferiores [6]. Esto implica que, aun cuando no se implementen de forma explícita en la plataforma, su representación puede comprenderse a través de la observación de las restricciones impuestas por los pares inferiores. De esta manera, el estudiante puede establecer la relación entre teoría y práctica, comprendiendo que toda junta cinemática puede descomponerse en equivalentes básicos de rotación y traslación [9]).

Diseño de una plataforma interactiva

En este capítulo se presenta el proceso general de diseño de la plataforma didáctica. Se describen los planteamientos conceptuales iniciales, la elaboración de los modelos CAD y las decisiones estructurales que dieron forma a cada módulo. En cada sección se presentan figuras que muestran la evolución del diseño hasta su materialización.

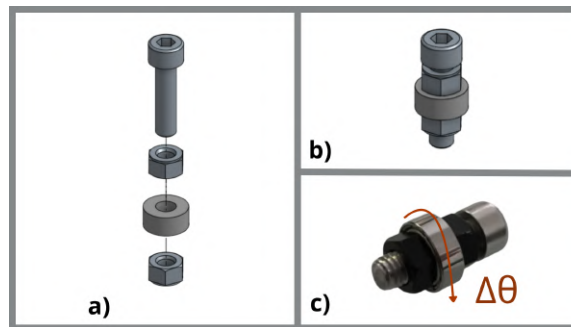
8.1. Junta revoluta

En las primeras iteraciones se modeló la junta revoluta como un sistema de eje roscado combinado con tuercas y roldanas. Sin embargo, durante las pruebas con los prototipos se observó que esta propuesta generaba roscas muy ajustadas o desgaste prematuro en las mismas, lo que interfería con el movimiento del mecanismo luego de varias revoluciones y generaba desacoples en ciertas configuraciones.

Para garantizar un movimiento eficiente en las juntas revolutas de cada eslabón, se adoptó un sistema basado en el principio de funcionamiento de los rodamientos. La idea central es que un tornillo puede atravesar el rodamiento y ser asegurado mediante tuercas sin comprometer la rotación, ya que la presión generada por las tuercas actúa únicamente sobre el anillo externo del rodamiento. De esta forma, el anillo interno permanece libre para girar, permitiendo el movimiento relativo entre los eslabones.

En la Figura 16 se ilustra la disposición mecánica empleada. Esta configuración permite aplicar un ajuste controlado de las tuercas lo suficientemente firme para evitar holguras y mantener la estabilidad estructural, pero sin interferir con la rotación del rodamiento. El resultado es una junta revoluta rígida, confiable y con baja fricción, adecuada para soportar las variaciones geométricas asociadas a los diferentes mecanismos reconfigurables.

Figura 16. Modelo para junta revoluta



Nota. Subfiguras: a) guía de ensamblaje de la junta en CAD, b) ensamblaje de junta en CAD y c) ensamblaje físico de junta con tornillo Allen y tuerca M5 con rodamiento 5mm.

8.2. Eslabones

Con el fin de facilitar la representación de múltiples inversiones en un mismo prototipo, se implementó un método de reconfiguración mediante fijaciones magnéticas. Esta solución se inspiró en el principio de variación de longitud de eslabones planteado en propuestas didácticas como Teaching Techyt [16], adaptándolo a las necesidades de la plataforma. Gracias a este enfoque, los eslabones pueden ensamblarse y desensamblarse rápidamente sin necesidad de herramientas, lo que permite al estudiante modificar longitudes y disposiciones con facilidad, explorando en un solo dispositivo la diversidad de mecanismos de cuatro barras y sus comportamientos cinemáticos. Sin embargo, a diferencia de dicha propuesta, en este trabajo se busca evitar la dependencia de los tornillos para realizar el cambio de longitudes, destinando su uso únicamente a asegurar que los eslabones no se desacoplen durante la operación.

Figura 17. Método para cambio de eslabones propuesto por Teaching Tech [16]



Nota. Cambio de eslabones a través de sistema deslizante.

Adicionalmente, para garantizar la estabilidad del prototipo durante su operación, se retomaron ideas de Ponsa [1], donde se plantea el uso de imanes como recurso didáctico

para fijar componentes. A partir de este principio, los eslabones de la plataforma se mantienen en posición una vez ensamblados, evitando desplazamientos no deseados y asegurando la correcta transmisión del movimiento. Esta estrategia permite lograr un equilibrio entre la facilidad de reconfiguración y la rigidez estructural necesaria para la experimentación práctica [17].

Se seleccionaron imanes circulares de 5×3 mm para evitar la generación de momentos no deseados que podrían presentarse con imanes rectangulares, cuyo punto de contacto introduce pares indeseados durante la operación. En cambio, el contacto simétrico de los imanes circulares asegura una fijación más uniforme y estable. Gracias al uso de imanes como sistema de fijación, no es necesario emplear tornillos para el ensamblaje entre eslabones, lo que además permite una mayor precisión y rapidez en el intercambio de longitudes durante la reconfiguración del mecanismo.

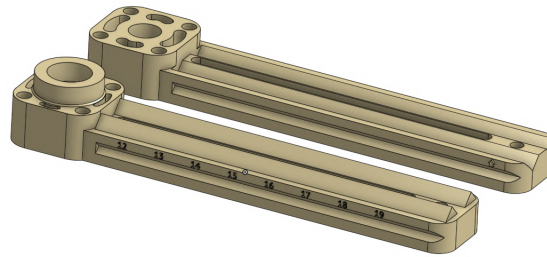
Si bien se conservó el principio de reconfiguración deslizante inspirado en Teaching Tech, se modificó la geometría del mecanismo deslizante para adaptarlo a los requerimientos estructurales de la plataforma. Para definir la interfaz de deslizamiento se evaluaron varias alternativas, incluyendo perfiles en T, correderas con ranura rectangular y perfiles en V. Las uniones en T ofrecían una amplia área de contacto, pero requerían mayor precisión dimensional para evitar holguras y presentaban riesgo de fricción ante presencia de cargas radiales. Las ranuras rectangulares, aunque sencillas de fabricar, mostraron menor capacidad de autorrealineación y eran más sensibles a la fricción lateral. En contraste, la geometría en V proporcionó un contacto estable en superficies inclinadas, mejor autoalineación y una distribución más favorable de cargas axiales y radiales, reduciendo el riesgo de juego y mejorando la suavidad del deslizamiento. Por estas ventajas mecánicas y de manufactura, la unión en V se seleccionó como la opción más adecuada para garantizar un acoplamiento confiable y repetible entre los eslabones.

8.2.1. Diseño de eslabones

Se diseñaron los eslabones con un acople específico para integrar la junta revoluta, desarrollando la geometría mostrada en la Figura 18. Esta configuración garantiza una unión ajustada y estable, evitando desacoples durante la operación del mecanismo. En la figura se aprecia el diseño final de los eslabones, optimizado tanto para alojar el rodamiento y asegurar un movimiento suave en cada junta, así como una sección deslizante en los laterales para acoplar el cambiador de eslabones gris observado en Figura 19. Esto con el propósito de mostrar en qué longitud está configurado el eslabón según las medidas agregadas en el diseño. Los colores seleccionados para representar cada eslabón son: rojo para manivela, azul para acoplador, color piel para tierra, gris para juntas y amarillo para sistemas multifunción.

Adicionalmente, el diseño de los eslabones consideró aspectos relacionados con la manufactura aditiva. El relleno adecuado en la impresión 3D para evitar sobrecargas en los motores es de tres por ciento a una altura de capa de 0.12 mm, asegurando que los eslabones mantuvieran la rigidez necesaria sin incrementar de forma innecesaria su masa. Asimismo, se incorporaron vaciados y reducciones de material en las zonas de acople de las juntas revolutas. Estas áreas concentran mayores fuerzas hacia abajo debido al peso propio del conjunto y a las fuerzas generadas durante el movimiento; por ello, la eliminación controlada de ma-

Figura 18. Diseño de eslabones

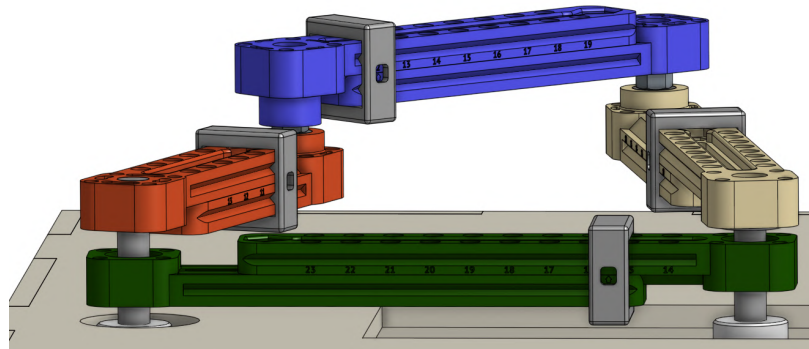


Nota. Sistema de deslizamiento basado en el diseño Teaching Techyt [16] con sistema de intercambio de longitudes a través de un cambiador de eslabones e identificación de longitudes.

terial permitió disminuir la inercia y facilitar el giro del rodamiento sin comprometer la resistencia estructural del eslabón. En la Figura 18 se observan estas modificaciones, diseñadas para optimizar simultáneamente la movilidad, la estabilidad y el desempeño dinámico del mecanismo.

En la Figura 19 se observa cómo resulta el ensamble de eslabones propiciando una visualización de tamaños unificada con sistema de cambio rápido. Las dimensiones correspondientes a cada eslabón para cada ensamble a replicar en la plataforma se presentan en el Cuadro 5.

Figura 19. Ensamble de eslabones



Nota. Sistema conjunto en el mecanismo de 4 barras con sistema de intercambio de longitudes a través de un cambiador de eslabones e identificación de longitudes.

Cuadro 5. Rangos de longitud de los eslabones utilizados en la plataforma didáctica

Tipo de mecanismo	Eslabón	Rango de longitudes (cm)
Mecanismo de cuatro barras	Manivela	9–13
Mecanismo de cuatro barras	Acoplador	12–19
Mecanismo de cuatro barras	Balancín	12–19
Mecanismo de cuatro barras	Tierra	14–23*
Manivela–corredera	Manivela	6–7
Manivela–corredera	Balancín	9–13

Nota. *El rango efectivo para el eslabón tierra es 14–20 cm debido a limitaciones físicas de la plataforma. Todos los eslabones tienen incrementos de 1 cm.

8.3. Bosquejo de proyecto

En esta primera etapa se realizaron bosquejos conceptuales que permitieron establecer la distribución general de la plataforma, identificar los módulos principales y definir los criterios de modularidad y reconfiguración. Estos esquemas iniciales sirvieron de guía para el desarrollo posterior de los modelos CAD y la integración de componentes mecánicos y electrónicos. Se desarrollaron iteraciones para evitar colisiones, así como re dimensionamientos basados en los límites de planos de corte de las cortadoras láser de la Universidad del Valle de Guatemala. Dado que dichas cortadoras tienen un espacio de corte de 600X450 mm, ninguna placa de MDF completa podría medir más de esas dimensiones. Asimismo, la impresora 3D que se utilizó tiene un volumen de impresión $256 \times 256 \times 256$ mm. Los bosquejos mencionados se encuentran en la Sección de Anexos 16.1.

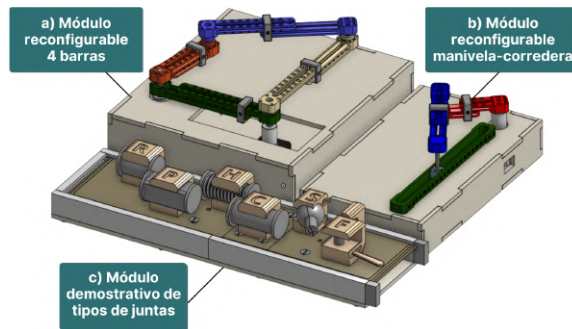
8.4. Diseño CAD

El diseño de la plataforma didáctica se desarrolló en el software Onshape, una elección adecuada para este proyecto, ya que permitió realizar modificaciones de forma ágil, así como verificar la compatibilidad entre los distintos módulos antes de su fabricación física.

En la Figura 20 se muestra una vista general del diseño modular, donde se integran los distintos bloques que conforman la plataforma. Este modelo permitió analizar la disposición espacial de los módulos y la interacción entre ellos. Las dimensiones generales de la plataforma son de 45×44 cms para un espesor de MDF de 0.575 cms.

En la Figura 21 se presenta la vista explosionada de la plataforma, donde se evidencian los componentes que la conforman y la secuencia propuesta de ensamblaje. Esta representación permite identificar con claridad la relación entre las piezas estructurales, los módulos

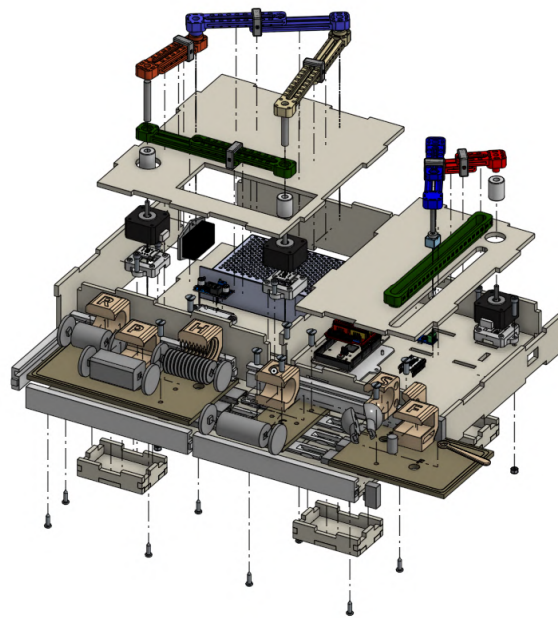
Figura 20. Sección modular de juntas superficiales



Nota. Diseño CAD desarrollado en Onshape.

funcionales y los elementos de fijación, facilitando tanto el análisis de manufactura como la comprensión del proceso de montaje.

Figura 21. Explosión de ensamblaje de diseño CAD



Nota. Explosión desarrollada en Onshape.

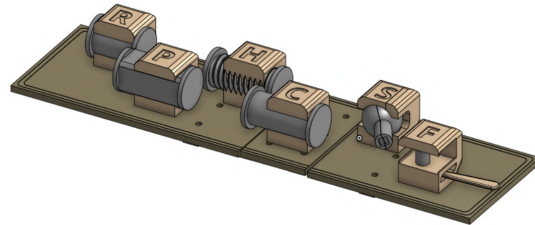
8.4.1. CAD de módulo de juntas

Se modeló de manera específica el módulo de juntas superficiales, tomando como referencia la Figura 5-a de la sección 6.4. Las dimensiones de la base de este módulo son de 45×12 cms.

Este diseño constituye un recurso clave para la enseñanza de los pares cinemáticos. Cada

junta fue diseñada con geometrías simplificadas, pero suficientemente representativas para que el estudiante pueda identificar su principio de funcionamiento. Se utilizó como base la sección abierta de la juntas superficiales presentes en la figura mencionada con el propósito de colocar imanes y facilitar el ensamble modular.

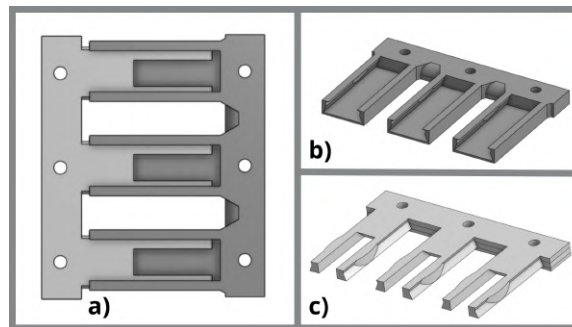
Figura 22. Sección modular de juntas superficiales



Nota. Diseño CAD desarrollado en Onshape.

Asimismo, este módulo posee uniones guía lineales de corredera de cola de milano (*Dovetail Slide*) ampliamente utilizado por el tipo de sujeción en aplicaciones de carpintería [18] o ingeniería debido a la alta rigidez y capacidad de carga a un precio más bajo usado en prototipos simples, dado que su principal desventaja es la adhesión estática y la alta fricción [19]. En la Figura 23 se observa el diseño de la unión con un vaciado central que genera una ligera deflexión durante el ensamble, facilitando la inserción de la pieza macho. La curvatura visible provee un seguro para que la union tenga clic y logre mantenerse en su posición al ejercer presión. Las uniones tipo cola de milano son comunes en diseño en ingeniería para desplazamiento lineal, donde existen fórmulas ligadas al ángulo de cola de milano para el diseño basado en requerimientos de carga, rigidez y precisión [20].

Figura 23. Uniones guía lineales de corredera de cola de milano (*Dovetail Slide*)



Nota. Subfiguras: a) Acople de unión macho y hembra. b) Unión hembra c) Unión macho.

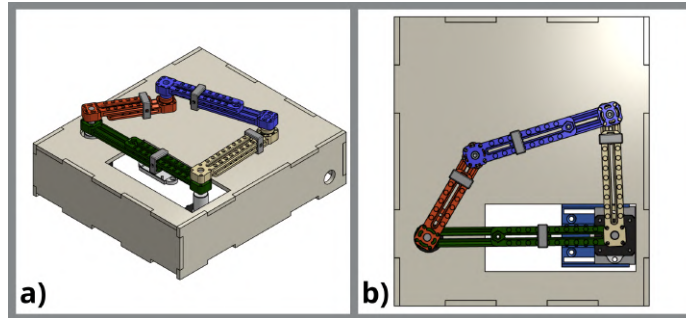
8.4.2. CAD de módulo reconfigurable de 4 barras

La Figura 24 presenta el modelado 3D del módulo del mecanismo de cuatro barras en el que se observa el principio de intercambio de eslabones, así como la base deslizante del

motor que permite obtener distintas dimensiones de la bancada. Las dimensiones generales de este módulo son de $26.5 \times 30 \times 8$ cms. Los colores de los eslabones corresponden a verde (tierra), azul (acoplador), rojo (manivela) y amarillo (balancín).

Este modelo permitió verificar la correcta movilidad de los eslabones y validar que las uniones, dimensiones y rangos de movimiento fueran coherentes con los objetivos didácticos planteados.

Figura 24. Módulo de 4 barras



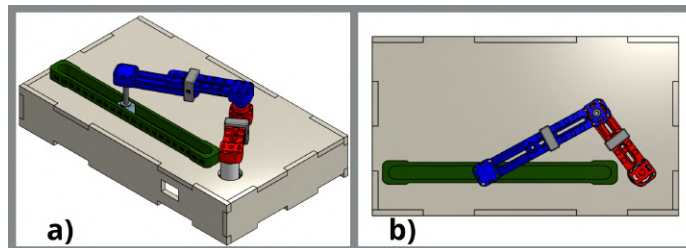
Nota. Subfiguras: a) Vista isométrica y b) vista superior.

8.4.3. CAD de módulo reconfigurable manivela corredera

La Figura 25 muestra el modelo CAD de la variante particular de mecanismo de 4 barras, manivela–corredera. En este diseño se observa la representación de los eslabones en diferentes colores para facilitar su identificación, empleando el código visual que posteriormente se replicará en la plataforma física. Las dimensiones de este módulo son de $17.5 \times 30 \times 5$ cms.

Este modelo permitió analizar la interacción entre la manivela (en rojo), el acoplador (en azul) y la corredera (en verde), verificando que el movimiento lineal de esta última se lograra de manera correcta a partir de la rotación de la manivela.

Figura 25. Módulo manivela-corredera



Nota. Subfiguras: a) Vista isométrica y b) vista superior.

Este capítulo presenta la integración del análisis cinemático incorporado en la aplicación desarrollada en Matlab. En él se describe cómo se implementaron los cálculos de cinemática abordados en el Capítulo 6, detallando la forma en que estos modelos fueron integrados en la herramienta digital para permitir la simulación y evaluación del comportamiento de los mecanismos incluidos en la plataforma.

9.1. Inicio

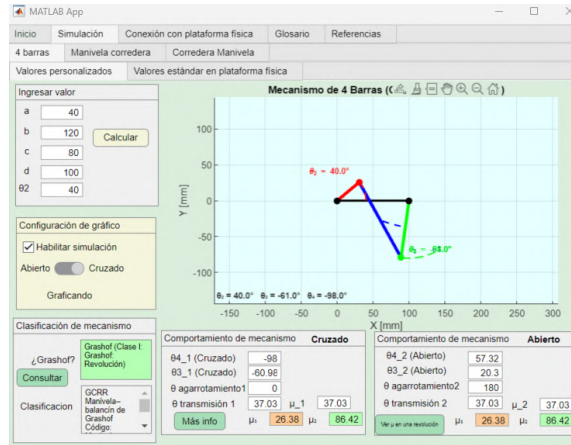
La pestaña *Inicio* introduce al usuario a la plataforma digital y establece las pautas básicas para su uso. Las figuras correspondientes a cada sección que la conforman se encuentran en Sección de Anexos 16.2.

Esta ventana cuenta con las siguiente pestañas de navegación:

- **Introducción:** presenta la plataforma y los mecanismos de 4 barras.
- **Tutorial:** explica la convención de colores empleada en la interfaz para diferenciar ingreso de datos, acceso a información adicional, visualización de sensores y envío de instrucciones a la plataforma física. También incluye recomendaciones para garantizar un funcionamiento adecuado, como el manejo de la comunicación serial y consideraciones de rendimiento del equipo.
- **Demostración de juntas:** se presentan las seis juntas superficiales utilizadas en la plataforma física. Cada junta se visualiza con flechas que representan sus grados de libertad (GDL), lo que permite comprender de forma intuitiva la restricción o libertad de movimiento que cada par cinemático impone entre los eslabones.

B, C, D, E, F y los parámetros k_1, k_2, k_3, k_4 y k_5 , necesarios para obtener los valores de θ_3 y θ_4 . La Figura 26 muestra la simulación y cálculos de síntesis de posición de un mecanismo manivela balancín en su configuración abierta, mientras que la Figura 27 muestra el mismo mecanismo en su configuración cruzada.

Figura 27. Pestaña de *Simulación > 4 barras > valores personalizados* en interfaz gráfica



Nota. Simulación de un mecanismo manivela balancín en configuración cruzada en la aplicación.

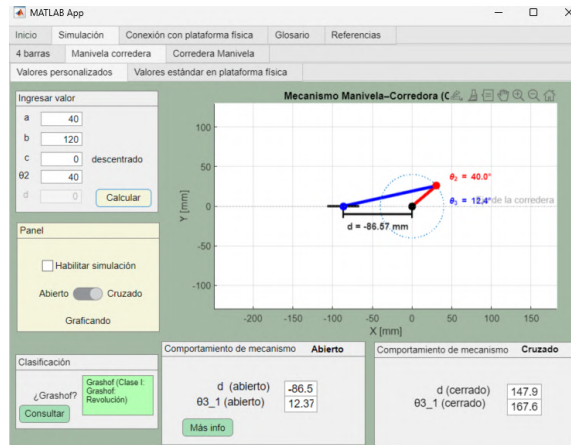
Para su implementación, estos cálculos se integraron mediante una función externa (`calc4Barras.m`) que concentra toda la lógica matemática. Desde el cálculo de las constantes geométricas, la resolución de las ecuaciones cuadráticas para obtener θ_3 y θ_4 , la verificación de la existencia de soluciones reales, el cálculo del ángulo de transmisión μ y los ángulos de agarrotamiento, así como el manejo de casos especiales y errores. Esta función es llamada desde App Designer cuando el usuario ingresa los valores de a, b, c, d y θ_2 . La interfaz recibe los resultados, actualiza los campos correspondientes, clasifica automáticamente el mecanismo según Grashof y Barker, asigna indicadores visuales y genera la representación gráfica en modo estático o animado. De esta forma, la interfaz se enfoca en la visualización, mientras que el procesamiento matemático se realiza en funciones externas.

9.4. Mecanismos manivela-corredera

Para el mecanismo manivela-corredera, los cálculos de posición se implementaron mediante una función externa (`calcManivelaCorredera.m`) que evalúa directamente las ecuaciones de cierre descritas en el Capítulo 6.12. Esta función determina las dos configuraciones posibles de la biela, obteniendo los valores de θ_3 y la posición del deslizador d a partir de las longitudes a, b , el descentrado c y el ángulo de entrada θ_2 . Asimismo, incorpora verificaciones geométricas para garantizar que el mecanismo tenga solución real. En App Designer, esta función es llamada cuando el usuario ingresa los parámetros en los campos de edición, y la interfaz se encarga de mostrar los valores calculados, generar la representación gráfica del mecanismo y, si se activa la opción correspondiente, animar el movimiento desde 0° hasta el valor deseado de θ_2 . La Figura 28 muestra la simulación y cálculos de síntesis de posición

de un mecanismo manivela corredera.

Figura 28. Pestaña de *Simulación* > *manivela corredera* > *valores personalizados* en interfaz gráfica



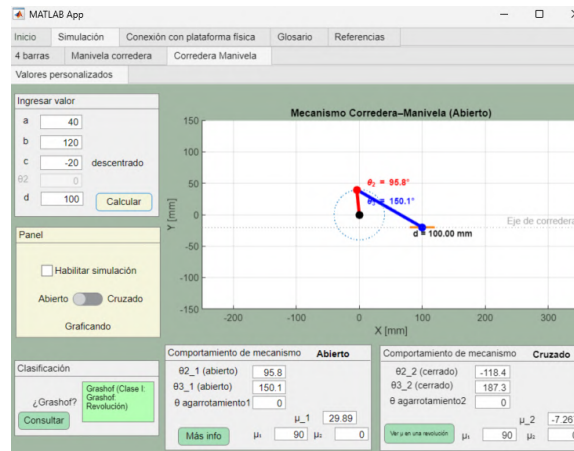
Nota. Interfaz en Matlab

9.5. Mecanismos corredera-manivela

Para el mecanismo corredera–manivela, la síntesis de posición se implementó mediante una función externa (`calcCorrederaManivela.m`), la cual resuelve el problema inverso del mecanismo manivela–corredera descrito en el Capítulo 6.12. A partir del desplazamiento de la corredera d como parámetro de entrada, esta función calcula las soluciones posibles para los ángulos de la manivela (θ_2) y de la biela (θ_3), verificando primero la factibilidad geométrica a través del discriminante de la ecuación cuadrática asociada al cierre del lazo vectorial. Asimismo, determina el ángulo de transmisión μ . Se mantiene la lógica de los anteriores mecanismos que consiste en encapsular la función externa, mientras que la interfaz gestiona la interacción, el despliegue visual y la simulación dinámica del mecanismo. La Figura 29 muestra la simulación y cálculos de síntesis de posición de un mecanismo manivela corredera.

A partir de estas expresiones se desarrolló una función dedicada a la síntesis de posición de cada mecanismo, la cual encapsula todos los cálculos necesarios para determinar la configuración geométrica del mecanismo. Dicha función fue posteriormente llamada en App Designer, de modo que la aplicación únicamente requiere leer los valores ingresados por el usuario en los campos de edición para ejecutar los cálculos y actualizar la simulación correspondiente.

Figura 29. Pestaña de *Simulación* > *corredera manivela* > *valores personalizados* en interfaz gráfica



Nota. Interfaz en Matlab

9.6. Conexión con plataforma física

La pestaña *Conexión con plataforma física* integra la interfaz desarrollada en Matlab con el sistema embebido implementado en Arduino. Esta comunicación se realiza mediante un enlace serial, a través del cual se envían comandos de control a los motores y se reciben valores de sensores en tiempo real. La Figura 42 en la Sección 16 de antecedentes muestra la ventana de conexión a la plataforma física.

Cuando el usuario selecciona un puerto disponible y presiona el botón *Conectar*, la aplicación detecta los puertos seriales disponibles y crea un objeto `serialport`. A continuación, configura el terminador de línea, limpia el búfer de recepción y enciende una lámpara que indica el estado de conexión. Seguidamente se activa un temporizador con un periodo de 0.1s encargado de ejecutar la función `actualizarAngulos(app)`. Este esquema permite realizar lecturas continuas sin bloquear la interfaz, asegurando un funcionamiento estable y fluido.

La aplicación recibe información desde Arduino mediante dos tipos de mensajes enviados por el puerto serial. El primero corresponde a mediciones de corriente, enviadas con un identificador inicial que permite actualizarlas en los indicadores de la interfaz y aplicar un código de colores que alerta sobre niveles seguros, moderados o de sobrecarga. El segundo tipo incluye lecturas de ángulos y posiciones, enviadas como una cadena de valores separados por comas. La aplicación extrae estos valores, corrige automáticamente el sentido de giro del motor derecho, que físicamente rota en dirección opuesta, y aplica una calibración lineal al ángulo medido en el mecanismo manivela corredera para compensar errores del sensor. Finalmente, los valores se normalizan y se muestran en la interfaz, permitiendo que el usuario observe en tiempo real el comportamiento físico del mecanismo y lo compare directamente con la simulación generada en Matlab.

9.6.1. Movimiento controlado

La aplicación permite enviar comandos de movimiento hacia la plataforma física mediante mensajes estructurados que especifican el motor a controlar, el torque deseado y la velocidad de operación. Estos comandos siguen la nomenclatura física del CNC Shield, donde el eje X corresponde al motor izquierdo del mecanismo de cuatro barras, el eje Y al motor derecho y el eje Z al motor del mecanismo manivela corredera. Cada instrucción se genera cuando el usuario ingresa un valor de torque (equivalente al límite de corriente del driver) y selecciona la velocidad mediante un control deslizante, cuya posición se traduce en un tiempo entre pasos del motor (desde movimientos lentos hasta muy rápidos). Una vez definidos los parámetros, la aplicación construye el comando correspondiente y lo envía al Arduino mediante comunicación serial, permitiendo un control directo del movimiento.

La Figura 43 en la Sección 16 de antecedentes muestra la ventana de conexión a la plataforma física para el control de la manivela-corredera.

9.6.2. Movimiento libre

En este modo, el usuario controla directamente el sentido de giro mediante interruptores tipo switch y ajusta la velocidad a través de deslizadores, lo que resulta útil para pruebas de mecanismos como manivela-corredera y manivela-balancín que tienen una disposición compatible con una torque de entrada continuo. La Figura 44 en la Sección 16 de antecedentes muestra la ventana de conexión a la plataforma física para el control libre de motores.

10.1. Implementación física

La selección de componentes responde a criterios de bajo costo y disponibilidad en el mercado. En la Sección de Anexos 16.4 se encuentran las imágenes referentes a la disposición de pines de los componentes mencionados en esta sección. Se emplearon motores NEMA 17, sensores magnéticos AS5600, drivers A4988 y un CNC Shield para el control, además de un multiplexor I2C TCA9548A para gestionar la lectura de múltiples encoders.

10.2. Control de motores

Se utilizaron 3 motores unipolares de 6 hilos Nema 17 de 23mm 17HS4023 1.8 grados de ángulo de paso, por lo que se requieren 200 pasos para dar una revolución.

Los motores se controlan mediante drivers A4988 montados sobre una CNC Shield V3, como la que se observa en la Figura 47. Aunque los drivers A4988 permiten operar en diferentes modos de microstepping (1/2, 1/4, 1/8 y 1/16 de paso), en esta implementación se configuraron explícitamente para trabajar en paso completo, para evitar pérdidas de pasos a mayores velocidades. Se realizó el cálculo para la resistencia variable que define la corriente según los pasos que se implementan y las especificaciones del motor.

Cuadro 6. Listado de componentes principales de la plataforma didáctica

Cantidad	Componente	Función
3	Motor NEMA 17 (23 mm, 17HS4023, 1.8° por paso)	Motores paso a paso conectados al eslabón de tierra para accionar el eslabón de entrada.
5	Encoder AS5600	Sensores magnéticos para medición de posición angular.
1	Módulo CNC Shield	Módulo controlador para accionamiento simultáneo de motores paso a paso.
3	Driver A4988	Drivers para el control de motores paso a paso mediante el CNC Shield.
1	Arduino Mega 2560	Microcontrolador responsable de la comunicación y control de motores y sensores.
1	Fuente de poder 12V 10A	Suministro eléctrico principal de la plataforma.
Varios	Imanes	Elementos de acoplamiento y reconfiguración de la longitud de los eslabones.
4	Rodamientos de 5 mm (eje)	Elementos de apoyo deslizante para reducir la fricción entre los eslabones y los ejes del mecanismo.
4	Rodamientos de 8 mm (eje)	Elementos de apoyo deslizante utilizados en ejes de mayor diámetro dentro del sistema.
1	Multiplexor Adafruit I2C TCA9548A	Módulo de expansión para gestionar múltiples buses I2C y permitir la lectura simultánea de sensores AS5600.
1	Módulo regulador de voltaje LM2596 – 2A	Regulador DC–DC para alimentación de 3.3V de sensores y módulos electrónicos.

Nota. Materiales a incluir en la plataforma.

10.3. Medición de ángulos

Se utilizó el Encoder AS5600 con resolución de 12bits (4096 posiciones en 360 grados) para la medición de la posición angular de los eslabones del mecanismo. En la Figura 48 se observa la disposición de pines de este sensor. Este sensor entrega el ángulo absoluto mediante comunicación I2C, lo que permite obtener mediciones estables, sin necesidad de realizar procedimientos para establecer los puntos de inicio al encender la plataforma.

La dirección de este sensor para conectarse a través de I2C con el microcontrolador es fija de 0x36 (0110110 binario), sin embargo, debido al uso de varios encoders se requiere un multiplexor para alternar de dispositivo. En la Figura 49 se observa la disposición de pines del multiplexor implementado Adafruit I2C TCA9548A.

Para cada lectura, el microcontrolador selecciona primero el canal correspondiente del TCA9548A y posteriormente consulta el ángulo bruto del AS5600. Estos valores son con-

vertidos de su formato nativo a grados mediante la relación:

$$\theta_{\text{deg}} = \frac{360^\circ}{4096} \theta_{\text{raw}} \quad (21)$$

Se aplicaron correcciones de offset, normalización y ajuste del sentido de giro para alinear las mediciones con el modelo cinemático.

10.4. Sensor de corriente

El sensor ACS712 se lee mediante un temporizador en interrupciones cada 100 ms, permitiendo muestrear la corriente de forma independiente del resto del programa. Gracias a este esquema, el monitoreo permanece activo incluso durante movimientos, cálculos o comunicación serial, garantizando una supervisión continua del comportamiento eléctrico del mecanismo. Esta lectura periódica facilita la detección de picos de corriente asociados a fricción anómala, esfuerzos inesperados o cercanía a posiciones singulares que incrementan el torque. La aplicación desarrollada muestra en tiempo real estas mediciones, ya que el timer del Arduino asegura una lectura estable y constante sin interferir con otros procesos.

10.5. Integración

La integración electrónica de la plataforma se fundamenta en la coordinación entre los módulos de sensado, el sistema de accionamiento y el microcontrolador principal. El Arduino Mega 2560 funciona como unidad central, gestionando motores paso a paso, encoders AS5600, el multiplexor I2C TCA9548A, el sensor de corriente y la CNC Shield. Mediante un lazo de control cerrado, el microcontrolador lee continuamente la posición real de cada eslabón, seleccionando el canal correspondiente del multiplexor para acceder a cada encoder. Con esa información calcula el error respecto al ángulo deseado y genera los pulsos necesarios para que los drivers A4988 ajusten la posición de los motores, manteniendo el mecanismo en la configuración solicitada.

El sistema opera en dos modos: modo automático, donde el usuario envía comandos como `X <ángulo> <velocidad>` y el Arduino ejecuta el control por posición; y modo libre, que permite movimientos continuos sin control de lazo cerrado mediante instrucciones como `MOVE X F <velocidad>`, útil para pruebas de movimiento continuo y verificación del sistema mecánico.

11.1. Selección de materiales

La selección de materiales incluyó el uso de PLA y PETG, garantizando que los prototipos mantuvieran la durabilidad necesaria para su uso en laboratorio. El PLA (ácido poliláctico) es un polímero de origen vegetal ampliamente utilizado en impresión 3D debido a su facilidad de procesamiento, buena estabilidad dimensional y carácter biodegradable. Por su parte, el PETG (tereftalato de polietileno modificado con glicol) es un material empleado por su mayor resistencia al impacto, su tolerancia a temperaturas más elevadas y su buena combinación de rigidez y flexibilidad, lo que lo convierte en una opción adecuada para componentes sometidos a esfuerzos repetidos.

11.2. Manufactura

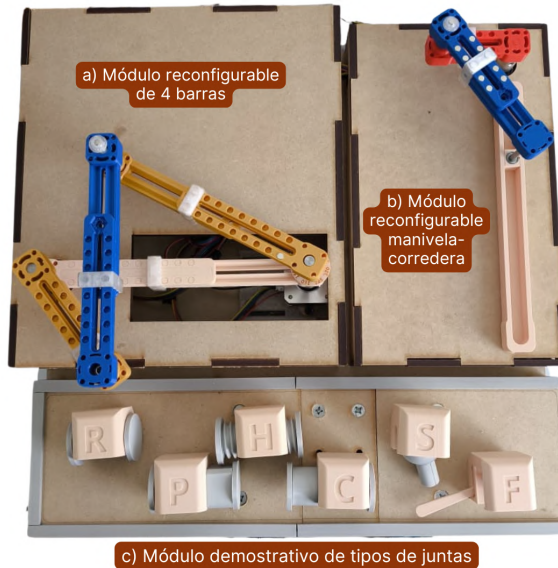
La fabricación de los componentes de la plataforma didáctica se realizó mediante una combinación de corte láser y manufactura aditiva. Las piezas estructurales en MDF fueron producidas utilizando las máquinas de corte láser disponibles en UVG, como son MakerLab y el laboratorio D-Hive. El uso de estos recursos permitió obtener geometrías precisas y repetibles con tiempos de producción reducidos sin necesidad de uso de herramientas de corte motorizadas.

Por otro lado, los componentes plásticos especializados, como eslabones, soportes y elementos de acople, se fabricaron mediante impresión 3D. Aunque estas piezas fueron impresas por cuenta propia, se empleó una impresora Bambu Lab A1, cuyos perfiles de impresión son plenamente compatibles con la impresora Bambu Lab disponible en el MakerLab. Esto asegura que cualquier pieza pueda ser reproducida o iterada posteriormente dentro de las

instalaciones universitarias sin requerir ajustes adicionales en los parámetros de manufactura.

En la Figura 30 se presenta la plataforma final construida, donde se integran los distintos módulos presentados en el Capítulo 8, correspondiente a la fase de diseño del proyecto. En la Sección de Anexos 16.3 se aprecian otras vistas de la plataforma en donde se observan los tamaños de eslabones, así como los sensores integrados en la misma.

Figura 30. Plataforma física modular

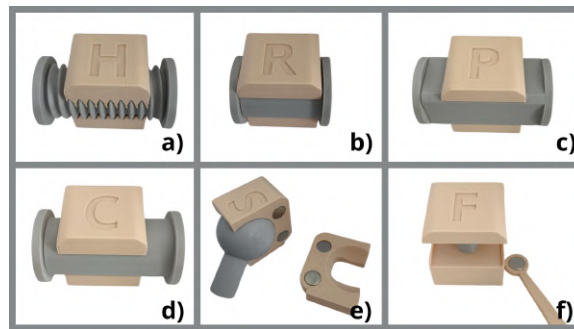


Nota. 6 juntas de superficie a incluir en módulo de juntas dividido según sus GDL.

11.2.1. Módulo físico de juntas

En la Figura 31 se muestran los seis pares cinemáticos correspondientes a las juntas superficiales diseñadas para la plataforma. Cada elemento representa un tipo distinto de junta clasificada según sus grados de libertad (GDL), permitiendo al estudiante visualizar físicamente la restricción de movimiento que impone cada una. La pieza en color gris corresponde a la junta, mientras que la pieza en color piel representa la tierra, manteniendo la misma convención utilizada en el resto de la plataforma. Para reducir los efectos de fricción, las juntas fueron fabricadas en PETG y las bases (tierra) en PLA.

Figura 31. Sección modular de juntas superficiales

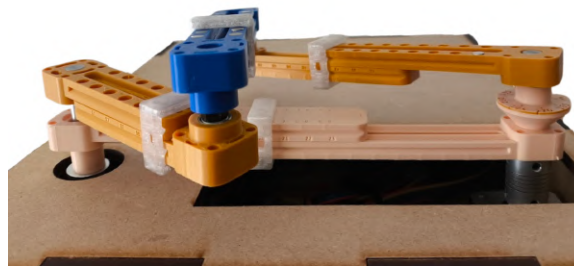


Nota. Módulo compuesto por 3 secciones divididas por GDL.

11.2.2. Módulo físico reconfigurable de 4 barras

La Figura 32 presenta el mecanismo de cuatro barras reconfigurable. Su diseño con principio deslizante permite ajustar longitudes y configuraciones para analizar diferentes configuraciones de forma eficaz. La pieza transparente es un cambiador de eslabones que facilita la visualización de la longitud seleccionada para cada eslabón. En el lado derecho de la figura se muestra un soporte de doble función, cuyo propósito es permitir la medición pasiva de ángulos, es decir, sin dependencia de componentes electrónicos.

Figura 32. Mecanismo de 4 barras reconfigurable en vista frontal



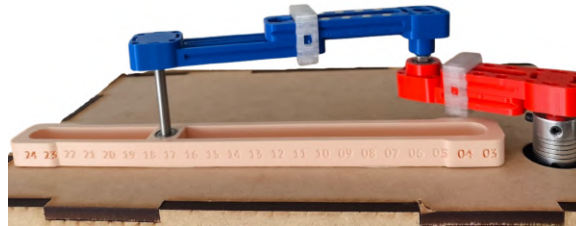
Nota. Mecanismo impreso en 3D con PLA.

11.2.3. Módulo físico reconfigurable manivela corredera

En la Figura 33 se ilustra el módulo reconfigurable de manivela–corredera. En esta representación, el eslabón azul corresponde al acoplador, el eslabón rojo a la manivela, el bloque que integra el rodamiento funciona como la corredera y la sección con marcas tipo regla representa la carrera a lo largo de la cual se desplaza.

El desplazamiento lineal de la corredera a lo largo de su carrera se logra mediante un rodamiento de 5 mm acoplado a un eje del mismo diámetro conectado al acoplador.

Figura 33. Mecanismo manivela corredera reconfigurable en vista frontal



Nota. Mecanismo impreso en 3D con PLA.

11.2.4. Combinaciones de eslabones

Para permitir un enfoque didáctico y experimental, se diseñaron distintos eslabones que pueden combinarse según se desee definir el eslabón de entrada o el eslabón de salida del mecanismo. Se desarrollaron tres juegos de eslabones, mostrados en la Figura 46. Cada juego contiene los eslabones ya ensamblados con sus juntas revolutas, de manera que únicamente sea necesario acoplarlos a los ejes del motor durante las prácticas.

La diferencia entre un eslabón de entrada y uno de salida se define por el tipo de acople. El eslabón de entrada posee un agujero cuyo diámetro coincide con el eje de 8 mm, de modo que, al acoplarlo a presión, se genera una interferencia debido a las tolerancias entre el componente eje y agujero que permite transmitir el torque desde el motor. En cambio, el eslabón de salida incorpora un rodamiento; este rodamiento permite que el eslabón gire libremente sobre el eje gracias a la holgura existente entre ambos componentes del acople, evitando así la transmisión de torque.

Por lo tanto, gracias a la combinación de estos eslabones con el acoplador, se tienen los siguientes juegos de eslabones:

- Juego manivela de entrada – balancín de salida: en este juego, el eslabón más largo es el que incorpora el rodamiento y por tanto actúa como eslabón de salida. El eslabón más corto posee únicamente un agujero para ser ajustado a presión y acoplarse al eje donde se aplica el torque.

- Juego manivela de salida – balancín de entrada: en este juego, el eslabón más corto es el que incorpora el rodamiento y por tanto actúa como eslabón de salida. El eslabón más largo posee únicamente un agujero para ser ajustado a presión y acoplarse al eje donde se aplica el torque.

- Juego manivela de salida – balancín de salida (modo manual): en este conjunto, ambos eslabones incluyen rodamientos, permitiendo que se muevan libremente al colocarse en el eje del motor. Debido al funcionamiento del rodamiento, existe holgura entre el eje y el agujero, evitando la transmisión de torque e impidiendo la inducción de corrientes o fuerzas en el motor, lo cual es ideal para el modo manual.

12.1. Medición y ajustes

Durante la fase de medición se verificó el comportamiento angular de los mecanismos mediante la lectura de los sensores AS5600 instalados en las juntas. Para garantizar coherencia entre los datos experimentales y la simulación, fue necesario realizar ajustes de calibración en los ángulos iniciales, compensar desplazamientos por holgura mecánica y corregir desfases derivados del montaje físico. Con estas correcciones fue posible obtener mediciones repetibles y comparables con los valores teóricos.

12.2. Comparativa plataforma física vs. análisis teórico

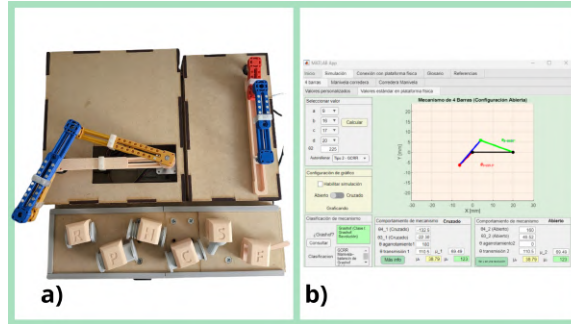
A continuación se presentan los pasos detallados para el caso de manivela–balancín. Para los mecanismos restantes, dado que el procedimiento es análogo, únicamente se mostrarán los valores esperados obtenidos mediante simulación y los registrados en la plataforma física en la Sección de Anexos 16.3. En esta misma sección se encuentran las gráficas de eficiencia para cada mecanismo probado, validando el cambio de μ en una revolución, siendo 90 grados la referencia de un mecanismo de eficiencia ideal, tal como se abordó en el Capítulo 6.13 sobre ángulos de transmisión.

12.2.1. Tipo 2, manivela-balancin

El mecanismo Tipo 2 corresponde a un sistema Grashof con manivela–balancín. Este mecanismo presentó un movimiento continuo en el eslabón de entrada y un movimiento

oscilatorio en el eslabón de salida. La Figura 34 muestra la comparación entre los valores teóricos y experimentales registrados.

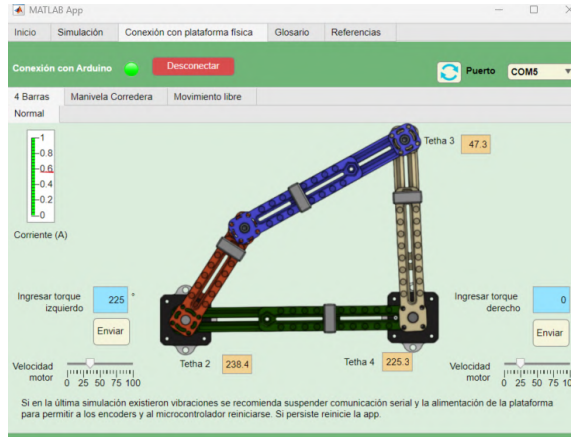
Figura 34. Prueba mecanismo Tipo 2 de la Clasificación de Barker manivela-balancín



Nota. Comparación de resultados teóricos vs. experimental.

Previo a la medición, se verificó el sentido de acoplamiento y el correcto ingreso del torque en el eslabón de entrada, como se muestra en la Figura 35.

Figura 35. Pestaña de conexión con plataforma física



Nota. Aplicación desarrollada en Matlab.

La Figura 50 en la Sección de Anexos 16.3 ilustra el desarrollo del procedimiento de medición, donde se acoplaron los sensores al mecanismo para la lectura de ángulos.

12.2.2. Tipo 3, doble-balancín

El mecanismo Tipo 3 corresponde a un doble balancín Grashof. En este caso, ninguno de los eslabones puede realizar un giro completo, lo que genera dos regiones separadas de movilidad. La Figura 51 en la Sección de Anexos 16.3 muestra la comparación entre los datos teóricos y los registrados experimentalmente. Hubo consistencia entre teoría y práctica.

12.2.3. Tipo 4, balancín-manivela

En mecanismo Tipo 4 el balancín es el eslabón donde se ingresa el torque. Se usan las mismas relaciones de manivela-balancín, pero cambiando el punto en donde se ingresa el torque, lo cual es posible con los motores disponibles X y Y. Los resultados comparativos se muestran en la Figura 52 de la Sección de Anexos 16.3. Hubo consistencia entre teoría y práctica.

12.2.4. Tipo 5, triple balancín

El mecanismo Tipo 5 corresponde a un sistema No-Grashof, es caracterizado por la imposibilidad de que cualquiera de sus eslabones complete un giro completo. Tal como se explicó en el Capítulo 6.14, este tipo de mecanismo presenta el doble de ángulos de agarrotamiento debido a su rango de movilidad limitado. Esta condición provocó vibraciones en las zonas cercanas a dichos puntos, comportamiento que se observó experimentalmente y que coincidió con los puntos del análisis teórico. La Figura 53 de la Sección de Anexos 16.3 muestra la comparación entre los resultados teóricos y los obtenidos experimentalmente para esta configuración.

12.2.5. Tipo 10, manivela-balancín SC

El Tipo 10 corresponde a un mecanismo manivela corredera, especial. Se presentaron puntos de cambio en el mecanismo, tal como se espera de un mecanismo Especial de Grashof. Los resultados experimentales se muestran en la Figura 54 contenida en la Sección de Anexos 16.3. El resultado tuvo correlación con la simulación y la teoría sobre puntos de cambio.

12.2.6. Tipo 11, doble balancín SC

En el mecanismo Tipo 11 el comportamiento es similar al doble balancín pero con restricciones adicionales. Este mecanismo presentó vibraciones al acercarse a los límites geométricos del mecanismo. La comparación entre simulación y medición se ilustra en la Figura 55 mostrada en la Sección de Anexos 16.3. El mecanismo presentó correlación con la simulación y la teoría.

12.2.7. Tipo 12, balancín-manivela SC

El Tipo 12 presenta una variación geométrica del doble balancín SC que produce movimientos de menor amplitud y mayor sensibilidad cerca de los agarrotamientos. La Figura 56 en la la Sección de Anexos 16.3 muestra la correspondencia obtenida entre simulación y medición.

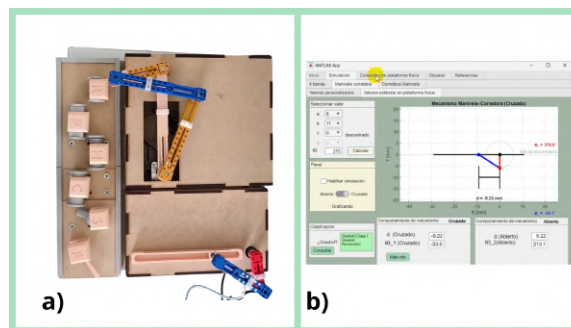
12.2.8. Tipo 13, paralelogramo

El mecanismo Tipo 13 corresponde a un paralelogramo articulado, caracterizado por mantener relaciones geométricas constantes entre los eslabones opuestos. Esto produce un movimiento prácticamente equivalente entre el eslabón de salida y el de entrada, conservando la orientación relativa durante su desplazamiento. En la Figura 57 de la Sección de Anexos 16.3 se presentan los resultados del análisis comparativo entre simulación y medición, donde se aprecia la consistencia entre ambos comportamientos. Tal y como se espera de un mecanismo con longitudes iguales, la eficiencia fue la más cercana a la ideal, pues los eslabones son ortogonales.

12.2.9. Manivela-corredera

En el caso del mecanismo manivela–corredera, el movimiento rotacional de la manivela se transforma en un desplazamiento lineal de la corredera a través del par prismático o corredera. En la los cálculos se observan los puntos de máximo y mínimos en la carrera de la corredera. La Figura 36 muestra la comparación entre el modelo teórico y los valores obtenidos experimentalmente, evidenciando la validez del comportamiento observado en la plataforma física.

Figura 36. Prueba manivela corredera



Nota. Comparación de resultados teóricos vs. experimental.

CAPÍTULO 13

Conclusiones

- Se definieron los parámetros de diseño basados en las competencias de la Iniciativa Académica de Mecanismos.
- Se diseñó una plataforma didáctica con tres módulos demostrativos basada en las competencias de la Iniciativa Académica de Mecanismos.
- La aplicación desarrollada integró el análisis cinemático paramétrico de los mecanismos de cuatro barras.
- Se construyó exitosamente la plataforma educativa utilizando los servicios de manufactura que ofrece la Universidad del Valle de Guatemala.
- La serie de pruebas demostró correlación con los resultados teóricos, validando la eficiencia de la plataforma.

Recomendaciones

A partir del desarrollo de la plataforma didáctica, se plantean las siguientes recomendaciones orientadas tanto a la mejora del prototipo como a su proyección hacia escenarios de aplicación más avanzados:

- **Fabricación en máquinas CNC:** se sugiere que futuras versiones de los módulos sean manufacturadas mediante procesos de control numérico computarizado (CNC). Esto permitiría obtener una mayor precisión dimensional y un mejor acabado superficial, lo que contribuiría a reducir el desgaste prematuro y mejorar la repetibilidad del sistema. Además, este enfoque brinda la posibilidad de que los estudiantes de ingeniería mecánica apliquen directamente sus conocimientos de teorías de falla y análisis de esfuerzos presentes con determinadas cargas.
- **Implementar sistemas mecánicos o eléctricos que mitiguen el agarrotamiento de los mecanismos:** la incorporación de elementos como resortes de precarga, amortiguadores, sensores adicionales o estrategias de control podría mejorar la continuidad del movimiento en zonas críticas, disminuir vibraciones y ampliar el rango de operación estable de la plataforma.
- **Integración de instrumentación avanzada:** se sugiere la incorporación de sensores de fuerza y acelerómetros que permitan medir en tiempo real esfuerzos y vibraciones en los eslabones. Con ello, los estudiantes podrían contrastar los modelos cinemáticos y dinámicos con datos experimentales, acercándose a metodologías de monitoreo industrial.
- **Sistema modular ampliable compatible con la incorporación de nuevos eslabones o diadas:** esto permitiría extender la plataforma actual, incrementando el número de configuraciones posibles y facilitando el estudio de mecanismos más complejos sin necesidad de rediseñar toda la estructura física.

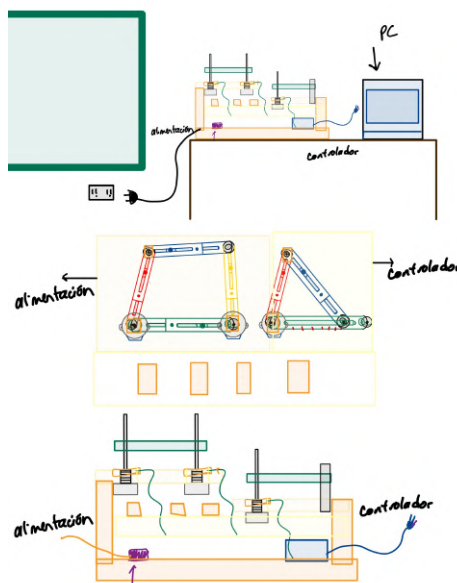
-
- [1] D. Ponsa Banús, «Maquetas didácticas para la enseñanza de Teoría de Máquinas y Mecanismos: análisis comparativo del diseño, la fabricación, el control y el coste,» B.S. thesis, Universitat Politècnica de Catalunya, 2020.
 - [2] TecQuipment, *Mechanisms*, [Accessed: 22-Mar-2025], 2025. dirección: <https://www.tecquipment.com/engineering-science/mechanisms>
 - [3] GUNT, *KI 110 - Kinematic Model: Crank Mechanism*, [Accessed: 22-Mar-2025], 2025. dirección: <https://www.gunt.de/en/products/engineering-mechanics-and-engineering-design/dynamics/glct-1:pa-148:ca-14>
 - [4] *Four-Bar Linkages*, <https://dynref.engr.illinois.edu/aml.html>, University of Illinois at Urbana-Champaign. Accessed: 12-09-2025, 2025.
 - [5] W. F. Riley y L. D. Sturges, *Ingeniería mecánica. dinámica. ii*. Reverté, 1996.
 - [6] R. L. Norton, *Diseño de maquinaria: Síntesis y análisis de máquinas y mecanismos*, Spanish, 4.^a ed. México, D.F.: McGraw-Hill, 2009, ISBN: 0-07-312158-4.
 - [7] R. M. Amé, *Mecánica aplicada al diseño de los elementos de máquinas: temas básicos de resistencia de materiales aplicables al diseño de árboles y ejes*. Nobuko, 2021.
 - [8] R. G. Budynas y J. K. Nisbett, *Diseño en ingeniería mecánica de Shigley*, 9.^a ed. México: McGraw-Hill, 2011, Versión en español de Shigley's Mechanical Engineering Design, ISBN: 978-607-15-0447-2.
 - [9] A. G. Erdman y G. N. Sandor, *Diseño de mecanismos: análisis y síntesis*, 3.^a ed. México: Prentice Hall Hispanoamérica, 1998, ISBN: 968-880-781-4.
 - [10] M. Grübler, «Die Synthese der Mechanismen und Getriebe,» en *Getriebelehre: Eine Theorie des Zwanglaufes und der ebenen Mechanismen*, Springer, 1917, págs. 102-116.
 - [11] N. Tamiloli, «STUDY OF THE KUTZBACH CRITERION AND ITS APPLICATIONS,» n.º 978-93-341-8183-8, pág. 6, 2024.

- [12] N. Sclater y C. Nicholas P., *Mechanisms and Mechanical Devices Sourcebook*, 4th. New York: McGraw-Hill, 2007, ISBN: 978-0-07-146761-2.
- [13] Onshape Inc., *¿Por qué Onshape?* <https://www.onshape.com/es/why-onshape>, 2025.
- [14] M. J. Prince y R. M. Felder, «Inductive teaching and learning methods: Definitions, comparisons, and research bases,» *Journal of engineering education*, vol. 95, n.º 2, págs. 123-138, 2006.
- [15] *NFPA 70: National Electrical Code*, 2023.^a ed. Quincy, Massachusetts: National Fire Protection Association, 2022, Código eléctrico nacional (NEC).
- [16] T. Techyt, *Teaching Techyt - Contact*, Accedido: 29 de septiembre de 2025, 2025. dirección: <https://teachingtechyt.github.io/contact.html>
- [17] OpenAI, *ChatGPT (GPT-5 version) [Large language model]*, <https://chat.openai.com/chat>, Accessed: 2025-09-29, 2025.
- [18] W. Nutsch, *Tecnología de la madera y del mueble*. Reverté, 2025.
- [19] A. Ahmad, *Handbook of optomechanical engineering*. CRC Press, 2017.
- [20] P. C. Sharma, *A textbook of production engineering*. S. Chand Publishing, 1999.
- [21] Amazon.com, *CNC Shield V3 expansión de impresora 3D para Arduino, compatible con controladores A4988 o DRV8825, con disipadores de calor*, Consultado el 4 de octubre de 2025, 2024. dirección: <https://www.amazon.com/-/es/expansi%C3%B3n-impresora-accionamiento-controladores-disipador/dp/BOB2RFZHGQ>
- [22] Amazon.com, *Encoder Magnético AS5600 de Alta Precisión, Sensor de Ángulo por Inducción, Módulo de Medición de Posición de 12 bits para Arduino*, Consultado el 4 de octubre de 2025, 2024. dirección: <https://www.amazon.com/-/es/Encoder-Magn%C3%A9tico-Precisi%C3%B3n-Inducci%C3%B3n-Medici%C3%B3n/dp/BOBBB5B3J8>
- [23] Adafruit Industries, *Adafruit TCA9548A 1-to-8 I²C Multiplexer Breakout: Technical Datasheet and Guide*, Consultado el 4 de octubre de 2025, Adafruit Industries, 2020. dirección: <https://cdn-learn.adafruit.com/downloads/pdf/adafruit-tca9548a-1-to-8-i2c-multiplexer-breakout.pdf>

16.1. Bosquejo de proyecto

El bosquejo original para seleccionar la distribución de la plataforma desrrollado en junio de 2025 se presenta en la Figura 37.

Figura 37. Bosquejo para el diseño de la plataforma

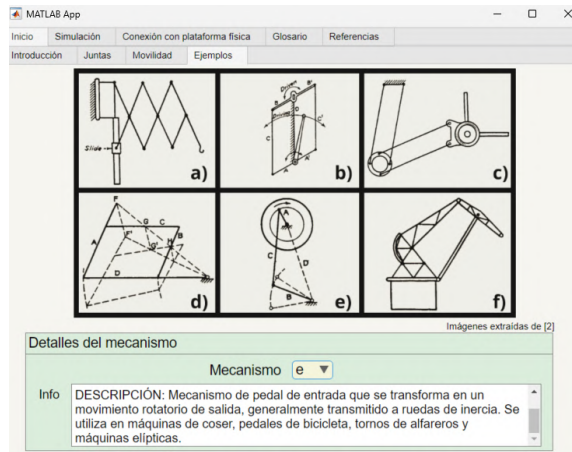


Nota. Bosquejo original dibujado a mano.

16.2. Recorrido por la aplicación

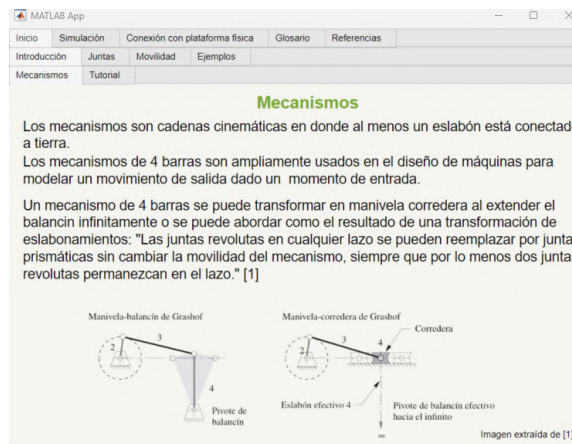
A continuación se presentan las figuras correspondientes al recorrido por las diferentes pestañas de la aplicación desarrollada en Matlab.

Figura 38. Pestaña de *Inicio* > *Ejemplos* en interfaz gráfica



Nota. Interfaz en Matlab.

Figura 39. Pestaña de *Inicio* > *Introducción* en interfaz gráfica



Nota. Interfaz en Matlab.

Figura 40. Pestaña de *Inicio > juntas* en interfaz gráfica



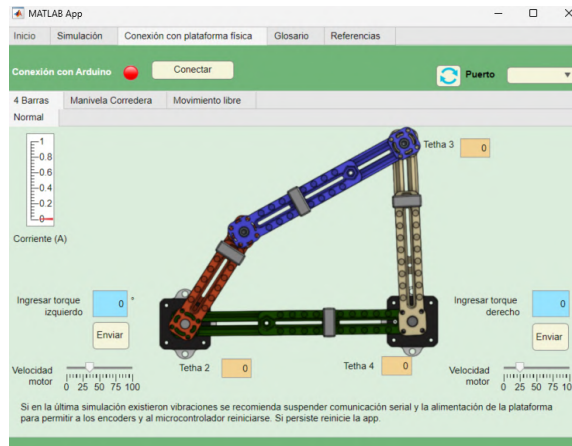
Nota. Interfaz en Matlab.

Figura 41. Pestaña de *Inicio > Movilidad* en interfaz gráfica



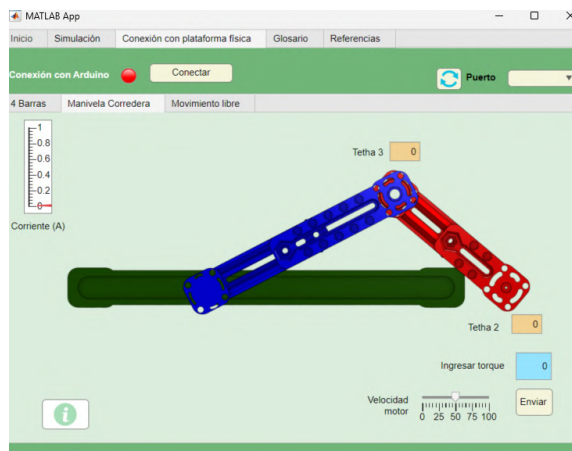
Nota. Interfaz en Matlab.

Figura 42. Pestaña de *Conexión con la plataforma física* > *4 barras* en interfaz gráfica



Nota. Interfaz en Matlab.

Figura 43. Pestaña de *Conexión con la plataforma física* > *manivela corredera* en interfaz gráfica



Nota. Interfaz en Matlab.

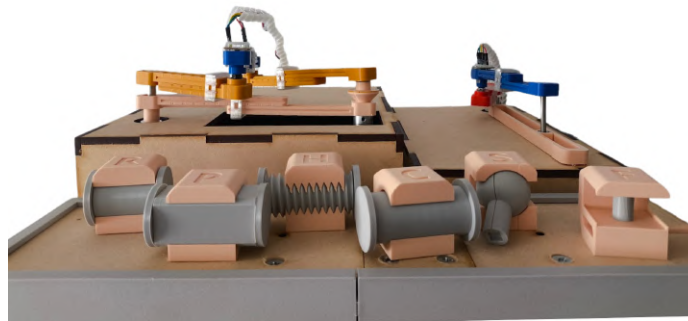
Figura 44. Pestaña de *Conexión con la plataforma física > Movimiento libre* en interfaz gráfica



Nota. Interfaz en Matlab.

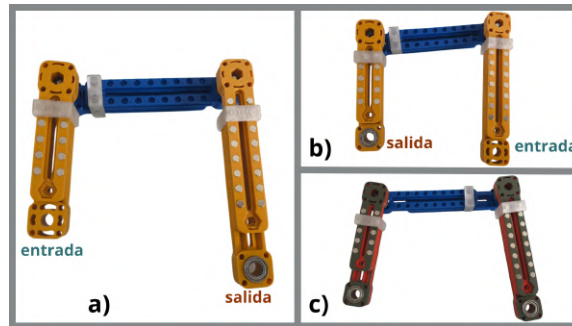
16.3. Plataforma física

Figura 45. Plataforma física vista frontal



Nota. Plataforma diseñada e impresa en 3D y corte láser.

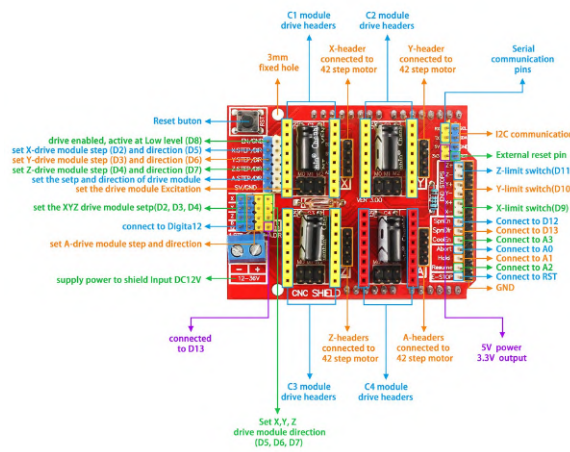
Figura 46. Juegos de eslabones acoplables a los puntos de la bancada del mecanismo de 4 barras



Nota. Subfiguras: a) juego de eslabones con entrada de manivela y salida balancín, b) juego de eslabones con entrada de balancín y salida manivela y c) juego de eslabones para modo manual.

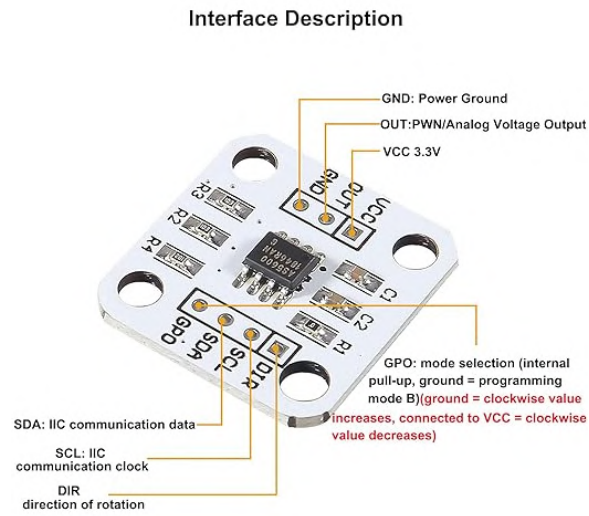
16.4. Componentes

Figura 47. Disposición de pines CNC Shield V3



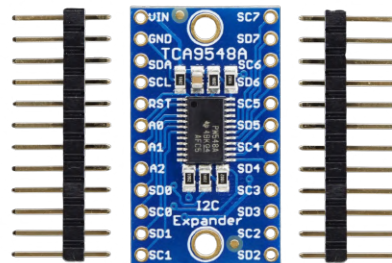
Nota. Imagen extraída de [21]

Figura 48. Disposición de pines Encoder AS5600 3.3V



Nota. Imagen extraída de [22].

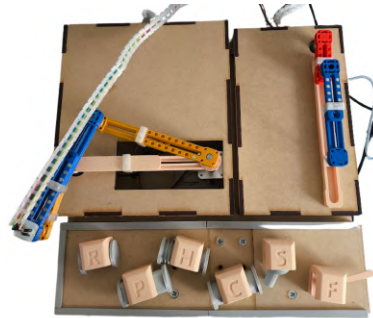
Figura 49. Disposición de pines multiplexor Adafruit I2C TCA9548A



Nota. Imagen extraída de [23].

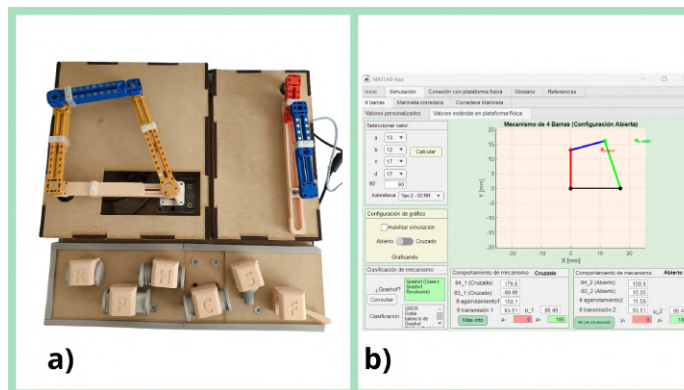
16.4.1. Pruebas de cada mecanismo

Figura 50. Medición de ángulos con plataforma física



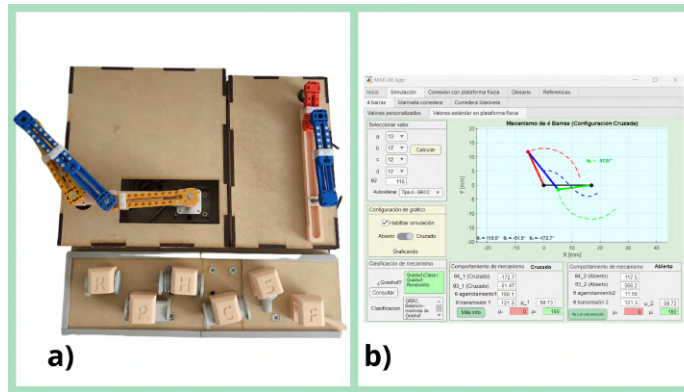
Nota. Medición de ángulos de acoplador mediante el acople del sensor de posición angular.

Figura 51. Prueba mecanismo Tipo 3 de la Clasificación de Barker



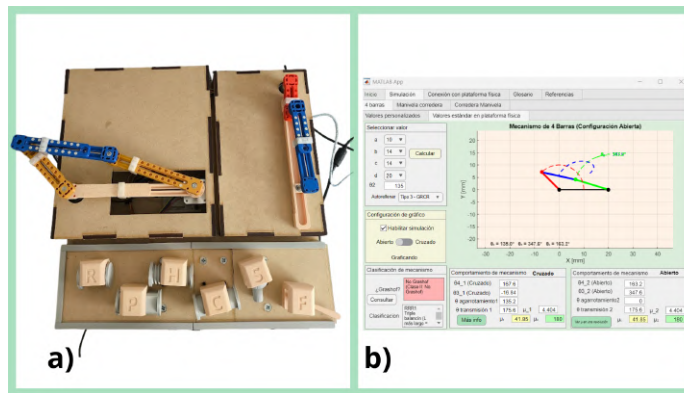
Nota. Comparación de resultados teóricos vs. experimental.

Figura 52. Prueba mecanismo Tipo 4 de la Clasificación de Barker



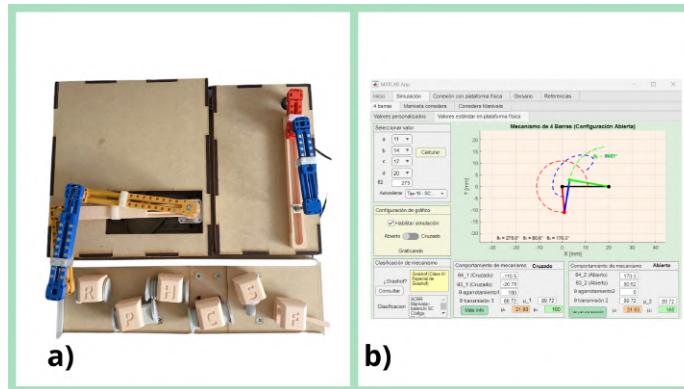
Nota. Comparación de resultados teóricos vs. experimental.

Figura 53. Prueba mecanismo Tipo 5 de la Clasificación de Barker



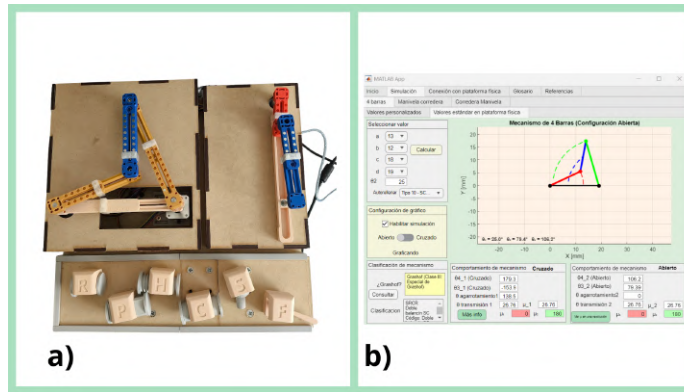
Nota. Comparación de resultados teóricos vs. experimental.

Figura 54. Prueba mecanismo Tipo 10 de la Clasificación de Barker



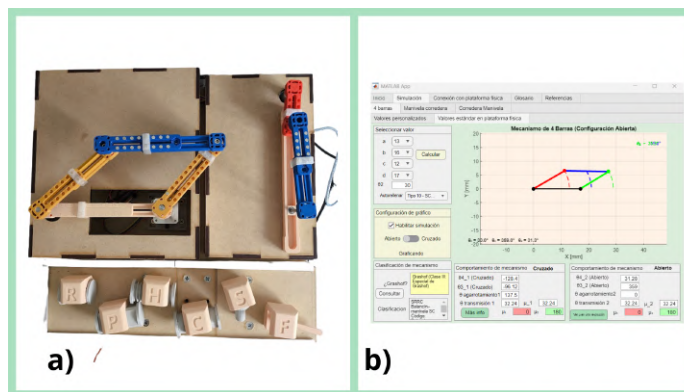
Nota. Comparación de resultados teóricos vs. experimental.

Figura 55. Prueba mecanismo Tipo 11 de la Clasificación de Barker



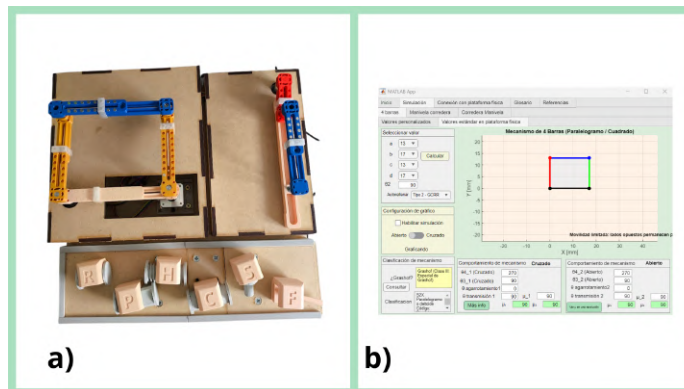
Nota. Comparación de resultados teóricos vs. experimental.

Figura 56. Prueba mecanismo Tipo 12 de la Clasificación de Barker



Nota. Comparación de resultados teóricos vs. experimental.

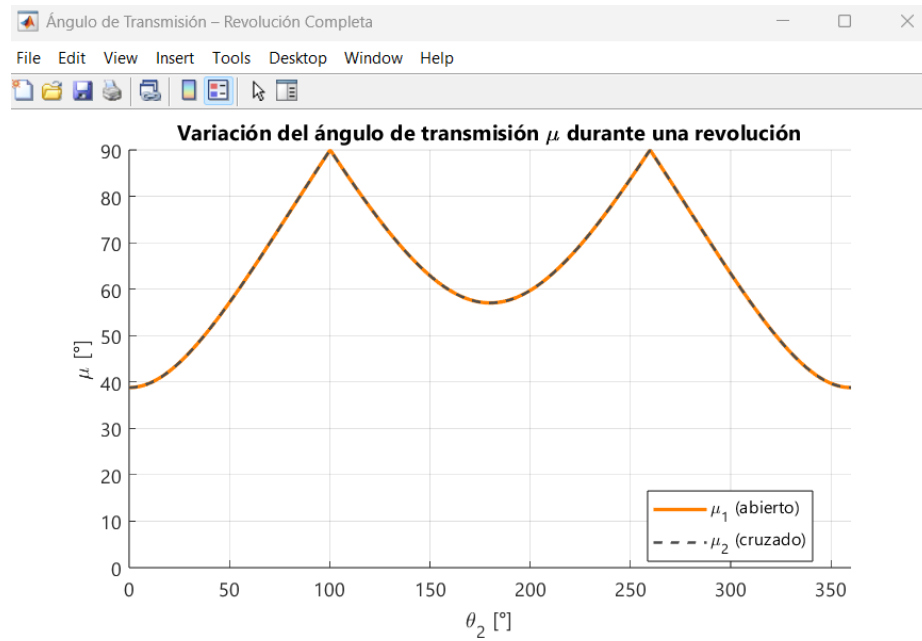
Figura 57. Prueba mecanismo Tipo 13 de la Clasificación de Barker



Nota. Comparación de resultados teóricos vs. experimental.

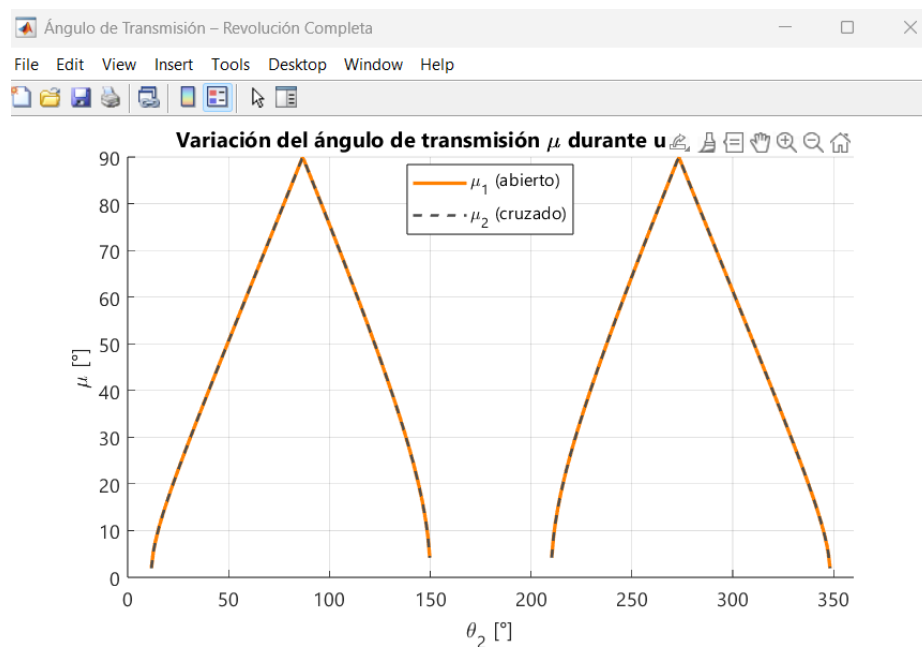
16.5. Complemento de resultados

Figura 58. μ en una revolución en el mecanismo manivela balancín



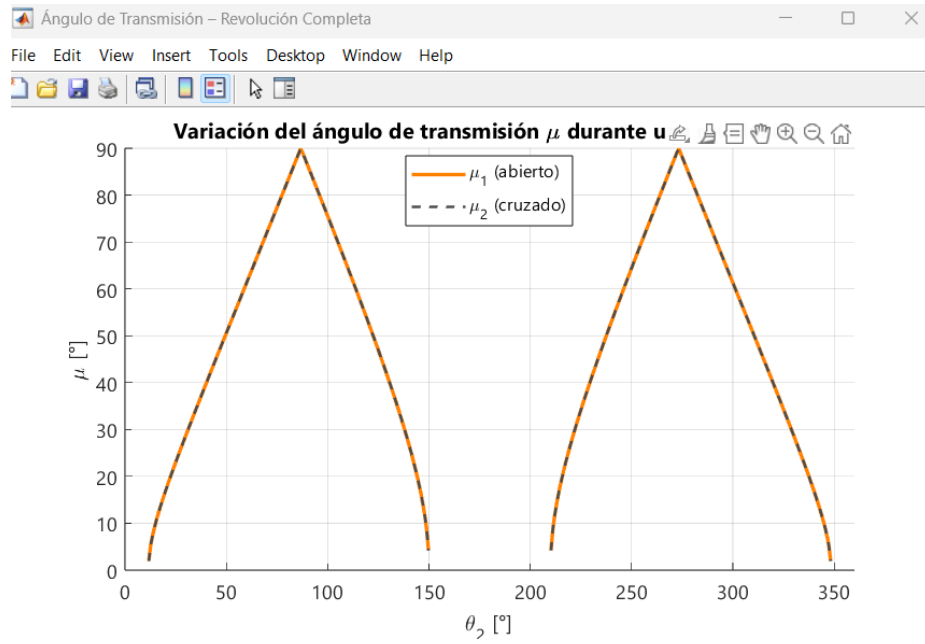
Nota. θ_2 vs μ de 0° a 360°.

Figura 59. μ en una revolución en el mecanismo doble balancín



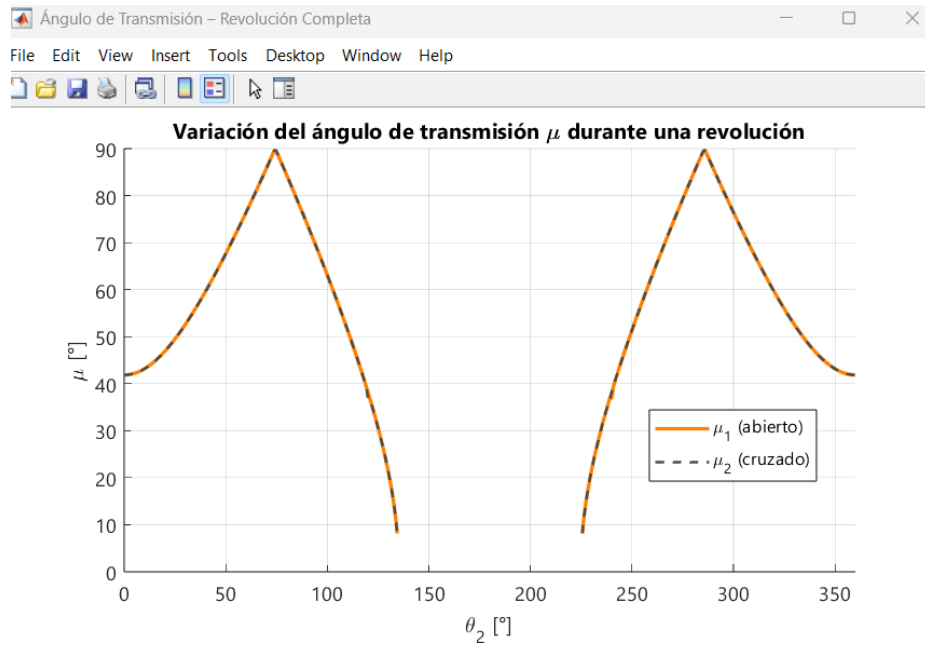
Nota. θ_2 vs μ de 0° a 360°.

Figura 60. μ en una revolución en el mecanismo balancín manivela



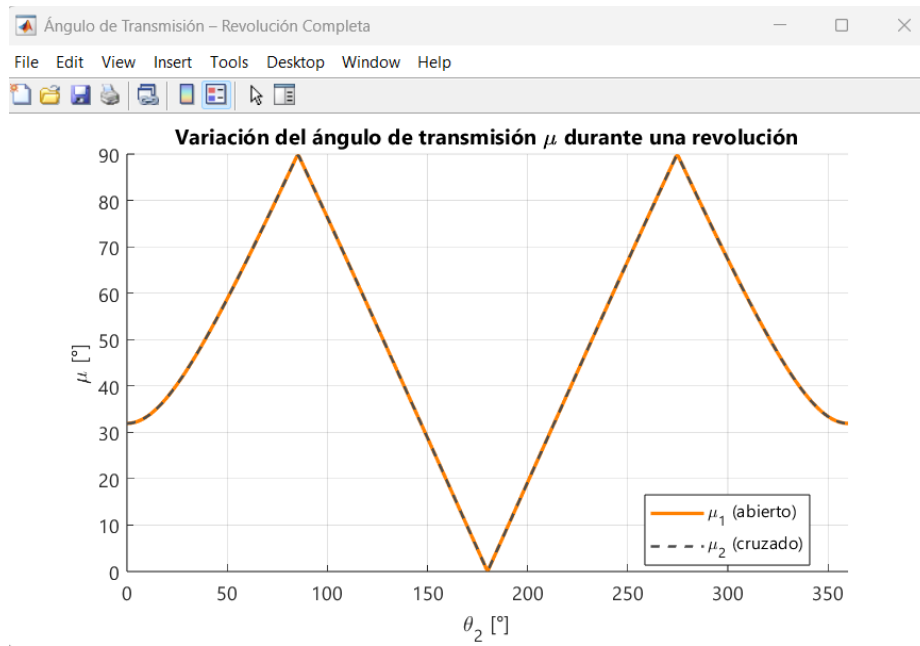
Nota. θ_2 vs μ de 0° a 360° .

Figura 61. μ en una revolución en el mecanismo triple balancín



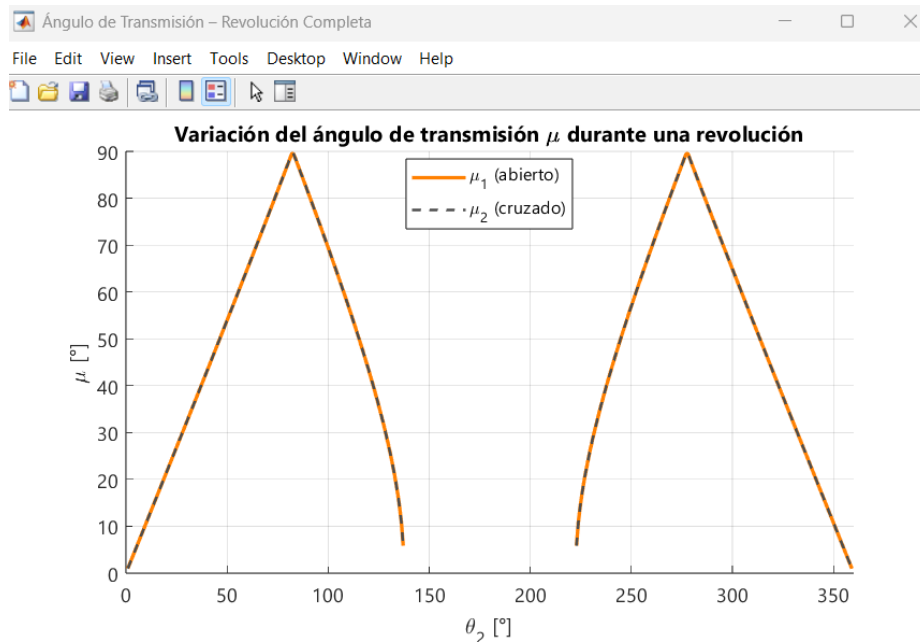
Nota. θ_2 vs μ de 0° a 360° .

Figura 62. μ en una revolución en el mecanismo manivela balancín sc



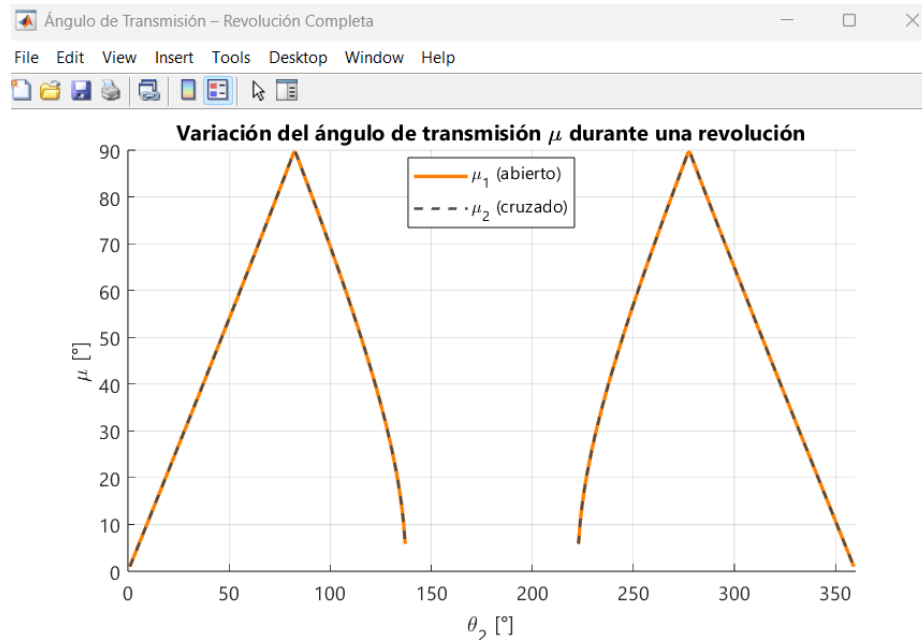
Nota. θ_2 vs μ de 0° a 360°.

Figura 63. μ en una revolución en el mecanismo doble balancín sc



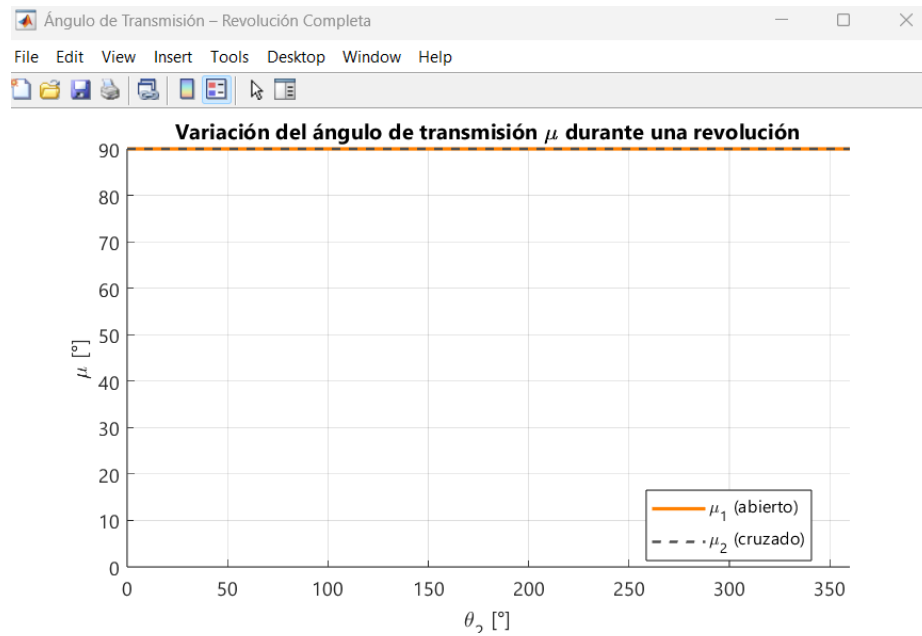
Nota. θ_2 vs μ de 0° a 360°.

Figura 64. μ en una revolución en el mecanismo doble balancín sc



Nota. θ_2 vs μ de 0° a 360°.

Figura 65. μ en una revolución en el mecanismo paralelogramo



Nota. θ_2 vs μ de 0° a 360°.

bancada: eslabón fijado a tierra. 2

D-Hive: espacio colaborativo de la Universidad del Valle de Guatemala orientado a fomentar el aprendizaje basado en proyectos mediante prototipado y experimentación con herramientas de impresión 3D, corte láser, taller, diseño y sublimado . 8

estructura precargada: es una estructura en la que hay presentes esfuerzos. Es más común que la estructura. El error de fabricación genera esfuerzos para ensamblarse. 11

inversión: proceso en el que se cambia el eslabón fijo, tierra o bancada dentro de un mismo mecanismo generando diferentes configuraciones cinemáticas. Este cambio mantiene la clasificación de Grashof, pero altera la clasificación de Barker. El movimiento relativo entre eslabones de un mecanismo no cambia a pesar de las inversiones [9]. 2

MakerLab: espacio orientado en la creación de proyectos o prototipos para estudiantes de Ingeniería Mecatrónica e Ingeniería Electrónica. Cuenta con impresoras 3D, máquinas de corte láser, CNC's, etc. 8