

## Métodos de análisis para mecanismos planos aplicables en procesos productivos

*Analysis methods for flat mechanisms applicable in production processes*

Ernesto Ramiro Santillán Mariño, Félix Javier Manjarrés Arias, Hernán Vinicio Morales Villegas

### Resumen

La mayoría de los elementos de nuestro entorno están en constante movimiento y muchos de ellos desempeñan un papel activo en la vida diaria. Es fundamental contar con herramientas que nos permitan realizar actividades diarias fundamentales como exprimir, triturar, picar, entre otras. De manera similar, existe una necesidad continua en la industria de sistemas mecánicos que ayuden en una variedad de procesos y subprocesos, como sellado, moldeado, mecanizado y transporte. Estos procesos producen elementos que facilitan la vida humana. El objetivo de este artículo es presentar al lector métodos para analizar mecanismos planos a través de técnicas matemáticas, gráficas y computacionales, así como modelamiento matemático. El objetivo es lograr estudios cinemáticos y cinéticos de mecanismos planos complejos en plazos más cortos en comparación con los análisis tradicionales. La participación de computadoras y software especializado reduce significativamente el tiempo de análisis, que es un factor crucial en la productividad industrial. **Palabras clave:** acelerador; procesos productivos; mecanismo manivela – oscilador; velocidad.

---

#### Ernesto Ramiro Santillán Mariño

Universidad de las Fuerzas Armadas Espe | Latacunga | Ecuador | [ersantillan@espe.edu.ec](mailto:ersantillan@espe.edu.ec)  
<http://orcid.org/0000-0001-9358-9739>

#### Félix Javier Manjarrés Arias

Universidad de las Fuerzas Armadas Espe | Latacunga | Ecuador | [fxmanjarres@espe.edu.ec](mailto:fxmanjarres@espe.edu.ec)  
<http://orcid.org/0000-0003-2045-9276>

#### Hernán Vinicio Morales Villegas

Universidad de las Fuerzas Armadas Espe | Latacunga | Ecuador | [hvmorales@espe.edu.ec](mailto:hvmorales@espe.edu.ec)  
<http://orcid.org/0000-0001-8211-1238>

<http://doi.org/10.46652/rgn.v9i41.1255>  
ISSN 2477-9083  
Vol. 9 No. 41 julio-septiembre, 2024, e2401255  
Quito, Ecuador

Enviado: abril 09, 2024  
Aceptado: junio 12, 2024  
Publicado: junio 27, 2024  
Publicación Continua



## Abstract

Most elements in our surroundings are in constant motion, and many of them play an active role in daily life. It is essential to rely on tools that enable us to perform fundamental daily activities such as squeezing, grinding, chopping, among others. Similarly, there is a continual need in the industry for mechanical systems that assist in a variety of processes and subprocesses, such as sealing, molding, machining, and transportation. These processes produce items that facilitate human life. The objective of this article is to present the reader with methods for analyzing planar mechanisms through mathematical, graphic, and computational techniques, as well as mathematical modeling. The goal is to achieve kinematic and kinetic studies of complex planar mechanisms in shorter time frames compared to traditional analyses. The involvement of computers and specialized software significantly reduces analysis time, which is a crucial factor in industrial productivity.

**Keywords:** accelerator; production processes; crank-oscillator mechanism; speed.

## Introducción

Un mecanismo es un conjunto de miembros sólidos conectados por juntas para transmitir movimiento de uno o más actuadores de entrada a uno o más miembros de salida (Culley et al., 2001; Norton, 2012; Shigley & Uicker, 2011). En su estudio cinemático, los componentes se consideran rígidos, lo que significa que sus deformaciones no se toman en cuenta, principalmente porque generalmente son muy pequeñas y, en algunos casos, insignificantes. Las juntas que conectan los elementos de un mecanismo se llaman “juntas cinemáticas,” las cuales se forman por contacto directo entre dos superficies.

Una de las primeras codificaciones de la cinemática de mecanismos fue desarrollada por Reuleaux, y algunas de sus terminologías básicas que destacan en el estudio de los mecanismos incluyen referirse a una junta cinemática como un “par”. Además, dividió las juntas en “pares inferiores” y “pares superiores” (Reuleaux, 1876). Un par inferior es aquel en el que el contacto se produce entre dos miembros rígidos en superficies geoméricamente congruentes. El contacto de superficie en los pares inferiores resulta en tensiones relativamente bajas (Reuleaux, 1876; Waldron & Kinzel, 1999). Un par superior o “junta de par superior” es aquel en el que el contacto se produce solo en puntos aislados o segmentos de línea. En este tipo de junta, las tensiones suelen ser mayores en comparación con los pares inferiores (Reuleaux, 1876).

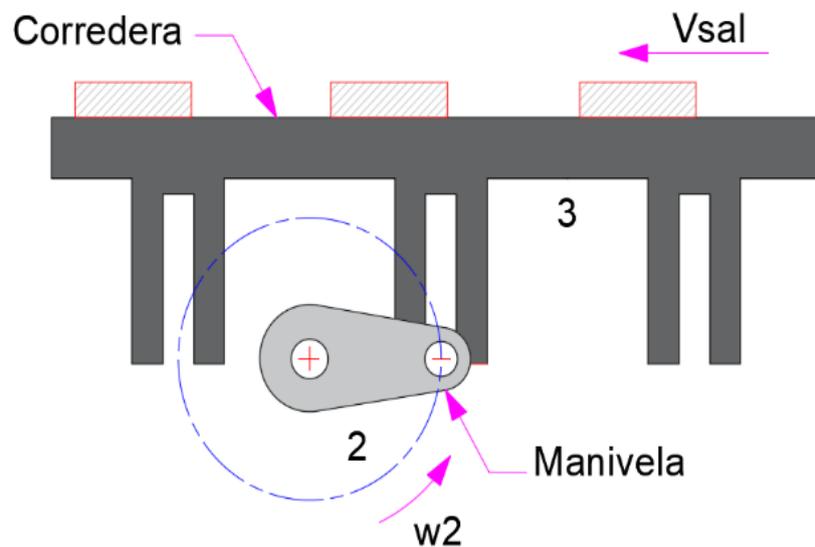
Las juntas son el aspecto más importante de un mecanismo a examinar durante el análisis, ya que permiten el movimiento en ciertas direcciones mientras restringen el movimiento en otras. Los tipos de movimiento permitido están relacionados con el número de grados de libertad (DOF) de la junta (Norton, 2012).

Los procesos productivos destinados a agregar valor requieren el uso de máquinas y equipos que puedan transformar la velocidad de entrada en otra velocidad, transformar la fuerza en otra fuerza, transformar una trayectoria en otra trayectoria, o transformar un tipo de energía en otro. El análisis de sistemas dinámicos aborda y resuelve estos aspectos utilizando métodos analíticos, gráficos, computacionales, o una combinación de ellos.

La teoría del análisis y síntesis de mecanismos está estrechamente relacionada con la tarea del análisis cinemático (Erdman & Sandor, 1991). La utilidad de las tareas de análisis y síntesis radica en el acuerdo de ecuaciones que definen la interdependencia de variables y parámetros fijos de mecanismos, los cuales se utilizan en cada caso según sus propósitos (Tsai, 2001).

El análisis de mecanismos requiere identificar el tipo de sistema entre mecanismos de transmisión, mecanismos de transformación y mecanismos auxiliares. Los mecanismos de transmisión funcionan para transmitir movimiento, la fuerza y la potencia producidas por un elemento motriz a otro punto. Pueden ser mecanismos de transmisión lineal (polea, polipasto, palanca) o mecanismos de transmisión circular (ruedas de fricción, sistemas de correa y polea, engranajes, cadenas). Los mecanismos de transformación funcionan para convertir el movimiento circular en movimiento rectilíneo o viceversa. Pueden ser mecanismos que transforman el movimiento circular en movimiento rectilíneo o viceversa (manivela-deslizador, cremallera y piñón, tornillo-tuerca, tornillo sin fin) o mecanismos que transforman el movimiento circular en movimiento rectilíneo alternativo o viceversa (biela-manivela, leva y seguidor, cigüeñal). Los mecanismos auxiliares consisten en una serie de elementos mecánicos utilizados para modificar o controlar ciertos parámetros de movimiento, como permitir la rotación en una dirección (trinquete), absorber energía (resortes) y permitir el acoplamiento de ejes y ejes de transmisión (embragues y acoplamientos).

Figura 1. Mecanismo industrial intermitente.



Fuente: elaborado por los autores.

## Desarrollo

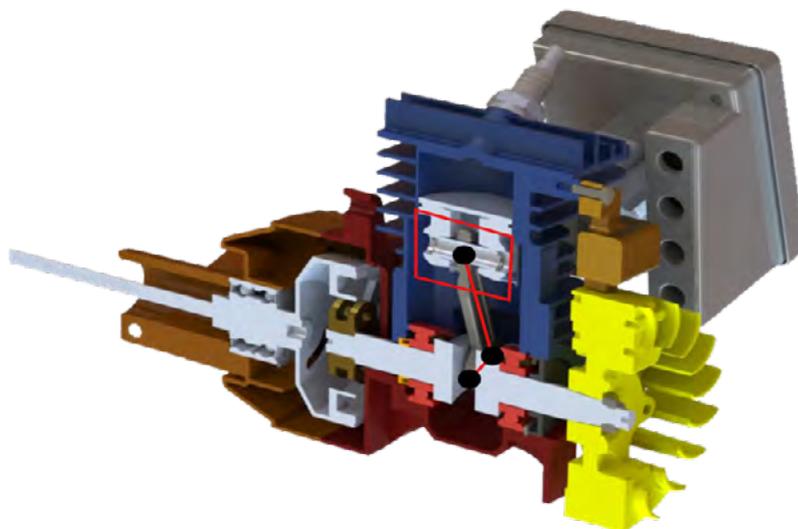
Los métodos para analizar mecanismos planos se han desarrollado desde tiempos antiguos utilizando las herramientas disponibles. Hasta hace poco, los procesos de análisis y síntesis se realizaban a menudo de manera manual, empleando técnicas gráficas en una mesa de dibujo y cálculos matemáticos usando los métodos tradicionales de “lápiz y papel”. La introducción de computadoras en la ingeniería ha permitido la innovación en estos procesos. Este documento presenta métodos de análisis respaldados por aplicaciones informáticas.

### Método Gráfico

Para la aplicación del método gráfico con la asistencia de software de computadora, se considera un mecanismo del tipo manivela-oscilador-deslizador. Este tipo de mecanismo es conocido por su uso en motores de combustión interna o compresores alternativos.

En el análisis de un mecanismo manivela-oscilador-deslizador, se utilizan herramientas gráficas computacionales para trazar la trayectoria de movimiento y analizar las fuerzas actuantes en los distintos componentes del mecanismo. Las aplicaciones informáticas permiten modelar y simular el comportamiento dinámico del mecanismo bajo diferentes condiciones operativas. Estos análisis gráficos proporcionan una visión clara y precisa de las interacciones entre los componentes del mecanismo, facilitando el diseño y la optimización del sistema.

Figura 2. Aplicación del Mecanismo Manivela-Oscilador.

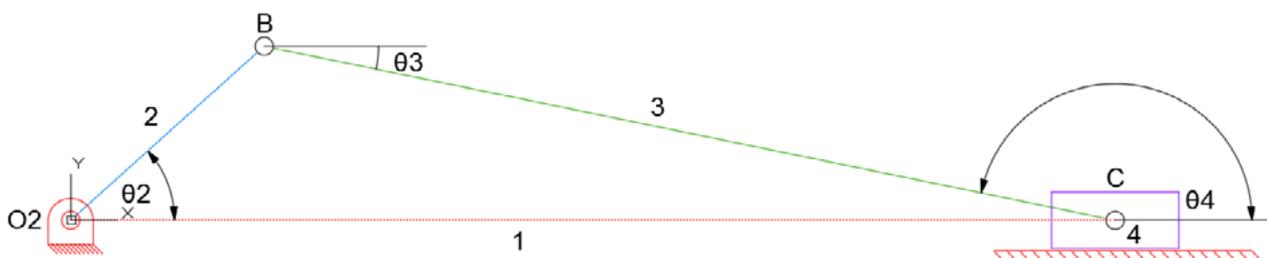


Fuente: elaborado por los autores.

Una versión de prueba del software AutoCAD Mechanical 2019 permite la presentación del mecanismo manivela-oscilador-deslizador en el siguiente diagrama fundamental. El análisis de posición en un mecanismo plano requiere generar proyecciones de los diferentes componentes (eslabones) de la cadena cinemática desde una posición inicial. Se utilizan técnicas de geometría plana para ejecutar este método, y el eslabón de entrada de energía al sistema se considera como el punto de partida para la proyección del análisis. La Figura 3 muestra el mecanismo manivela-oscilador-deslizador.

El uso de AutoCAD Mechanical 2019 facilita la visualización precisa de las posiciones relativas de los eslabones del mecanismo, permitiendo identificar y corregir posibles interferencias o conflictos en el diseño. La capacidad de este software para manejar complejas proyecciones geométricas y la integración de herramientas de análisis gráfico simplifica el proceso de diseño y optimización del mecanismo.

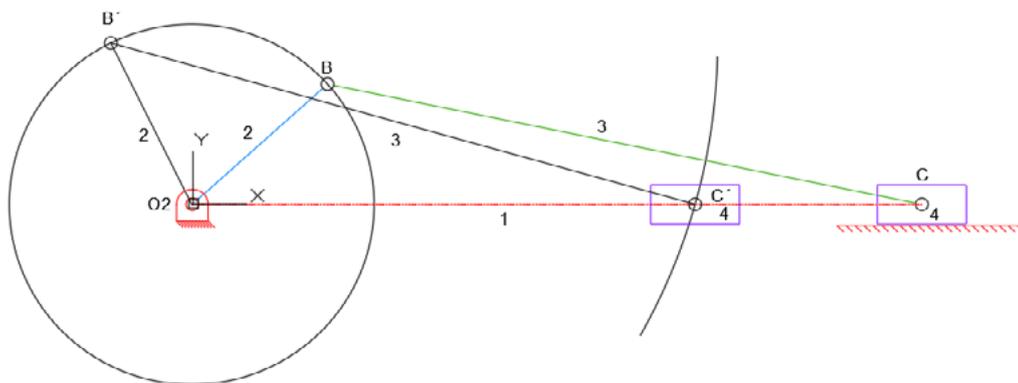
Figura 3. Diagrama del Mecanismo Manivela-Oscilador-Deslizador.



Fuente: elaborado por los autores.

El análisis de posición en un mecanismo plano requiere generar proyecciones de los diferentes componentes (eslabones) de la cadena cinemática desde una posición inicial. Se utilizan técnicas de geometría plana para ejecutar este método, y el eslabón de entrada de energía al sistema se considera como el punto de partida para la proyección del análisis. La Figura 4 muestra el mecanismo manivela-oscilador-deslizador en un análisis de posición.

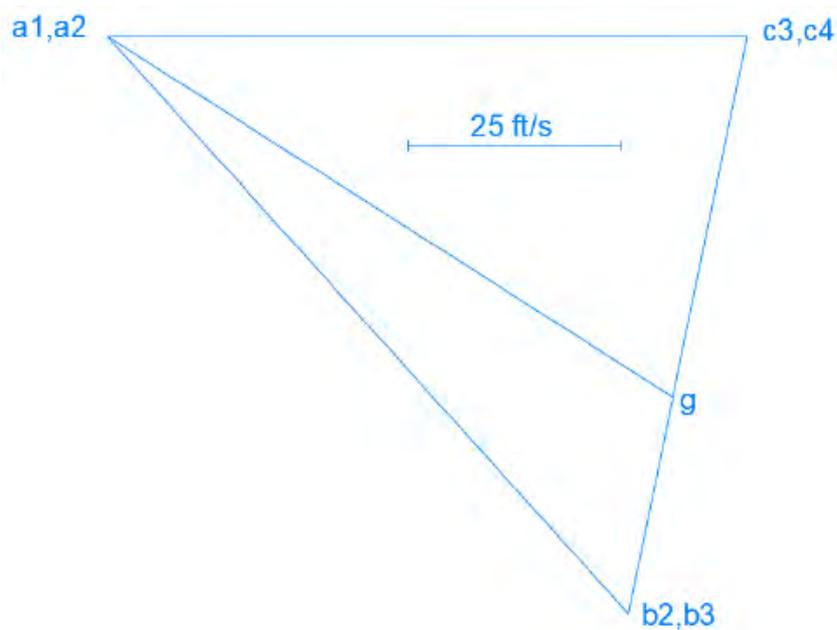
Figura 4. Análisis de Posición en un Mecanismo Manivela-Oscilador-Deslizador.



Fuente: elaborado por los autores.

Utilizando técnicas de trigonometría y dibujo mecánico, se traza el polígono de velocidades a una escala adecuada. Este polígono permite determinar, mediante una simple inspección, las dimensiones de magnitud de los vectores de velocidad en diferentes puntos de interés del mecanismo. La Figura 5 muestra el polígono de velocidades para el mecanismo manivela-oscilador-deslizador.

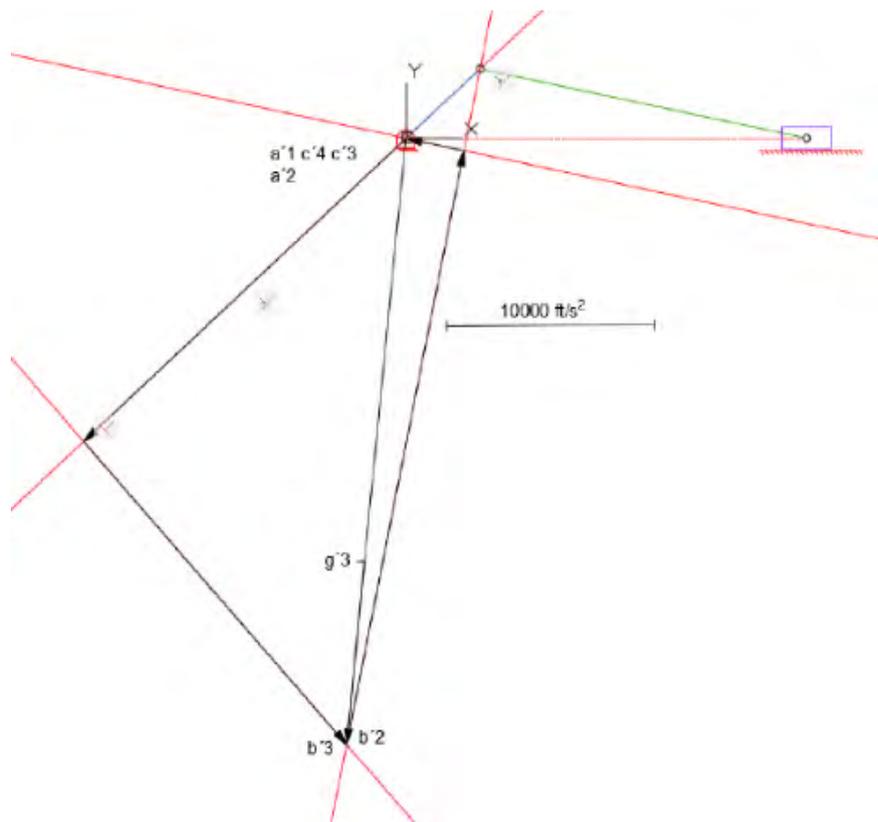
Figura 5. Polígono de Velocidades del Mecanismo Manivela-Oscilador-Deslizador.



Fuente: elaborado por los autores.

En el caso del análisis de aceleración en un mecanismo plano como el mecanismo manivela-oscilador-deslizador, es necesario generar el polígono de aceleración. La aceleración total en un mecanismo consiste en la suma de la aceleración normal, la aceleración tangencial y la aceleración de Coriolis, si es aplicable. Cada vector debe trazarse según la dirección y el sentido determinados por la naturaleza de la aceleración, utilizando la escala necesaria. La Figura 6 muestra el polígono de aceleración resultante del análisis del mecanismo manivela-oscilador-deslizador.

Figura 6. Polígono de Aceleración en el Mecanismo Manivela-Oscilador-Deslizador.



Fuente: elaborado por los autores.

### Método Analítico

Otra forma de analizar un mecanismo plano es aplicando álgebra compleja para determinar los parámetros operativos del sistema. A continuación, se presenta una exposición del desarrollo del análisis de álgebra compleja para el mecanismo manivela-oscilador-deslizador, seguida de las ecuaciones obtenidas utilizando este método para determinar velocidades y aceleraciones en puntos de interés del mecanismo.

La ventaja e innovación en este proceso radican en la interacción con software de procesamiento matemático basado en programación, como la versión estudiantil de Matlab, que se utilizó para este ejemplo.

**Datos:  $r_2, r_3, \theta_2, \theta_1 = 0$ .**

**$r_2 = 100\text{mm}$ . y  $r_3 = 500\text{mm}$ .**

**$\theta_2 = 0 \dots 360^\circ$ . y  $\Delta\theta_2 = 40^\circ$ .**

**$\theta_3 = ?$  y  $r_1 = ?$ .**

$$r_1 = r_2 + r_3$$

$r_1 - r_2 - r_3 = 0 \leftrightarrow$  Ecuación de Cierre del Circuito.

$r_1 e^{i\theta_1} = r_2 e^{i\theta_2} + r_3 e^{i\theta_3}$  ;  $r = r e^{i\theta} \leftrightarrow$  Ecuación de Euler.

$$e^{i\theta} = \cos \theta + i \sin \theta.$$

$$r_1(\cos \theta_1 + i \sin \theta_1) = r_2(\cos \theta_2 + i \sin \theta_2) + r_3(\cos \theta_3 + i \sin \theta_3)$$

$$r_1 \cos \theta_1 = r_2 \cos \theta_2 + r_3 \cos \theta_3 \rightarrow (\text{Real}, \theta_1 = 0)$$

$$r_1 \sin \theta_1 = r_2 \sin \theta_2 + r_3 \sin \theta_3 \rightarrow (\text{Imag. } \theta_1 = 0)$$

$$r_1 = r_2 \cos \theta_2 + r_3 \cos \theta_3 \quad (1).$$

$$0 = r_2 \sin \theta_2 + r_3 \sin \theta_3 \quad (2).$$

$$r_3 \sin \theta_3 = -r_2 \sin \theta_2.$$

$$\theta_3(\theta_2) = \sin^{-1} \left( \frac{(-r_2 \sin \theta_2)}{r_3} \right) \quad (3).$$

**Reemp. (3) en (1).**

$$r_1(\theta_2) = r_2 \cos \theta_2 + r_3 \cos \left( \sin^{-1} \left( \frac{(-r_2 \sin \theta_2)}{r_3} \right) \right) \quad (4)$$

Se desarrollan las expresiones que permiten evaluar la variación en la posición del mecanismo manivela-oscilador-deslizador utilizando la ecuación de Euler. Una vez obtenidas las expresiones que rigen el comportamiento posicional del mecanismo, se utiliza la versión académica del software Matlab para ejecutar las iteraciones requeridas dentro del intervalo de rotación de la manivela, que, en este ejemplo, es de  $40^\circ$ .

**% Definir los parámetros y ángulos iniciales**

`theta2 = (0:1:360) * (pi/180); % grados convertidos a radianes, incrementos de 1 grado`

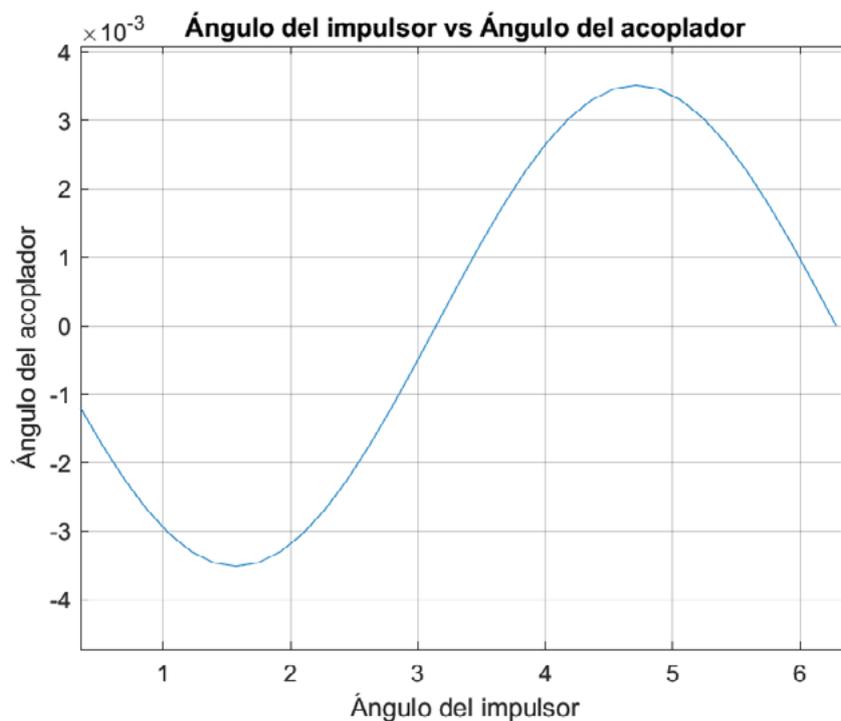
`r2 = 100; % mm`

`r3 = 500; % mm`

**% Calcular el ángulo theta3 utilizando una función más precisa**

```
theta3 = asin(-r2 * sin(theta2) / r3);  
  
% Convertir theta3 de radianes a grados para una mejor interpretación  
  
theta3_deg = theta3 * (180/pi);  
  
% Graficar el ángulo de la manivela contra el ángulo del acoplador  
  
figure;  
  
plot(theta2 * (180/pi), theta3_deg, 'b', 'LineWidth', 1.5);  
  
xlim([0 360]); % Limitar el eje x de 0 a 360 grados  
  
ylim([-0.6 0.6]); % Ajustar los límites del eje y para mejorar la visualización  
  
grid on;  
  
title('Crank Angle vs Coupler Angle');  
  
xlabel('Crank Angle (degrees)');  
  
ylabel('Coupler Angle (degrees)');
```

Figura 7. Gráfico de la variación en la posición del mecanismo biela-manivela-deslizador.

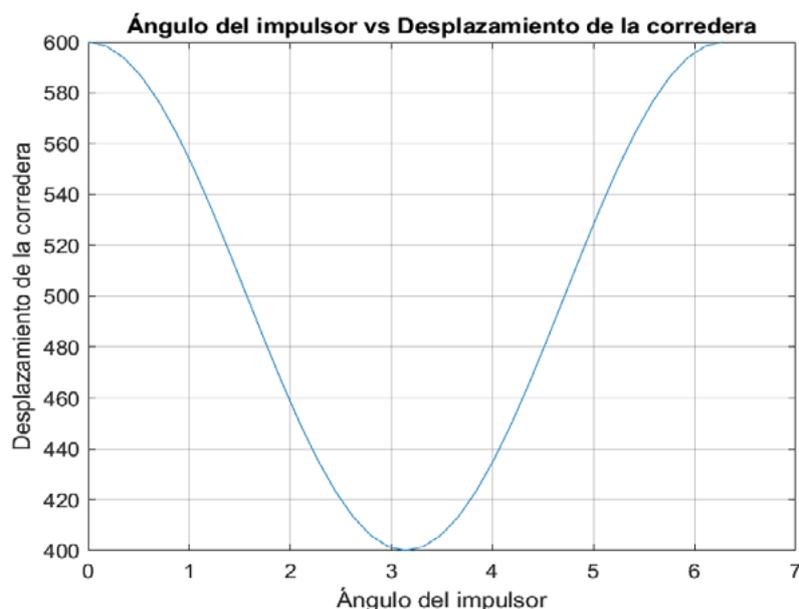


Fuente: elaborado por los autores.

El desplazamiento lineal del deslizador se determina en Matlab utilizando la ecuación obtenida del análisis de álgebra compleja. El resultado se muestra en la Fig. 8.

```
% Definir los parámetros y ángulos iniciales
theta2 = (0:1:360) * (pi/180); % grados convertidos a radianes, incrementos de 1 grado
r2 = 100; % mm
r3 = 500; % mm
% Calcular el desplazamiento lineal del deslizador
theta3 = asin(-r2 * sin(theta2) / r3);
r1 = r2 * cos(theta2) + r3 * cos(theta3);
% Graficar el ángulo de la manivela contra el desplazamiento del deslizador
figure;
plot(theta2 * (180/pi), r1, 'r', 'LineWidth', 1.5); % Conversión de radianes a grados para theta2
grid on;
title('Crank Angle vs Slider Displacement');
xlabel('Crank Angle (degrees)');
ylabel('Slider Displacement (mm)');
xlim([0 360]); % Limitar el eje x de 0 a 360 grados
```

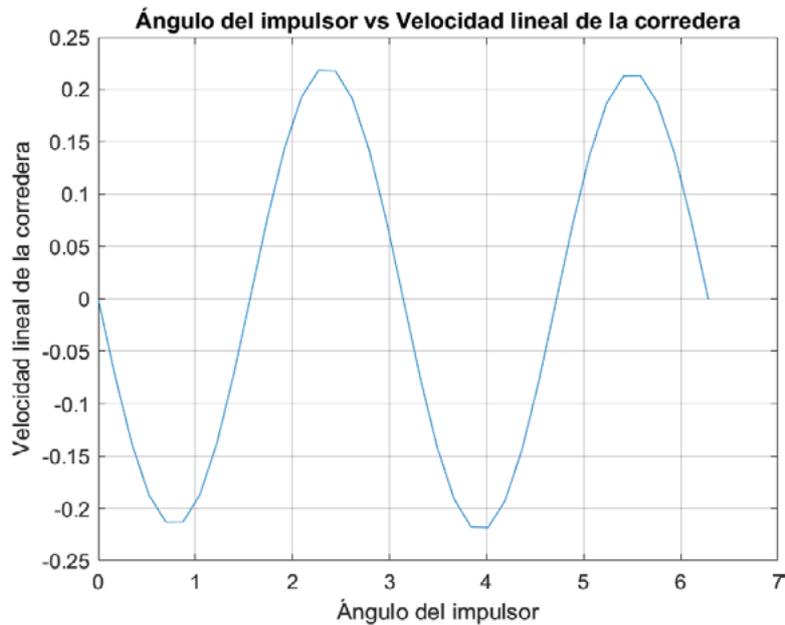
Figura 8. Gráfico de la variación en el desplazamiento del deslizador en el mecanismo biela-manivela-deslizador.



Fuente: elaborado por los autores.

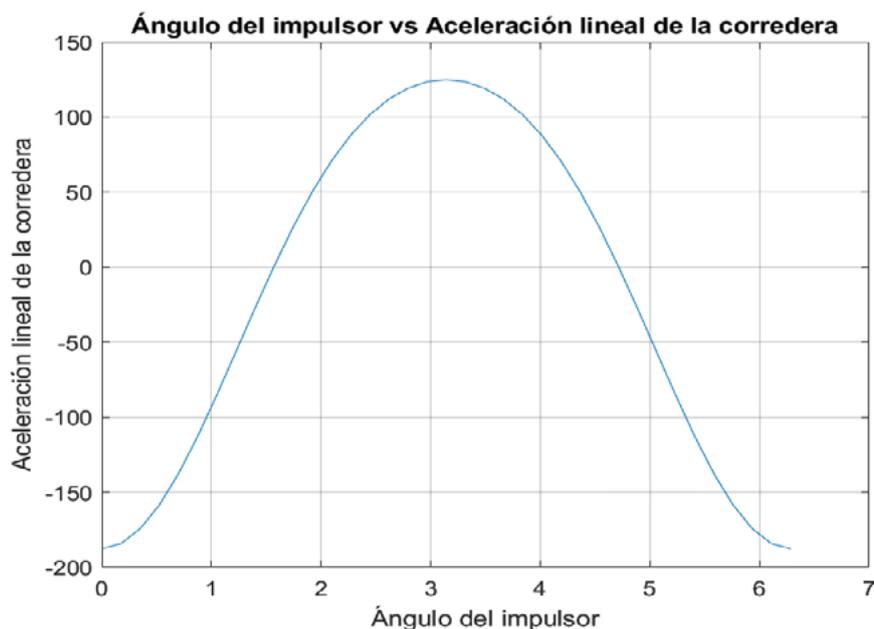
A continuación, las Figuras 9 y 10 muestran las gráficas de velocidad y aceleración en el mecanismo manivela-oscilador-deslizador analizado. Cabe destacar que las expresiones utilizadas para generar estas gráficas provienen del análisis matemático usando álgebra compleja. Las primeras y segundas derivadas de la ecuación de posición con respecto al tiempo se han calculado en Matlab, iterando de acuerdo con la variación en la rotación de la manivela.

Figura 9. Gráfico de la variación en la velocidad lineal del deslizador vs. ángulo de la manivela en el mecanismo biela-manivela-deslizador.



Fuente: elaborado por los autores.

Figura 10. Gráfico de la variación en la aceleración lineal del deslizador vs. ángulo de la manivela en el mecanismo biela-manivela-deslizador.



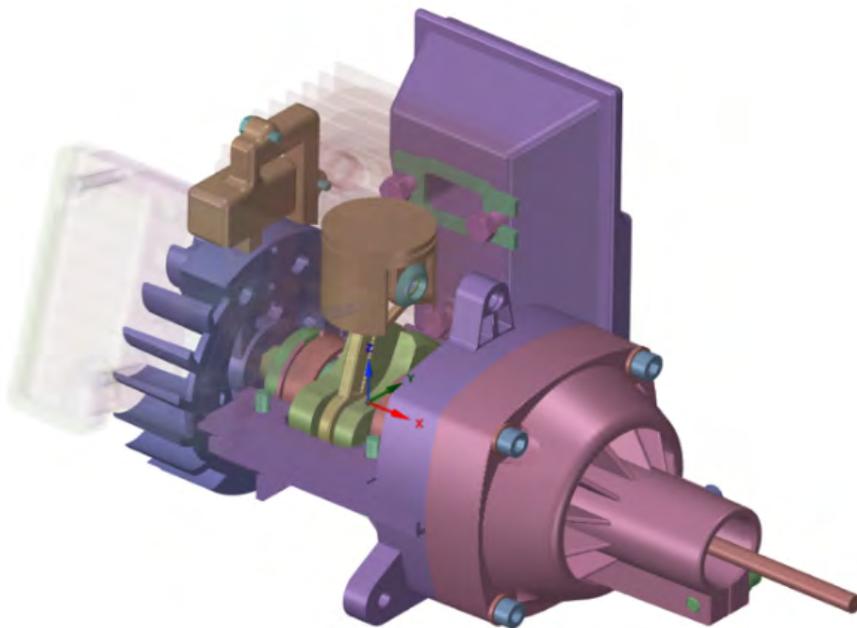
Fuente: elaborado por los autores.

Matlab permite realizar cálculos iterativos durante la evaluación de expresiones obtenidas a través del álgebra compleja aplicada al análisis de mecanismos. Aunque estos cálculos puedan parecer simples, implican la generación de matrices complejas, las cuales son resueltas eficientemente por el software de programación en tiempos muy cortos.

### Método Computacional

En este método, el mecanismo en estudio se analiza utilizando software especializado, en este caso, ANSYS en su versión para estudiantes. Se crea el diseño asistido por computadora del compresor que contiene el mecanismo a analizar. La Figura 11 muestra el modelo CAD en el entorno de dibujo tridimensional de ANSYS.

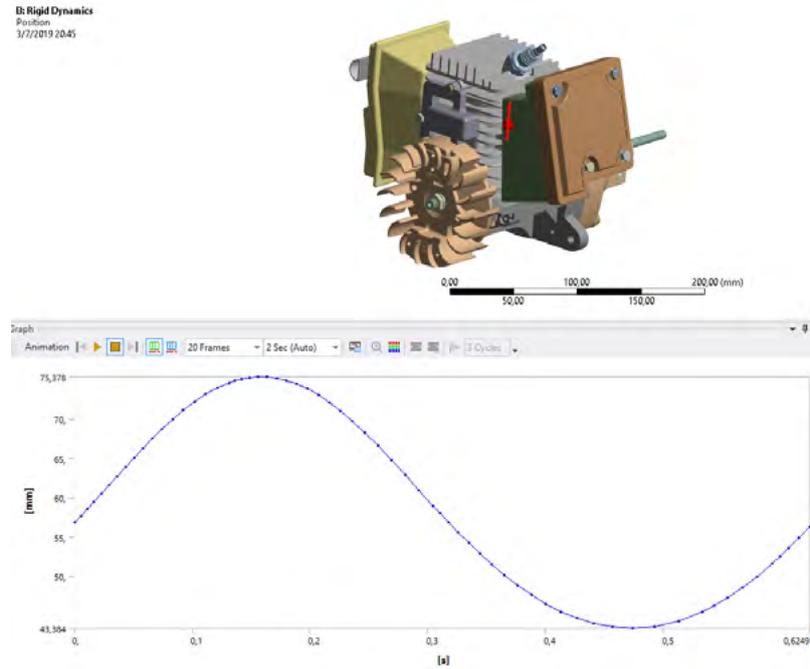
Figura 11. Modelado tridimensional del compresor que contiene el mecanismo biela-manivela-deslizador.



Fuente: elaborado por los autores.

ANSYS proporciona un entorno de trabajo fácil de usar, pero su operación requiere conocimientos de métodos numéricos, particularmente del análisis de elementos finitos. La Figura 12 muestra el resultado del análisis de posición del deslizador a los 0.6249 segundos de la simulación dinámica, lo que corresponde a una revolución completa de la manivela del mecanismo.

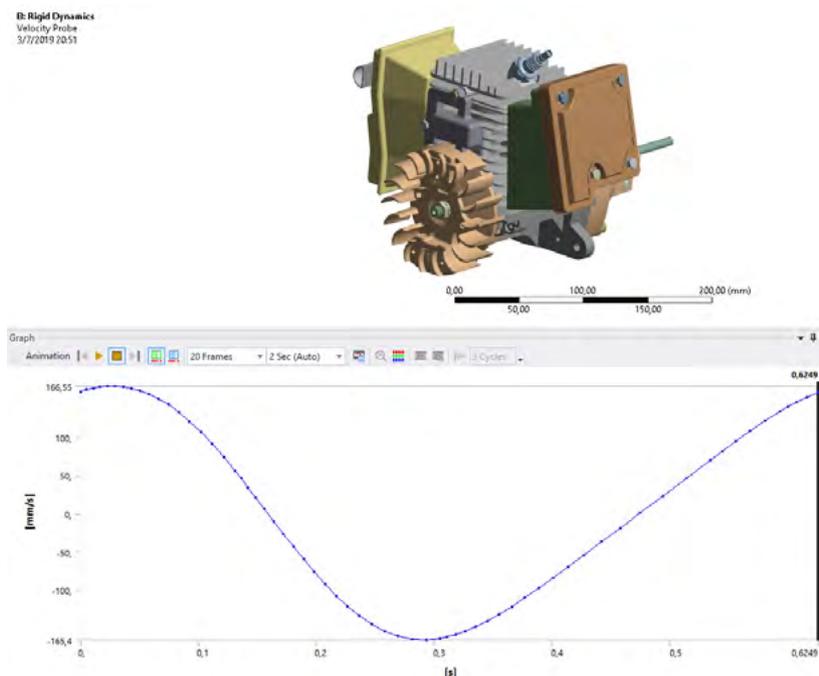
Figura 12. Gráfico del análisis de posición resultante de la simulación del mecanismo en ANSYS.



Fuente: elaborado por los autores.

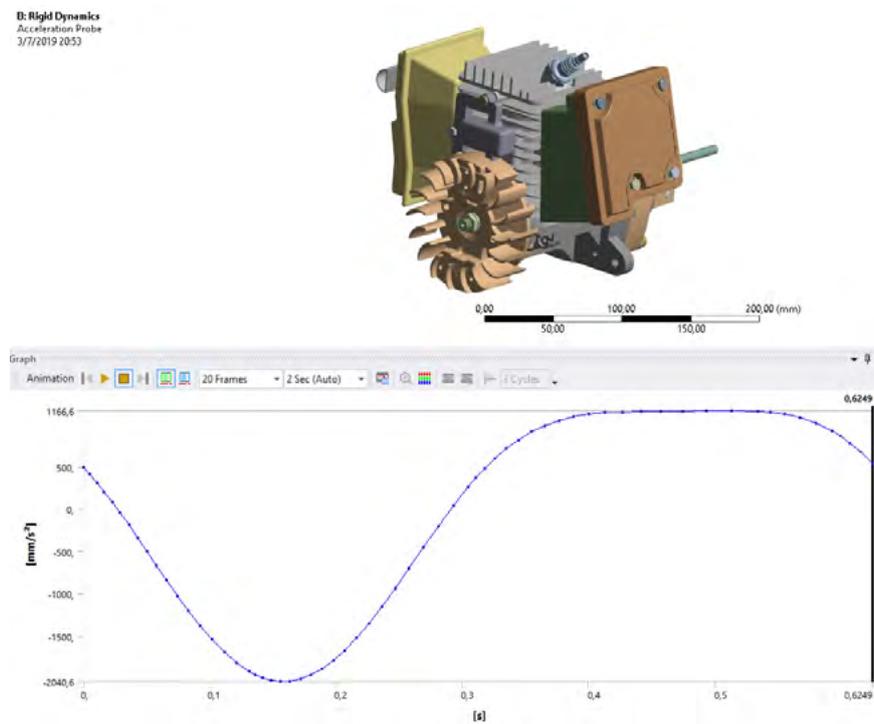
La Figura. 13 muestra el gráfico resultante de la simulación de la velocidad en el deslizador, y la Figura 14 indica el gráfico de la aceleración.

Figura 13. Gráfico de la velocidad resultante de la simulación del mecanismo en ANSYS.



Fuente: elaborado por los autores.

Figura 14. Gráfico de la aceleración resultante de la simulación del mecanismo en ANSYS.



Fuente: elaborado por los autores.

El método de elementos finitos se basa en la diferenciación, lo que puede llevar a preocupaciones sobre una falta de aproximación a una solución real por parte del software. Sin embargo, cabe destacar que existen herramientas dentro del programa para controlar la discretización y el tamaño de los elementos. Al aplicar las técnicas de configuración adecuadas, el programa proporciona una excelente aproximación a los resultados.

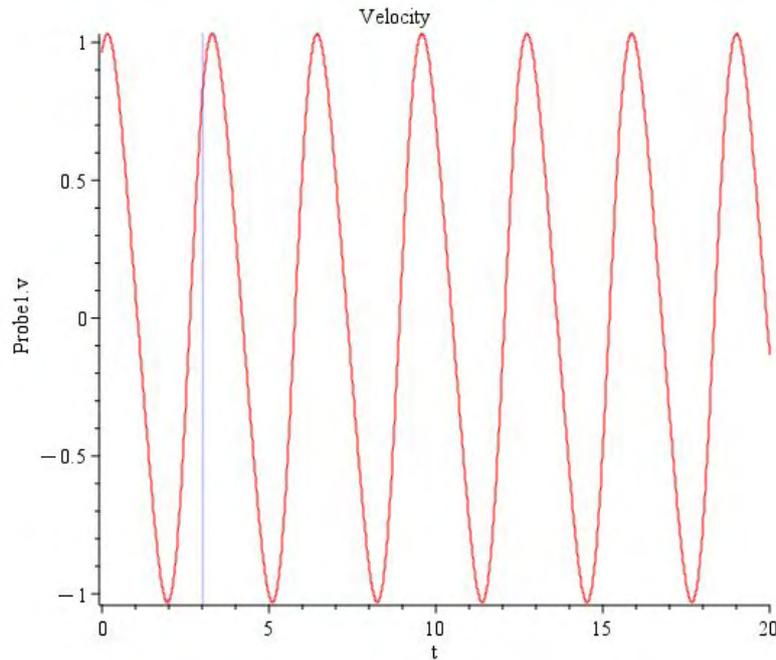
### Modelización Matemática

La modelización matemática de mecanismos para la producción industrial es un enfoque que utiliza herramientas matemáticas y computacionales para describir, analizar y simular el comportamiento de los mecanismos utilizados en los procesos de producción industrial.

En la producción industrial, los mecanismos son componentes físicos utilizados para realizar diversas tareas como el movimiento de máquinas, el transporte de materiales o la manipulación de objetos. La modelización matemática tiene como objetivo representar estos mecanismos a través de ecuaciones y relaciones matemáticas que describen su comportamiento cinemático y dinámico.



Figura 17. Gráfico de la velocidad resultante de la simulación del mecanismo en MapleSim.



Fuente: elaborado por los autores.

## Discusión

La aplicabilidad de los métodos desarrollados es una función directa del tipo de sistema dinámico que se está analizando. Cada método presenta sus ventajas y desventajas, las cuales se resumen en la siguiente tabla:

Tabla 1. Comparación entre métodos de análisis de mecanismos.

Parámetros	Gráfico	Análítico	Computacional	Modelización
Complejidad	Media	Alta	Alta	Alta
Precisión	Baja	Alta	Alta	Alta
Velocidad de Resolución	Baja	Media	Alta	Alta
Uso de Recursos	Bajo	Alto	Alto	Alto
Fundamento Matemático	Bajo	Alto	Alto	Alto
Aplicación Industrial	Baja	Alta	Alta	Alta
Innovación en Procesos	Alta	Alta	Alta	Alta

Fuente: elaborado por los autores.

El método gráfico, debido a su relativa facilidad, proporciona una visión rápida del comportamiento del sistema dinámico en términos de posición, velocidad y aceleraciones. Sin embargo, su precisión está limitada por las habilidades gráficas de la persona que realiza el estudio, y puede o no utilizar recursos computacionales. Una desventaja significativa del método gráfico es que para trazar el comportamiento del sistema en diferentes posiciones del elemento motriz (manivela), el método debe repetirse para cada nueva posición, lo que resulta en un aumento del tiempo.

El análisis de sistemas dinámicos mediante el método analítico aumenta en dificultad en comparación con el método gráfico, pero su precisión es mayor. La dificultad radica en la formulación de expresiones matemáticas o fórmulas basadas en uno o más bucles del mecanismo que interrelacionan las variables de análisis, y su solución constituye el análisis de la posición, velocidad o aceleración del sistema dinámico. Para sistemas dinámicos más complejos, el uso de procesamiento matemático y programación reduce y optimiza el tiempo de procesamiento.

El método computacional tiene más ventajas que desventajas en comparación con los dos métodos descritos anteriormente. Su aplicación requiere una base matemática sólida para formular parámetros de simulación más realistas e interpretar los análisis y resultados para validarlos.

### **Uso Actual del Método Computacional para el Análisis de Mecanismos**

Este trabajo se centró en el estudio de métodos de análisis para mecanismos planos aplicados en la industria ecuatoriana. Debido a la aplicación casi inexistente de mecanismos espaciales en los procesos de producción, que requieren un análisis más complejo, estos se convierten en un objetivo de investigación futuro. Sin embargo, en un futuro cercano, también será necesario desarrollar métodos que reduzcan el tiempo de diseño para la síntesis de mecanismos planos.

### **Conclusiones**

Mediante la combinación de métodos gráficos, analíticos y computacionales se logra un análisis más preciso y eficiente de los mecanismos planos en comparación con el uso exclusivo de métodos tradicionales manuales. En la industria, es de vital importancia contar tanto con precisión como eficiencia para lograr una mejora en la productividad. Aunque el método gráfico proporciona una visión general rápida y sencilla del comportamiento del sistema, tiene sus limitaciones en términos de precisión y requiere repetirlo para diferentes posiciones, lo que hace que lleve más tiempo analizarlo.

Pese a que el método analítico es más complicado, ofrece una mayor precisión al momento de analizar mecanismos dinámicos. Al utilizar programas de procesamiento matemático como Matlab, se logra mejorar el tiempo de análisis y resolver ecuaciones complejas que describen tanto la cinemática como la dinámica del sistema.

El uso de software especializado como ANSYS y MapleSim en el método computacional brinda un entorno intuitivo y visual que simplifica la simulación y optimización de sistemas físicos. Aunque se necesita una base matemática sólida y conocimientos de métodos numéricos, estos programas son capaces de ofrecer resultados precisos y confiables en poco tiempo, lo cual resulta ventajoso para la optimización de procesos industriales.

## Referencias

- Cross, N. (2001). *Engineering design methods*. Wiley.
- Erdman, A. G., & Sandor, G. N. (1991). *Mechanism design: analysis and synthesis*. Prentice-Hall.
- Gallardo-Alvarado, J., & Gallardo-Razo, J. (2022). *Mechanisms: Kinematic Analysis And Applications In Robotics*. Academic press.
- Joldasbekov, S., Ibraev, S., Zhauyt, A., Nurmagambetova, A., & Imanbaeva, N. (2014) *Modular Synthesis of Plane Lever Six-Link Mechanism Of High Class*. *Middle-East Journal Of Scientific Research*, 21(12), 2339-2345.
- Kuang-Hua, C. (2015). *E-design*. Academic Press.
- Laliberté, T., Gosselin, Cm., & Côté, G. (2000). *Rapid Prototyping Of Lower-Pair, Geared-Pair And Cam Mechanisms*. Proceedings Of The ASME 2000 International Design Engineering Technical Conferences And Computers And Information In Engineering Conference. <https://doi.org/10.1115/detc2000/mech-14202>
- Norton, R. L. (2012). *Design of machinery: An introduction to the synthesis and analysis of mechanisms and machines*. McGraw-Hill.
- Rai, A. K., Saxena, A., & Mankame, N. D. (2010) Unified Synthesis Of Compact Planar Path-Generating Linkages With Rigid And Deformable Members. *Struct Multidisc OPTIM*, 41, 863–879.
- Reuleaux, F. (1876). *The Kinematics of Machinery*. Macmillan.
- Shigley, J. E., & Uicker, J. J. (2011). *Theory of Machines and Mechanisms*. Oxford University Press.
- Tsai, L. W. (2001). *Mechanism design: enumeration of kinematic structures according to function*. CRC Press.
- Waldron, K. J., & Kinzel, G. L. (1999). *Kinematics, dynamics, and design of machinery*. Wiley.
- Waldron, K. J., Kinzel, G. L., & Agrawal, S. K. (2016). *Kinematics, Dynamics, And Design Of Machinery*. John Wiley & Sons.
- Waldron, K., & Schmiedeler, J. (2008). *Kinematics*. In: B. Siciliano, & O. Khatib, (eds), *Handbook Of Robotics*. Springer. [https://doi.org/10.1007/978-3-540-30301-5\\_2](https://doi.org/10.1007/978-3-540-30301-5_2)
- Yan, H.-S. (1998). *Creative Design Of Mechanical Devices*. Springer Science & Business Media.

## **Autores**

**Ernesto Ramiro Santillán Mariño.** Magister en Diseño, Producción y Automatización Industrial. M.Sc. Escuela Politécnica Nacional. 2016. Máster en Dirección de Empresas Mención Proyectos. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. Profesor, 2004. Consultor Individual en proyectos de Inversión y Desarrollo. Profesor impartiendo asignaturas en áreas de: Diseño y Mecánica Computacional, Mecatrónica, Materiales. Mecánica de Sólidos. Energía y Termofluidos Sept. 2010 a la fecha.

**Félix Javier Manjarrés Arias.** Investigador y profesional multidisciplinario con sólida formación en ingeniería y amplia experiencia en tecnología aeronáutica, ingeniería automotriz e industrial. Posee másteres en gestión de empresas y en diseño, producción y automatización industrial. Ha dirigido más de 100 proyectos de investigación en estructuras, máquinas, materiales y robótica. En su carrera profesional, ha sido Gerente Regional Técnico Comercial en REPSOL YPF, aplicando su experiencia en ingeniería industrial y mecánica. Como docente en el Instituto Tecnológico Superior Aeronáutico de la Fuerza Aérea del Ecuador y en la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, imparte conocimientos en diseño, mecánica computacional, energía y mecatrónica, inspirando a futuras generaciones. Además, colabora como consultor en ingeniería industrial y mecánica, optimizando procesos y mejorando la eficiencia operativa de diversas organizaciones.

**Hernán Vinicio Morales Villegas.** Maestría en Gestión de Energías Renovables. Universidad Técnica de Cotopaxi., Maestría en Formulación de proyectos. Universidad Nacional de Chimborazo., Diplomado en Gestión de la educación superior. Espe., Docente Titular. Espe., Conductor y capacitador Profesional tipo E. HFMC. Capacitador en el CNECH.

## **Declaración**

### **Conflicto de interés**

No tenemos ningún conflicto de interés que declarar.

### **Financiamiento**

Sin ayuda financiera de partes ajenas a este artículo.

### **Notas**

El artículo es original y no ha sido publicado previamente.