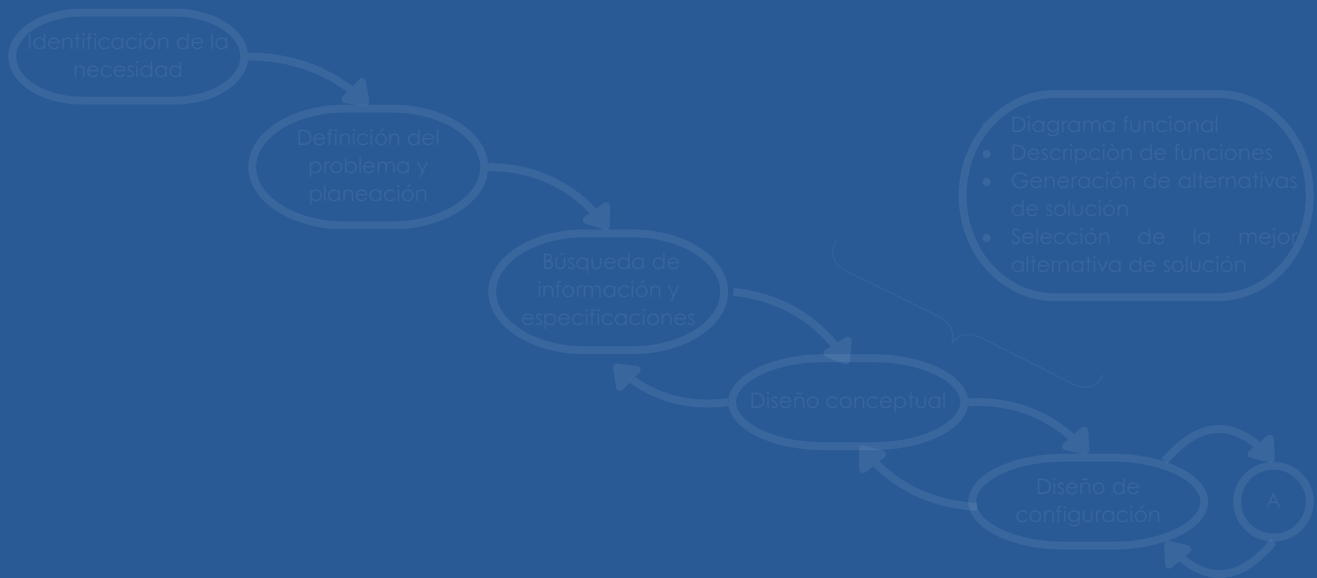


Dr. Leopoldo Adrián González González  
Ing. Diana Paula Vázquez Lezama



# Fundamentos de la Ingeniería Mecánica y Mecatrónica



# **Fundamentos de la Ingeniería Mecánica y Mecatrónica**

# Fundamentos de la Ingeniería Mecánica y Mecatrónica

Dr. Leopoldo Adrián González González  
Ing. Diana Paula Vázquez Lezama



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO  
México, 2025

Índice.....	i
Prólogo.....	v
<b>1. Introducción: una mirada histórica.....</b>	<b>1</b>
<b>2. Fundamentos de matemáticas aplicadas.....</b>	<b>9</b>
2.1 Introducción a las matemáticas en la ingeniería.....	11
2.2 Álgebra lineal aplicada.....	12
2.3 Cálculo diferencial e integral.....	17
2.4 Introducción a ecuaciones diferenciales.....	21
Amplía tus conocimientos.....	24
<b>3. Termodinámica.....</b>	<b>27</b>
3.1 Conceptos básicos de termodinámica.....	29
3.2 Energía y transferencia de calor.....	32
3.3 Propiedades de las sustancias puras.....	38
3.4 Aplicaciones de la termodinámica en la ingeniería.....	44
Amplía tus conocimientos.....	49
<b>4. Materiales en ingeniería.....</b>	<b>51</b>
4.1 Conceptos fundamentales de los materiales.....	53
4.2 Comportamiento mecánico de los materiales.....	59
4.3 Selección de materiales en ingeniería.....	63
4.4 Análisis de fallas en materiales.....	69
4.5 Innovación en materiales de ingeniería.....	72
Amplía tus conocimientos.....	74
<b>5. Fundamentos de electrónica.....</b>	<b>77</b>
5.1 Circuitos eléctricos.....	79
5.2 Semiconductores.....	83
5.3 Electrónica de potencia.....	89
Amplía tus conocimientos.....	94

<b>6. Mecánica de sólidos.....</b>	<b>97</b>
6.1 ¿Qué es la mecánica de sólidos?.....	99
6.2 Conceptos fundamentales.....	99
6.3 Análisis de estructuras simples.....	104
Amplía tus conocimientos.....	112
<b>7 Dinámica de mecanismos.....</b>	<b>115</b>
7.1 ¿Qué es la dinámica en sistemas mecánicos?.....	117
7.2 Cinemática y dinámica: comprendiendo el movimiento.....	119
7.3 Vibraciones en sistemas mecánicos.....	125
7.4 Elementos de máquinas.....	131
Amplía tus conocimientos.....	141
<b>8 Control y automatización.....</b>	<b>145</b>
8.1 El mundo automatizado que nos rodea.....	147
8.2 Automatización: fundamentos y alcances.....	148
8.3 Sistemas de control: ¿cómo se enseña a una máquina a tomar decisiones?.....	157
8.4 Aplicaciones ahora y en el futuro.....	162
Amplía tus conocimientos.....	167
<b>9 Diseño y manufactura.....</b>	<b>171</b>
9.1 Paradigmas del diseño y la crisis contemporánea del diseño.....	173
9.2 Metodologías de diseño en ingeniería.....	178
9.3 Metodología en ingeniería de diseño.....	180
9.4 Diseño para X.....	181
Amplía tus conocimientos.....	202
<b>10 Mecatrónica y robótica.....</b>	<b>205</b>
10.1 Mecatrónica: definición y breve historia.....	207
10.2 Los cuatro pilares de la mecatrónica.....	211
10.3 Robótica: el corazón de la ingeniería mecatrónica.....	215
Amplía tus conocimientos.....	224

<b>11 Energía y sustentabilidad.....</b>	<b>227</b>
11.1 Fuentes de energía en ingeniería: convencionales y renovables.....	<b>229</b>
11.2 Eficiencia energética y optimización de sistemas.....	<b>231</b>
11.3 Diseño sustentable y análisis de impacto ambiental.....	<b>233</b>
11.4 Tecnologías limpias aplicadas a la ingeniería.....	<b>238</b>
11.5 Los Objetivos de Desarrollo Sostenible y su relevancia en la ingeniería mexicana.....	<b>241</b>
Amplía tus conocimientos.....	<b>243</b>



# Prólogo

El presente texto tiene la finalidad de mostrar cómo la INGENIERÍA se puede estudiar como un área aplicada, interdisciplinaria, multidisciplinaria y orientada a resolver problemas reales. Al inicio del libro se sitúa al lector en una mirada histórica y social de la disciplina, mostrando por qué la formación técnica ha evolucionado y cómo México y el mundo han construido instituciones y prácticas, siendo la columna vertebral para los temas técnicos presentados y para la visión profesional que se busca transmitir.

Para que el lector pueda abordar problemas con rigor, el capítulo dos consolida algunas herramientas matemáticas necesarias: álgebra lineal, cálculo diferencial e integral y ecuaciones diferenciales, siempre desde aplicaciones concretas en ingeniería mecánica y mecatrónica. Este capítulo actúa como guía para todo el resto del libro y proporciona las bases para modelar, analizar y optimizar sistemas mecánico-mecatrónicos.

El capítulo tres muestra la termodinámica desde sus principios hasta sus aplicaciones prácticas (motores, ciclos de refrigeración, generación de energía). Más allá de fórmulas, enfatiza la interpretación física —energía, trabajo, entropía— y muestra ejemplos que permiten pasar del concepto a la valoración crítica de la eficiencia en sistemas reales. Esto es esencial para cualquier ingeniero que diseñe o evalúe sistemas térmicos.

Los materiales son uno de los elementos que conectan el diseño conceptual con el diseño de detalle y la funcionalidad y desempeño: el capítulo cuatro presenta clasificación, propiedades y criterios de selección para materiales metálicos, poliméricos y compuestos, y vincula esas propiedades con criterios de durabilidad, manufacturabilidad y sostenibilidad. Conocer las limitaciones y potencialidades de los materiales evita fallas en la etapa de diseño y favorece decisiones más eficientes.

La electrónica (capítulo cinco) presenta las bases para el sensado, adquisición y control de variables físicas: desde circuitos pasivos y semiconductores hasta electrónica de potencia. Este capítulo permite entender cómo convertir señales físicas en información útil y cómo alimentar y proteger los sistemas que integran la sensorica y actuadores. Es el puente entre lo físico y lo lógico en sistemas mecánico-mecatrónicos.

La mecánica de sólidos (capítulo seis) y la dinámica de mecanismos (capítulo siete) forman el bloque dedicado a la resistencia mecánica y movimiento. El primero analiza esfuerzos, deformaciones y modos de falla; el segundo estudia cinemática, dinámica y análisis de mecanismos reales. Juntos permiten diseñar componentes resistentes y sistemas móviles que cumplen con necesidades específicas.



Control y automatización (capítulo ocho) introduce principios de retroalimentación, regulación y algoritmos prácticos (incluyendo el controlador PID) y hace énfasis en la implementación segura y robusta. Este capítulo es clave para pasar de modelos a prototipos funcionales y operativos: explica cómo garantizar estabilidad y precisión en la interacción máquina-entorno.

Diseño y manufactura (capítulo nueve) articula metodologías, criterios de manufactura y análisis del ciclo de vida. Presenta paradigmas de diseño, manufacturabilidad y optimización para que las soluciones no sean solo funcionales, sino también económicas, reproducibles y sostenibles. Aquí se cierra el ciclo entre idea y prototipo funcional operativo.

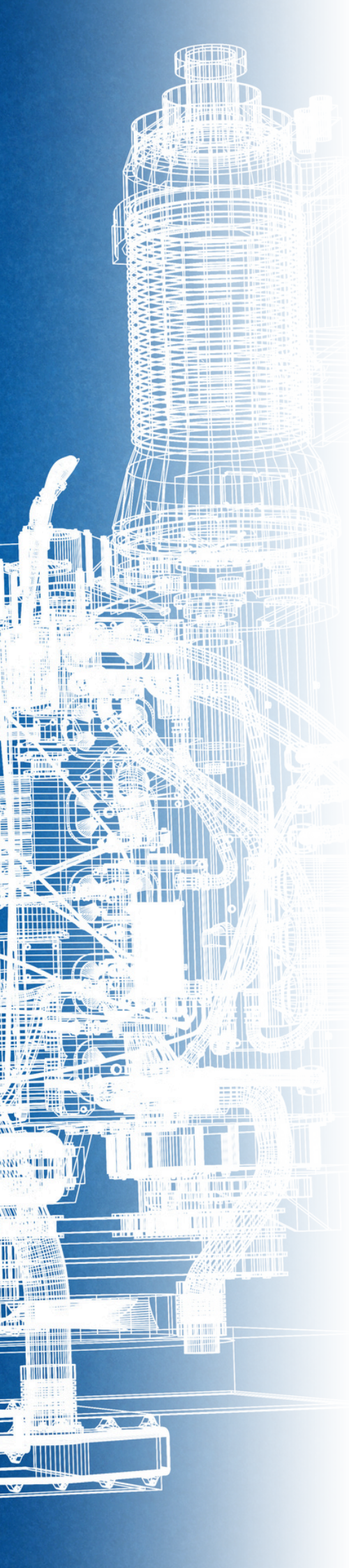
La mecatrónica (capítulo diez) integra los bloques previos en sistemas complejos: sensores, actuadores, electrónica embebida y control se combinan en ejemplos aplicados (por ejemplo, impresoras de manufactura aditiva). Este capítulo muestra cómo diseñar sistemas multidisciplinarios coherentes, y por qué una visión integrada y multidisciplinaria es indispensable en la ingeniería moderna.

Finalmente, energía y sustentabilidad (capítulo once) sitúa la práctica ingenieril en los objetivos globales: eficiencia energética, fuentes renovables, análisis de impactos y los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) del Plan de Desarrollo 2030 de la ONU. También el libro ofrece criterios para evaluar tecnologías desde su aporte al desarrollo sostenible, alentando soluciones responsables y de largo plazo.

Seguir la secuencia propuesta facilita el aprendizaje; sin embargo, los capítulos están presentados también para consultas puntuales.

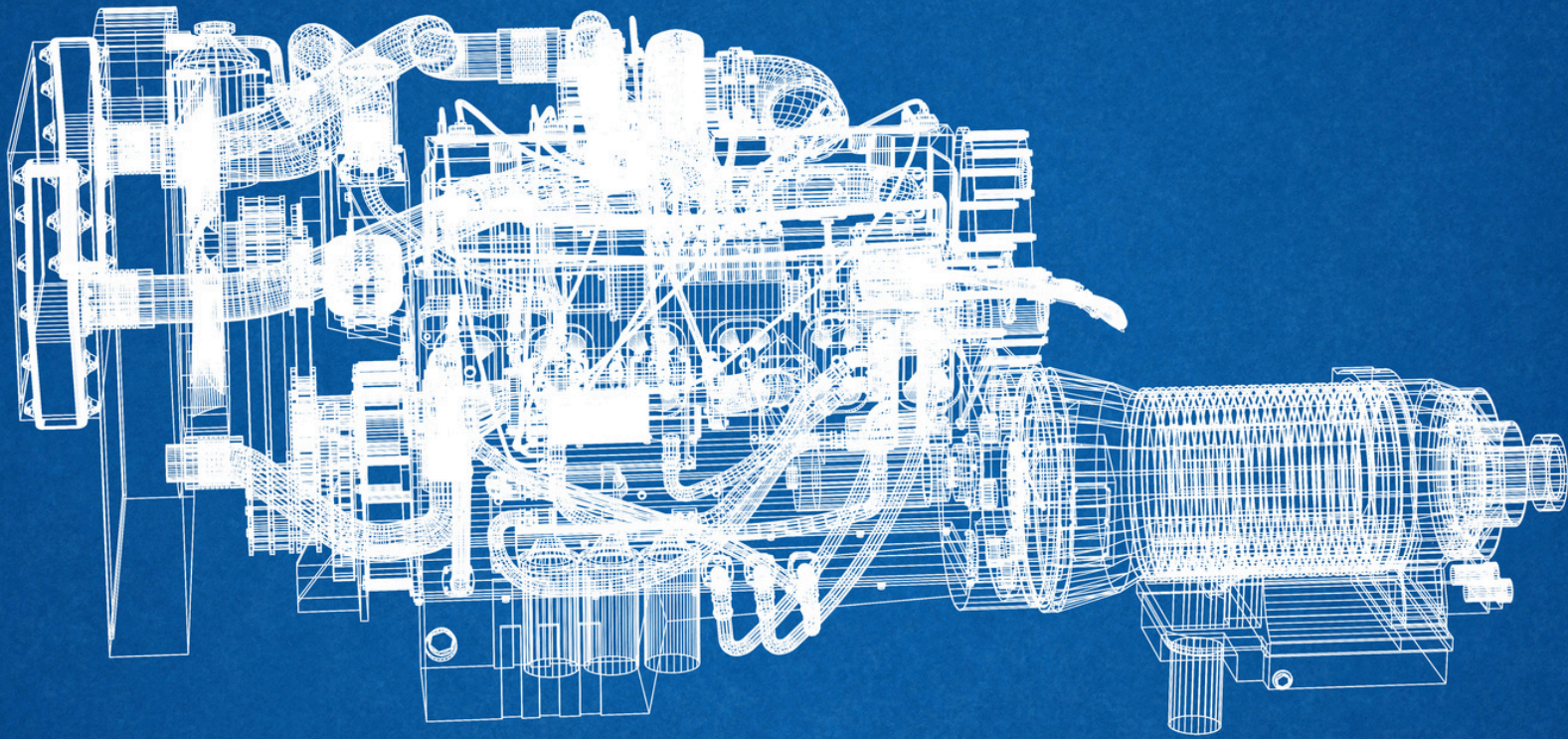
Aprovechar los casos de estudio y proyectos incluidos en los apartados, ayuda a fijar los conceptos, motivar el pensamiento crítico y de diseño en ingeniería.

Por último, es de suma importancia indicar que al final de cada uno de los capítulos del libro, se presenta una recomendación en cuanto a una lista de libros, páginas web y videos con el objeto de que los futuros ingenieros puedan ampliar sus conocimientos.



Capítulo 1

# Introducción: una mirada histórica



La ingeniería, entendida como la aplicación del conocimiento científico y técnico para resolver problemas prácticos, ha sido un motor clave del progreso humano. Desde los primeros dispositivos simples usados en las civilizaciones antiguas hasta los sistemas complejos actuales que integran inteligencia artificial, automatización y energías limpias, la ingeniería ha transformado radicalmente la manera en que vivimos, producimos y nos relacionamos con el entorno.

A continuación, a través de una línea del tiempo se destacan eventos relevantes a nivel global, así como momentos clave en la historia de México que han influido en la formación de ingenieros y en la aplicación de tecnologías en la industria nacional. Con ello, se busca no solo contextualizar los conocimientos que se abordarán en este libro, sino también mostrar la profunda conexión entre las ingenierías y el desarrollo económico, social y ambiental del país.

## PRIMEROS INGENIOS

Las civilizaciones antiguas desarrollan mecanismos simples (rueda, palanca y poleas), esenciales para la construcción de estructuras y el transporte.

3000  
A. C.



## ANTIGUA GRECIA

Arquímedes formula principios de la mecánica y diseña máquinas simples.



287  
A. C.

## RENACIMIENTO

Leonardo da Vinci diseña prototipos de mecanismos complejos: engranajes, poleas y máquinas voladoras.

S. XV



## 1ª REVOLUCIÓN INDUSTRIAL

La invención de la máquina de vapor impulsa la manufactura mecánica y consolida la ingeniería mecánica como profesión.



1760-1840

## PRIMERA ESCUELA DE INGENIERÍA

Se funda el Instituto Politécnico Nacional de Francia, École Polytechnique, con carreras de ingeniería mecánica. Por primera vez se sistematiza la enseñanza de la ingeniería.

1794



## CREACIÓN DEL IPN EN MÉXICO

Se inaugura el Instituto Politécnico Nacional (IPN) en México, con carreras como ingeniería mecánica y el objetivo de industrializar al país.



1936

## INICIOS DE CONTROL

Comienza la automatización industrial con los primeros controladores lógicos y el desarrollo de la teoría de control.

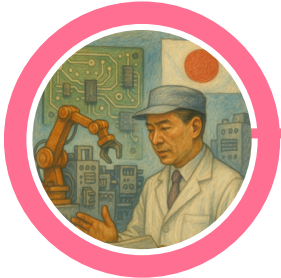
1950s



## INICIO DE LA MECATRÓNICA

En Japón nace el término "mecatrónica", acuñado por ingenieros de Yaskawa Electric, que integra mecánica, electrónica y sistemas de control.

1969



## ROBÓTICA EN LA INDUSTRIA

Se introducen robots industriales en las cadenas de producción automotrices. La ingeniería mecatrónica comienza a tomar forma como disciplina.

1970s



## MECATRÓNICA

En países como Alemania y Japón surgen programas de licenciatura en mecatrónica.

1980-1990



## MÉXICO IMPULSA LA INGENIERÍA

México firma el Tratado de Libre Comercio de América del Norte (TLCAN), lo que impulsa la modernización de la industria y la demanda de ingenieros capacitados en automatización.

1992



## INTELIGENCIA ARTIFICIAL

Se intensifica el uso de inteligencia artificial y sensores avanzados. La mecatrónica se vincula cada vez más con la robótica y la Industria 4.0.

2010s



## EN LA UNAM

Universidades mexicanas como la UNAM abren nuevas carreras de ingeniería, acordes con las demandas actuales.

2015



2020



## MÉXICO Y LOS ODS

La ingeniería en México se vincula a los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), de la ONU, destacando la importancia del diseño eficiente, energías limpias y automatización sustentable.

La ingeniería no surge de manera aislada, sino en respuesta a necesidades sociales, económicas y tecnológicas concretas. En especial, en la línea temporal mostrada se observa cómo México ha participado activamente en esta evolución, construyendo instituciones educativas, impulsando la industria y formando profesionales capaces de enfrentar los retos del desarrollo.

El propósito de este libro es acompañar al lector en una travesía por los fundamentos más importantes de la ingeniería mecánica y mecatrónica. A través de capítulos enfocados en áreas clave como la termodinámica, los materiales, la electrónica, la mecánica de sólidos, el diseño, el control y la robótica, se presentan explicaciones claras, ejemplos reales y actividades prácticas que permitirán al estudiante visualizar cómo se aplican estos conocimientos en el mundo profesional.

Cada sección busca no solo enseñar aspectos teóricos, sino también despertar la curiosidad y la motivación por aprender por medio de la resolución de problemas reales.

Se pretende que este libro sea una herramienta útil tanto para quienes están considerando estudiar ingeniería, como para estudiantes de primeros semestres que desean conectar lo aprendido en clase con su utilidad en la vida práctica. Al terminar esta lectura, se espera que el lector no solo comprenda los conceptos básicos de cada área, sino que también sea capaz de reconocer su valor dentro del diseño, la innovación y la solución de problemas del entorno actual.

### Artículos

- Acar, M. (1997). Mechatronics challenge for the higher education world. *IEEE Transactions on Components, Packaging, and Manufacturing Technology: Part C*, 20(1), 14–20. <https://doi.org/10.1109/3476.585140>
- Anderson, B. G. (2020). The Cybernetics Thought Collective: Machine-Generated Data Using Computational Methods. *Journal of Open Humanities Data*, 6(1), 7. <https://openhumanitiesdata.metajnl.com/articles/10.5334/johd.19>
- Ceccarelli, M. (2014). Contributions of Archimedes on mechanics and design of mechanisms. *Mechanism and Machine Theory*, 72, 86–93. <https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2013.10.005>
- Cerveró-Meliá, E., Capuz-Rizo, S. F. y Ferrer-Gisbert, P. (2020). Leonardo da Vinci's Contributions from a Design Perspective. *Designs*, 4(3), 38. <https://doi.org/10.3390/designs4030038>
- Hazaveh, P., Sergeyeve, A. y Rawashdeh, N. (2022). Mechatronics bachelor curriculum development in light of Industry 4.0 technology needs: Contrasting United States and German university curricula. En *Proceedings of the American Society for Engineering Education (ASEE) Conference for Industry and Education Collaboration (CIEC 2022)*. American Society for Engineering Education. <https://digitalcommons.mtu.edu/michigantech-p/16518>
- Jiménez Mejía, J. F. (2019). Leonardo da Vinci y la ingeniería. *Revista de Extensión Cultural*, 65, 46–62. [https://medellin.unal.edu.co/revista-extension-cultural/images/revista/rec65/Rec\\_65-58-74.pdf](https://medellin.unal.edu.co/revista-extension-cultural/images/revista/rec65/Rec_65-58-74.pdf)
- Prieto, J. J., Fortes, J. C., Salguero, F., González-Palma, R. y Esquivel, R. (2011). Ingeniería mecánica en el siglo quince y su contribución al descubrimiento de América. *DYNA*, 86(3), 270–272. <https://www.revistadyna.com/Documentos/pdfs/201103jun/4191DYNAINDEX.pdf>
- Ruiz Nápoles, P. (2019). El TLCAN y el desarrollo de la ciencia y la tecnología en México. *Ciencia*, 70(4), 24–31. [https://www.revistaciencia.amc.edu.mx/images/revista/70\\_4/PDF/L\\_06\\_70\\_4\\_1165\\_TLCAN.pdf](https://www.revistaciencia.amc.edu.mx/images/revista/70_4/PDF/L_06_70_4_1165_TLCAN.pdf)
- Ryalat, M., Franco, E., Elmoaqet, H., Almtireen, N. y Al-Refai, G. (2024). The Integration of Advanced Mechatronic Systems into Industry 4.0 for Smart Manufacturing. *Sustainability*, 16(19), 8504. <https://doi.org/10.3390/su16198504>
- Sharma, R. y Dhiman, B. (2021). Mechatronics around the world – at a glance. *Journal of Mechatronics and Robotics*, 5, 1–7. <https://doi.org/10.3844/jmrsp.2021.1.7>



## Recursos en línea

🌐 American Society of Civil Engineers. (s. f.). *École nationale des ponts et chaussées*. <https://www.asce.org/about-civil-engineering/history-and-heritage/historic-landmarks/ecole-nationale-des-ponts-et-chaussees>

🌐 Centro de Investigación en Materiales Avanzados S.C. (s. f.). *Diagnóstico y prospectiva de la mecatrónica en México: Reporte final*. Autor. [https://www.economia.gob.mx/files/comunidad\\_negocios/industria\\_comercio/Estudios/Diagnostico\\_Prospectiva\\_Mecatronica\\_Mexico.PDF](https://www.economia.gob.mx/files/comunidad_negocios/industria_comercio/Estudios/Diagnostico_Prospectiva_Mecatronica_Mexico.PDF)

🌐 CEPAL. (2000, 14 de junio). *El Tratado de Libre Comercio de Norteamérica y el desempeño de la economía en México (LC/MEX/L.431)*. <https://www.cepal.org/es/publicaciones/25453-tratado-libre-comercio-norteamerica-desempeno-la-economia-mexico>

🌐 Encyclopedia.com (Gale). (s. f.). *Archimedes and the simple machines that moved the world*. <https://www.encyclopedia.com/science/encyclopedias-almanacs-transcripts-and-maps/archimedes-and-simple-machines-moved-world>

🌐 Instituto Tecnológico Davante. (s. f.). *La Revolución de la Mecatrónica*. <https://www.itmasterd.es/blog/mantenimiento/mecatronica-que-es>

🌐 Kelly Talent Community. (s. f.). *Ingeniería sostenible: Innovaciones y prácticas verdes*. Kelly Services México. [https://www.kellyservices.com.mx/hubfs/Ebook%20Ingeniería%20Sostenible%20Innovaciones%20y%20Prácticas%20Verdes\\_RB.pdf](https://www.kellyservices.com.mx/hubfs/Ebook%20Ingeniería%20Sostenible%20Innovaciones%20y%20Prácticas%20Verdes_RB.pdf)

🌐 Material de Libre Acceso. (s. f.). *Ingeniería mecánica*. LibroWeb. [https://libroweb.alfaomega.com.mx/book/592/free/ovas\\_statics/Carreras/IngenieriaMecanica.html](https://libroweb.alfaomega.com.mx/book/592/free/ovas_statics/Carreras/IngenieriaMecanica.html)

🌐 National Geographic España. (s. f.). *Inventos revolucionarios: Un estudio sugiere que la rueda pudo inventarse en los Cárpatos hace 6.000 años*. [https://historia.nationalgeographic.com.es/a/estudio-revela-que-rueda-pudo-inventarse-carpatos-hace-6000-anos\\_22482](https://historia.nationalgeographic.com.es/a/estudio-revela-que-rueda-pudo-inventarse-carpatos-hace-6000-anos_22482)

🌐 National Geographic España. (s. f.). *Robots de la antigüedad: Los autómatas de Herón, las maravillas mecánicas de la antigüedad*. [https://historia.nationalgeographic.com.es/a/inventos-griegos-automatas-heron\\_9395](https://historia.nationalgeographic.com.es/a/inventos-griegos-automatas-heron_9395)

🌐 Nian, J. (2024, 25 de noviembre). *The revolution of robots in the automotive industry*. Omdia. <https://omdia.tech.informa.com/blogs/2024/nov/the-revolution-of-robots-in-the-automotive-industry>

🌐 Robots.com. (s. f.). *Industrial Robot History*. <https://www.robots.com/articles/industrial-robot-history>





🌐 SEAS. (2014, 3 junio). *Antecedentes del alfabeto mecánico*. <https://www.seas.es/blog/disenomecanico/antecedentes-del-alfabeto-mecanico/>

🌐 Sossa Azuela, J. H. (s. f.). *El papel de la inteligencia artificial en la Industria 4.0*. Instituto Politécnico Nacional. [https://ru.iibi.unam.mx/jspui/bitstream/IIBI\\_UNAM/89/1/01\\_inteligencia\\_artificial\\_juan\\_sossa.pdf](https://ru.iibi.unam.mx/jspui/bitstream/IIBI_UNAM/89/1/01_inteligencia_artificial_juan_sossa.pdf)

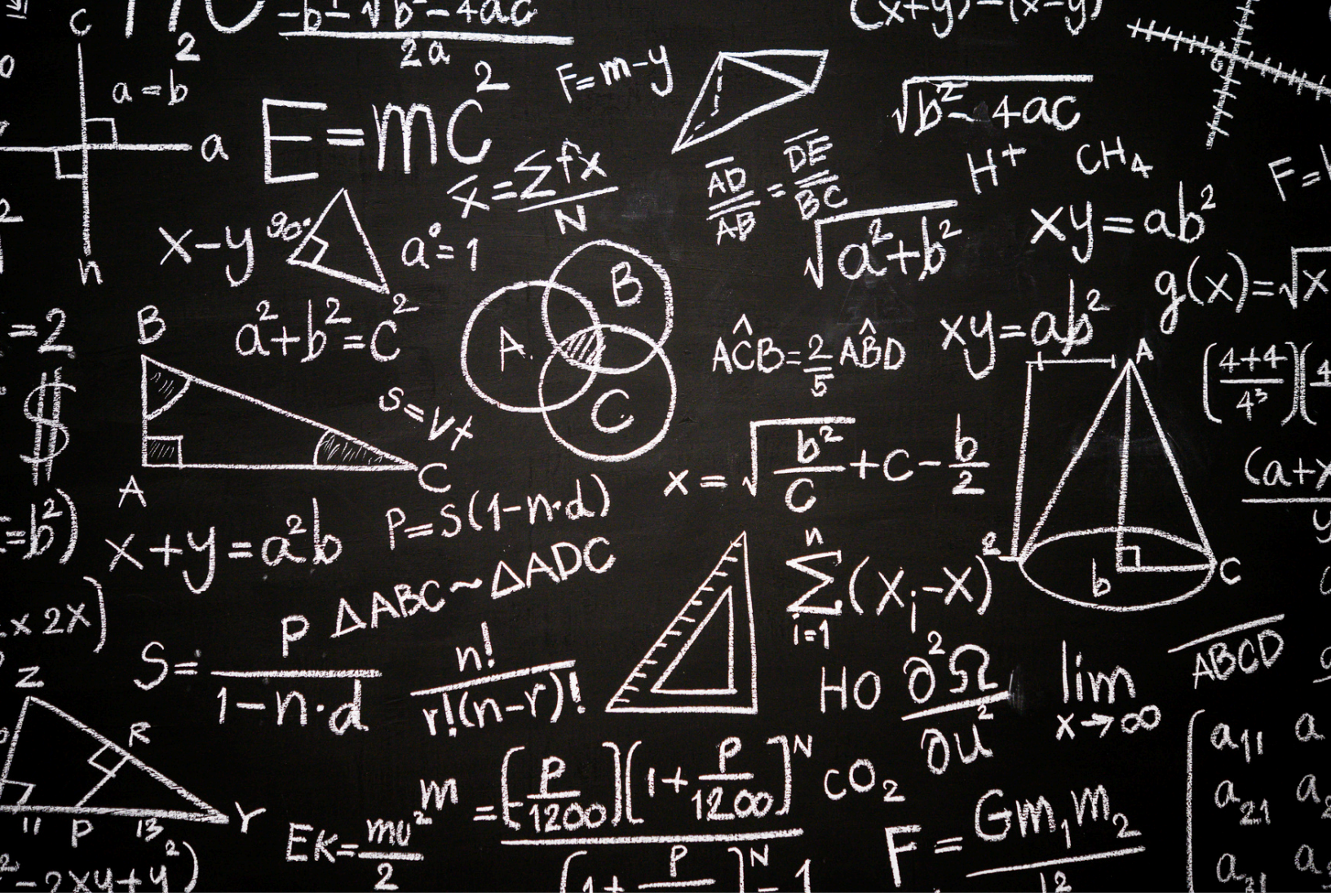
🌐 Martínez Silva, M. (s. f.). *Mecatrónica: La fusión que transformó la ingeniería y la industria*. UNINTER. <https://blogs.uninter.edu.mx/ESCAT/index.php/mecatronica/>

🌐 Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Física. (s. f.). *Arquímedes (287 a. C.–212 a. C.)*. Biblioteca IFUNAM. <https://w2.fisica.unam.mx/bif/notices/742>

🌐 Universidad Nacional Autónoma de México. (2022). *Gobernanza para la acción climática: Informe de cambio climático UNAM*. <https://www.pincc.unam.mx/wp-content/uploads/2022/02/gobernanza-cambio-climatico-unam.pdf>

Capítulo 2

# Fundamentos de matemáticas aplicadas



Las matemáticas aplicadas son la base que sustenta casi todas las disciplinas de la ingeniería. Desde el modelado del comportamiento de un sistema físico hasta la optimización del diseño de una máquina, las herramientas matemáticas permiten comprender, predecir y resolver problemas complejos de manera eficiente y precisa. Esta área combina conceptos teóricos con aplicaciones prácticas, haciendo posible la conexión entre el mundo abstracto de las ecuaciones y las soluciones tangibles en la ingeniería.

En este capítulo, se abordan los fundamentos matemáticos más relevantes para la ingeniería mecánica y mecatrónica. Se exploran temas como álgebra lineal, cálculo diferencial e integral y optimización, siempre desde una perspectiva aplicada.



## 2.1 Introducción a las matemáticas en la ingeniería

Las matemáticas son el lenguaje universal de la ingeniería. A través de fórmulas, ecuaciones y modelos, los ingenieros tienen la capacidad de describir y comprender fenómenos complejos del mundo real. Si alguna vez te has preguntado cómo un puente soporta toneladas de peso, cómo un robot sigue una trayectoria precisa o cómo se calcula la eficiencia de un motor, la respuesta está en las matemáticas.

Pero no se trata solo de números y ecuaciones. Las matemáticas en ingeniería son una herramienta práctica que conecta lo teórico con lo tangible.

¿Te imaginas a un ingeniero diseñando un edificio sin saber calcular las cargas que debe soportar? ¿O a un desarrollador de robots programando movimientos sin entender vectores y trayectorias? Las matemáticas permiten comunicar ideas de manera precisa, sin ambigüedades, lo que es crucial en el diseño y análisis de cualquier sistema.

Por dar algunos ejemplos de cómo las matemáticas son de vital importancia en la ingeniería podemos mencionar los siguientes:

### Simulación de sistemas dinámicos:

Imagina un robot que debe moverse entre varios puntos en una fábrica. Con ecuaciones diferenciales, puedes predecir cómo se comportará su motor al cambiar de posición. Esto asegura que el movimiento sea suave y eficiente, evitando errores o fallas.

### Optimización de diseños:

¿Cómo decides el diseño más eficiente para un engranaje o una estructura? Las matemáticas te permiten comparar opciones y elegir la mejor solución considerando factores como resistencia, peso y costo.

### Análisis de estructuras:

Si estás diseñando una grúa o un puente, necesitas saber cómo las fuerzas se distribuyen a través de cada componente. Utilizando álgebra y cálculo, puedes garantizar que la estructura soporte las cargas sin colapsar.

En este sentido, las matemáticas no son un fin, sino un medio. Cada ecuación que resuelvas tiene un propósito, cada gráfica que interpretes cuenta una historia y cada modelo que desarrolles refleja cómo funciona el mundo físico.



## 2.2 Álgebra lineal aplicada

Los conceptos del álgebra y del álgebra lineal son muy utilizados en la ingeniería. El concepto de vector permite modelar el movimiento de robots para que realicen la trayectoria deseada, las matrices nos permiten organizar las ecuaciones que modelan diferentes sistemas físicos, como circuitos eléctricos o mecanismos, de modo que, una vez organizadas, podamos resolver las ecuaciones y obtener voltajes y corrientes en un circuito o fuerzas y velocidades en un mecanismo.

Conocer las propiedades de los diferentes elementos algebraicos permite, en campos más avanzados, aplicarlas para resolver problemas de diseño en ingeniería.

A continuación, se abordan algunos de los conceptos más utilizados del álgebra y del álgebra lineal en la ingeniería mecánica y mecatrónica, aunque es bueno aclarar que no son los únicos conceptos matemáticos importantes en la ingeniería.

### 2.2.1 Vectores: definición y operaciones

Un **vector** se define como una lista ordenada de números reales que representan magnitudes en direcciones específicas. Formalmente, un vector en el espacio  $\mathbb{R}^n$  se escribe como:

$$\vec{v} = \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ \vdots \\ v_n \end{bmatrix}, \quad v_i \in \mathbb{R}, i = 1, 2, \dots, n$$

donde  $n$  es la dimensión del espacio.

Veremos ahora operaciones matemáticas que se pueden realizar con los vectores.

#### Suma de vectores

Dados dos vectores  $\vec{u}$  y  $\vec{v}$  su suma se define como:

$$\vec{u} + \vec{v} = \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ \vdots \\ u_n \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ \vdots \\ v_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_1 + v_1 \\ u_2 + v_2 \\ \vdots \\ u_n + v_n \end{bmatrix}$$

## Producto punto

El producto punto entre dos vectores  $\vec{u}$  y  $\vec{v}$  se define como:

$$\vec{u} \cdot \vec{v} = |\vec{u}||\vec{v}| \cos \theta$$

donde  $\theta$  es el ángulo entre vectores.

En este caso  $|\vec{u}|$  y  $|\vec{v}|$  no son determinantes, sino la magnitud de un vector, la cual se define como:

$$|\vec{u}| = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + \dots + u_n^2}$$

$$|\vec{v}| = \sqrt{v_1^2 + v_2^2 + \dots + v_n^2}$$

El uso del producto punto tiene relevancia para representar la proyección de un vector sobre otro, así como para la detección de ortogonalidad entre vectores cuando el producto es igual a cero.

## 2.2.2 Matrices: definición y operaciones

Una matriz es un arreglo rectangular de números organizados en filas y columnas. Formalmente, una matriz  $A$  de dimensión  $m \times n$  ( $m$  es el número de filas y  $n$  es el número de columnas) se define como:

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{m1} & a_{m2} & \cdots & a_{mn} \end{bmatrix}, \quad a_{ij} \in \mathbb{R}$$

donde  $a_{ij} \in \mathbb{R}$  representa el elemento en la fila  $i$  y la columna  $j$ .

## Suma de matrices

Dos matrices de la misma dimensión  $m \times n$  pueden sumarse elemento por elemento:

$$A + B = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} \\ b_{21} & b_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} + b_{11} & a_{12} + b_{12} \\ a_{21} + b_{21} & a_{22} + b_{22} \end{bmatrix}$$

## Multiplicación por un escalar

Cada elemento de la matriz se multiplica por un número real  $c$  :

$$cA = \begin{bmatrix} c \cdot a_{11} & \cdots & c \cdot a_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ c \cdot a_{m1} & \cdots & c \cdot a_{mn} \end{bmatrix}$$



Conoce más.

En este video de Matemáticas profe Alex (2019), se muestra de forma detallada el proceso para multiplicar matrices.

## Multiplicación de matrices

Supongamos que tenemos dos matrices:

1.  $A$  de dimensiones  $m \times n$ .
2.  $B$  de dimensiones  $n \times p$ .

Dos matrices solo se pueden multiplicar si el número de columnas de la primera es igual al número de filas de la segunda.

El producto  $C = AB$  será una nueva matriz  $C$ , con dimensiones  $m \times p$ . Es decir, el número de filas de  $C$  es igual al número de filas de  $A$  y el número de columnas de  $C$  es igual al número de columnas de  $B$ .

## Determinante de una matriz

El determinante es un número asociado a una matriz cuadrada (es decir, con igual número de filas y columnas) que proporciona información clave sobre las propiedades de la matriz. Se denota comúnmente como  $\det(A)$  o  $|A|$ , donde  $A$  es la matriz.

Para una matriz  $A$  de dimensiones  $2 \times 2$  (con dos filas y dos columnas), su determinante se calcula como:

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix}$$

$$|A| = a_{11}a_{22} - a_{12}a_{21}$$



Conoce más.

En este video de Ingeniosos (2023), se explica de forma muy básica en qué consiste el FEM y su importancia en el diseño en ingeniería.

Las operaciones que se muestran aquí se utilizan de forma continua en diferentes ramas de la ingeniería; por ejemplo, muchos sistemas físicos se modelan con sistemas de ecuaciones y, para resolverlos, se usan métodos matriciales.

De hecho, una herramienta muy utilizada en diseño mecánico es el análisis por el **método de elementos finitos (FEM)**, que permite predecir si una pieza mecánica se romperá o deformará al someterla a fuerzas.

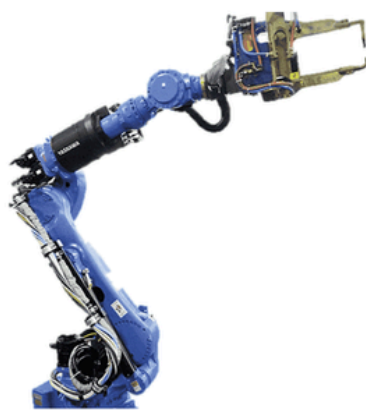
Aunque el FEM suele hacerse por computadora, la comprensión y el conocimiento de qué son las matrices y qué representan es esencial para que la simulación entregue resultados correctos.

## Caso de estudio

### Uso de matrices y vectores para determinar la posición del efector final de un robot serial:

- En la industria, la automatización de procesos está muy presente, aunque los robots no son la única forma de automatizar un proceso, sí son muy utilizados en las líneas de ensamblaje. Los robots, aunque de varios tipos, pueden clasificarse en dos grandes grupos: seriales o paralelos. Los robots seriales son los más utilizados a nivel industrial. Veremos cómo el álgebra y el álgebra lineal son indispensables en su diseño.

Un robot serial se muestra en la figura 2.1. La herramienta de trabajo del robot se conoce como efector final; este varía según la tarea que va a desempeñar el robot, puede ser una pinza si la tarea es de sujeción o una antorcha de soldadura, por ejemplo. Para que el robot realice la tarea, como soldar la puerta de un auto, se programa una trayectoria a través de la computadora del robot, pero ¿cómo sabe la computadora cómo mover los motores del robot para que realice dicha trayectoria? Aquí es donde entra en juego el álgebra lineal.



Soldadura por puntos



Soldadura por arco



Soldadura láser

Figura 2.1 Robots seriales con diferentes efectores finales para soldadura



### Detalles del caso

Se pretende realizar un modelo matemático que permita conocer la posición del robot serial de la figura 2.2 respecto al sistema de referencia  $\{A\}$  (indicado en color negro). El movimiento que puede hacer el robot es girar sobre su propio eje. La longitud de cada una de las partes del robot está indicada con las letras  $a_2$  y  $a_1$ . Son magnitudes, no vectores.

### Aplicación de conocimientos

Modelar significa aproximar el comportamiento de un sistema físico a través de las matemáticas. En este caso, queremos modelar la posición del robot de la figura 2.2 respecto al sistema coordenado  $\{A\}$ .

Lo primero que haremos es colocar otro sistema de referencia en el efector final del robot, lo llamaremos  $\{B\}$ . Observa que la dirección de los ejes  $x$ ,  $y$  y  $z$  de ambos sistemas, por el momento, está en la misma dirección que el sistema  $\{A\}$ .

Para que la computadora conozca la altura del robot podemos definirla como un vector que llamaremos  $\vec{p}$ , será un vector que inicia en el origen de  $\{A\}$  y llega al origen de  $\{B\}$ . El vector  $\vec{p}$ , entonces, se definiría como:

$$\vec{p} = \begin{bmatrix} p_x \\ p_y \\ p_z \end{bmatrix}$$

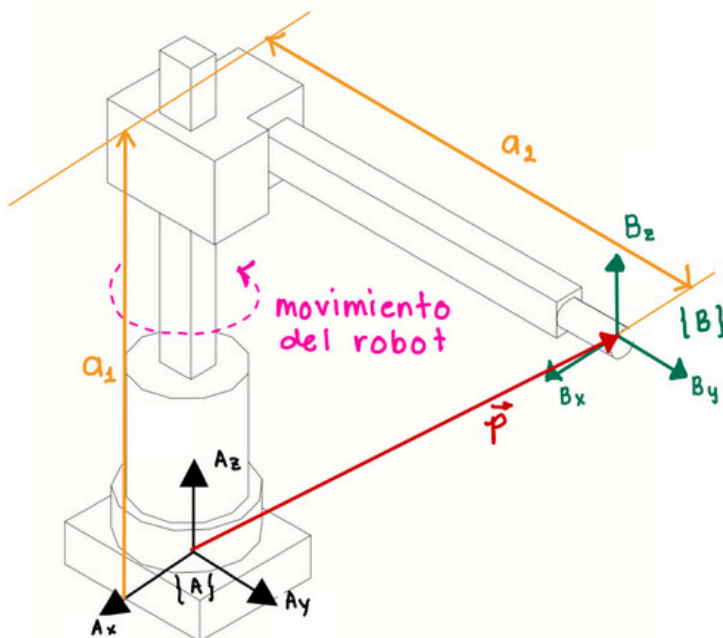


Figura 2.2 Robot serial con capacidad de giro en eje  $A_z$

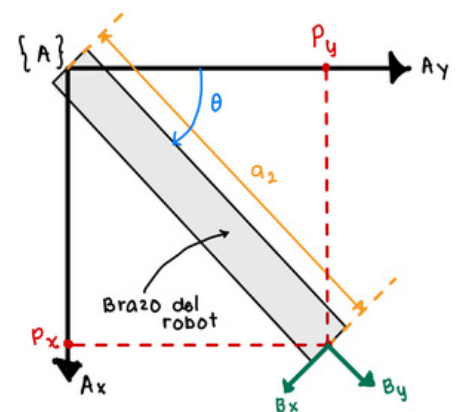


Figura 2.3 Vista superior del robot mostrado en la figura 2.2

Nótese que en la posición mostrada en la figura 2.2, el vector  $\vec{p}$  tendría los siguientes valores respecto a los ejes del sistema  $\{A\}$ :

$$\vec{p} = \begin{bmatrix} 0 \\ a_2 \\ a_1 \end{bmatrix}$$

Sin embargo, si la computadora mueve el motor para girar el robot, los valores del vector  $\vec{p}$  cambian; pueden aumentar o disminuir, a excepción de  $p_z$ , ya que la altura permanece constante. Entonces,  $p_x$  y  $p_y$  estarán variando. Cuando la computadora gire el motor, ¿cómo podrá saber dónde quedó el robot?

Para resolver esto, usaremos la vista superior del robot ilustrado en la figura 2.3. En este caso, el robot se ha movido de la posición original de la figura 2.2. Sus valores  $p_x$  y  $p_y$  pueden obtenerse usando proyecciones sobre los ejes de  $\{A\}$ :

$$p_x = a_2 \text{ sen } \theta$$

$$p_y = a_2 \text{ cos } \theta$$

Recordemos que  $a_2$  es un valor constante; entonces, con estas ecuaciones, la computadora sabrá las nuevas coordenadas  $p_x$  y  $p_y$  dependiendo de qué valor del ángulo  $\theta$  produzca con el giro del motor.

### Observaciones

El proceso que acabamos de realizar, donde describimos las ecuaciones de posición del efector final del robot en términos de sus ángulos, se conoce como cinemática directa. Sin embargo, el proceso usual es hacer lo inverso: con base en la posición que queremos encontrar del efector, se determina el ángulo de giro del motor; a esto se le conoce como cinemática inversa.



El cálculo diferencial e integral constituye una herramienta muy poderosa en la ingeniería. Su capacidad para modelar cambios, acumular cantidades y analizar sistemas dinámicos lo hace indispensable en mecánica, mecatrónica y otras disciplinas. En esta sección, se explora cómo las derivadas e integrales permiten resolver problemas relacionados con la velocidad, la aceleración, el trabajo y la dinámica de sistemas mecánicos. Además, se introducen las ecuaciones diferenciales, esenciales para modelar sistemas que cambian con el tiempo.

### 2.3.1 Derivadas y sus aplicaciones

La derivada de una función  $f(x)$  se define como el límite de la razón de cambio promedio de  $f(x)$  en un intervalo  $\Delta x$ , cuando este intervalo tiende a cero:

$$f'(x) = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{f(x + \Delta x) - f(x)}{\Delta x}$$

Esta definición proporciona la tasa de cambio instantánea de la función  $f(x)$  en el punto  $x$ . En ingeniería, esta tasa de cambio es crucial para calcular velocidades, aceleraciones y fuerzas.

#### Derivadas en problemas de velocidad y aceleración

En mecánica, la posición de un objeto en función del tiempo se describe mediante una función  $x(t)$ . Su derivada respecto del tiempo ( $t$ ) da la velocidad instantánea:

$$v(t) = \frac{dx}{dt}$$

La segunda derivada de la posición, conocida como la aceleración, se define como:

$$a(t) = \frac{d^2x}{dt^2}$$

#### Ejemplo práctico: análisis de trayectorias en sistemas mecánicos

Supongamos que la posición de un objeto en un sistema mecánico está dada por:

$$x(t) = 5t^2 - 2t + 1$$

Derivamos para obtener la velocidad:

$$v(t) = \frac{dx}{dt} = 10t - 2$$

Derivamos nuevamente para calcular la aceleración:

$$a(t) = \frac{d^2x}{dt^2} = 10$$

Con estas funciones podemos conocer la posición, velocidad y aceleración para cualquier instante de tiempo.

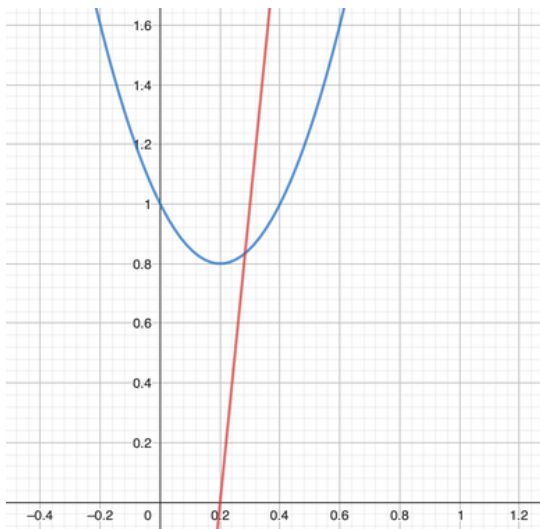


Figura 2.4 Gráfica de funciones de posición (azul) y velocidad (rojo)

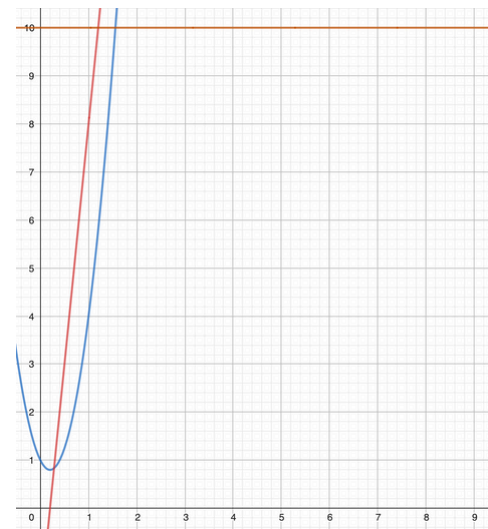


Figura 2.5 Gráfica de funciones de posición (azul), velocidad (rojo) y aceleración (anaranjado)

Por ejemplo, si el movimiento inicia en el instante de tiempo  $t = 0$  s y sustituimos este valor en las funciones anteriores, es posible saber que en ese instante de tiempo la posición del objeto es  $1 \text{ m}$  y tiene una velocidad de  $-2 \text{ m/s}^2$ . Dado que la velocidad se define como el cambio de la posición respecto al tiempo, por cada segundo que pasa, el objeto se mueve dos metros. ¿Y el signo? ¿Qué significará?

Observa que a la posición inicial se le asignaron unidades de metros y a la velocidad, metros por segundo. Cuando utilizamos las matemáticas en ingeniería, no solo el resultado numérico importa, sino también las unidades que los acompañan.

Las gráficas de las funciones de posición y velocidad se muestran en la figura 2.4. Observa que la posición siempre tiene valores positivos, pero en el intervalo de tiempo entre 0 y 0.4 segundos, los valores de posición son menores que el valor inicial. ¿Cómo podrías interpretar eso? ¿Qué estaría haciendo el objeto en ese intervalo?

Observemos la gráfica de velocidad, es una recta de pendiente positiva, inicia en valores negativos y, conforme pasa el tiempo, estos valores aumentan hasta volverse positivos. Justo a los 0.2 segundos la velocidad tiene valor de cero, es decir, el objeto deja de moverse.

Por su parte, la aceleración (figura 2.5), que es el cambio de la velocidad respecto al tiempo, permanece constante. El objeto, entonces, inicia con una velocidad de  $-2$  metros por segundo y la velocidad comienza a hacerse cero hasta que se detiene a los 0.4 segundos de iniciado el movimiento para después incrementar su velocidad indefinidamente. Toda esta información la obtuvimos a través del cálculo diferencial y es importante saber derivar, pero es fundamental saber interpretar las ecuaciones que obtenemos.

### 2.3.2 Integrales y sus aplicaciones

Una integral puede entenderse como una forma de sumar pequeñas cantidades infinitesimales para obtener un total. Por ejemplo, si queremos calcular el área bajo una curva o el trabajo realizado al mover un objeto, usamos integrales. Hay dos tipos básicos de integrales:

**Integral indefinida:** nos da una función que representa la acumulación de cambios. Es como encontrar la "antiderivada" de una función. En el capítulo 7, en el caso de estudio, se muestra un ejemplo de la utilidad de la antiderivada.

$$\int f(x) dx$$

**Integral definida:** nos da un valor numérico que representa una acumulación en un intervalo específico.

$$\int_a^b f(x) dx$$

#### Cálculo de áreas y volúmenes en ingeniería

En ingeniería, las integrales se utilizan para calcular áreas bajo curvas y volúmenes de objetos mecánicos. Supongamos que se quiere calcular el área bajo la curva de una función  $f(x) = x^2$  en el intervalo  $[0, 3]$ . Esto representa una fuerza que varía según la distancia  $x$  a lo largo de un tramo. La integral se escribe como:

$$\int_0^3 x^2 dx$$

Resolviendo la integral definida:

$$\int x^2 dx = \frac{x^3}{3} + C$$

Evaluando los valores del intervalo en la integral definida:

$$\int_0^3 x^2 dx = \left[ \frac{x^3}{3} \right]_0^3 = \frac{3^3}{3} - \frac{0^3}{3} = 9$$

El área bajo la curva de esta función tendría un valor de 9, pero ¿qué unidades serían? ¿Qué representa físicamente? Lo veremos con un poco más de detalle a continuación.

## Cálculo de trabajo en sistemas mecánicos

La integral de una función que representa la fuerza aplicada a un cuerpo a lo largo de una distancia representa el trabajo realizado para mover dicho cuerpo. El trabajo es una forma de energía por lo que el resultado de esta integral se expresa en joules (  $J$  ). Veamos un ejemplo.

El trabajo realizado al mover un peso en un sistema de poleas se calcula integrando la fuerza aplicada sobre la distancia. Si una fuerza  $F = 10\text{ N}$  se aplica de forma constante en una distancia de  $5\text{ m}$ , el trabajo total es:

$$W = \int_0^5 F dx = \int_0^5 100 dx = 100x \Big|_0^5 = 500\text{ J}$$

Cabe aclarar que aquí la función que se integra es una función constante, ya que la fuerza permanece constante con valor de  $10\text{ N}$  (newtons), sin importar la distancia a la que se aplique.



## 2.4 Introducción a ecuaciones diferenciales

Cuando tratamos con una ecuación algebraica, la incógnita o valor que queremos resolver suele ser constante. Por ejemplo, pensemos en una ecuación simple:

$$x - 8 = 11 \therefore x = 19$$

En este caso, la solución es un valor constante de 19. Las ecuaciones diferenciales tienen la particularidad de que las incógnitas no suelen ser valores constantes, sino que las soluciones son funciones; es decir, el valor cambiará dependiendo de otra variable.

Pensemos, por ejemplo, en la función de velocidad de la sección 2.3.1:

$$v(t) = \frac{dx}{dt} = 10t - 2$$

Esta, en sí misma, es una ecuación diferencial que nos dice cómo varía la velocidad con respecto al tiempo, pero para que sea más evidente, supongamos que este es el valor de la velocidad de un objeto y es el único dato que conocemos, sin embargo, queremos saber cómo varía su posición  $x$ , tendríamos que despejar a  $x$  de esta ecuación:

$$dx = (10t - 2)dt$$

Ahora tenemos el operador derivada ( $d$ ) en ambos lados de la ecuación y, como se mencionó en la sección 2.3.2, la integral se puede ver como la antiderivada (análogamente, es lo que la división es al producto), así que aplicada a ambos lados de la ecuación resulta:

$$\int dx = \int (10t - 2)dt$$

$$x = \frac{10}{2}t^2 - 2t + C$$

Como puedes ver, el resultado es que  $x$  es una función del tiempo, igual que la velocidad:

$$x(t) = \frac{10}{2}t^2 - 2t + C$$

$$x(t) = 5t^2 - 2t + C$$

Al haber realizado una integral indefinida, tenemos que agregar la constante  $C$ . Esto siempre pasa al resolver ecuaciones diferenciales y para poder darles un valor se requiere conocer previamente unos valores que se llaman condiciones iniciales, es decir, qué valor toma la función que encontramos al inicio, en este caso, qué valor toma la distancia  $x$  cuando  $t = 0$  s, para esta función sabemos, por lo analizado en la sección 2.3.1, que  $x(0) = 1$ .

Entonces sabemos que si evaluamos la función  $x(t)$  en un tiempo igual a cero, el resultado debe ser cero, esto es:

$$5(0)^2 - 2(0) - C = 1$$

$$C = 1$$

Así, la función  $x(t)$  quedaría expresada como:

$$x(t) = 5t^2 - 2t + 1$$

La cual es la función de posición respecto del tiempo que ya conocíamos de la sección 2.3.1. Otro ejemplo de estas ecuaciones se encuentra en la sección 7.2 del capítulo 7.

### 2.4.1 Orden de las ecuaciones diferenciales

Así como las ecuaciones algebraicas pueden clasificarse en ecuaciones de primer, segundo, tercer grado o superior, las ecuaciones diferenciales se clasifican en ecuaciones de primer orden, segundo orden, tercer orden o de orden superior. El orden de una ecuación diferencial simplemente significa la cantidad de veces que se deriva con respecto a una variable. Por ejemplo, retomemos la ecuación:

$$v(t) = \frac{dx}{dt} = 10t - 2$$

$$\frac{dx(t)}{dt} = 10t - 2$$

En el caso de la segunda ecuación, estamos expresando lo mismo que en la primera, solo que la primera tiene una notación simplificada donde se considera "obvio" que  $x$  es función del tiempo, mientras que la segunda ecuación tiene una notación más completa donde se deja explícito que  $x$  es función del tiempo, pero ambas significan lo mismo.

Esta segunda ecuación puede ser igualada a cero y quedaría expresada de la siguiente forma:

$$\frac{dx(t)}{dt} - 10t + 2 = 0$$

Como la función  $x(t)$  solo se deriva una vez con respecto a  $t$ , entonces la expresión es una ecuación diferencial de primer orden.



## Amplía tus conocimientos

A continuación, se presentan referencias que te permitirán reforzar y ampliar tus conocimientos sobre matemáticas aplicadas.

### Libros

▣ Apostol, T. M. (2019). *Calculus II: Cálculo con funciones de varias variables y álgebra lineal, con aplicaciones a las ecuaciones diferenciales y probabilidad*. Barcelona, España: Reverté. <https://content.e-bookshelf.de/media/reading/L-13960720-5b854c29a3.pdf>

Este libro aborda el cálculo diferencial e integral de varias variables, integrando conceptos de álgebra lineal y aplicaciones a ecuaciones diferenciales.

▣ Kolman, B. y Hill, D. R. (2006). *Álgebra lineal* (8.ª ed.). Edo. de México, México: Pearson Educación. <https://www.cs.buap.mx/~sandoval/ALAverano2013/AlgebraLineal.pdf>

Este texto ofrece una introducción al álgebra lineal, enfatizando aspectos computacionales y geométricos.

▣ Moya, L. M. y Rojas, E. (2021). *Ecuaciones diferenciales ordinarias: Técnicas de resolución*. Bogotá, Colombia: Universidad Nacional de Colombia. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/80012>

Este trabajo analiza la implementación de contenidos de álgebra lineal y su relación con la resolución de sistemas lineales de ecuaciones diferenciales ordinarias.

### Recursos en línea

🌐 Blasco, J. y Benitez, O. (s. f.). *Cálculo Diferencial e Integral* [Curso en línea]. docsity. <https://www.docsity.com/es/curso/calculo-diferencial-e-integral/>

Este curso en línea incluye videoclases y ejercicios resueltos sobre derivación de funciones, polinomio de Taylor, métodos de integración y ecuaciones diferenciales.

🌐 Chasnov, J. R. (s. f.). *Álgebra lineal aplicada y ecuaciones diferenciales (Chasnov)* [Recurso en línea]. LibreTexts Español.

[https://espanol.libretexts.org/Bookshelves/Matematicas/Ecuaciones\\_diferenciales/%C3%81lgebra\\_Lineal\\_Aplicada\\_y\\_Ecuaciones\\_Diferenciales\\_\(Chasnov\)](https://espanol.libretexts.org/Bookshelves/Matematicas/Ecuaciones_diferenciales/%C3%81lgebra_Lineal_Aplicada_y_Ecuaciones_Diferenciales_(Chasnov))

Estas notas de clase están dirigidas a estudiantes de ingeniería, cubriendo álgebra lineal y ecuaciones diferenciales con aplicaciones prácticas.

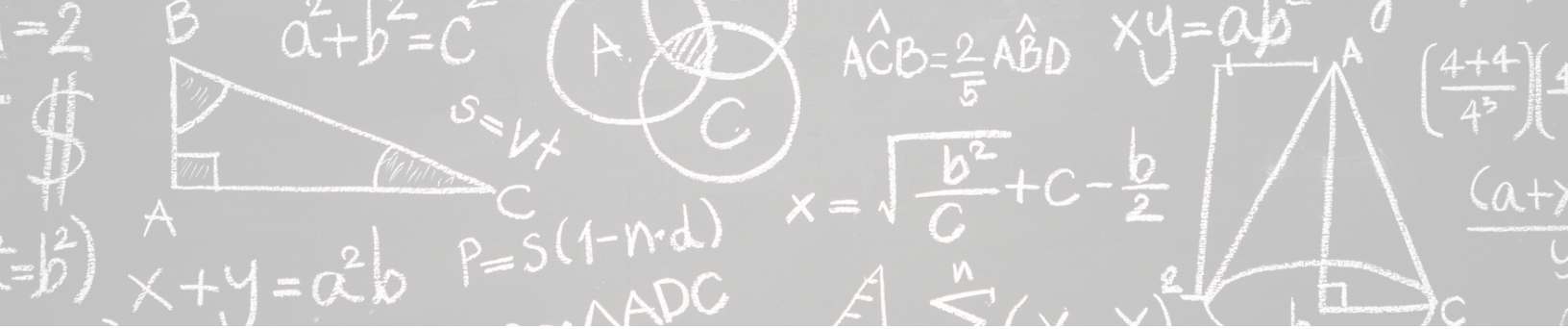
🌐 MateFacil. (s. f.). *MateFacil Sitio Oficial* [Recurso en línea]. <https://matefacil.net/>

Ofrece videos educativos sobre aritmética, álgebra elemental, geometría analítica, trigonometría, cálculo diferencial e integral, álgebra lineal y ecuaciones diferenciales, entre otros temas.

🌐 Ramírez Ríos, J. H. (2022). *Ecuaciones Diferenciales* [Libro electrónico interactivo]. Red Educativa Digital Descartes.

[https://proyectodescartes.org/iCartesiLibri/materiales\\_didacticos/EcuacionesDiferenciales/index.html](https://proyectodescartes.org/iCartesiLibri/materiales_didacticos/EcuacionesDiferenciales/index.html)

Este libro interactivo ofrece una introducción a las ecuaciones diferenciales, abarcando temas desde las ecuaciones de primer orden hasta las de orden superior.



🌐 Strang, G. y Herman, E. J. (2022, 24 de marzo). 4.2 Aproximaciones lineales y diferenciales. En *Cálculo volumen 1* [Libro electrónico]. OpenStax. <https://openstax.org/books/cálculo-volumen-1/pages/4-2-aproximaciones-lineales-y-diferenciales>

En esta sección del libro electrónico se explora las aproximaciones lineales y el uso de diferenciales en el cálculo.

## Videos

▶ Ingeniosos. (2023, 12 de febrero). *MÉTODO de los ELEMENTOS FINITOS* 😊 *Simulaciones en Ingeniería* ✓ [Video]. YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=pZbxGKBsSnQ>

Video que explica en qué consiste el FEM y su importancia en el diseño en ingeniería.

▶ Matemáticas profe Alex. (2019, 2 de junio). *Multipliación de matrices | Producto de matrices | Ejemplo 1* [Video]. YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=Tjrm3HsqBXE>

Video que muestra detalladamente el proceso para multiplicar matrices.

▶ OpenFING. (2022, 12 de agosto). *Cálculo Diferencial e Integral en Varias Variables: Ecuaciones diferenciales lineales de 2do orden* [Video]. YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=oUnzqxhjNPM>

Clase que aborda ecuaciones diferenciales lineales de segundo orden en el contexto del cálculo diferencial e integral en varias variables.





## Capítulo 3

# Termodinámica



En este capítulo se exploran los conceptos fundamentales de la termodinámica de una manera accesible y aplicada, mostrando cómo estos conocimientos son clave en numerosos problemas de ingeniería. A través de explicaciones claras, ejemplos cotidianos y actividades prácticas, descubrirás cómo los principios de la termodinámica se aplican en el diseño de motores, sistemas de refrigeración y generación de energía.

¿Alguna vez te has preguntado cómo un refrigerador mantiene los alimentos fríos sin producir frío, o por qué un motor de auto no convierte toda la gasolina en movimiento? Estas preguntas encuentran sus respuestas en los principios de la termodinámica. A lo largo de este capítulo, se observa cómo estas ideas pueden aplicarse para diseñar sistemas más eficientes y sostenibles, sentando las bases para futuros estudios en ingeniería energética y mecánica.

## 3.1 Conceptos básicos de termodinámica

La termodinámica es una rama fundamental de la física y la ingeniería que estudia la energía, su transformación y su transferencia entre sistemas. Es una disciplina clave en numerosas aplicaciones tecnológicas, desde la generación de electricidad hasta el diseño de motores y sistemas de refrigeración. En esta sección, se abordan los principios básicos que rigen la termodinámica y cómo estos se aplican en el mundo real.

### 3.1.1 ¿Qué es la termodinámica?

El término "termodinámica" proviene de las palabras griegas *thermos* (calor) y *dynamis* (fuerza o poder), lo que refleja su propósito original: el estudio de la conversión del calor en trabajo mecánico. Hoy en día, su alcance va mucho más allá y se aplica en diversas áreas de la ingeniería (véase la figura 3.1), desde la energía renovable (véase la figura 3.2) hasta la climatización de edificios.

En términos simples, la termodinámica permite responder preguntas como:

- ¿Cómo se transfiere el calor en un motor?
- ¿Por qué algunos procesos son eficientes y otros no?
- ¿Cómo podemos aprovechar la energía térmica en la vida cotidiana?

Para responder a estas preguntas, es necesario definir primero algunos conceptos fundamentales.



**Figura 3.1** Interior de turbina de vapor, la cual se usa en las centrales eléctricas para convertir el calor del vapor en energía eléctrica. La termodinámica ayuda a hacer más eficiente este proceso de conversión de energía.



**Figura 3.2** Las celdas solares son también un sistema de conversión de energía; reciben la energía del sol y la convierten en energía eléctrica. El estudio de los materiales semiconductores y la termodinámica ayuda a que estos sistemas sean cada vez más eficientes y, por lo tanto, económicos.

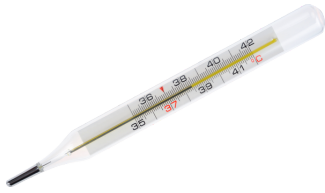


Figura 3.3 Un termómetro de mercurio es un sistema cerrado. ¿Y un termómetro digital?

### 3.1.2 Sistemas y fronteras termodinámicas

Un *sistema termodinámico* es cualquier cantidad de materia o región del espacio seleccionada para su estudio. Todo lo que se encuentra fuera del sistema se denomina *entorno*. Lo que separa el sistema del entorno se denomina *frontera*, que puede ser real o imaginaria.

Para entender mejor este concepto, imaginemos que estamos observando una cocina. En esta cocina hay una tetera con agua hirviendo, una cafetera eléctrica funcionando y una nevera cerrada. Cada uno de estos objetos puede considerarse un sistema termodinámico, dependiendo de cómo intercambie energía y masa con su entorno.

Los sistemas se clasifican en tres tipos según su interacción con el entorno:

**Sistema cerrado:** un sistema cerrado intercambia energía (más adelante se explicará que la energía puede ser calor o trabajo) con el entorno, pero no masa. Esto significa que la cantidad de materia dentro del sistema permanece constante.

Un termómetro como el mostrado en la figura 3.3, puede ser considerado un sistema cerrado, pues la materia (mercurio y el vidrio) no se intercambia con el entorno, pero sí hay intercambio de energía en forma de calor con el ambiente, lo que cambia la distribución del mercurio.

**Sistema abierto:** un sistema abierto puede intercambiar tanto energía como masa con su entorno. Es el tipo de sistema más común en la naturaleza y en la ingeniería.

Cuando calentamos agua en una tetera sin tapa, parte del agua se convierte en vapor y escapa al aire (intercambio de masa), mientras que la tetera sigue absorbiendo calor de la estufa (intercambio de energía).

**Sistema aislado:** un sistema aislado no intercambia ni masa ni energía con el entorno. En la realidad, no existen sistemas 100% aislados, pero algunos dispositivos se acercan bastante a este concepto.

Si un termo está bien sellado y aislado térmicamente, el calor del café no se escapa fácilmente y no entra aire del exterior, lo que lo convierte en un sistema casi aislado.



Figura 3.4 Una tetera es un sistema abierto ya que sale vapor (masa) hacia el entorno (la cocina) por una frontera imaginaria. Es imaginaria porque el agujero por el que sale el vapor no tiene material; es un límite que se fija para separar el sistema de su entorno.



Figura 3.5 Un termo puede verse como un sistema aislado, sin embargo, sí existe intercambio de energía, por lo que, al final, la bebida en su interior, con el paso del tiempo, llega a la temperatura del ambiente.

### 3.1.3 Propiedades termodinámicas: estado de equilibrio y proceso

Cada sistema termodinámico tiene ciertas características medibles llamadas *propiedades termodinámicas*, que incluyen:

- **Presión ( $P$ ):** fuerza ejercida por un fluido sobre una superficie. Se mide en pascales ( $P_a$ ), atmósferas ( $atm$ ) o libras por pulgada cuadrada ( $psi$ ).

- **Temperatura ( $T$ ):** medida del nivel de energía térmica de un sistema. Se mide en Kelvin ( $K$ ) o grados Celsius ( $^{\circ}C$ ).
- **Volumen ( $V$ ):** espacio ocupado por una sustancia dentro del sistema, expresado en metros cúbicos ( $m^3$ ).
- **Energía interna ( $U$ ):** energía almacenada en las moléculas de un sistema debido a su movimiento y estructura química.

Aunque estas no son las únicas propiedades. Cuando un sistema no cambia con el tiempo, se dice que está en *estado de equilibrio*. Si una propiedad cambia con el tiempo, el sistema experimenta un *proceso termodinámico*. Estos procesos pueden ser:

- **Isotérmico:** la temperatura no cambia.
- **Isobárico:** la presión no cambia.
- **Isoentrópico:** la propiedad termodinámica entropía (explicada más adelante) no cambia.
- **Adiabático:** sin intercambio de calor con el entorno.

Cada proceso describe una transformación específica que ocurre en un sistema termodinámico.

Las propiedades termodinámicas determinan el estado de un sistema y ayudan a analizar cómo interactúa con su entorno. A continuación, se explican algunas de las más importantes:

**Presión:** la presión es la fuerza ejercida por un fluido (líquido o gas) sobre una superficie. En ingeniería, se expresa en diferentes unidades, como pascales ( $Pa$ ), atmósferas ( $atm$ ) o libras por pulgada cuadrada ( $psi$ ). Su fórmula es:

$$P = \frac{F}{A}$$

donde:

$P$  es la presión.

$F$  es la fuerza aplicada.

$A$  es el área sobre la cual actúa la fuerza.

**Temperatura:** la temperatura mide la energía térmica de un sistema. Se mide en escalas como:

Kelvin ( $K$ ) — escala absoluta utilizada en termodinámica.

Celsius ( $^{\circ}C$ ) — común en el uso cotidiano.

Fahrenheit ( $^{\circ}F$ ) — usada en algunos países.

La relación entre estas escalas se expresa como:

$$K = ^{\circ}C + 273.15 K$$



donde:

$^{\circ}\text{C}$  es la temperatura medida en grados Celsius

$K$  es la temperatura equivalente en Kelvin

**Volumen:** el volumen es la cantidad de espacio ocupado por un sistema. En termodinámica, se usa para describir la expansión o compresión de un gas en un recipiente.

**Energía interna:** la energía interna de un sistema es la suma de la energía cinética y potencial de sus moléculas. Es una propiedad clave para analizar la conversión de calor en trabajo.

## 3.2 Energía y transferencia de calor

La **energía** es un concepto fundamental en la termodinámica. Todos los procesos en la naturaleza y en la ingeniería involucran la transferencia y transformación de energía en distintas formas. La energía puede moverse de un sistema a otro y cambiar de una forma a otra, pero nunca se crea ni se destruye, lo que da lugar a la **Primera Ley de la Termodinámica**, también conocida como el principio de conservación de la energía.

Esta sección explora las diferentes formas de energía, los mecanismos de transferencia de energía y cómo se aplican estos conceptos en la vida cotidiana y la ingeniería.

### 3.2.1 Formas de energía en termodinámica

En termodinámica, la energía se puede clasificar en dos grandes categorías: **energía macroscópica** y **energía microscópica**.

La **energía macroscópica** se relaciona con el movimiento y la posición de un sistema en su conjunto. La energía macroscópica puede ser:

- *Energía cinética:* es la energía del movimiento de un cuerpo, la cual se calcula con la siguiente ecuación.

$$E_c = \frac{1}{2}mv^2$$

donde:

$E_C$  es la energía cinética medida en joules (J).

$m$  es la masa del sistema en kilogramos (kg).

$v$  es la velocidad del sistema medida en metro por segundo ( $\frac{\text{m}}{\text{s}}$ ).

- *Energía potencial:* es la energía almacenada debido a la posición de un objeto en un campo de fuerzas, como la gravedad. Se obtiene con la siguiente ecuación.

$$E_P = mgh$$



**Conoce más.**

En este video de EcologíaVerde (2020), se explica cómo funciona una central hidroeléctrica y cómo la energía potencial del agua se transforma en electricidad.

donde:

$E_p$  es la energía potencial medida en joules (J).

$m$  es la masa del sistema en kilogramos (kg).

$g$  es la constante gravitacional con valor de  $9.81$  medida en metros por segundo al cuadrado ( $m/s^2$ ).

$h$  es la altura a la cual se encuentra el sistema, medida en metros (m).

Un ejemplo del aprovechamiento de la energía macroscópica es la generación de electricidad en las centrales hidroeléctricas. En estas centrales, se aprovecha la energía potencial del agua que se encuentra naturalmente almacenada a gran altura, la cual se deja caer por tuberías, donde la energía potencial se transforma en energía cinética. Esta energía del agua hace girar una turbina, que a su vez gira un generador, produciendo así electricidad.

En México se encuentra la central hidroeléctrica Manuel Moreno Torres (figura 3.6), que tiene la presa (lugar donde se almacena el agua) más alta del continente americano.



Figura 3.6 Fotografía de la central hidroeléctrica Manuel Moreno Torres

La **energía microscópica** se engloba en la **energía interna** ( $U$ ), que representa la suma de todas las formas de energía a nivel molecular, atómico y subatómico dentro de un sistema. A su vez, la energía interna se subdivide en diferentes componentes según su origen:

- **Energía sensible:** se relaciona con la energía cinética de las moléculas debido a su movimiento traslacional, rotacional y vibracional. Depende de la temperatura: a mayor temperatura, mayor energía sensible.
- **Energía latente:** asociada con los cambios de fase de una sustancia (la evaporación o congelamiento, por ejemplo). Se almacena en la estructura molecular debido a la formación o ruptura de enlaces intermoleculares.
- **Energía química:** proviene de los enlaces químicos entre átomos en las moléculas. Se libera o absorbe en reacciones químicas, como en la combustión de combustibles.
- **Energía nuclear:** es la energía almacenada en el núcleo de los átomos, debido a las fuerzas de atracción entre protones y neutrones. Se libera en reacciones nucleares como la fisión y la fusión.

Todos los sistemas tienen energía interna al estar compuestos de diferentes moléculas. Dependiendo de lo que suceda con el sistema (calentarse, enfriarse, entre otros), el valor de la energía interna puede cambiar. El cambio del valor de la energía interna se denota como  $\Delta U$  y se calcula de la siguiente manera:

$$\Delta U = U_1 - U_2$$

donde:

$\Delta U$  es el cambio de la energía interna.

$U_1$  es el valor de la energía interna antes del cambio.

$U_2$  es el valor de la energía interna después del cambio.

Cuando se profundice en la primera ley de la termodinámica, se explicará con mayor detalle cómo se calcula este cambio de la energía interna.

### 3.2.2 Transferencia de energía: calor y trabajo

Existen dos formas por las cuales un sistema puede transferir o recibir energía: por medio de **calor** o por medio de **trabajo**.

El **calor** es la energía transferida debido a una diferencia de temperatura entre dos cuerpos, y se transmite del cuerpo con mayor temperatura al de menor temperatura. Se mide en joules ( J ) y ocurre de tres formas:

- **Conducción:** transferencia de calor a través de dos cuerpos por contacto entre ellos.
- **Convección:** transferencia de calor mediante el movimiento de un fluido o un gas (esta forma de transferencia no sucede entre sólidos).
- **Radiación:** transferencia de calor a través de ondas electromagnéticas. Este tipo de transferencia no requiere contacto entre los cuerpos o los fluidos y sucede incluso en el vacío. Todos los cuerpos emiten radiación siempre que su temperatura sea diferente del **cero absoluto**, es decir,  $0\text{K}$  (cero Kelvin). ¿Cuánto es esto en grados Celsius? Un ejemplo claro de radiación es el calor del Sol llegando a la Tierra a través del vacío del espacio.

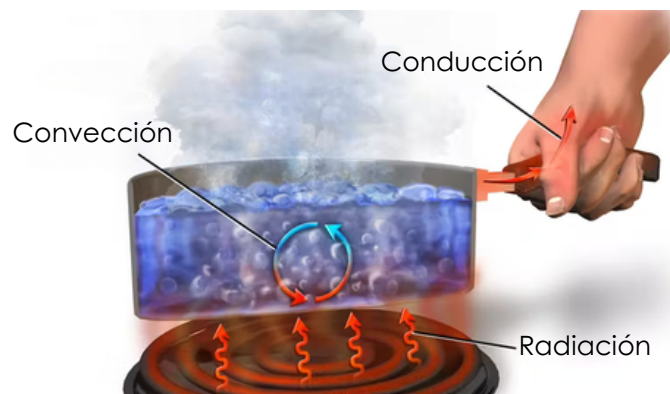


Figura 3.7 Se ilustran las diferentes formas de transferencia de energía por calor

En la figura 3.7 se ilustra un ejemplo donde se presentan las tres formas en que se transmite el calor. La mano, al tocar la olla, recibe el calor por conducción, pues la mano estaría a menor temperatura que el recipiente.

El líquido al interior del recipiente sube su temperatura al estar recibiendo calor del recipiente caliente. Primero, el recipiente (más caliente en un inicio que el líquido), al tener contacto directo con el fluido de abajo, transmite calor por conducción. La convección comienza cuando el líquido inferior, al ser de mayor temperatura que el líquido superior, disminuye su densidad al estar más caliente, lo cual lo hace subir y permite que el líquido más frío baje. Cuando este tenga una mayor temperatura, volverá a subir. Este ciclo se repite y es a lo que se llama convección.

Por otra parte, si los elementos de la figura 3.7 se encontraran en el vacío, la parrilla calentaría el recipiente a través de radiación, pues el recipiente y la parrilla no se están tocando. Si en lugar del vacío entre ellos consideramos la atmósfera, ¿cómo sería el proceso de conducción del calor de la parrilla al recipiente? ¿Sería solo por radiación?

Finalmente, el calor que se transfiere a un sistema se puede calcular a través de la siguiente ecuación:

$$Q = mc\Delta T$$

donde:

$Q$  es el calor transferido en  $J$ .

$m$  es la masa del sistema en  $kg$ .

$c$  es el calor específico, que es una constante que depende del material y se mide en joules por kilogramo por Kelvin ( $J/kgK$ ).

$\Delta T$  es la diferencia de temperatura en  $K$ , es decir, la temperatura inicial del sistema menos la temperatura final.

El **trabajo** ( $W$ ) es una forma de transferencia de energía que ocurre cuando una fuerza actúa sobre un sistema y provoca un desplazamiento. En términos termodinámicos, el trabajo está asociado con cambios en las propiedades del sistema (como volumen o presión).

En un sistema cerrado, el tipo más común de trabajo es el trabajo de frontera o de expansión o compresión en gases, el cual se expresa como:

$$\delta W = F dx$$

donde:

$\delta W$  es el trabajo en la frontera del sistema.

$F$  es la fuerza aplicada al sistema.

$dx$  es el cambio del desplazamiento en la dirección de la fuerza.

Si el proceso ocurre en un sistema que sea un gas, el desplazamiento se puede medir a través del volumen, y si la expansión o compresión ocurre de manera lenta y constante, la expresión integral del trabajo es:

$$W = \int_{V_1}^{V_2} F dV$$

donde:

$W$  es el trabajo entregado al sistema.

$F$  es la fuerza aplicada al sistema.

$dV$  es el cambio del volumen.

$V_1$  es el volumen inicial del sistema.

$V_2$  es el volumen final del sistema.

Esta expresión indica que el trabajo transferido al sistema ( $W$ ) es igual a la fuerza que recibe el sistema ( $F$ ) por el cambio de volumen que este produce ( $dV$ ); es decir, es la suma (representada por la integral) de la fuerza por cada cambio en el volumen.

Si la fuerza que se aplica al sistema es constante, entonces la expresión final del trabajo transferido es:

$$W = F(V_2 - V_1)$$

### 3.2.3 Primera ley de la termodinámica

La primera ley de la termodinámica es una expresión del principio de conservación de la energía aplicada a los sistemas termodinámicos. Establece que la energía no se crea ni se destruye, solo se transfiere o se transforma en diferentes formas. Matemáticamente, se expresa como:

$$\Delta U = Q + W$$

donde:

$\Delta U$  es el cambio en la energía interna del sistema.

$Q$  es el calor transferido al sistema (si  $Q > 0$ ) o cedido por el sistema (si  $Q < 0$ ).

$W$  es el trabajo transferido al sistema (si  $W > 0$ ) o cedido por el sistema (si  $W < 0$ ).

## Caso de estudio

### ¿Cuánta energía se necesita para calentar una taza de café?

En este caso de estudio se va a analizar la energía necesaria para que una taza de café se caliente a la temperatura deseada, determinando el tiempo requerido de calentamiento. Con este ejemplo simple, podremos ver la aplicación real de los conceptos y leyes termodinámicas.

El sistema que se analiza es el café dentro de la taza, considerado como un sistema cerrado porque no intercambia masa con el entorno, pero sí puede intercambiar energía en forma de calor.

#### Detalles del caso

Se considerarán los siguientes datos para el análisis del caso:

- Masa del café:  $m = 0.3 \text{ kg}$  (aproximadamente 300 ml, suponiendo que la densidad del café es similar a la del agua).
- Calor específico del café:  $c = 4184 \text{ J}/(\text{kgK})$  (se asume que es igual al del agua).
- Temperatura inicial:  $T_i = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ .
- Temperatura final:  $T_f = 60 \text{ }^\circ\text{C}$ .

#### Aplicación de conocimientos

Como el sistema es cerrado y no hay trabajo realizado (el café no se expande ni se comprime), la primera ley de la termodinámica en este caso se reduce a:

$$\Delta U = Q$$

La transferencia de calor necesaria para elevar la temperatura del café hasta la temperatura final se calcula como:

$$Q = mc\Delta T$$

Para poder utilizar la ecuación anterior, es necesario convertir el valor de temperatura de grados Celsius a Kelvin:

$$T_i = 20 \text{ }^\circ\text{C} + 273.15 = 293.15 \text{ K}$$

$$T_f = 60 \text{ }^\circ\text{C} + 273.15 = 333.15 \text{ K}$$

Con esta conversión de unidades se puede calcular el calor que es necesario transferir al café para que eleve su temperatura:

$$Q = (0.3)(4184)(333.15 - 293.15)$$

$$Q = 50208 \text{ J}$$

Ahora que se tiene la cantidad de energía, es posible determinar el tiempo necesario para calentar el café. Esto depende de la potencia eléctrica del microondas. La potencia nos dice la cantidad de energía que entrega un sistema cada segundo.

Si se utiliza un microondas con una potencia de 800 W (donde  $1 \text{ W} = 1 \text{ J/s}$ ), esto significa que el microondas entrega 800 joules cada segundo. Así que el tiempo se calcularía:

$$t = \frac{50208 \text{ J}}{800 \text{ W}}$$

$$t = 62.76 \text{ s}$$

### 3.3 Propiedades de las sustancias puras

En el estudio de la termodinámica, el análisis de las propiedades de las sustancias puras es esencial para comprender el comportamiento de los sistemas térmicos.

En esta sección se estudia qué es una sustancia pura, sus fases, cómo se representan sus propiedades en diagramas de fase y el uso de tablas termodinámicas en ingeniería.

#### 3.3.1 Definición de una sustancia pura y sus fases

Una sustancia pura es aquella que tiene una composición química homogénea, independientemente de su fase (sólido, líquido o gas). Ejemplos comunes de sustancias puras incluyen el agua, el oxígeno, el nitrógeno y los refrigerantes utilizados en sistemas de climatización.

Las sustancias puras pueden existir en tres fases:

- **Sólido:** las moléculas están fuertemente unidas y tienen poca movilidad, por ejemplo, el hielo.
- **Líquido:** las moléculas tienen más libertad de movimiento, pero aún están unidas por fuerzas intermoleculares, por ejemplo, el agua líquida.
- **Gas:** las moléculas están separadas y se mueven libremente, por ejemplo, el vapor de agua.

Se ejemplificará qué es una sustancia pura con una sustancia conocida: el agua. Un bloque de hielo es una sustancia pura en fase sólida. Al calentarse, se derrite en agua líquida y si continúa recibiendo calor, se convierte en vapor de agua, pasando por las tres fases sin cambiar su composición química.

El helio, usado en aplicaciones de criogénica y refrigeración de superconductores (materiales que conducen la corriente eléctrica sin calentarse para evitar pérdidas de energía) y el dióxido de carbono, usado en sistemas de refrigeración, son otros ejemplos de sustancia pura.

### 3.3.2 Diagramas de fase: relación entre presión, volumen y temperatura

El comportamiento de una sustancia pura en diferentes condiciones de temperatura y presión puede representarse mediante **diagramas de fase** (figura 3.8). Estos diagramas muestran las regiones donde una sustancia existe como sólido, líquido o gas y los puntos en los que ocurren transiciones de fase.

Son fundamentales en termodinámica porque permiten predecir cómo una sustancia reaccionará ante cambios de temperatura y presión, facilitando el diseño de sistemas térmicos eficientes. En ingeniería, los diagramas de fase son herramientas clave en la selección de materiales y en el análisis de procesos como la refrigeración, la generación de energía y el almacenamiento de sustancias criogénicas.

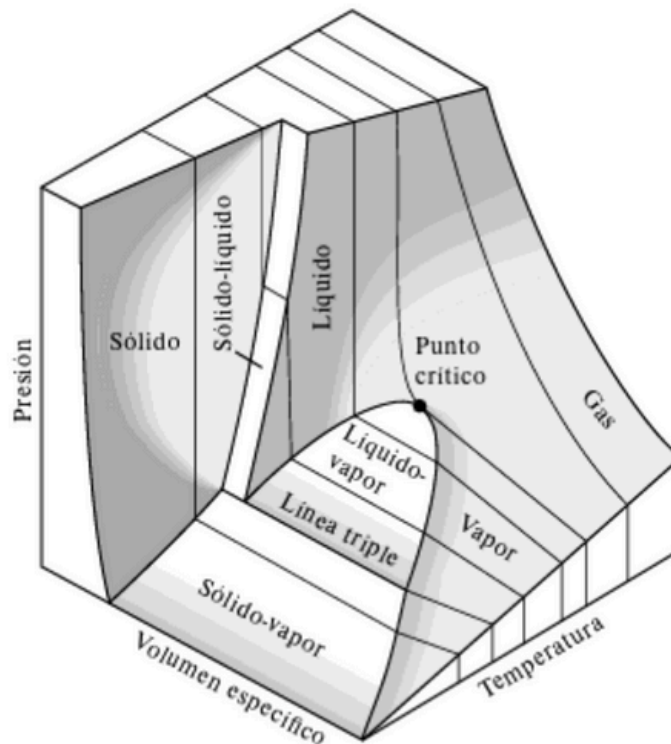


Figura 3.8 En la imagen se representa un diagrama de fase conocido como PVT; es una gráfica tridimensional donde se indica el estado de una sustancia dependiendo de la presión, temperatura y volumen de la sustancia.



Un diagrama de fase puede contemplar presión, temperatura y volumen, como en la figura 3.8, aunque también se pueden encontrar diagramas donde una de las propiedades se fija en un valor.

Por ejemplo, el diagrama puede considerar un volumen fijo de una sustancia y mostrar cómo la sustancia cambia de fase dependiendo de la temperatura y la presión, estas dos pueden variar. El diagrama de la figura 3.9 muestra un corte sobre el eje de volumen de la figura 3.8.

Las líneas en el diagrama de fase, como se muestra en la figura 3.9, representan los límites de una sustancia en los cuales cambiará de fase dependiendo de si la presión y la temperatura aumentan o disminuyen. A lo largo de estas líneas, la sustancia experimenta una transición de fase, pasando de un estado físico a otro.

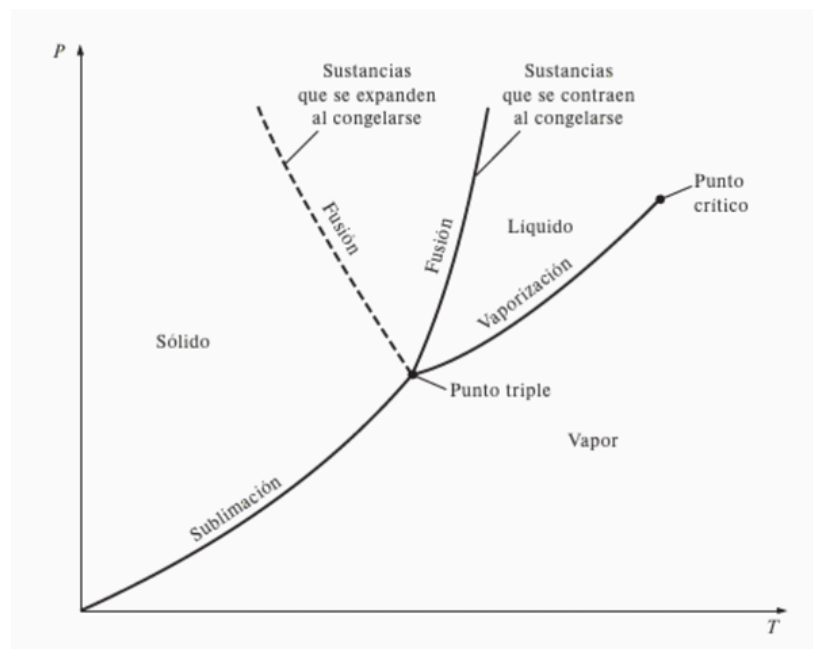


Figura 3.9 Diagrama de fase PT (volumen constante). Dependiendo de si la sustancia se contrae al congelarse (como la mayoría de las sustancias) o se expande (como el agua), la línea de fusión puede tener la dirección de la línea continua o la línea punteada.

### Transiciones de fase

Dependiendo del tipo de cambio de fase, cada transición tiene un nombre específico:

- **Fusión:** es el proceso en el cual una sustancia pasa de sólido a líquido al aumentar la temperatura a una presión determinada.
- **Solidificación o congelación:** es la transición de líquido a sólido cuando se reduce la temperatura.

- **Evaporación o vaporización:** es el cambio de una sustancia de fase líquida a gaseosa al alcanzar su temperatura de ebullición.
- **Condensación:** es el proceso inverso de la evaporación, en el cual el vapor se convierte en líquido cuando la temperatura disminuye.
- **Sublimación:** es el paso directo de sólido a gas sin pasar por la fase líquida. Un ejemplo de este proceso es el hielo seco (dióxido de carbono sólido) transformándose en gas sin dejar un residuo líquido.
- **Deposición o sublimación inversa:** es el cambio directo de fase de gas a sólido sin pasar por el estado líquido; por ejemplo, la formación de escarcha cuando el vapor de agua se deposita directamente como hielo en superficies frías.

### Puntos importantes de los diagramas de fase

El punto crítico y el punto triple son dos conceptos clave en los diagramas de fase de las sustancias puras.

El **punto crítico** es la combinación de temperatura y presión a la cual una sustancia ya no puede existir como líquido, sin importar cuánto se presurice. En este punto (zona anaranjada de la figura 3.10), la diferencia entre la fase líquida y la fase gaseosa desaparece, formando un fluido supercrítico. En este estado, el fluido no puede condensarse en un líquido simplemente aumentando la presión.

Por ejemplo, véase el punto sobre la línea anaranjada de la figura 3.10. En el punto indicado, la sustancia se encuentra como vapor, pero si la presión aumenta sin cambiar la temperatura (a lo largo de la línea naranja), con suficiente aumento de presión, la sustancia se convertirá en líquido; pasado el punto crítico, este cambio de fase por la elevación de presión ya no es posible.

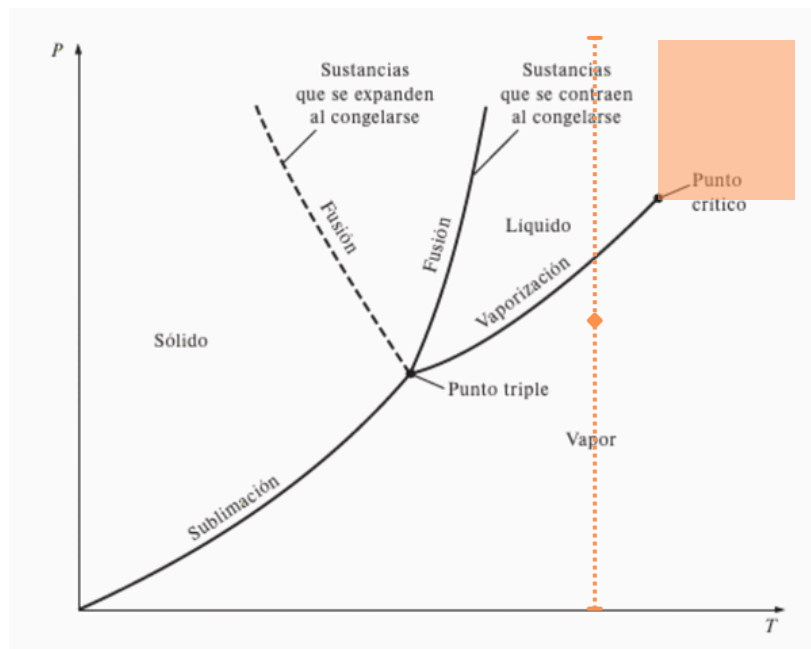


Figura 3.10 Diagrama de fase PT (volumen constante) con punto crítico resaltado



Conoce más.

En este video UCSC Physics (2018), se observa cómo es el punto triple del agua.

En termodinámica, el punto crítico es relevante en el diseño de turbinas de vapor y sistemas de generación de energía, ya que los fluidos supercríticos tienen alta eficiencia en la transferencia de calor y trabajo.

El **punto triple** es la única combinación de temperatura y presión en la que una sustancia puede existir en equilibrio en sus tres fases simultáneamente: sólido, líquido y gas. Para el agua, el punto triple ocurre a  $0.01\text{ }^{\circ}\text{C}$  ( $273.16\text{ K}$ ) y  $0.006\text{ atm}$  ( $611.657\text{ Pa}$ ). A esta presión y temperatura extremadamente baja, el agua puede coexistir como hielo, líquido y vapor. La figura 3.11 muestra el diagrama de fase del agua.

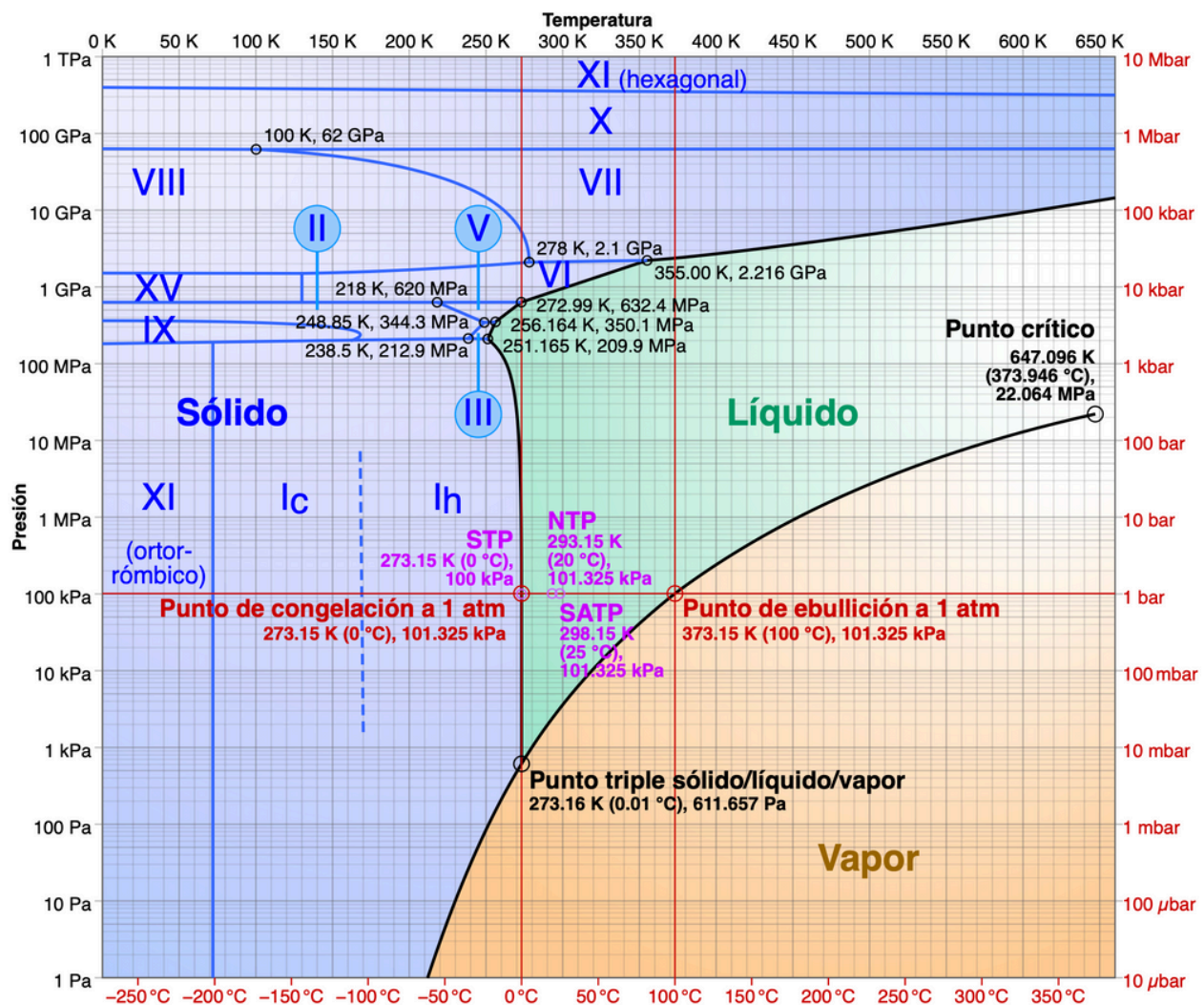
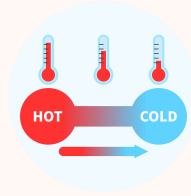


Figura 3.11 Diagrama de fase PT del agua. En rojo se indica temperatura en  $^{\circ}\text{C}$  y presión en bar. En negro, la presión se indica en Pa y la temperatura en K. En todos los casos, se usa una escala logarítmica.

## Proyecto 3.1

### Reflexión sobre sistemas dinámicos cotidianos



#### Objetivo del proyecto

Comprender el uso de los diagramas de fase para analizar los cambios de estado de una sustancia pura y determinar las condiciones en las que ocurren las transiciones de fase.

#### Materiales

- Diagrama de fase del agua (impreso o digital)
- Calculadora
- Papel y lápiz

#### Instrucciones

##### 1. Identificación de fases:

- Usando el diagrama de fase del agua, determinar en qué estado físico se encuentra el agua a 200 kPa y 150 °C.
- Determinar en qué estado se encuentra el agua a 500 kPa y 50 °C.

##### 2. Determinación de temperaturas de cambio de fase:

- Usando la tabla de propiedades del agua, encontrar la temperatura a la cual el agua hierve a 300 kPa.
- Determinar la presión a la que el agua se congelaría a -5 °C.

##### 3. Ubicación del punto triple y punto crítico:

- Identificar, en el diagrama de fase del agua, los valores de presión (Pa y atm) y temperatura (K y °C) correspondientes al punto triple y al punto crítico.

##### 4. Análisis de aplicación:

- Identifique en qué parte del diagrama de fase se encuentra el agua en una caldera industrial a 350 °C y 5 MPa.

## 3.4 Aplicaciones de la termodinámica en la ingeniería

La termodinámica también permite el desarrollo y optimización de distintos ciclos termodinámicos que se utilizan en la ingeniería para la conversión de energía en trabajo útil, desde la generación de energía en plantas termoeléctricas hasta la climatización de espacios y la optimización de motores de combustión interna.

En esta sección se describen algunos de los ciclos termodinámicos más importantes, como el ciclo Otto y el ciclo Diesel en motores de combustión interna, y el ciclo de compresión de vapor en sistemas de refrigeración. A través de su explicación, se entenderá cómo estos ciclos permiten la conversión de energía térmica en trabajo mecánico o la transferencia de calor en sistemas de climatización y refrigeración.

### 3.4.1 Importancia de la termodinámica en la producción de energía

La capacidad de controlar y predecir los cambios de estado en una sustancia ayuda a mejorar la eficiencia en una amplia gama de aplicaciones, como la climatización de edificios, el diseño de turbinas y la gestión de combustibles en la industria automotriz y aeroespacial.

Por ejemplo, en la industria energética, la termodinámica permite calcular la eficiencia de las plantas termoeléctricas mediante el análisis de los ciclos termodinámicos, como el ciclo Rankine (figura 3.12), optimizando así la conversión del calor generado por la combustión de un combustible, como el carbón, en trabajo mecánico.

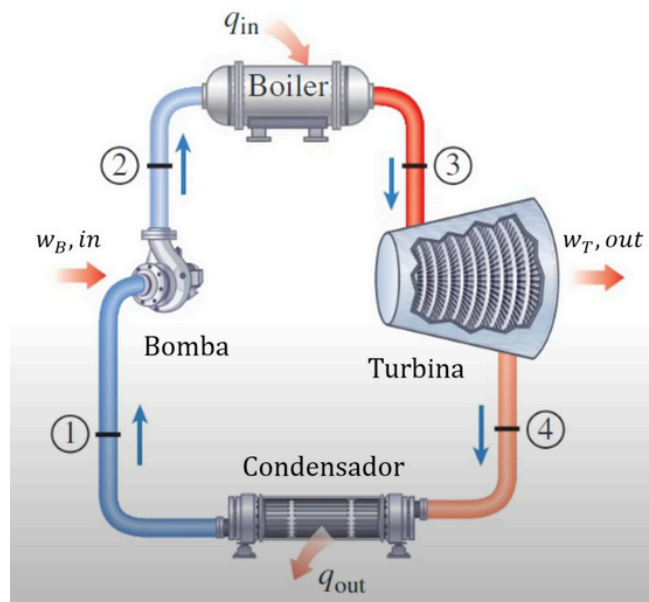


Figura 3.12 Diagrama de las etapas del ciclo Rankine. Son cuatro etapas: (1) se incrementa la presión del agua al bombearla aplicando trabajo al sistema; (2) a cierta presión, el agua se calienta para volverla vapor, transfiriendo calor; (3) el vapor transfiere trabajo a la turbina; (4) el vapor se condensa para que el agua vuelva a fase líquida.



**Conoce más.**

En este video de heysoymarvin (2018), se muestra el funcionamiento de una planta termoeléctrica y otros detalles sobre su operación.

En este proceso, el calor se emplea para calentar agua hasta convertirla en vapor, el cual se expande y fluye a través de una turbina, provocando su rotación. La turbina, acoplada a un generador eléctrico, convierte este movimiento en electricidad. Comprender cómo el volumen de agua, la presión y la temperatura influyen en los cambios de fase del agua permite mejorar la eficiencia del proceso, minimizando pérdidas de energía y maximizando la producción eléctrica.

En la figura 3.13 se puede observar un esquema de una planta de producción de energía; la figura 3.12 muestra el caso ideal de ciclo Rankine para la producción de energía, pero en la figura 3.13 se muestra cómo se implementa en la realidad ese ciclo.

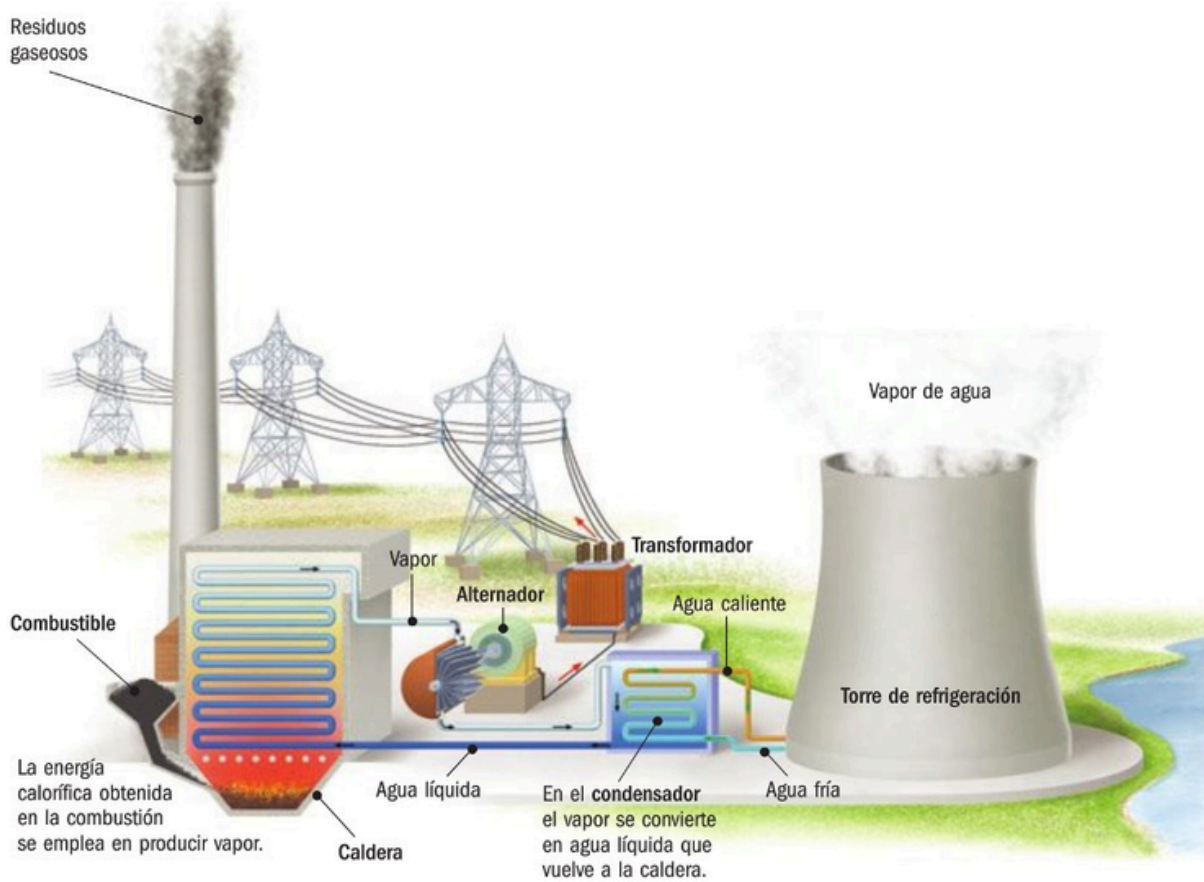


Figura 3.13 Esquema de una planta generadora de energía

### 3.4.2 Motores de combustión interna y termodinámica

Los **motores de combustión interna** (figura 3.14) son una de las aplicaciones más directas de la termodinámica en la ingeniería mecánica. Estos motores convierten la energía química del combustible en energía térmica a través de un proceso de combustión y luego transforman esa energía en trabajo mecánico mediante la expansión de los gases dentro de los cilindros.

La termodinámica es esencial en el diseño y análisis de estos motores, ya que permite determinar la eficiencia del proceso de conversión de energía, identificar pérdidas de calor y optimizar el rendimiento del motor. En la práctica, se utilizan modelos matemáticos basados en los ciclos Otto y Diesel para analizar y predecir el comportamiento de los motores, ajustando variables como la relación de compresión, la presión de combustión y la temperatura de los gases de escape.

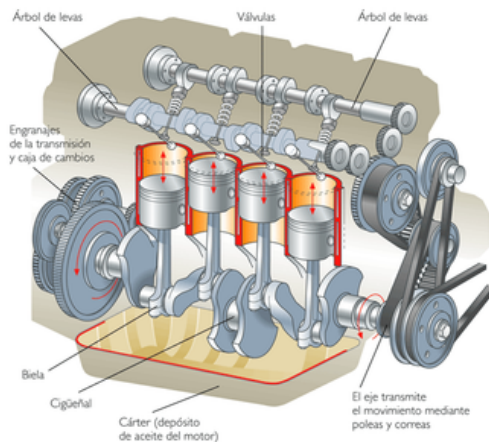


Figura 3.14 Esquema de un motor de combustión interna de cuatro tiempos, con indicación de las partes que lo componen.

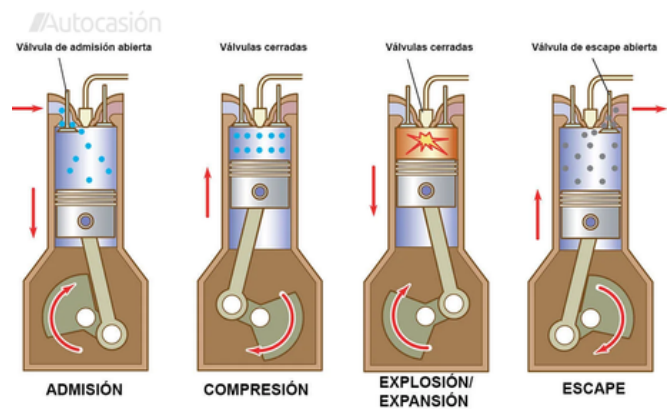


Figura 3.15 Etapas de un motor de cuatro tiempos

El **ciclo Otto**, que se aplica en motores de gasolina, describe el comportamiento termodinámico de un motor de encendido por chispa. Este ciclo consta de cuatro etapas fundamentales (figura 3.15): admisión, compresión, combustión-expansión y escape. Durante la compresión, la mezcla de aire y combustible se comprime dentro del cilindro y, posteriormente, se enciende mediante una chispa, lo que provoca una rápida expansión de los gases que empujan el pistón, generando trabajo mecánico.

La eficiencia de este ciclo depende en gran medida de la **relación de compresión**: a mayor relación de compresión, mayor eficiencia térmica. La relación de compresión  $r$  es la división del volumen máximo del cilindro  $V_{\text{máx}}$  (émbolo en el punto muerto inferior, alcanzado en etapa de admisión), entre el volumen mínimo  $V_{\text{mín}}$  (émbolo en el punto muerto superior en la etapa de compresión).

$$r = \frac{V_{\text{máx}}}{V_{\text{mín}}}$$



**Conoce más.**

En este video de Hidráulica y neumática (2021), se muestra cómo funciona el motor de combustión interna y las cuatro etapas del ciclo Otto.

Por otro lado, el **ciclo Diesel**, utilizado en motores de encendido por compresión, opera de manera similar, pero con diferencias clave en la inyección y la combustión del combustible. En este ciclo, el aire se comprime primero dentro del cilindro hasta alcanzar una temperatura lo suficientemente alta como para encender el combustible sin necesidad de una chispa.

La combustión ocurre de manera más controlada y a mayor presión, lo que permite que los motores Diesel sean más eficientes que los de gasolina. Su mayor eficiencia térmica se debe a la mayor relación de compresión y a que la combustión ocurre de manera progresiva, permitiendo un mejor aprovechamiento de la energía del combustible.

Desde el punto de vista termodinámico, ambos ciclos están limitados por la segunda ley de la termodinámica, la cual establece que ninguna máquina térmica puede convertir el 100% de la energía en trabajo útil. Gran parte de la energía se pierde en forma de calor a través de los gases de escape, la fricción interna y la refrigeración del motor. Por esta razón, en el diseño de motores modernos se busca reducir estas pérdidas mediante tecnologías como la recuperación de calor residual, sistemas de inyección más eficientes y materiales avanzados que minimicen la disipación de energía.

### 3.4.3 Sistemas de refrigeración y su relación con la termodinámica

Los **sistemas de refrigeración** son una aplicación clave de la termodinámica en la vida cotidiana y la industria. Su función principal es transferir calor desde un espacio frío a otro más caliente, utilizando un fluido de trabajo que cambia de fase en un ciclo de refrigeración. La termodinámica permite analizar y optimizar estos sistemas, asegurando que operen con la máxima eficiencia posible.

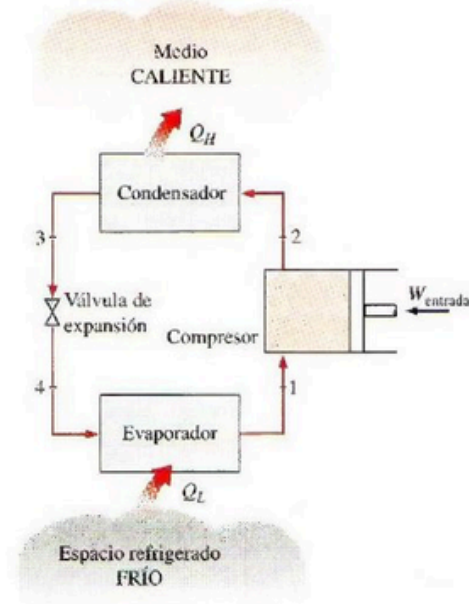


Figura 3.16 Etapas del ciclo de compresión de vapor





**Conoce más.**

En este video de ALBAÑILERÍA ,PLOMERÍA Y ELECTRICIDAD (2016), se muestra cómo funciona el sistema de aire acondicionado y observarás cómo se ven los componentes reales y cada una de las etapas del ciclo de compresión de vapor.

El principio de funcionamiento de un sistema de refrigeración se basa en el **ciclo de compresión de vapor** (figura 3.16), un proceso en el que un refrigerante circula a través de distintos componentes para absorber y liberar calor de manera controlada.

Un **refrigerante** es una sustancia utilizada en sistemas de refrigeración y aire acondicionado para absorber y transferir calor en un ciclo termodinámico. Su principal característica es su capacidad para cambiar de fase de líquido a gas (evaporación) y de gas a líquido (condensación) a temperaturas y presiones relativamente bajas. Estas características permiten el cambio de fase sin requerir grandes cantidades de energía para comprimir o expandir el fluido.

Inicialmente, el refrigerante entra al evaporador en estado de baja presión y temperatura (figura 3.16, del punto 4 al punto 1), donde absorbe calor del espacio que se desea enfriar y cambia de fase, pasando de líquido a vapor.

Luego, este vapor es aspirado por el compresor, donde se comprime, aumentando su presión y temperatura significativamente (figura 3.16, del punto 1 al punto 2). Al alcanzar esta nueva condición, el refrigerante se dirige al condensador (figura 3.16, del punto 2 al punto 3), donde cede el calor absorbido al ambiente y vuelve a cambiar de fase, convirtiéndose nuevamente en líquido. Finalmente, el refrigerante pasa por una válvula de expansión (figura 3.16, del punto 3 al punto 4), donde su presión y temperatura disminuyen antes de ingresar nuevamente al evaporador, repitiendo el ciclo. Este proceso es fundamental en aplicaciones como la refrigeración doméstica, la climatización de edificios y los sistemas de enfriamiento industrial, permitiendo mantener temperaturas controladas en distintos entornos con un consumo eficiente de energía.

Desde el punto de vista termodinámico, la eficiencia de un sistema de refrigeración está determinada por el **coeficiente de desempeño (COP)**, que mide la relación entre el calor extraído y el trabajo suministrado al compresor. Para mejorar la eficiencia, los ingenieros buscan optimizar las condiciones de presión y temperatura, minimizar las pérdidas de energía y utilizar refrigerantes con mejores propiedades termodinámicas.

## Amplía tus conocimientos

A continuación, se presentan referencias que te permitirán reforzar y ampliar tus conocimientos sobre termodinámica.

### Libros

📖 Muldberg, F. G. (2011). *Termodinámica para ingeniería*. CDMX, México: Trillas.

Este libro, escrito por Frederick M. Goldberg, está dirigido a estudiantes de ingeniería mecánica, eléctrica, electrónica y civil. Presenta los temas de manera rigurosa, con énfasis en las aplicaciones prácticas, e incluye problemas de diversos grados de dificultad para reforzar el aprendizaje.

📖 Moran, M. J. y Shapiro, H. N. (2004). *Fundamentos de termodinámica técnica (2.ª ed.)*. Barcelona, España: Reverté.

Este libro ofrece un análisis exhaustivo de la termodinámica técnica, combinando teoría con ejemplos prácticos y ejercicios para resolver. Es ampliamente utilizado tanto por estudiantes como por profesionales que buscan profundizar en sus conocimientos.

### Páginas web

🌐 Khan Academy: *Termodinámica*

Khan Academy ofrece una serie de lecciones en video y artículos sobre termodinámica, que abarcan desde conceptos básicos hasta aplicaciones más avanzadas.

- <https://es.khanacademy.org/science/physics/thermodynamics>
- <https://es.khanacademy.org/science/chemistry/thermodynamics-chemistry>
- <https://es.khanacademy.org/science/ap-chemistry/thermodynamics-ap>

🌐 Lira, A. (2018). *Introducción a conceptos termodinámicos y de conversión de energía*. Unidades de Apoyo para el Aprendizaje. CUAED-UNAM/Facultad de Arquitectura. [https://uapa.cuaed.unam.mx/sites/default/files/minisite/static/e36b4343-a671-47db-b534-f04de123b57a/Introduccion\\_conceptos\\_termodinamicos\\_conversion\\_energia/index.html](https://uapa.cuaed.unam.mx/sites/default/files/minisite/static/e36b4343-a671-47db-b534-f04de123b57a/Introduccion_conceptos_termodinamicos_conversion_energia/index.html)

Recurso educativo de la UNAM diseñado para proporcionar una introducción clara y estructurada a los principios fundamentales de la termodinámica.

🌐 UNAM (s. f.). *Termodinámica*. <https://www.unamenlinea.unam.mx/recurso/82242-termodinamica>

Material que aborda la termodinámica desde los conceptos básicos, como las leyes de los gases, la conservación de la energía, las máquinas térmicas y la ley de la entropía. Incluye además algunos videos explicativos que presentan los temas de manera didáctica.



## Videos

▶ ALBAÑILERÍA ,PLOMERÍA Y ELECTRICIDAD. (2016, 20 de noviembre). *Ciclo de refrigeración (aire acondicionado)* [Video]. YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=CoV6SuWeKYQ>

Video que explica el funcionamiento del sistema de aire acondicionado.

▶ Bobinando. (s. f.). 🔥 *TERMODINÁMICA DESDE CERO. (curso de termodinámica)* [Lista de reproducción]. YouTube. <https://www.youtube.com/playlist?list=PLMoIW3LDmn8knQkAxHiAES4gfr3hef7de>

Una serie de videos que cubre desde conceptos básicos hasta temas más avanzados en termodinámica. Es útil para aquellos que buscan una comprensión profunda y estructurada de la materia.

▶ EcologíaVerde. (2020, 3 de mayo). *ENERGÍA HIDRÁULICA 💧 ¿Es renovable? ¿Cómo funciona?* [Video]. YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=Z34TbQB79jE>

Video que explica el funcionamiento de una central hidroeléctrica.

▶ heysoymarvin. (2018, 8 de marzo). *El ciclo Rankine - ¿Cómo funciona una planta termoeléctrica?* [Video]. YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=Z1kf-Ad1Uos>

Video que muestra el funcionamiento de una planta termoeléctrica.

▶ Hidráulica y neumática. (2021, 25 de septiembre). *¿Cómo funciona el motor de combustión interna de un automóvil?* [Video]. YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=sRMBq--LVjk>

Video que muestra el funcionamiento de un motor de combustión interna, así como las cuatro etapas del ciclo Otto.

▶ QuantumFracture. (2015, 12 de marzo). *Las Leyes de la Termodinámica en 5 Minutos* [Video]. YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=Bvfn6eUHUAc>

Video educativo que ofrece una explicación sencilla y rápida de las leyes de la termodinámica, ideal para reforzar conceptos clave de manera visual.

▶ UCSC Physics. (2018, 13 de marzo). *Triple Point of Water* [Video]. YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=Juz9pVVsmQQ>

Video que muestra el punto triple del agua.



Capítulo 4

# Materiales en ingeniería



En el vasto campo de la ingeniería, la selección y el uso de materiales adecuados son fundamentales para el éxito de cualquier proyecto, ya sea en el diseño de estructuras, en la fabricación de componentes mecánicos, en la creación de sistemas mecatrónicos complejos, etcétera. Los materiales de ingeniería no solo definen la funcionalidad y la eficiencia de los productos, sino que también influyen en su durabilidad, seguridad y sostenibilidad.

Esta sección explora las propiedades y el comportamiento de los diferentes tipos de materiales utilizados en la ingeniería mecánica y mecatrónica. A lo largo del capítulo, los estudiantes descubrirán cómo las propiedades mecánicas, térmicas, eléctricas y químicas de los materiales determinan su idoneidad para diversas aplicaciones. Además, se analizan los métodos y criterios de selección de materiales, lo que permitirá a los estudiantes tomar decisiones informadas y optimizadas en el diseño y la manufactura de sistemas.

## 4.1 Conceptos fundamentales de los materiales

En el campo de la ingeniería, los materiales son la base sobre la cual se construyen estructuras, mecanismos y dispositivos. Comprender las propiedades y la clasificación de los materiales es esencial para cualquier ingeniero, ya que estas características determinan el rendimiento, la durabilidad y la eficiencia de los dispositivos. En esta sección se explora la clasificación de los materiales, sus propiedades fundamentales y cómo estos conceptos se aplican en la ingeniería mecánica y mecatrónica.

### 4.1.1 Clasificación de los materiales

Los materiales pueden clasificarse en varias categorías principales, cada una con sus propias características, ventajas y aplicaciones. A continuación, se presenta una descripción general de las principales clases de materiales que se utilizan en ingeniería.

#### Metales

Los metales son materiales sólidos que se caracterizan por su alta conductividad eléctrica y térmica, su capacidad para deformarse plásticamente (ductilidad) y su resistencia a la fractura.

**Aplicaciones:** estructuras de soporte, componentes de maquinaria, conductores eléctricos, piezas de automóviles, entre otros.

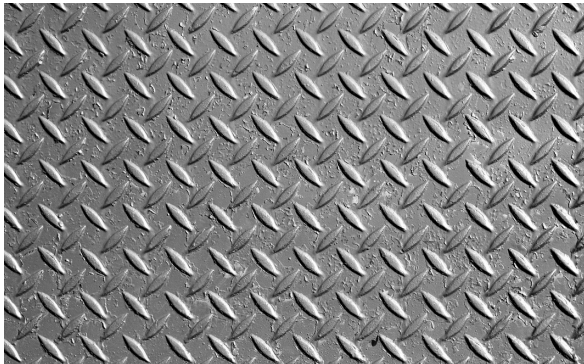


Figura 4.1 Chapa estriada de acero

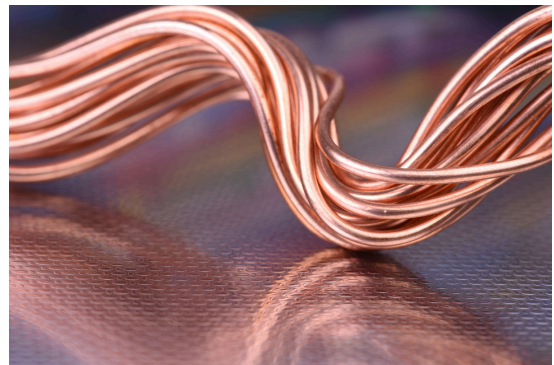


Figura 4.2 Alambre de cobre



Figura 4.3 Latas de aluminio



Figura 4.4 Implante de titanio

## Polímeros

Los polímeros son materiales compuestos por largas cadenas de moléculas orgánicas. Son conocidos por su ligereza, alta resistencia a la corrosión y versatilidad en el diseño.

**Aplicaciones:** piezas plásticas en electrodomésticos, carcasas de dispositivos electrónicos, piezas automotrices, envases.



Figura 4.5 Protectores de celular

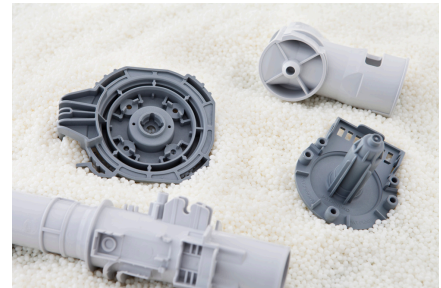


Figura 4.6 Piezas de automóviles



Figura 4.7 Envases de plástico



Figura 4.8 Carcasas plásticas de diferentes electrodomésticos

## Cerámicos

Los cerámicos son materiales inorgánicos no metálicos, que se caracterizan por su alta dureza, resistencia al desgaste y estabilidad a altas temperaturas. Sin embargo, suelen ser frágiles.

**Aplicaciones:** herramientas de corte, recubrimientos de alta temperatura, aislantes eléctricos, implantes médicos.

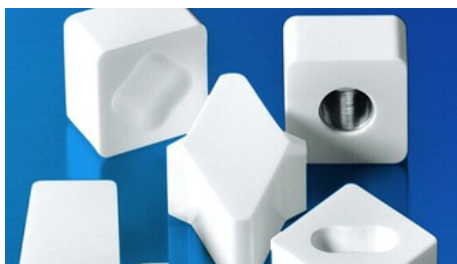


Figura 4.9 Inserto cerámico para torno (herramienta de corte)



Figura 4.10 Resistores cerámicos con potencia de 5 W

## Compuestos

Los compuestos son materiales formados por la combinación de dos o más materiales diferentes, resultando en propiedades superiores a las de los componentes individuales. Los compuestos suelen combinar una matriz (como un polímero) con un refuerzo (como fibras de vidrio o carbono).

**Aplicaciones:** estructuras aeronáuticas, componentes de automóviles de alto rendimiento, equipos deportivos, construcción civil.



Figura 4.11 Brazo robótico en fibra de carbono



Figura 4.12 Fibra de vidrio para recubrimiento

### 4.1.2 Propiedades mecánicas

Las propiedades mecánicas de los materiales describen cómo responden estos materiales ante fuerzas externas. Estas propiedades son cruciales para determinar la idoneidad de un material en aplicaciones específicas donde se requiere resistencia, durabilidad y seguridad.

#### Resistencia

La resistencia de un material es su capacidad para soportar fuerzas sin romperse o deformarse permanentemente. La resistencia puede ser a la tracción, a la compresión, a la cizalladura, entre otras.

**Ejemplo:** El acero estructural tiene alta resistencia a la tracción, lo que lo hace ideal para construir puentes y edificios.

#### Dureza

La dureza mide la capacidad de un material para resistir la indentación o el rayado. Es una indicación de la resistencia al desgaste.

**Ejemplo:** El carburo de tungsteno es extremadamente duro, lo que lo hace útil en herramientas de corte y perforación.



### Ductilidad

La ductilidad es la capacidad de un material para deformarse plásticamente sin romperse. Los materiales dúctiles pueden estirarse en hilos o formar láminas delgadas.

**Ejemplo:** El cobre es un material altamente dúctil, lo que lo hace ideal para la fabricación de cables eléctricos.

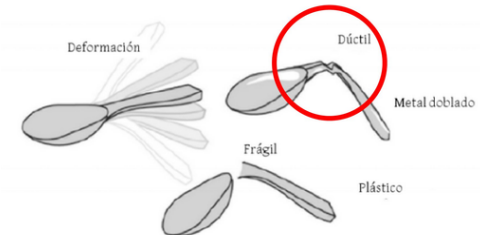


Figura 4.13 Ejemplo de comportamiento de material dúctil contra frágil

### Tenacidad

La tenacidad es la capacidad de un material para absorber energía antes de fracturarse. Es una combinación de resistencia y ductilidad.

**Ejemplo:** El titanio es tenaz, por lo que se utiliza en aplicaciones donde la resistencia a impactos y la capacidad de soportar condiciones extremas son cruciales, como en la industria aeroespacial.

### Elasticidad

La elasticidad es la capacidad de un material para regresar a su forma original después de ser deformado. Es un comportamiento importante en aplicaciones donde se requieren movimientos repetitivos o flexibilidad.

**Ejemplo:** Las ligas de goma son altamente elásticas, lo que permite su uso en aplicaciones donde se necesita flexibilidad y recuperación rápida.

## 4.1.3 Otras propiedades de los materiales

Además de las propiedades mecánicas, los materiales poseen otras propiedades que determinan su comportamiento en diferentes entornos y aplicaciones.

### Propiedades térmicas

**Conductividad térmica:** La capacidad de un material para conducir calor. Materiales como el cobre tienen alta conductividad térmica, lo que los hace útiles en disipadores de calor y sistemas de refrigeración.

**Expansión térmica:** La tendencia de un material a expandirse cuando se calienta. Este comportamiento es crítico en aplicaciones que implican cambios de temperatura, como en motores y estructuras que experimentan ciclos térmicos.



Figura 4.14 Materiales con diferente resistividad se utilizan para resistores con diferente resistencia.

### Propiedades eléctricas

**Conductividad eléctrica:** La capacidad de un material para conducir electricidad. Los metales como el cobre y el aluminio son excelentes conductores, y se utilizan en cables y componentes electrónicos.

**Resistividad:** La resistencia de un material al flujo de corriente eléctrica. Los materiales con alta resistividad, como los cerámicos, se utilizan como aislantes eléctricos.

### Propiedades ópticas

**Transparencia y opacidad:** La capacidad de un material para transmitir o bloquear la luz. Materiales como el vidrio son transparentes y se utilizan en ventanas y pantallas, mientras que otros, como los metales, son opacos y reflejan la luz.

**Índice de refracción:** La capacidad de un material para desviar la luz. Los materiales con un alto índice de refracción, como los lentes de vidrio, son esenciales en la óptica para enfocar y manipular la luz.

### Propiedades magnéticas

**Permeabilidad magnética:** La capacidad de un material para formar un campo magnético en su interior. Materiales como el hierro tienen alta permeabilidad y se utilizan en núcleos de transformadores y motores eléctricos.

**Susceptibilidad magnética:** La medida en que un material puede ser magnetizado. Los materiales ferromagnéticos, como el níquel, son altamente susceptibles al magnetismo y se utilizan en aplicaciones como imanes permanentes y memorias magnéticas.

### Propiedades químicas

**Resistencia a la corrosión:** La capacidad de un material para resistir la degradación química. El acero inoxidable es resistente a la corrosión, lo que lo hace ideal para aplicaciones en ambientes corrosivos, como en la construcción naval y la industria alimentaria.

**Reactividad química:** La tendencia de un material a reaccionar con otras sustancias. Los materiales altamente reactivos, como el magnesio, deben manejarse con cuidado en ambientes donde pueden ocurrir reacciones indeseadas.

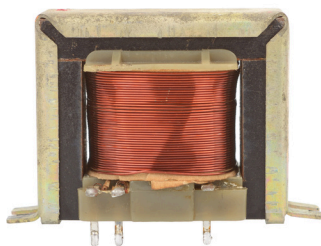


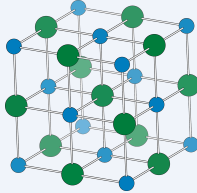
Figura 4.15 Los transformadores utilizan la permeabilidad magnética para subir o bajar el voltaje de una señal eléctrica.



Figura 4.16 Elegir materiales que sean resistentes a la corrosión es importante si la pieza que se fabrica estará expuesta al ambiente.

## Proyecto 4.1

### Construcción de un modelo de clasificación de materiales con ejemplos de aplicaciones reales.



Este proyecto te permitirá explorar cómo se seleccionan los materiales en escenarios reales de la ingeniería. A partir del estudio de sus propiedades y del análisis de aplicaciones concretas, podrás identificar qué características hacen que cada material sea adecuado para ciertos usos.

#### Objetivo del proyecto

Desarrollar un modelo de clasificación de materiales que incluya ejemplos prácticos de su uso en aplicaciones reales, a través de un ejercicio que permitirá aplicar los conceptos aprendidos sobre la clasificación y las propiedades de los materiales en situaciones del mundo real.

#### Instrucciones

1. Seleccionar al menos un material de cada categoría (metal, polímero, cerámico y compuesto).
2. Investigar y describir las propiedades fundamentales de cada material seleccionado, incluyendo sus propiedades mecánicas, térmicas, eléctricas y químicas.
3. Para cada material seleccionado, investigar y documentar al menos una aplicación práctica en ingeniería mecánica o mecatrónica. La investigación debe enfocarse en cómo las propiedades específicas del material lo hacen adecuado para su aplicación.
4. Crear un modelo visual (como un póster, una presentación digital o un informe ilustrado) que clasifique los materiales y muestre sus aplicaciones reales.
5. El modelo debe destacar las propiedades clave que hacen que cada material sea adecuado para sus aplicaciones específicas, utilizando imágenes, diagramas y descripciones.

#### Análisis de resultados

Reflexionar sobre el proceso de selección y clasificación de los materiales y sobre cómo las propiedades de los materiales influyeron en su aplicación en los casos estudiados.

## 4.2 Comportamiento mecánico de los materiales

El comportamiento mecánico de los materiales se refiere a cómo estos responden ante la aplicación de fuerzas o cargas. Entender este comportamiento es crucial para seleccionar y diseñar materiales que puedan soportar las condiciones operativas a las que serán sometidos en la ingeniería. En esta sección se exploran conceptos clave como la elasticidad, la plasticidad, los diferentes tipos de ensayos mecánicos y los fenómenos de fractura y fatiga.

### 4.2.1 Elasticidad y plasticidad

La **elasticidad** es la capacidad de un material para deformarse bajo la aplicación de una fuerza y regresar a su forma original cuando se retira dicha fuerza. Es una propiedad fundamental en aplicaciones donde se requiere flexibilidad y recuperación rápida después de la deformación. Por ejemplo, los resortes en sistemas de suspensión automotriz son un claro ejemplo de materiales que operan en el régimen elástico, lo que permite que el vehículo absorba impactos y recupere su forma original.

La **plasticidad** es la capacidad de un material para deformarse permanentemente cuando se aplica una fuerza que excede su límite elástico. Los materiales que se deforman plásticamente no regresan a su forma original cuando se retira la fuerza. Por ejemplo, en la manufactura de metales, como el estampado y la forja, se aprovecha la plasticidad para dar forma a los componentes metálicos.

### 4.2.2 Ensayos mecánicos

Los ensayos mecánicos son métodos experimentales utilizados para determinar las propiedades mecánicas de los materiales. Estos ensayos son esenciales para caracterizar cómo un material se comportará bajo diferentes tipos de cargas y condiciones. A continuación, se describen algunos de los ensayos más comunes.

#### Ensayo de tracción

En este ensayo, una muestra del material se estira hasta la fractura mientras se mide la fuerza aplicada y el alargamiento. El ensayo de tracción (traccionar se puede entender como estirar) permite determinar propiedades como la resistencia a la tracción, el módulo de elasticidad (en palabras más coloquiales cuánto se estirará el material dependiendo de la fuerza aplicada) y la ductilidad.

**Aplicación:** Es crucial en la selección de materiales para componentes estructurales, donde la resistencia a la tracción es una propiedad crítica.



#### Conoce más.

En este video de Ingeniosos (2020), se explica la prueba de tracción; prueba que se utiliza para determinar la resistencia a la tracción de diferentes materiales.



Figura 4.17 Probetas de acero antes (probeta superior) y después (probeta inferior) del ensayo de tracción. Mientras más resistente sea el material a la tracción, la longitud de la zona estrechada será mayor.



Conoce más.

En este video de Ingeniosos (2021), se observan los diferentes ensayos de dureza y sus características.

### Ensayo de dureza

La dureza de un material se mide mediante la resistencia que ofrece a la penetración de un objeto más duro. Los métodos comunes incluyen el ensayo de Brinell, Rockwell y Vickers. En forma general, los métodos consisten en penetrar una muestra del material y dependiendo de las características geométricas que deje la penetración (como la profundidad) se determina qué tan duro es el material. Mientras mayor sea la marca, el material es más blando; mientras menor sea el tamaño de la marca, el material es más duro.

**Aplicación:** La dureza es un indicador de la resistencia al desgaste y es una propiedad importante en herramientas de corte y superficies sometidas a abrasión.



Conoce más.

En este video de Ingeniosos (2022a), se explica el ensayo de impacto Charpy y sus características.

### Ensayo de impacto

Este ensayo mide la capacidad de un material para absorber energía bajo condiciones de impacto (recibir una gran fuerza a alta velocidad), lo que se traduce en su **resiliencia** (energía acumulada en el material debido al impacto antes de la rotura). Se realiza comúnmente utilizando el péndulo de Charpy o Izod.

**Aplicación:** Es fundamental en la evaluación de materiales que estarán sujetos a impactos, como en la fabricación de parachoques automotrices y cascos de protección.

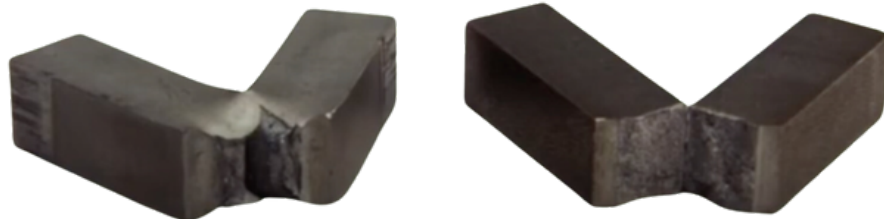


Figura 4.18 Un material con alta resiliencia presenta deformación ante el impacto antes de romperse (probeta de la izquierda), mientras que un material con baja resiliencia se deforma poco ante el impacto antes de romperse (probeta de la derecha).



Conoce más.

En este video de Ingeniosos (2022b), se explica el ensayo de fluencia y sus características.

### Ensayo de fluencia o prueba Creep

Es la deformación lenta y progresiva de un material sometido a una carga constante durante un período prolongado, generalmente a temperaturas elevadas. La prueba de creep mide la tasa de deformación en función del tiempo.

**Aplicación:** Es crucial en la selección de materiales para turbinas de gas, motores a reacción y otras aplicaciones donde los componentes están expuestos a altas temperaturas durante largos períodos.

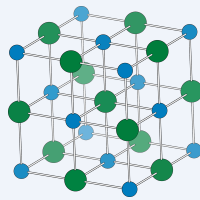
### 4.2.2 Fractura y fatiga

La **fractura** es la separación de un material en dos o más partes bajo la aplicación de una carga. Puede ocurrir de manera dúctil (con deformación previa significativa) o frágil (con poca o ninguna deformación previa). Por ejemplo, la fractura frágil es común en cerámicos y algunos metales a bajas temperaturas, donde la falta de deformación plástica conduce a una rotura abrupta.

La **fatiga** es la debilitación de un material debido a la aplicación repetida de cargas cíclicas. Con el tiempo, incluso cargas menores pueden causar la iniciación y propagación de grietas, lo que lleva eventualmente a la falla del material. Por ejemplo, la fatiga es una causa común de falla en componentes como ejes, resortes y piezas de aeronaves, donde las cargas repetidas son frecuentes.

## Proyecto 4.2

### Exploración del comportamiento mecánico de materiales



En este proyecto se realizará una serie de pruebas caseras que permitirán observar cómo responden distintos materiales cuando se someten a fuerzas y condiciones simples del entorno.

#### Objetivo del proyecto

Explorar el comportamiento mecánico de diferentes materiales utilizando métodos caseros. A través de pruebas sencillas, se podrán observar y analizar propiedades como la elasticidad, la plasticidad, la dureza y la tenacidad de una manera práctica y accesible.

#### Materiales

- Regla de metal y regla de plástico: para evaluar la elasticidad y la plasticidad.
- Barras de plastilina o arcilla: para observar la deformación plástica.
- Clavos y martillo: para probar la dureza de diferentes materiales.
- Piezas de madera, plástico y metal.

- Pesas pequeñas o latas llenas de agua: para aplicar carga en las pruebas de elasticidad.
- Gomas elásticas de diferentes tipos: para evaluar la elasticidad bajo cargas repetitivas.
- Cinta métrica o regla graduada: para medir deformaciones.

Por favor, ten en cuenta que los materiales utilizados en esta práctica podrían dañarse o volverse inutilizables.

## Instrucciones

### Prueba de elasticidad:

- Materiales: regla de metal, regla de plástico y pesas pequeñas.
- Procedimiento: coloca una de las reglas sobre el borde de una mesa, con una parte sobresaliendo. Aplica una pequeña carga (como una pesa o lata o aplica tú mismo la fuerza) en el extremo sobresaliente y observa la deformación. Retira la carga y observa si la regla vuelve a su forma original. Repite con la otra regla.
- Observaciones: compara la elasticidad de la regla de metal y la de plástico. Discute cómo estos materiales podrían comportarse en aplicaciones reales.

### Prueba de plasticidad:

- Materiales: barras de plastilina o arcilla.
- Procedimiento: aplica fuerza a las barras de plastilina o arcilla, doblándolas y estirándolas. Observa cómo se deforman y si recuperan su forma original.
- Observaciones: discute cómo la deformación plástica es diferente de la elástica y cómo esta propiedad se utiliza en procesos como la modelación y fabricación de piezas.

### Prueba de dureza:

- Materiales: clavos, martillo, bloques de madera, plástico y metal.
- Procedimiento: usa el martillo para clavar el clavo en los diferentes bloques de material. Observa cuánta fuerza se requiere para penetrar cada material.
- Observaciones: compara la dureza de los materiales y discute qué aplicaciones serían adecuadas para cada uno, basado en su resistencia a la penetración.

### Prueba de tenacidad:

- Materiales: gomas elásticas y pesas pequeñas.
- Procedimiento: estira la goma elástica aplicando peso progresivamente hasta que se rompa. Repite la prueba con gomas de diferentes grosores o materiales.
- Observaciones: discute la capacidad de las gomas para absorber energía antes de romperse, comparando la tenacidad de diferentes materiales.

## Análisis de resultados

Elasticidad y plasticidad: reflexiona sobre las diferencias entre la recuperación de forma (elasticidad) y la deformación permanente (plasticidad).

Dureza: considera cómo la dureza de un material influye en su resistencia al desgaste y en aplicaciones donde se requiere resistencia a la penetración.

Tenacidad: analiza cómo la capacidad de un material para absorber energía antes de fracturarse es crucial en aplicaciones de seguridad y protección.

## 4.3 Selección de materiales en ingeniería

La selección de materiales es un proceso crucial en el diseño y la fabricación de productos en ingeniería. La elección del material adecuado no solo afecta el rendimiento y la durabilidad del producto, sino que también tiene implicaciones significativas en el costo, la sustentabilidad y la capacidad de fabricación. Esta sección aborda los criterios fundamentales que los ingenieros deben considerar al seleccionar materiales, así como las herramientas y metodologías que facilitan este proceso.

### 4.3.1 Criterios de selección de materiales

La selección de materiales en ingeniería implica un análisis cuidadoso de varias características y condiciones operativas para garantizar que el material elegido cumpla con los requisitos del proyecto. A continuación, se presentan los principales criterios que guían este proceso.

**Propiedades mecánicas:** la resistencia, la dureza, la ductilidad y la tenacidad son propiedades mecánicas clave que determinan cómo se comportará un material bajo diferentes aplicaciones de fuerzas. Por ejemplo, en la construcción de puentes o estructuras portantes, es esencial seleccionar materiales con alta resistencia a la tracción y a la compresión.

**Propiedades térmicas:** los materiales deben seleccionarse en función de su conductividad térmica, expansión térmica y capacidad calorífica, especialmente en aplicaciones donde las fluctuaciones de temperatura son críticas. Por ejemplo, los materiales con baja expansión térmica son preferibles en componentes que operan en ambientes con cambios térmicos significativos para evitar deformaciones.



**Costo:** el costo del material es un factor determinante en el proceso de selección. No solo se considera el costo inicial de adquisición, sino también los costos asociados con la fabricación, el mantenimiento y el ciclo de vida del producto. Por ejemplo, aunque los materiales compuestos pueden ser más costosos que los metales convencionales, su ligereza y durabilidad pueden justificar el costo en aplicaciones donde la eficiencia energética y la vida útil son prioritarias.

**Disponibilidad:** la disponibilidad del material en el mercado también juega un papel importante. Los ingenieros deben asegurarse de que el material seleccionado sea fácilmente asequible en las cantidades necesarias y que pueda ser adquirido dentro del plazo del proyecto.

**Resistencia a la corrosión:** en aplicaciones donde los materiales están expuestos a ambientes agresivos, como ambientes marinos o industriales, es esencial elegir materiales que resistan la corrosión para prolongar la vida útil del producto. Por ejemplo, el acero inoxidable es una opción común para componentes que deben resistir la oxidación y el ataque químico.

**Estabilidad térmica:** la estabilidad térmica se refiere a la capacidad de un material para mantener sus propiedades mecánicas y físicas bajo temperaturas extremas. Los materiales que deben operar a altas temperaturas, como los utilizados en motores de aeronaves, requieren una alta estabilidad térmica para evitar fallos por deformación o degradación.

**Durabilidad:** la durabilidad de un material es su capacidad para resistir el desgaste, la fatiga y otros tipos de fallas a lo largo del tiempo. En aplicaciones como el diseño de puentes o edificios, la durabilidad es un criterio esencial para garantizar la seguridad y una larga vida útil de la estructura.

#### 4.3.2 Herramientas y métodos de selección

Para ayudar en el proceso de selección de materiales, los ingenieros utilizan diversas herramientas y metodologías que permiten comparar diferentes materiales en función de múltiples criterios y seleccionar la opción más adecuada para una aplicación específica.

##### Diagramas de Ashby

El diagrama de Ashby (un ejemplo de varios tipos de diagramas que presenta Ashby es el de la figura 4.19) es una herramienta gráfica que permite a los ingenieros visualizar y comparar las propiedades de diferentes materiales. Este diagrama presenta pares de propiedades (como resistencia y densidad) en un gráfico de dos ejes, lo que permite identificar rápidamente qué materiales cumplen con los requisitos de diseño.

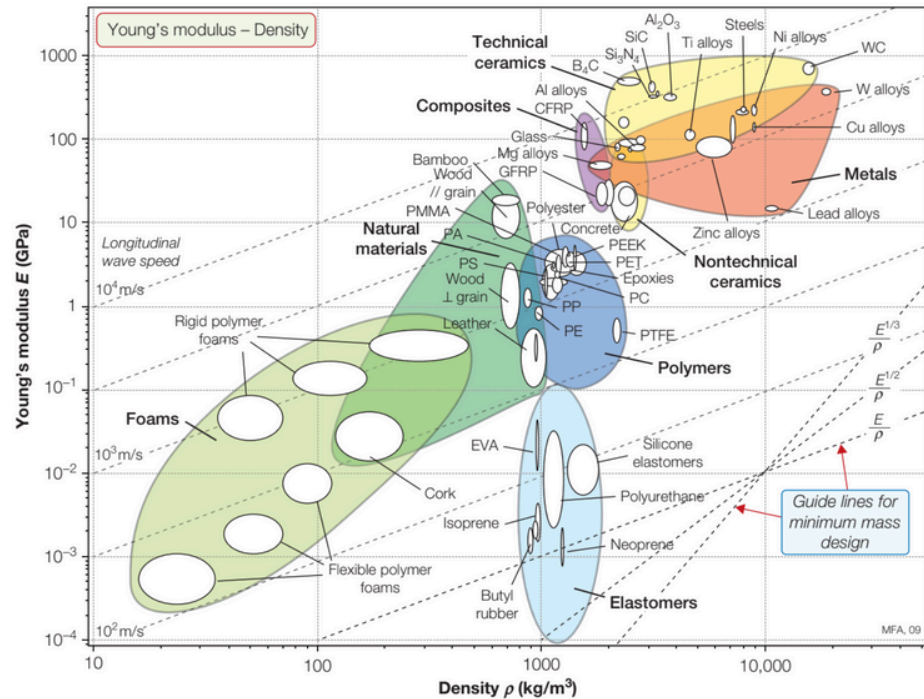


Figura 4.19 Diagrama de Ashby: densidad - módulo de Young

Por ejemplo, si un ingeniero necesita seleccionar un material que sea ligero pero resistente, puede usar el diagrama de Ashby (figura 4.19) densidad - módulo de Young para identificar materiales que se encuentran en la región deseada del gráfico, facilitando la comparación entre metales, polímeros y compuestos.

### Optimización de materiales para múltiples criterios

La selección de materiales a menudo implica encontrar un equilibrio entre múltiples propiedades y restricciones. La optimización de múltiples criterios es un enfoque sistemático que permite evaluar y comparar materiales en función de varios parámetros simultáneamente, como el costo, el rendimiento y la sostenibilidad.

Una técnica común es asignar pesos a diferentes criterios según su importancia relativa y calcular un puntaje total para cada material. Esta metodología permite priorizar las propiedades más críticas para la aplicación específica y tomar decisiones informadas sobre la selección del material.

## Caso de estudio

### Selección de materiales para el chasis de un automóvil eléctrico

Imaginemos que un ingeniero está diseñando un chasis para un vehículo eléctrico ligero. El objetivo es seleccionar un material que sea ligero, resistente y duradero, a la vez que mantenga los costos bajo control. El chasis debe ser capaz de soportar las cargas y tensiones a las que estará sometido durante la operación del vehículo, incluyendo impactos, vibraciones y corrosión debido a la exposición a diferentes condiciones climáticas.

#### Detalles del caso

**Ligereza:** dado que el chasis es parte de un vehículo eléctrico, la reducción de peso es crucial para maximizar la eficiencia energética y la autonomía del vehículo.

**Resistencia a la tracción:** el material debe tener una alta resistencia a la tracción para soportar las fuerzas dinámicas durante la conducción.

**Resistencia a la corrosión:** el chasis estará expuesto a condiciones ambientales que pueden incluir humedad, sal en las carreteras y cambios de temperatura, por lo que la resistencia a la corrosión es un factor clave.

**Costo y disponibilidad:** es importante que el material seleccionado sea rentable y esté disponible en el mercado en las cantidades necesarias para la producción en serie.

#### Especificaciones del chasis:

- Peso máximo del vehículo: 1000 kg.
- Esfuerzos soportados: 25 GPa.
- Vida útil estimada: 10 años.
- Condiciones ambientales: exposición a humedad, sal en carreteras y cambios de temperatura.

#### Aplicación de conocimientos

Se puede utilizar el diagrama de Ashby para comparar los materiales en términos de módulo de Young (resistencia a la tracción) y densidad. Los materiales más cercanos a la esquina superior izquierda del diagrama son los más deseables para aplicaciones ligeras y resistentes.

En el diagrama de Ashby se marca una línea en el límite de 25 GPa en el módulo de Young (véase la figura 4.19); solo los materiales con módulo de Young superior a este valor pueden ser utilizados, para cumplir con la especificación.

- Aluminio (6061-T6): Ofrece una buena combinación de ligereza y resistencia, con una densidad de 2700 kg/m<sup>3</sup> y una resistencia a la tracción de 69 GPa. Es una opción equilibrada y tiene una buena resistencia a la corrosión.
- Acero de alta resistencia: Aunque tiene una resistencia a la tracción alta (200 GPa), su densidad es significativamente mayor (7850 kg/m<sup>3</sup>), lo que aumenta considerablemente el peso del chasis.
- Fibra de carbono: Es el material más ligero y resistente, con una densidad de solo 1600 kg/m<sup>3</sup> y una resistencia a la tracción de 500 MPa. Sin embargo, su costo es extremadamente alto (\$25/kg consultado en agosto de 2024), lo que puede ser prohibitivo para la producción en masa.

Material	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	Resistencia a la tracción	Resistencia a la corrosión	Costo (\$/kg)
Aluminio 6061-T6	2700	310	Buena	2.50
Acero de alta resistencia	7850	550-700	Moderada	1
Fibra de carbono	1600	600-1000	Excelente	25

Tabla 4.1 Propiedades de los materiales que se desean comparar

Cada material será calificado en una escala de 1 a 10, con pesos asignados a cada criterio según su importancia.

**Ligereza (40 %):** la ligereza se evalúa a partir de la densidad del material. A menor densidad, mayor será la puntuación.

- Fibra de Carbono: 1600 kg/m<sup>3</sup> → Puntaje: 10
- Aluminio: 2700 kg/m<sup>3</sup> → Puntaje: 8
- Acero de Alta Resistencia: 7850 kg/m<sup>3</sup> → Puntaje: 2

**Resistencia a la tracción (30 %):** la resistencia a la tracción es clave para garantizar que el material pueda soportar las fuerzas a las que estará sometido el chasis.

- Fibra de Carbono: 600-1000 MPa → Puntaje: 9 (resistencia promedio de 800 MPa)
- Acero de Alta Resistencia: 550-700 MPa → Puntaje: 7
- Aluminio: 310 MPa → Puntaje: 4

**Resistencia a la corrosión (20 %):** la resistencia a la corrosión es fundamental para prolongar la vida útil del chasis en ambientes hostiles.

- o Fibra de Carbono: Excelente → Puntaje: 10
- o Aluminio: Buena → Puntaje: 8
- o Acero de Alta Resistencia: Moderada → Puntaje: 5

**Costo (10 %):** el costo es un factor importante en la producción a gran escala.

- o Acero de Alta Resistencia: 1.00 USD/kg → Puntaje: 10
- o Aluminio: 2.50 USD/kg → Puntaje: 7
- o Fibra de Carbono: 25.00 USD/kg → Puntaje: 1

Material		Aluminio 6061-T6		Acero de alta resistencia		Fibra de carbono	
Ligereza	0.40	8	3.2	2	0.8	10	4
Resistencia a la tracción	0.30	4	1.2	7	2.1	9	2.7
Resistencia a la corrosión	0.20	8	1.6	5	1	10	2
Costo	0.10	7	0.7	10	1	1	0.1
Puntaje			6.7		4.9		8.8

Tabla 4.2 Propiedades de los materiales evaluados, la calificación para cada propiedad se multiplica por el peso asignado a cada propiedad.

En la evaluación final, la fibra de carbono es la mejor calificada (8.8); sin embargo, por cuestión de costos se elige el segundo mejor, es decir, el aluminio 6061-T6 (6.7).

## 4.4 Análisis de fallas en materiales

El análisis de fallas en los materiales es un proceso esencial para comprender las causas subyacentes de fallas en componentes o estructuras. A través de este análisis, los ingenieros pueden prevenir futuras fallas, mejorar el diseño y optimizar la selección de materiales. Esta sección explora los mecanismos comunes de falla, las técnicas de análisis y un caso de estudio sobre el análisis de fallas en un componente mecánico crítico.

### 4.4.1 Mecanismos comunes de falla

Los materiales pueden fallar de diversas maneras, dependiendo de las condiciones de servicio y las propiedades del material. Los mecanismos de falla más comunes se describen a continuación.

#### Falla por fatiga

La fatiga ocurre cuando un material se debilita debido a la aplicación repetida de cargas cíclicas, incluso si estas cargas son menores que la resistencia máxima del material. Con el tiempo, las cargas cíclicas pueden iniciar pequeñas grietas en el material, las cuales eventualmente se propagan hasta causar una falla catastrófica.

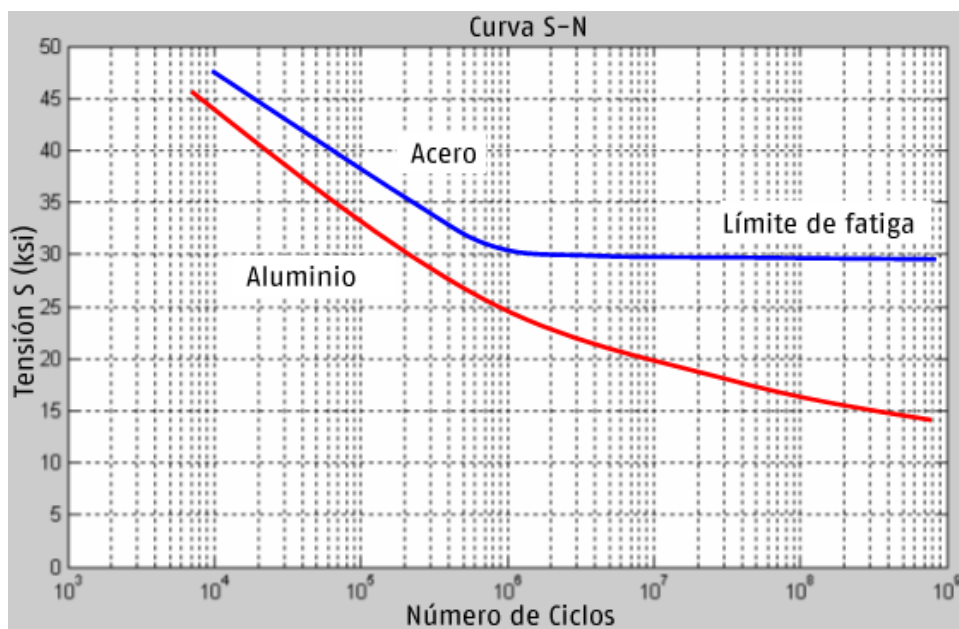


Figura 4.20 Curva S-N, donde se grafica el número de ciclos que soporta el acero y el aluminio a cierto valor de tensión antes de romperse.

La figura 4.20 muestra una curva característica obtenida en pruebas de fatiga para diferentes materiales. Esta curva indica el número de ciclos de aplicación repetida de una fuerza antes de que el material se fracture.



Conoce más.

En este video de Ingeniosos (2023), se muestra la falla por fatiga en los materiales.

En el gráfico, se puede observar que ciertos materiales, como el acero, presentan un comportamiento en el que, si la fuerza aplicada se mantiene por debajo de un valor crítico, la curva se estabiliza, es decir, el material no fallará por fatiga sin importar cuántos ciclos de carga se apliquen.

Por otro lado, existen materiales, como el aluminio, que no presentan este umbral. En estos casos, eventualmente, el material fallará por fatiga, incluso con cargas muy pequeñas, siempre que se apliquen suficientes ciclos de carga.

#### Falla por fractura

La fractura se refiere a la separación de un material en dos o más partes debido a la aplicación de una carga excesiva. La fractura puede ser de dos tipos: **dúctil**, que implica una deformación considerable antes de romperse, o **frágil**, en la cual ocurre sin apenas deformación.

#### Falla por creep (deformación lenta)

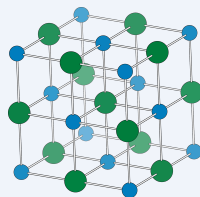
El creep es un proceso de deformación lenta y progresiva bajo una carga constante, generalmente a temperaturas elevadas. Ocurre principalmente en materiales metálicos cuando se exponen a tensiones y temperaturas cercanas a su punto de fusión durante largos períodos.

#### Falla por corrosión

La corrosión es la degradación química de un material, generalmente debido a reacciones con el entorno. Puede debilitar gravemente la integridad estructural de los materiales, especialmente en metales.

## Proyecto 4.3

### Simulación de mecanismo de falla



Este proyecto está diseñado para que puedas observar y experimentar los mecanismos de falla (fatiga, fractura, creep y corrosión) utilizando materiales comunes. A través de actividades sencillas, se observará cómo los materiales se debilitan o fallan bajo condiciones de carga y ambiente.

#### Objetivos del proyecto

- Observar cómo ocurre la fatiga en un material sometido a cargas repetidas.
- Identificar las diferencias entre fractura dúctil y fractura frágil en diferentes materiales.
- Simular el fenómeno de creep en un material plástico sometido a una carga constante.
- Observar la corrosión en metales comunes cuando están expuestos a diferentes ambientes.

## Materiales

- Clips de papel metálico o alambre para observar fatiga.
- Palitos de madera (de paleta o brochetas) para fractura dúctil y frágil.
- Bolsa de plástico resistente (como las de supermercado) y una botella llena de agua para simular *creep*.
- Clavos metálicos, sal y vinagre para la prueba de corrosión.

## Instrucciones

### Simulación de falla por Fatiga

**Materiales:** clip de papel o alambre metálico delgado.

**Procedimiento:**

1. Dobra un clip de papel (o un trozo de alambre) hacia atrás y adelante varias veces en el mismo punto.
2. Observa cómo el metal comienza a debilitarse progresivamente en la zona donde se aplica la carga repetida.
3. Registra cuántos ciclos de doblado son necesarios hasta que el material se rompa.

**Análisis:** explica cómo este comportamiento simula la fatiga que ocurre en componentes mecánicos cuando están sometidos a cargas cíclicas. Reflexiona sobre cómo se relaciona con el uso de piezas de maquinaria sometidas a vibraciones o cargas repetidas.

### Simulación de falla por fractura (dúctil y frágil)

**Materiales:** Palitos de madera (de paleta o brochetas).

**Procedimiento:**

1. Toma un palito de madera y dóblalo lentamente hasta que se rompa. Este será un ejemplo de fractura dúctil, ya que notarás que se deformará ligeramente antes de romperse.
2. Luego, toma otro palito y aplícale una fuerza brusca (rápida), tratando de romperlo de un golpe. En este caso, observarás una fractura frágil, ya que el palito se rompe de manera abrupta y sin deformarse previamente.

**Análisis:** discute las diferencias entre las dos fracturas, cómo se observan en materiales reales, y en qué tipo de aplicaciones mecánicas se pueden esperar estos tipos de falla.

### Simulación de falla por creep (deformación lenta)

**Materiales:** Bolsa de plástico resistente (tipo supermercado) y botella llena de agua o peso similar.

**Procedimiento:**

1. Coloca una botella llena de agua en una bolsa de plástico resistente, colgándola de algún lugar seguro donde pueda permanecer sin moverse durante un largo período de tiempo.
2. Marca la posición inicial de la base de la bolsa y deja la botella colgada durante varias horas o incluso un día.
3. Después del tiempo designado, observa si la bolsa se ha deformado (alargado) debido a la carga constante.



**Análisis:** explica cómo el plástico experimenta *creep* bajo una carga constante, especialmente cuando la temperatura ambiente es alta. Relaciona este fenómeno con componentes de ingeniería que operan a temperaturas elevadas, como turbinas o motores.

### **Simulación de falla por corrosión**

#### **Materiales:**

- Clavos de hierro o acero
- Vasos de vidrio o plástico
- Sal, vinagre y agua

#### **Procedimiento:**

1. Llena un vaso con agua y disuelve sal en ella.
2. Llena otro vaso con vinagre.
3. Coloca un clavo en cada solución y deja un tercer clavo expuesto al aire como control.
4. Observa los clavos cada día durante una semana para ver si hay signos de corrosión (formación de óxido).

**Análisis:** reflexiona sobre cómo diferentes ambientes (salino, ácido o expuesto al aire) aceleran la corrosión en los metales. Discute por qué la corrosión es un problema crítico en aplicaciones marinas o industriales y cómo puede evitarse mediante revestimientos y otros métodos.

## **4.5 Innovación en materiales de ingeniería**

El campo de los materiales de ingeniería está en constante evolución, con el desarrollo de nuevos materiales y tecnologías que abren las puertas a soluciones más eficientes, sostenibles y personalizables. En esta sección, se exploran algunos de los materiales avanzados más interesantes, las tendencias actuales en la investigación de materiales y un caso de estudio que destaca la evaluación de materiales innovadores para el desarrollo de sistemas en la ingeniería mecánica y mecatrónica.

### **4.5.1 Materiales avanzados y sus aplicaciones**

Hoy en día, los ingenieros tienen a su disposición materiales que parecen sacados de ciencia ficción. Desde materiales que pueden "pensar" y responder a su entorno, hasta aquellos que están diseñados a escala nanométrica para tener propiedades únicas, los materiales avanzados están transformando el diseño y la fabricación en muchos campos. Aquí se presentan tres tipos de materiales avanzados y sus aplicaciones más interesantes.

#### **Materiales inteligentes**

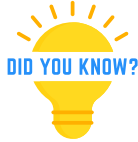
Los materiales inteligentes tienen la capacidad de cambiar sus propiedades físicas (como forma, dureza, color o conductividad) en respuesta a estímulos externos como temperatura, presión, campo eléctrico o magnético.



**Conoce más.**

En este video de Cienciabit: Ciencia y Tecnología (2022), se muestra cómo funciona el material Nitinol, el cual tiene memoria de forma.

Estos materiales se usan en robótica, prótesis activas, sensores y arquitectura adaptativa. Por ejemplo, en la industria aeronáutica, las "aleaciones con memoria de forma" pueden cambiar su estructura en respuesta a la temperatura, permitiendo una adaptación a las condiciones del vuelo sin intervención mecánica.



**¿Sabías que algunos materiales inteligentes pueden incluso "recordar" su forma original después de ser deformados?** Este fenómeno se conoce como efecto memoria, y se utiliza en dispositivos médicos como stents, que se expanden cuando se insertan en el cuerpo.

#### Materiales nanoestructurados

Los materiales nanoestructurados están diseñados a nivel nanométrico (una milmillonésima parte de un metro). A esta escala, los materiales pueden tener propiedades significativamente diferentes a las de su versión en tamaño macroscópico, como mayor resistencia, ligereza o conductividad.

Un ejemplo clásico son los nanomateriales en los recubrimientos antiadherentes o en las baterías de próxima generación. Los nanotubos de carbono, que son increíblemente ligeros y más fuertes que el acero, se usan para mejorar la resistencia de materiales compuestos en la industria aeroespacial y automotriz.



**¡Un nanotubo de carbono es tan ligero que puedes levantar una estructura hecha de ellos con solo un dedo, pero es más resistente que el acero!** Además, los nanomateriales están revolucionando la medicina, permitiendo la entrega de medicamentos directamente a las células dañadas.

#### Materiales biodegradables

Estos materiales están diseñados para descomponerse de manera natural en el ambiente, reduciendo así el impacto ambiental. Están compuestos de polímeros naturales o sintéticos que se degradan bajo la acción de microorganismos.

Se utilizan principalmente en embalajes sostenibles, dispositivos médicos temporales (como suturas o implantes que se disuelven una vez que cumplen su función) y en la agricultura (bioplásticos y textiles biodegradables). Estos materiales son esenciales en la transición hacia una economía circular y sustentable.

¡Algunos bioplásticos pueden degradarse en menos de seis meses, comparado con los plásticos convencionales que pueden tardar hasta 1000 años en desaparecer! Un avance enorme en la lucha contra los residuos plásticos.

## Amplía tus conocimientos

A continuación, se presentan referencias que te permitirán reforzar y ampliar tus conocimientos sobre materiales en ingeniería.

### Libros

📖 Ashby, M. F. y Jones, D. R. H. (2012). *Engineering Materials 1: An Introduction to Properties, Applications and Design* (4th ed.). Barcelona, España: Reverté.

Este libro es una referencia clave para los conceptos fundamentales de los materiales y su aplicación en ingeniería.

📖 Callister, W. D. y Rethwisch, D. G. (2018). *Materials Science and Engineering: An Introduction* (10th ed.). Hoboken, Estados Unidos: Wiley.

Un libro clásico que cubre una amplia gama de temas, desde los conceptos básicos hasta las aplicaciones avanzadas de materiales.

📖 Dieter, G. E. y Schmidt, L. C. (2013). *Engineering Design* (5th ed.). New York, Estados Unidos: McGraw-Hill.

Excelente referencia para la selección de materiales y el proceso de diseño, incluyendo metodologías de optimización y casos prácticos.

📖 Jones, R. (1998). *Mechanics of Composite Materials*. New York, Estados Unidos: Taylor & Francis.

Este libro profundiza en los materiales compuestos, abordando tanto los principios teóricos como las aplicaciones prácticas.

### Artículos académicos

📄 Malíková, L., Benešová, A., Khazali, M. A. y Seitzl, S. (2024). Fatigue behavior of high strength steels under various levels of corrosion. *Procedia Structural Integrity*, 52, 376-381. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2023.12.037>

Un artículo que analiza en profundidad el comportamiento de los materiales de alta resistencia bajo cargas cíclicas y los mecanismos de fatiga.

📄 Gunatillake, P., Mayadunne, R. y Adhikari, R. (2006). Recent developments in biodegradable synthetic polymers. *Biotechnology Annual Review*, 301-347. [https://doi.org/10.1016/s1387-2656\(06\)12009-8](https://doi.org/10.1016/s1387-2656(06)12009-8)

Revisión de los últimos avances en polímeros biodegradables y sus aplicaciones en la ingeniería y la manufactura sostenible.

### Páginas web

🌐 ANSYS. (n.d.). *Ansys Granta EduPack*. <https://www.ansys.com/products/materials/granta-edupack>  
Esta plataforma permite a los estudiantes y profesionales explorar la selección de materiales utilizando herramientas interactivas, como el Diagrama de Ashby.



🌐 ASM International. (n.d.). *ASM Handbook Online*. <https://www.asminternational.org/materials-resources>

Esta es una excelente fuente en línea para consultar sobre el comportamiento de los materiales, procesos de manufactura y análisis de fallas.

🌐 MatWeb. (n.d.). *Material Property Data*. <https://www.matweb.com>

MatWeb es una base de datos en línea que proporciona propiedades mecánicas, térmicas, eléctricas y químicas de miles de materiales de ingeniería.

## Videos

▶ Cienciabit: Ciencia y Tecnología. (2022, abril 6). *Nitinol, un material inteligente*. [Video]. YouTube. [https://www.youtube.com/watch?v=5\\_pz0Mx9ybc](https://www.youtube.com/watch?v=5_pz0Mx9ybc)

Video que muestra cómo funciona el material Nitinol.

▶ Ingeniosos. (2020, diciembre 4). *ENSAYO de TRACCIÓN 😊 ¿DÚCTIL o FRÁGIL? ¿Módulo ELÁSTICO?* [Video]. YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=fK7vKtwCcbI>

Video que explica la prueba de tracción.

▶ Ingeniosos. (2021, abril 26). *ENSAYOS de DUREZA 💪💎 Rockwell, Brinell, Vickers y Knoop 😊* [Video]. YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=mQZq1Ql2ts>

Video que muestra diferentes ensayos de dureza y sus características.

▶ Ingeniosos. (2022a, marzo 7). *ENSAYO CHARPY 😊✅ ¿Qué es y para qué sirve?* [Video]. YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=8S9csn4gy4M>

Video que explica el ensayo de impacto Charpy y sus características.

▶ Ingeniosos. (2022b, abril 19). *ENSAYO de FLUENCIA 😊✅* [Video]. YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=NLh-e4-CbR0>

Video que explica el ensayo de fluencia y sus características.

▶ Ingeniosos. (2023, enero 15). *FATIGA en los MATERIALES 😊* [Video]. YouTube. [https://www.youtube.com/watch?v=ec50pX\\_0N4s](https://www.youtube.com/watch?v=ec50pX_0N4s)

Video que muestra la falla por fatiga en los materiales.

▶ MIT OpenCourseWare. (2020, diciembre 7). 1. Introduction (Intro to Solid-State Chemistry) [Video]. YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=Ao41FrJFgvQ>

Una serie de conferencias de MIT que cubre los fundamentos de los materiales sólidos, incluyendo el análisis de fallas y las propiedades de los materiales a nivel atómico.

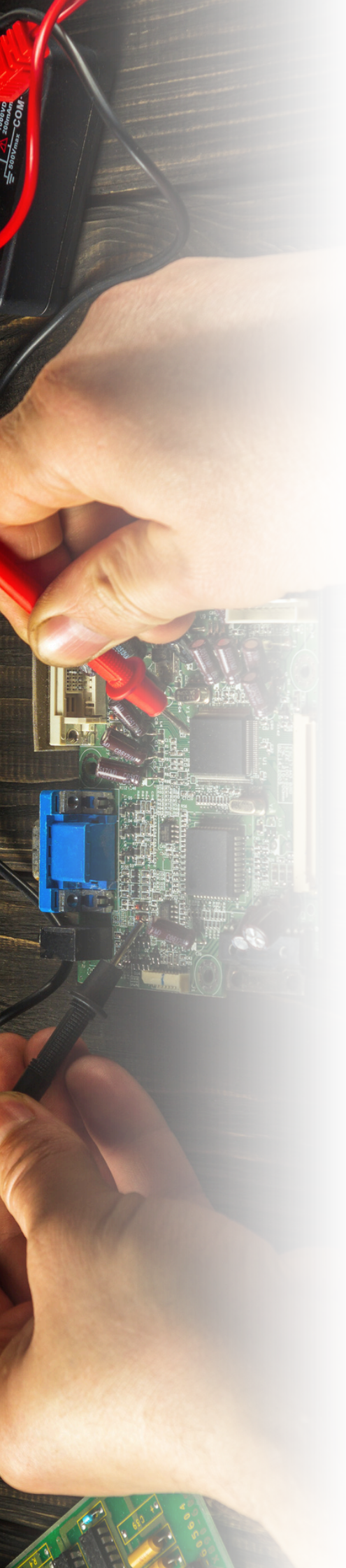
▶ The Efficient Engineer. (2021, 8 de junio). *Understanding metals* [Video]. YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=PaGJwOPg2kU>

Video que explica cómo se pueden modificar las propiedades de los materiales, específicamente en los metales.



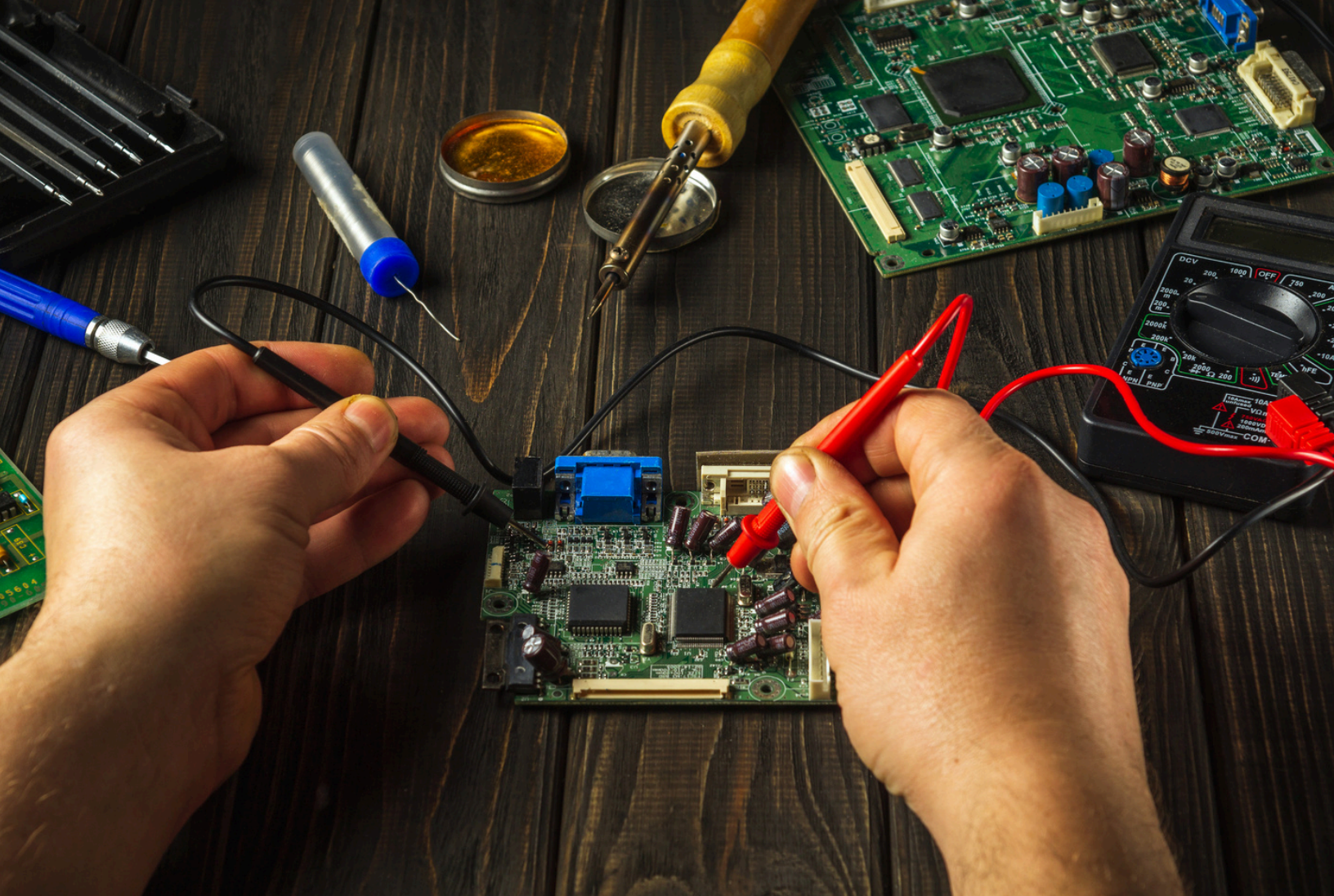
▶ CrashCourse. (s. f.). *Engineering* [Lista de reproducción]. YouTube. [https://www.youtube.com/playlist?list=PL8dPuuaLjXtO4A\\_tl6DLZRotxEb114cMR](https://www.youtube.com/playlist?list=PL8dPuuaLjXtO4A_tl6DLZRotxEb114cMR)

Curso de 46 episodios donde se enseña fundamentos de ingeniería y su impacto global, ético, social y técnico. Se recomiendan los recursos 18, 19, 20, 22, 23 y 24.



## Capítulo 5

# Fundamentos de electrónica



La electrónica es un pilar fundamental en el desarrollo de soluciones avanzadas en los campos de la ingeniería mecánica y mecatrónica. Desde los primeros días de la ingeniería, la electrónica ha permitido no solo la creación de dispositivos y sistemas más eficientes, sino también la integración de la inteligencia y la automatización en procesos mecánicos que antes eran puramente manuales.

En la actualidad, la ingeniería mecánica y mecatrónica no pueden entenderse sin una base sólida en electrónica. Por ejemplo, sistemas altamente sofisticados, como robots industriales capaces de realizar tareas complejas con alta precisión y autonomía, dependen de circuitos electrónicos para recibir, procesar y actuar sobre la información, lo que les permite interactuar de manera segura y eficiente con su entorno.

Otro ejemplo clave es el uso de dispositivos de medición y monitoreo en equipos y maquinaria. Estos dispositivos, como sensores de presión, temperatura, vibración, sonido, luz, entre otros, permiten la captura y transmisión de datos en tiempo real. Esto no solo mejora la eficiencia operativa, sino que también incrementa la seguridad, permitiendo la detección temprana de fallos y la implementación de medidas preventivas.

La importancia de la electrónica, en estos y otros campos, radica en su capacidad para transformar los conceptos teóricos de la física y las matemáticas en soluciones prácticas que impulsan la innovación y mejoran la calidad de vida. Este capítulo explorará los fundamentos de la electrónica con un enfoque práctico, mostrando cómo los principios básicos se aplican en proyectos y sistemas reales que forman la columna vertebral de la ingeniería moderna.



## 5.1 Circuitos eléctricos

En la ingeniería, un circuito eléctrico es una interconexión de elementos electrónicos que permite el flujo de corriente eléctrica para realizar funciones específicas. Estos elementos pueden incluir resistencias, capacitores, inductores y fuentes de energía como baterías o fuentes de voltaje. Comprender cómo estos componentes interactúan es esencial para diseñar y analizar sistemas en ingeniería mecánica y mecatrónica.

### 5.1.1 Ley de Ohm

La ley de Ohm es uno de los principios más básicos, pero fundamentales en la electrónica. Esta ley establece que la corriente eléctrica que fluye a través de un conductor entre dos puntos es directamente proporcional al voltaje entre esos puntos e inversamente proporcional a la resistencia del conductor:

$$V = RI$$

Este principio es esencial para calcular cómo se comportará un circuito eléctrico en diferentes condiciones y es una herramienta indispensable en el diseño de sistemas electrónicos.

### 5.1.2 Leyes de Kirchhoff

Para analizar circuitos más complejos, las leyes de Kirchhoff son fundamentales:

**Ley de corriente de Kirchhoff (KCL):** establece que la suma de todas las corrientes que entran en un nodo debe ser igual a la suma de todas las corrientes que salen de ese nodo.



$$\sum I_{in} = \sum I_{out}$$

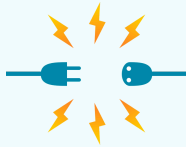
**Ley de voltaje de Kirchhoff (KVL):** indica que la suma de los voltajes alrededor de un lazo cerrado en un circuito es igual a cero.

$$\sum V = 0$$

Estas leyes son esenciales para el análisis de circuitos donde múltiples componentes interactúan de manera compleja, permitiendo determinar las corrientes y voltajes en cada parte del circuito.

## Proyecto 5.1

### Diseño de un circuito de control de velocidad para un motor de corriente continua (DC)



Para poner en práctica los conceptos fundamentales de los circuitos eléctricos, exploraremos cómo se aplican en proyectos de ingeniería reales. La siguiente aplicación muestra cómo los principios teóricos se traducen en soluciones prácticas.

#### Objetivo del proyecto

Diseñar un circuito simple que permita controlar la velocidad de un motor DC utilizado en una máquina de control numérico (CNC) mediante un potenciómetro.

#### Materiales

- Motor DC
- Potenciómetro (de 10 k $\Omega$ )
- Fuente de alimentación (9V DC)
- Interruptor deslizante
- Cables caimán-caimán
- Cables de conexión (jumper macho-macho)
- Multímetro digital
- Protoboard

#### Instrucciones

1. Diseña un circuito en serie con el motor, fuente, potenciómetro e interruptor conectado en la protoboard.
2. Con el circuito ensamblado y el interruptor cerrado, varía el valor del potenciómetro.
3. En cada variación, mide el voltaje en el potenciómetro y la corriente en el circuito. También mide la resistencia en las terminales del potenciómetro, pero apagando el interruptor.
4. Calcula de forma teórica el voltaje y corriente en el potenciómetro.

## Análisis de resultados

Discute cualquier discrepancia entre los resultados teóricos y prácticos. Considera factores como la resistencia interna del motor y las tolerancias de los componentes. Propón mejoras para optimizar el circuito, como la inclusión de un diodo de protección para evitar daños al motor. ¿Cómo se conectaría?



### Conoce más.

Interactúa con la simulación de este circuito creado por Lezama (2024b). Requerirás registro en Tinkercad para ver la simulación.

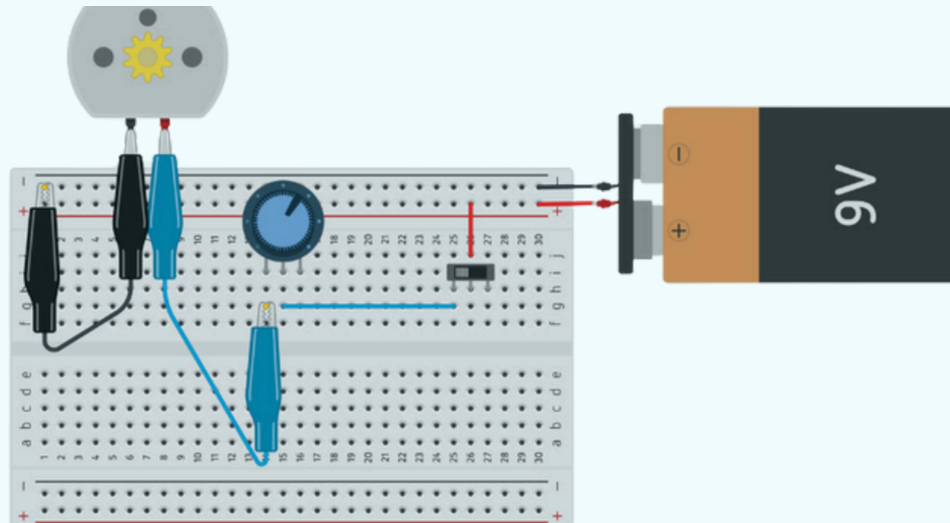


Figura 5.1 Circuito de control de velocidad

## Caso de estudio

### Optimización de un sistema de distribución eléctrica para una máquina de ensamblaje

En una planta de manufactura, se ha instalado una nueva máquina de ensamblaje automatizada que requiere un sistema de distribución eléctrica eficiente, para operar diversos actuadores y sensores. El objetivo es diseñar un circuito que asegure la distribución adecuada de energía eléctrica a estos componentes, minimizando las pérdidas y garantizando un funcionamiento seguro y confiable. Para ello, se aplicarán la ley de Ohm y las leyes de Kirchhoff en el diseño y análisis del circuito.

#### Detalles del caso

Se describen a continuación algunos de los elementos que componen la línea de ensamblaje, aunque hay que aclarar que una línea de ensamblaje consta de más elementos que los descritos aquí.

- Actuadores: Motores eléctricos que requieren un suministro de corriente (2 A) y voltaje constante (24 V) para realizar movimientos precisos.

- Sensores: dispositivos de detección que operan a bajo voltaje (5 V) y requieren un flujo de corriente constante (0.5 A) para enviar señales precisas al controlador central.
- Controlador central: el cerebro del sistema, que coordina las acciones de los actuadores y procesa la información de los sensores.

### Aplicación de conocimientos

**Ley de Voltaje de Kirchhoff (KVL):** Se aplicará en los lazos de corriente que incluyen los actuadores y el resistor para el control de corriente. El resistor de cada actuador estará a 86 V de tensión. Aplicando KVL:

$$-V_S + V_1 + V_A = 0$$

$$-110 + V_1 + 24 = 0$$

$$V_1 = 86 \text{ V}$$

Cálculo de resistencia para actuadores: cada resistor en serie con su actuador consume 86 V y requiere 2 A de corriente. Según la ley de Ohm:

$$R = \frac{86}{2} = 43 \Omega$$

El resistor en la línea de alimentación debe elegirse no solo de la resistencia calculada, sino con la potencia adecuada.

### Ley de Corriente de Kirchhoff (KCL):

Se aplicará en los nodos donde las líneas de alimentación se dividen para alimentar múltiples actuadores. Si en un nodo se conectan tres actuadores, la corriente que entra en el nodo debe ser igual a la suma de las corrientes que salen hacia cada actuador. Si cada actuador requiere 2 A, la corriente total que entra al nodo será:

$$I_{Total} = I_{S_1} + I_{S_2} + I_{S_3}$$

$$I_{Total} = 2 + 2 + 2 = 6 \text{ A}$$

La corriente total que consume la máquina de ensamblaje es de 6 A.

## Conclusiones del caso de estudio

Este caso de estudio muestra cómo la ley de Ohm y las leyes de Kirchhoff se aplican en el diseño y optimización de un sistema de distribución eléctrica, para una máquina de ensamblaje automatizada. La correcta aplicación de estos principios asegura que los componentes reciban la energía necesaria para operar eficientemente, minimizando las pérdidas y garantizando la seguridad del sistema.

## 5.2 Semiconductores

Los semiconductores son materiales fundamentales en la electrónica moderna, debido a su capacidad para controlar el flujo de corriente eléctrica. A diferencia de los conductores, que permiten el flujo libre de electrones, y los aislantes, que lo impiden, los semiconductores tienen propiedades eléctricas intermedias que pueden ser manipuladas mediante la adición de impurezas (dopaje) o la aplicación de voltajes externos.

### 5.2.1 Tipos de circuitos semiconductores

A continuación, se describen las características principales de los circuitos más utilizados en la ingeniería; sin embargo, no son los únicos circuitos que se pueden encontrar en la práctica de la electrónica.

#### Diodos

Un diodo es un dispositivo semiconductor que permite el paso de la corriente en una única dirección. Los diodos se utilizan en rectificación de señales, protección de circuitos y como componentes en circuitos lógicos.

El diodo tiene dos formas de funcionamiento; polarización directa, donde el diodo permite el paso de la corriente, mientras que en polarización inversa, bloquea el flujo de corriente. Existen diferentes tipos de diodos, como el diodo rectificador, diodo Zener y LED (diodo emisor de luz).

**Rectificador:** tipo más básico de diodo, diseñado para convertir corriente alterna (AC) en corriente continua (DC). Este tipo de diodo es esencial en las fuentes de alimentación, donde se requiere una conversión eficiente de AC a DC.

**Zener:** tipo especial de diodo que permite el flujo de corriente en la dirección inversa cuando se alcanza un cierto voltaje de umbral, conocido como "voltaje Zener". Este diodo se utiliza principalmente para la regulación de voltaje en circuitos electrónicos.

**LED:** tipo de diodo que emite luz cuando está en polarización directa. La luz emitida puede ser de diferentes colores, dependiendo del material semiconductor utilizado.

### Transistores

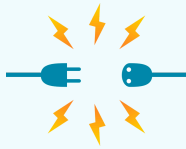
Los transistores son dispositivos semiconductores utilizados para amplificación y conmutación de señales. Existen principalmente dos tipos: BJT (Transistor Bipolar de Unión) y FET (Transistor de Efecto de Campo).

**BJT:** funciona mediante la inyección de corriente en la base para controlar una corriente mayor entre el colector y el emisor.

**FET:** controla el flujo de corriente a través de un canal semiconductor utilizando un campo eléctrico aplicado a una puerta.

## Proyecto 5.2

### Circuito protector con diodo rectificador



Este proyecto es un ejemplo para comprender una de las muchas aplicaciones de los dispositivos electrónicos en proyectos de diseño y aplicaciones de ingeniería. El circuito de protección contra inversión de polaridad utiliza un diodo en serie con la fuente de alimentación para asegurar que la corriente solo fluya en la dirección correcta. Si se invierte accidentalmente la polaridad de la fuente de alimentación, el diodo bloquea el flujo de corriente, evitando daños al circuito.

#### Objetivo del proyecto

Diseñar un circuito simple que proteja un dispositivo electrónico contra daños causados por una inversión accidental de polaridad en la fuente de alimentación.

#### Materiales

- Diodo Rectificador: por ejemplo, 1N4007.
- LED: Para indicar que el circuito está correctamente alimentado.
- Resistor de 330  $\Omega$  (para limitar la corriente a través del LED).
- Fuente de alimentación DC: 9 V (puede ser una batería).
- Protoboard y cables de conexión.

#### Instrucciones

1. Conectar una terminal de la fuente de alimentación, al ánodo del diodo rectificador.

2. Conectar el cátodo del diodo rectificador a una de las terminales del resistor de 330  $\Omega$ . Conectar la otra terminal del resistor al ánodo del LED.
3. Conectar el cátodo del LED a la otra terminal de la fuente de alimentación.
4. Una vez cerrado el circuito, observa los efectos del diodo rectificador, si el LED enciende o no.
5. Intercambia la conexión en las terminales de la fuente (poner el positivo donde al inicio estaba el negativo y el negativo donde antes estaba el positivo) de alimentación y observe los efectos en el LED.

### Análisis de resultados

Dependiendo de cómo se conecten las terminales de la fuente de alimentación, el diodo rectificador puede estar polarizado en dos formas: directa o inversa.

**Polarización directa:** si el diodo rectificador está conectado de tal manera que la corriente fluye desde el ánodo hacia el cátodo, permitirá el paso de corriente hacia el LED. En este caso, el LED se encenderá porque está recibiendo corriente (circuito de la izquierda de la figura 5.2).

**Polarización inversa:** si la polaridad de la fuente de alimentación se invierte, el diodo rectificador estará polarizado en inversa. Esto significa que el diodo bloqueará el paso de la corriente, impidiendo que llegue al LED y como resultado el LED no se encenderá (circuito de la derecha de la figura 5.2).

En un escenario real, el diodo rectificador actúa como un protector para el dispositivo (en este caso, el LED). Si accidentalmente se invierte la polaridad de la fuente de alimentación, el diodo rectificador se polariza en inversa y bloquea la corriente, evitando que un flujo de corriente incorrecto dañe el LED o cualquier otro componente conectado en el circuito.



#### Conoce más.

Interactúa con la simulación de este circuito creado por Lezama (2024a). Requerirás registro en Tinkercad para ver la simulación.

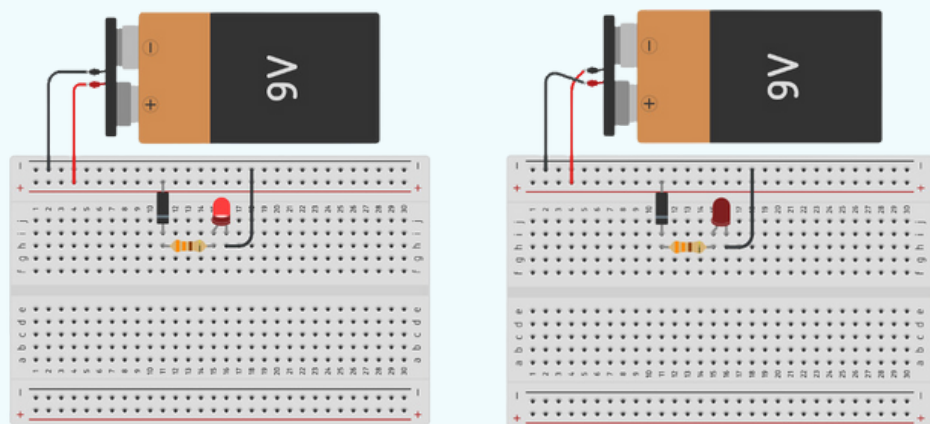


Figura 5.2 Circuito con diodo rectificador y LED

## Caso de estudio

### Implementación de un regulador de voltaje para un sistema mecatrónico que se alimenta con energía renovable

En este caso de estudio, diseñaremos un regulador de voltaje utilizando un diodo Zener alimentado por celdas solares, cuyo voltaje de salida varía con la intensidad de la luz solar. Este regulador se implementará en un sistema mecatrónico, por ejemplo, un brazo robótico, que requiere un voltaje constante para funcionar correctamente. La variabilidad de la energía solar presenta un desafío, ya que las fluctuaciones en el voltaje pueden afectar el rendimiento del sistema mecatrónico. El objetivo es mantener un suministro de energía estable para asegurar el funcionamiento continuo y eficiente del sistema.

#### Detalles del caso

**Brazo robótico:** el sistema mecatrónico en cuestión es un brazo robótico que realiza tareas de ensamblaje en una línea de producción. Este brazo robótico es alimentado eléctricamente y requiere un voltaje constante de 5 V para alimentar sus controladores, actuadores y sensores. Las celdas solares se utilizarán como fuente primaria de energía, con un sistema de regulación basado en un diodo Zener para estabilizar el voltaje.

**Variabilidad de la energía solar:** las celdas solares generan un voltaje que varía dependiendo de la intensidad de la luz solar. Este voltaje puede fluctuar entre 10 V y 15 V durante el día.

**Requisito de voltaje constante:** el brazo robótico requiere un suministro estable de 5 V para operar eficientemente. Las fluctuaciones en el suministro de energía pueden causar mal funcionamiento o daños en los componentes electrónicos del brazo.

#### Aplicación de conocimientos

El regulador de voltaje basado en un diodo Zener se encargará de estabilizar el voltaje de salida de las celdas solares a un valor constante de 5 V, que es el requerido por el sistema mecatrónico. El circuito básico consta de los elementos en la figura 5.3.

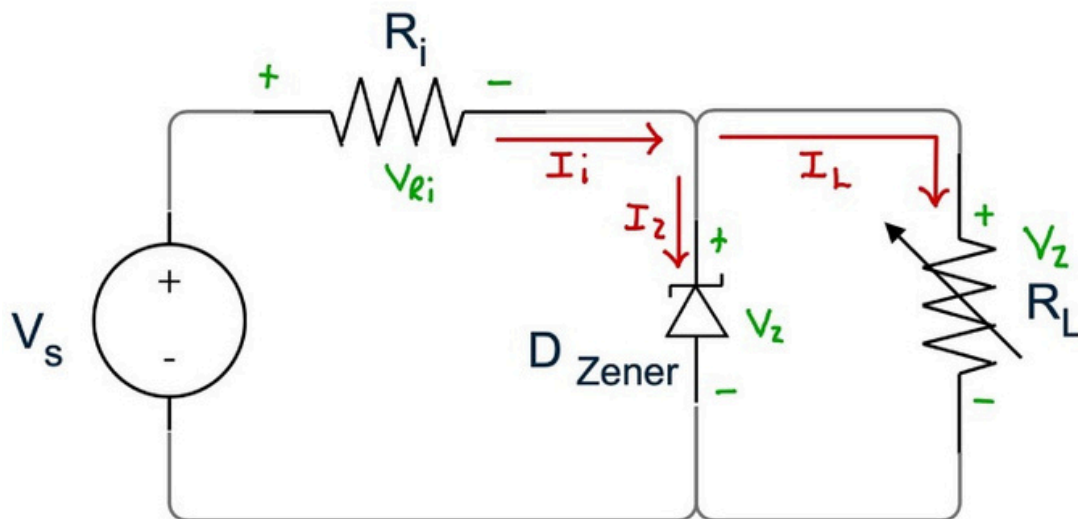


Figura 5.3 Circuito regulador Zener básico

**Celdas solares:** proveen energía con un voltaje de salida variable entre 10 V y 15 V. En el circuito de la figura 5.3 se representa con la fuente  $V_s$ .  
**diodo Zener:** mantiene un voltaje constante de 5 V en la salida.

**Resistencia serie ( $R_i$ ):** Limita la corriente que pasa a través del diodo Zener para protegerlo.

**Resistencia de carga ( $R_L$ ):** representa el elemento para el cual se va a regular el voltaje, en este caso el brazo robótico, el cual se supone que trabaja a 5 V y 500 mA.

Para determinar el voltaje del diodo Zener se deben considerar dos casos principales:

- Cuando la fuente entrega el máximo voltaje  $V_{S_{\text{máx}}}$  la corriente a través del Zener subirá a su valor máximo  $I_{Z_{\text{máx}}}$  para mantener  $I_L$ .
- Cuando la fuente entrega el voltaje mínimo  $V_{S_{\text{mín}}}$  la corriente a través del Zener bajará a su valor mínimo  $I_{Z_{\text{mín}}}$  para mantener  $I_L$ .

Aplicando LK en la primera malla y LCK en el nodo que une  $R_L$ ,  $R_i$  y el diodo Zener, en unión con la ley de Ohm, se puede determinar que el valor se calcula como:

$$R_i = \frac{V_S - V_Z}{I_L + I_{Z_{\text{máx}}}}$$

Al considerar que  $V_S$  puede tomar dos valores, pueden existir dos valores de  $R_i$ :



$$R_i = \frac{V_{S_{\min}} - V_Z}{I_L + I_{Z_{\min}}}$$

$$R_i = \frac{V_{S_{\max}} - V_Z}{I_L + I_{Z_{\max}}}$$

Igualando ambas ecuaciones, se puede obtener el valor de corriente a través del diodo Zener:

$$\frac{V_{S_{\max}} - V_Z}{I_L + I_{Z_{\max}}} = \frac{V_{S_{\min}} - V_Z}{I_L + I_{Z_{\min}}}$$

Se suele fijar la relación entre la corriente mínima y máxima del diodo Zener y sustituir en la ecuación anterior:

$$I_{Z_{\min}} = 0.1I_{Z_{\max}}$$

$$\frac{V_{S_{\max}} - V_Z}{I_L + I_{Z_{\max}}} = \frac{V_{S_{\min}} - V_Z}{I_L + 0.1I_{Z_{\max}}}$$



**Conoce más.**

Interactúa con la simulación de este circuito creado por Lezama (2024c). Requerirás registro en Tinkercad para ver la simulación.

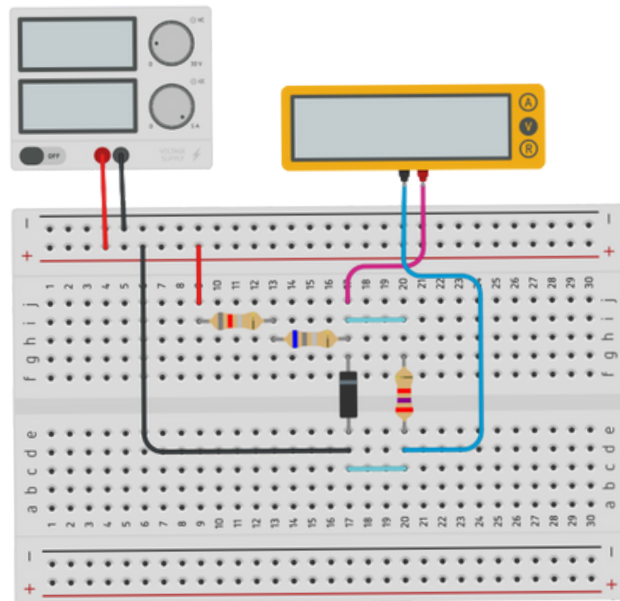


Figura 5.4 Circuito regulador Zener del ejercicio

De esta forma, se puede calcular la corriente que pasará a través del diodo Zener. Utilizando los valores del caso de estudio se obtiene:

$$I_{Z_{\max}} = 625 \text{ mA}$$

Utilizando la ley de Ohm, se puede calcular como:

$$R_i = \frac{V_{S_{\max}} - V_Z}{I_L + I_{Z_{\max}}} = \frac{15 - 5}{0.5 + 0.625}$$

Finalmente, hay que elegir un modelo de diodo Zener adecuado que regule a 5 V y soporte hasta 625 mA. Para esto, hay que consultar las hojas de datos del dispositivo. En este caso, se puede elegir el diodo Zener 1N5339B, el cual regula a 5.1 V y tiene una potencia de 5 W. Si se calcula la potencia en el Zener con su corriente máxima, se observa que el modelo del Zener soportará la corriente:

$$P_z = V_Z I_{Z_{\max}} = (5.1)(0.625) = 2.19 \text{ W}$$

### Conclusión del caso de estudio

Este caso de estudio resalta la importancia de los semiconductores en la estabilización de voltajes en sistemas que dependen de fuentes de energía renovable. La habilidad de diseñar y entender estos reguladores es crucial para ingenieros que buscan integrar soluciones sostenibles en sistemas mecatrónicos y de automatización industrial. Este principio puede aplicarse en otros sistemas donde la fuente de energía es variable, asegurando siempre un rendimiento óptimo del sistema final.

## 5.3 Electrónica de potencia

La electrónica de potencia es una disciplina de la ingeniería eléctrica que se ocupa del procesamiento y control de la energía eléctrica, mediante dispositivos electrónicos. A diferencia de la electrónica tradicional, que se centra en señales de baja potencia, la electrónica de potencia trata con niveles más altos de energía, donde es crucial convertir, controlar y optimizar el flujo de energía para maximizar la eficiencia de los sistemas.

La electrónica de potencia se basa en la aplicación de dispositivos semiconductores de potencia, como diodos, transistores y tiristores, para manipular la energía eléctrica. Estos dispositivos permiten el control preciso del voltaje, la corriente y la frecuencia de la energía, lo que es esencial en una amplia gama de aplicaciones, desde la alimentación de dispositivos electrónicos pequeños hasta la gestión de grandes sistemas de energía en industrias.

### 5.3.1 Dispositivos electrónicos de potencia

Los dispositivos electrónicos de potencia son la base de la electrónica de potencia. Estos dispositivos son capaces de manejar grandes corrientes y voltajes, y su funcionamiento se basa en la conmutación rápida entre estados de encendido y apagado. Los principales dispositivos utilizados incluyen:

**Diodos de potencia:** permiten el flujo de corriente en una sola dirección y se utilizan en rectificadores para convertir AC en DC.

**Transistores Bipolares de Puerta Aislada (IGBT):** son ampliamente utilizados en aplicaciones de conmutación rápida y control de motores debido a su capacidad para manejar altos voltajes y corrientes con baja pérdida de energía.

**MOSFETs de potencia:** estos transistores son preferidos en aplicaciones de alta frecuencia y baja potencia debido a su rápida velocidad de conmutación.

**Rectificador Controlado de Silicio (SCR):** un dispositivo que puede controlar grandes cantidades de energía y es comúnmente utilizado en aplicaciones de control de potencia y rectificación controlada.

### 5.3.2 Convertidores de energía

Un aspecto clave de la electrónica de potencia es la capacidad de convertir la corriente de una forma a otra, de continua (con valor constante en el tiempo) a alterna (con valor variable en el tiempo) o inversamente. Esto incluye:

#### Convertidor AC-DC

**Funcionamiento:** un rectificador convierte corriente alterna (AC) en corriente continua (DC). Los rectificadores pueden ser de media onda o de onda completa, dependiendo de cómo se rectifique la señal AC.

**Aplicaciones:** se utilizan en fuentes de alimentación para dispositivos electrónicos, cargadores de baterías y en cualquier aplicación donde se necesite un suministro de energía DC estable.

**Componentes clave:** diodos de potencia y, en algunos casos, capacitores de filtrado para suavizar la señal rectificada y reducir el rizado en la salida DC.

#### Convertidor DC-DC

**Funcionamiento:** un convertidor DC-DC ajusta un nivel de voltaje DC a otro, ya sea elevando (boost) o reduciendo (buck) el voltaje. Estos convertidores son esenciales para alimentar componentes electrónicos que requieren voltajes específicos.

**Aplicaciones:** se encuentran en reguladores de voltaje para dispositivos electrónicos, sistemas de energía renovable y en la gestión de energía en vehículos eléctricos.

**Componentes clave:** Transistores de potencia (como MOSFETs), inductores y capacitores. Estos componentes trabajan juntos para almacenar y liberar energía, lo que permite la conversión eficiente de voltaje.

### Convertidor DC-AC

**Funcionamiento:** un inversor convierte corriente continua (DC) en corriente alterna (AC). Los inversores son cruciales en sistemas donde la energía se almacena en forma DC, como en baterías, pero se necesita en forma AC para alimentar dispositivos y sistemas domésticos o industriales.

**Aplicaciones:** se utilizan en sistemas de energía solar, vehículos eléctricos y para alimentar dispositivos electrónicos en lugares donde solo hay disponible energía DC.

**Componentes clave:** transistores de potencia y circuitos de control que modulan la conmutación para generar una señal AC de alta calidad.

### 5.3.3 Fuentes de alimentación

Las fuentes de alimentación son sistemas esenciales que proporcionan energía eléctrica a otros dispositivos. Pueden clasificarse en dos categorías principales:

#### Fuentes de alimentación lineales

**Funcionamiento:** utilizan un transformador para reducir el voltaje AC de la red eléctrica, seguido de un rectificador para convertir este voltaje en DC. Posteriormente, se emplea un regulador lineal para estabilizar el voltaje DC.

**Ventajas:** simplicidad de diseño y baja emisión de ruido eléctrico.

**Desventajas:** baja eficiencia energética debido a la disipación de calor en el regulador, lo que las hace menos adecuadas para aplicaciones de alta potencia.

**Aplicaciones:** equipos electrónicos sensibles, como amplificadores de audio y dispositivos de medición.

#### Fuentes de alimentación conmutadas (SMPS)

**Funcionamiento:** estas fuentes convierten el voltaje AC en DC, luego lo dividen en pequeñas porciones mediante un interruptor de alta frecuencia (MOSFET) y lo convierten de nuevo en DC después de pasar por un transformador y un rectificador.

**Ventajas:** alta eficiencia energética y capacidad para manejar una amplia gama de voltajes de entrada.

**Desventajas:** diseño más complejo y mayor emisión de ruido eléctrico.

**Aplicaciones:** computadoras, dispositivos electrónicos portátiles y cualquier aplicación que requiera una fuente de alimentación compacta y eficiente.

### 5.3.4 Sistemas de control en electrónica de potencia

El control es una parte esencial de la electrónica de potencia, ya que permite gestionar el flujo de energía de manera eficiente y precisa. Los sistemas de control en electrónica de potencia utilizan técnicas como la modulación por ancho de pulso (PWM), para ajustar la salida de los convertidores de energía según las necesidades del sistema.

#### Modulación por ancho de pulso (PWM)

**Funcionamiento:** PWM es una técnica en la que la duración de los pulsos en una señal de conmutación se modula para controlar la cantidad de energía que se entrega a la carga. Al variar el ciclo de trabajo (proporción del tiempo durante el cual el pulso está encendido), se puede controlar la energía promedio entregada a la carga.

**Aplicaciones:** PWM se utiliza en convertidores DC-DC, control de motores, inversores y fuentes de alimentación conmutadas.

### 5.3.5 Desafíos en la electrónica de potencia

Trabajar con electrónica de potencia presenta desafíos únicos, principalmente, debido a los altos niveles de corriente y voltaje involucrados. Algunos de estos desafíos incluyen:

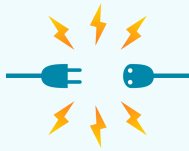
**Manejo de calor:** los dispositivos de potencia generan calor durante su operación, lo que puede afectar su rendimiento y vida útil. La gestión térmica, mediante disipadores de calor, ventilación forzada o refrigeración líquida, es crucial para mantener el sistema operativo dentro de límites seguros.

**Ruido eléctrico y EMI:** la conmutación rápida de corrientes y voltajes puede generar interferencia electromagnética (EMI), que puede afectar a otros dispositivos electrónicos. El diseño cuidadoso del circuito, el uso de blindaje y los filtros EMI son necesarios para minimizar estos efectos.

**Confiabilidad y durabilidad:** Los sistemas de electrónica de potencia deben ser altamente confiables, ya que fallos en estos sistemas pueden tener consecuencias graves, especialmente en aplicaciones industriales y de transporte.

## Proyecto 5.3

### Convertidor AC-DC para sistemas electrónicos de 500 mA



El uso de los convertidores AC-DC es fundamental para la alimentación de cualquier dispositivo electrónico. Estos dispositivos se conectan a terminal eléctrica de 120 V efectivos (en el caso de México) que entrega voltaje alterno; sin embargo, los elementos electrónicos que los componen trabajan en voltaje continuo en diferentes rangos de voltaje, es por eso esencial el uso de convertidores AC-DC para poder alimentar computadoras, celulares o cualquier elemento que funcione con voltaje continuo y requiera ser conectado a una toma de voltaje alterno.



#### Conoce más.

En este video de Potencia hp (2021), aprenderás el funcionamiento del puente de diodos y el capacitor en estos sistemas.

#### Análisis de resultados

El transformador entrega a su salida un voltaje efectivo de aproximadamente 12 V, que se puede confirmar al medirlo.

El voltaje efectivo en la salida del regulador 5 V (7805) es prácticamente cero, debido a que el puente de diodos transforma la señal de voltaje alterno a voltaje continuo variable, posteriormente, el capacitor y el regulador evitan la variación de la señal y la mantienen a 5 V de voltaje continuo. Por ello, al medir el voltaje alterno con el multímetro a la salida del regulador, este valor es prácticamente cero, porque no hay señal de voltaje alterno, solamente voltaje directo.

El voltaje promedio a la salida del transformador debe ser 0 V, pues el promedio de una onda sinusoidal es igual a cero. Esto indica que a la salida del transformador la señal es puramente una señal de voltaje alterno. La medida de voltaje promedio en el regulador es la señal alterna después de pasar por el puente de diodos, que convierte la señal de voltaje alterno en voltaje directo variable, el regulador, posteriormente, evita que el voltaje varíe y se mantiene continuo a 5 V. Por ello, al medir el voltaje VDC después de estas dos etapas (puente de diodos y regulador) el voltaje promedio es de 5 V.

De esta forma se puede ver los efectos del transformador de AC-DC: al inicio, la señal de AC está presente y la señal de DC es cero, posteriormente, a que la señal pasa por las diferentes etapas del transformador AC-DC, la señal de AC es cero y se convierte en una señal de DC a 5V.

#### Objetivo del proyecto

Implementar un circuito convertidor de AC-DC para alimentar sistemas electrónicos a 5 [VDC] que consuman hasta 500 mA de corriente.

#### Materiales

- Transformador de 120 V - 12 V a 0.5 A, con o sin derivación central
- Circuito integrado de puente de diodos GBU4M
- Capacitor de 33 mF
- Regulador integrado 7805
- Protoboard
- Cables para conexión de protoboard

## Amplía tus conocimientos

A continuación, se presentan referencias que te permitirán reforzar y ampliar tus conocimientos sobre electrónica.

### Libros

■ Boylestad, R. L. (2009). *Electrónica: teoría de circuitos y dispositivos electrónicos* (10.ª ed.). Estado de México, México: Pearson Educación.

En este libro podrás aprender la teoría de los dispositivos semiconductores, cómo son los diodos y los transistores, aprenderás a analizar circuitos básicos que contengan este tipo de dispositivos.

■ Hayt, W. H., Kemmerly, J. E. y Durbin, S. M. (2012). *Análisis de circuitos en ingeniería*. CDMX, México: McGraw-Hill Interamericana.

En este libro podrás consultar la teoría para analizar circuitos, tanto si solo tienen resistencias, capacitores o inductores, tanto si las fuentes dan un valor fijo o si su valor cambia en el tiempo.

■ Neamen, D. A., (2012). *Dispositivos y circuitos electrónicos*. CDMX, México: McGraw-Hill Interamericana.

Este libro te permitirá profundizar en la teoría del funcionamiento de semiconductores y los elementos básicos que se manufacturan con semiconductores.

### Artículos académicos

■ Wen, X., Wu, W., Pan, C., Hu, Y., Yang, Q. y Wang, Z. L. (2014). Development and progress in piezotronics. *Nano Energy*, 14, 276-295. <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2014.10.037>

Este artículo tiene como objetivo revisar el progreso de los hitos y ofrecer perspectivas de un nuevo campo de estudio que son los materiales piezoeléctricos, así como las aplicaciones para sistemas de detección multifuncionales, interfaz humano-electrónica y recolección de energía.

■ Uchida, T. (2014). 40 years research and development on liquid crystal displays. *Japanese Journal Of Applied Physics*, 53(3S1), 03CA02. <https://doi.org/10.7567/jjap.53.03ca02>

En este artículo se describe la situación real de cómo se impulsó la investigación y el desarrollo del cristal líquido (pantallas de cristal líquido) relacionado con la experiencia del autor. Además, describe las tendencias futuras de la investigación y el desarrollo sobre electrónica de la imagen (generación de imágenes a través de la electrónica).

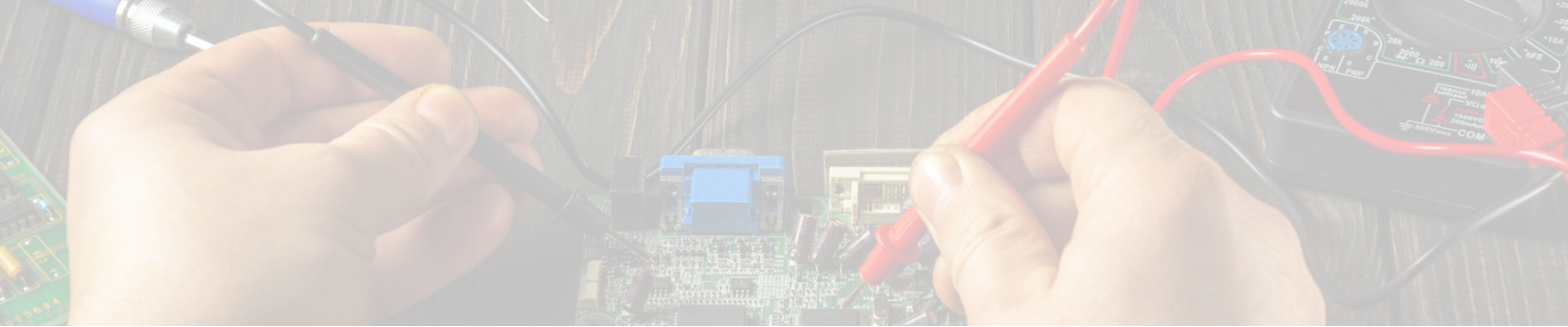
### Páginas web

🌐 Cursos Gratis UNAM. (s. f.). *Electrónica* | Cursos gratis UNAM. <https://cursosgratisunam.com/electronica/>

En esta página tendrás acceso a diferentes cursos gratuitos que imparte la UNAM sobre electrónica básica. Los cursos son introductorios.

🌐 Khan Academy. (s. f.). *Ingeniería eléctrica*. <https://es.khanacademy.org/science/electrical-engineering>

En este curso de Khan Academy podrás aprender a través de videos y ejercicios conceptos clave para la electrónica como es el análisis de circuitos, funcionamiento de semiconductores y otros dispositivos que no se vieron en el capítulo pero son igualmente importantes como el amplificador operacional.



[Tinkercad](https://www.tinkercad.com/). (s. f.). *Todo lo que necesitas es un 'qué tal si...'*. <https://www.tinkercad.com/>

En esta página encontrarás un simulador en línea de la compañía Autodesk. Podrás hacer simulaciones de circuitos y también tiene una sección para el dibujo mecánico básico. Cuenta con proyectos listos para poder simular

## Videos

▶ [CrashCourse](https://www.youtube.com/watch?v=6-tKOHICqrl). (2017, 21 de junio). *Integrated Circuits & Moore's Law: Crash Course Computer Science #17* [Video]. YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=6-tKOHICqrl>

En este video aprenderás sobre cómo los semiconductores cambiaron la computación y como la nueva etapa que abrieron está llegando a su fin y qué nuevas tecnologías se están desarrollando.

▶ [Potencia hp](https://www.youtube.com/watch?v=jzibrKq4ing). (2021, 21 de diciembre). *Rectificador de ONDA COMPLETA, MEDIA ONDA, FILTRO capacitivo* [Video]. YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=jzibrKq4ing>

En este video se muestra el funcionamiento del puente de diodos y el capacitor en convertidores AC-DC.

▶ [CrashCourse](https://www.youtube.com/watch?v=kdy3RsZk7As). (2013, 22 de octubre). *Silicon - the internet's favorite element: Crash course chemistry #35* [Video]. YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=kdy3RsZk7As>

En este video se habla de Silicon Valley y cómo los sólidos de red están en el centro de todo. También habla de semiconductores de estado sólido, semiconductores de tipo N y tipo P, diodos, transistores, chips de computadora y código binario.

▶ [Veritasium](https://www.youtube.com/watch?v=lcrBqCFLHIY). (2013, 9 de julio). *How Does a Transistor Work?* [Video]. YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=lcrBqCFLHIY>

En este video se muestra de forma simplificada el funcionamiento del transistor y su importancia en la tecnología actual.

## Simulaciones

■ [Lezama, P.](https://www.tinkercad.com/things/ivtv56LRiP1-circuito-de-proteccion-con-diodo-rectificador) (2024a, 15 de agosto). *Circuito de protección con diodo rectificador* [Simulación]. AUTODESK Tinkercad. <https://www.tinkercad.com/things/ivtv56LRiP1-circuito-de-proteccion-con-diodo-rectificador>

Simulación de un circuito de protección con diodo rectificador.

■ [Lezama, P.](https://www.tinkercad.com/things/4Gy8L2wRUCP-control-de-velocidad-de-motor-de-dc) (2024b, 12 de agosto). *Control de velocidad de motor de DC* [Simulación]. AUTODESK Tinkercad. <https://www.tinkercad.com/things/4Gy8L2wRUCP-control-de-velocidad-de-motor-de-dc>

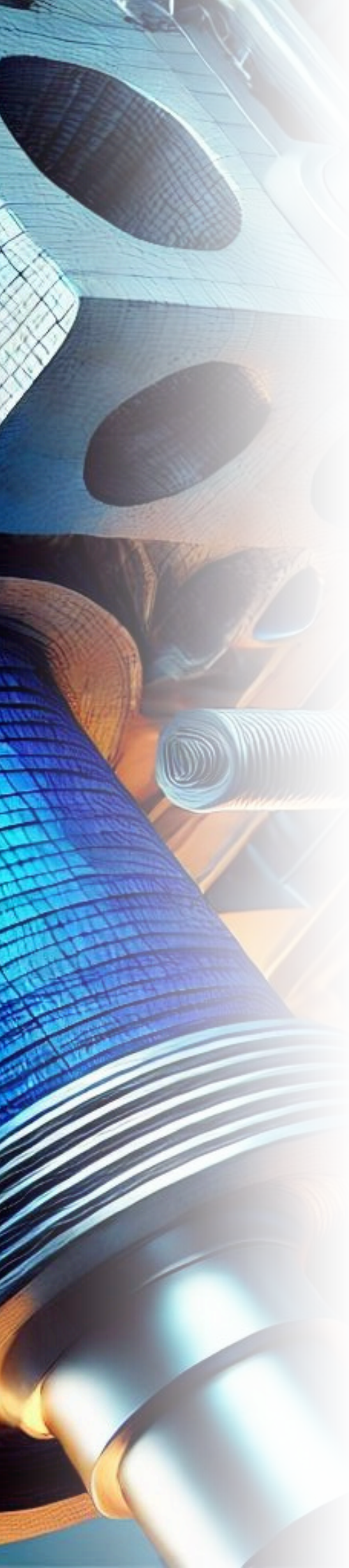
Simulación de un control de velocidad de motor de DC

■ [Lezama, P.](https://www.tinkercad.com/things/k7p94dmeQly-regulador-de-voltaje) (2024c, 15 de agosto). *Regulador de voltaje* [Simulación]. AUTODESK Tinkercad. <https://www.tinkercad.com/things/k7p94dmeQly-regulador-de-voltaje>

Simulación de un regulador de voltaje

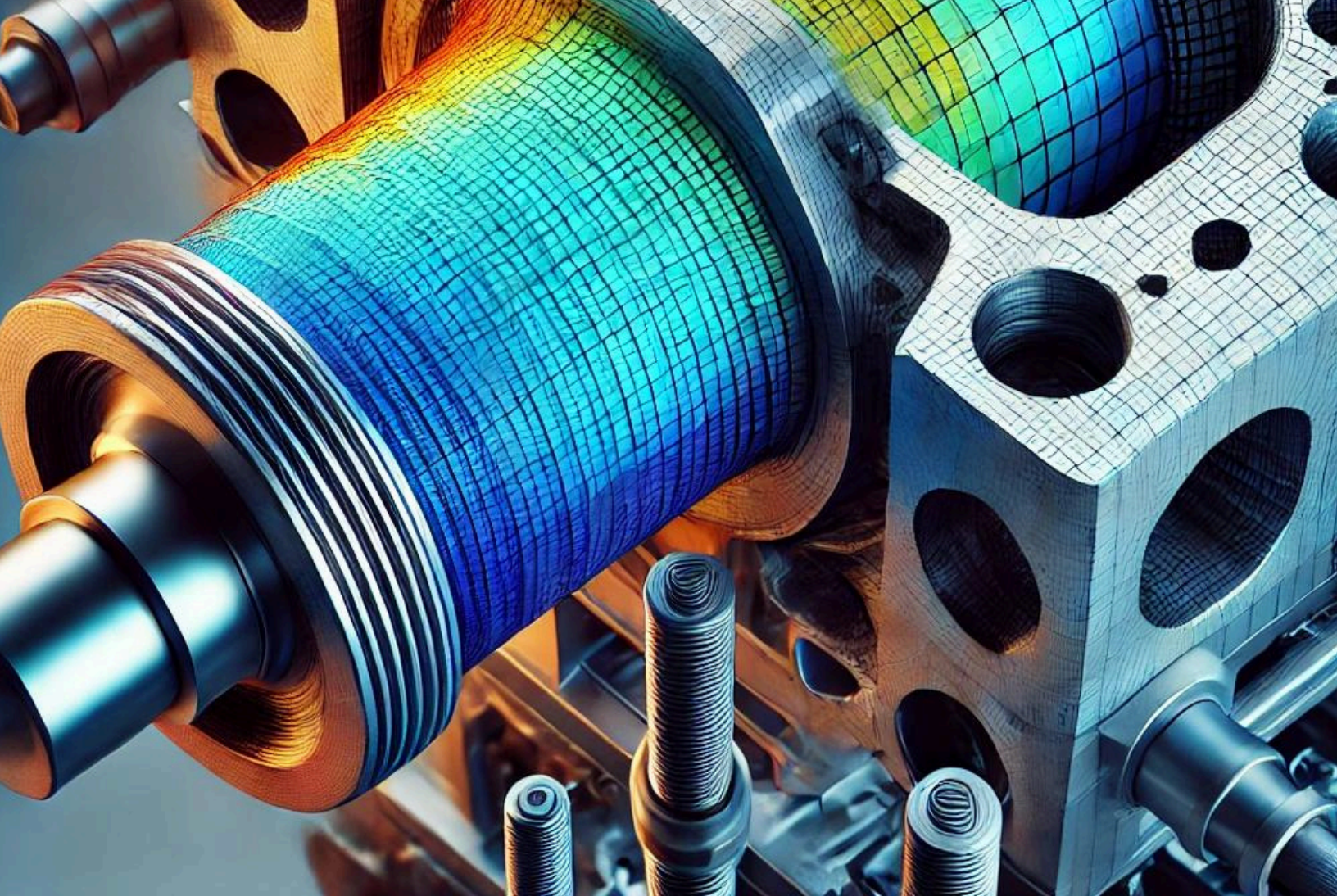






**Capítulo 6**

# **Mecánica de sólidos**



La mecánica de sólidos es una disciplina fundamental dentro de la ingeniería mecánica, civil y estructural, que se centra en el estudio del comportamiento de los materiales bajo la acción de diversas fuerzas. Esta rama de la ingeniería analiza cómo los sólidos responden a cargas, deformaciones y tensiones, proporcionando las herramientas teóricas y prácticas necesarias para diseñar estructuras seguras y eficientes.

En este capítulo se exploran los conceptos esenciales de la mecánica de sólidos, comenzando por la teoría de esfuerzos y deformaciones, hasta llegar al análisis de elementos estructurales como vigas y columnas. El conocimiento de estas áreas es vital para cualquier ingeniero, ya que proporciona una base sólida para resolver problemas de diseño y análisis estructural, asegurando que los materiales seleccionados puedan soportar las condiciones de servicio a las que estarán expuestos sin fallar.

Este capítulo proporciona las bases para desarrollar habilidades en el análisis estructural y en la toma de decisiones en la selección de materiales, diseño de elementos y estructuras, preparando al estudiante para aplicarlas posteriormente en su carrera profesional y en proyectos de ingeniería.

## 6.1 ¿Qué es la mecánica de sólidos?

La **mecánica de sólidos** es una rama de la física y la ingeniería que se enfoca en el estudio del comportamiento de los materiales sólidos bajo la acción de fuerzas externas.

Los sólidos pueden deformarse o romperse dependiendo de la magnitud de las cargas aplicadas y de las propiedades mecánicas de los materiales.



### Conoce más.

En este video, realizado por ANSYS Inc. (2020b), se explica mejor qué estudia la mecánica de sólidos y su importancia en la ingeniería. (Video en inglés, con traducción automática disponible hasta la fecha).

El objetivo principal de esta disciplina es comprender y predecir cómo los materiales responderán a tensiones, deformaciones y otras condiciones, con el fin de diseñar elementos, estructuras y componentes seguros y eficientes.

La mecánica de sólidos describe el comportamiento de los materiales sometidos a fuerzas externas (**tensiones**) o internas (**deformaciones**). Este estudio es crucial para determinar cómo se deforman, agrietan o fallan los materiales con diferentes tipos de carga. Los ingenieros utilizan estos principios para:

- Diseñar elementos y estructuras que soporten cargas sin colapsar.
- Optimizar componentes para reducir peso y costos sin comprometer la seguridad.
- Predecir el comportamiento de materiales nuevos o compuestos en condiciones extremas.

## 6.2 Conceptos fundamentales

En esta sección se presentan los conceptos esenciales para comprender cómo los materiales sólidos responden a las fuerzas externas. Estos conceptos constituyen la base para el análisis de estructuras y componentes en ingeniería.

### 6.2.1 Esfuerzos y deformaciones

El **esfuerzo** es una medida de la intensidad de las fuerzas internas que actúan en un cuerpo cuando se le aplica una carga. Se define como la fuerza aplicada por unidad de área y se expresa comúnmente en pascuales (Pa) o en newtons por metro cuadrado (N/m<sup>2</sup>). El esfuerzo puede actuar de varias formas, según la naturaleza de la fuerza aplicada:

$$\sigma = \frac{F}{A}$$

**Esfuerzo normal ( $\sigma$ ):** se produce cuando una fuerza actúa perpendicularmente a la sección transversal de un material. Los esfuerzos normales pueden ser **tensiles** (cuando el material se estira) o **compresivos** (cuando se comprime).

Donde:

$\sigma$  Es el esfuerzo axial.

$F$  Es la fuerza aplicada de forma axial a una superficie.

$A$  Es el área sobre la cual se está aplicando la fuerza.

**Esfuerzo cortante ( $\tau$ ):** también llamado tangencial o de corte. Este esfuerzo ocurre cuando la fuerza actúa paralelamente a la sección transversal del material, generando un deslizamiento interno. El esfuerzo cortante es relevante en situaciones donde el material está sujeto a fuerzas que tienden a desgarrarlo, como en uniones y remaches.

$$\tau = \frac{V}{A}$$

Donde:

$\tau$  Es el esfuerzo cortante.

$V$  Es la fuerza aplicada de forma paralela a una superficie.

$A$  Es el área sobre la cual se está aplicando la fuerza.

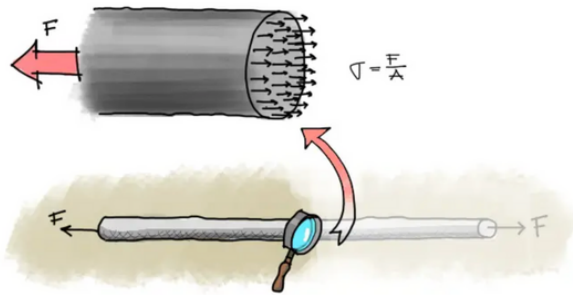


Figura 6.1 Aplicación de fuerza axial ( $F$ ) sobre una barra, generando esfuerzos tensiles.

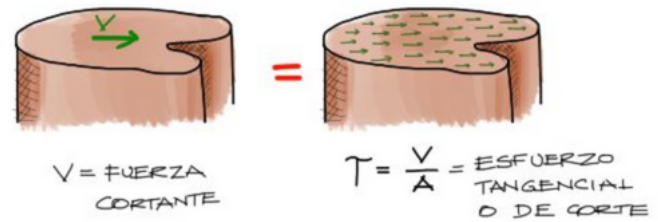


Figura 6.2 Aplicación de fuerza cortante ( $V$ ) sobre un tronco, generando un esfuerzo cortante.

La **deformación** mide la variación en forma o tamaño de un material cuando está sometido a una carga. Es una cantidad adimensional (sin unidades), que se define como la razón entre la variación de longitud y la longitud original del material. Existen dos tipos principales de deformaciones:

**Deformación longitudinal ( $\epsilon$ ):** asociada a esfuerzos normales, describe el estiramiento o contracción de un material.

$$\epsilon = \frac{\Delta L}{L_0}$$

Donde:

$\varepsilon$  Es la deformación longitudinal.

$\Delta L$  Es el cambio de longitud.

$L_0$  Es la longitud original.

**Deformación cortante ( $\gamma$ ):** se produce bajo esfuerzos cortantes y mide el cambio angular entre las capas del material.

$$\gamma = \frac{\Delta x}{h}$$

Donde:

$\gamma$  Es la deformación cortante.

$\Delta x$  Es el desplazamiento entre las capas donde se aplica la fuerza cortante.

$h$  Es la altura del material o la distancia entre las capas en las que ocurre el deslizamiento.

### 6.2.2 Módulo de elasticidad y ley de Hooke

El **módulo de elasticidad** es una propiedad del material que describe su rigidez, es decir, cómo responde un material a la deformación bajo cargas. El módulo de elasticidad más común es el módulo de Young, que se aplica en situaciones de tensión o compresión. Relaciona el esfuerzo con la deformación en la región elástica del material, antes de que este sufra deformaciones plásticas o permanentes.

La **ley de Hooke** establece que, en el rango elástico de un material, la deformación es directamente proporcional al esfuerzo aplicado. La relación es lineal y se expresa de la siguiente manera:

$$\alpha = E\varepsilon$$

Donde:

$\alpha$  Es el esfuerzo normal.

$E$  Es el módulo de elasticidad o módulo de Young.

$\varepsilon$  Es la deformación.

El módulo de Young determina cuánto se estirará o comprimirá un material con una carga específica. Un valor alto de  $E$  indica que el material es rígido y se deforma poco, mientras que un valor bajo indica un material flexible.

## Proyecto 6.1

### Ley de Hooke y módulo de elasticidad



En esta práctica, exploraremos la ley de Hooke. Este experimento te permitirá observar de manera práctica la relación entre la fuerza aplicada y la deformación, conceptos clave en la mecánica de sólidos.

#### Objetivo del proyecto

Demostrar la ley de Hooke utilizando bandas elásticas y medir la relación entre esfuerzo y deformación.

#### Materiales

- Bandas elásticas (de diferentes resistencias, si es posible)
- Pesas pequeñas o cualquier objeto con peso conocido
- Regla o cinta métrica
- Ganchos para colgar las bandas elásticas

#### Instrucciones

1. Cuelga una banda elástica en un gancho o soporte estable.
2. Mide la longitud inicial  $L_0$  de la banda sin ninguna carga.
3. Cuelga de la banda un peso conocido y mide la nueva longitud de la banda elástica.
4. Calcula la deformación  $\Delta L$  causada por la carga (el peso), es decir, la diferencia entre la longitud final y  $L_0$ .
5. Repite el proceso añadiendo más peso y midiendo la deformación.
6. Registra los datos y crea una tabla con el esfuerzo aplicado  $\alpha$  (peso dividido por el área de la sección transversal de la banda) y la deformación correspondiente  $\varepsilon$ .

#### Análisis de resultados

- Grafica los resultados con el esfuerzo  $\alpha$  en el eje vertical y la deformación  $\varepsilon$  en el eje horizontal.
- Si la banda sigue la Ley de Hooke, observarás una relación lineal entre el esfuerzo y la deformación.
- Calcula el módulo de Young  $E$  a partir de la pendiente de la gráfica.

### 6.2.3 Teoría de elasticidad

La **elasticidad** y la **plasticidad** son conceptos fundamentales en la mecánica de sólidos que describen cómo los materiales responden a las fuerzas aplicadas. Estas propiedades determinan si un material recuperará su forma original o sufrirá deformaciones permanentes después de ser sometido a una carga.

Imagina un resorte que se estira al aplicar una fuerza. Si no se supera su límite elástico, volverá a su longitud original cuando se retire la fuerza. Este principio se aplica en componentes como amortiguadores o resortes industriales.

La **plasticidad** describe el comportamiento de los materiales cuando se deforman de manera permanente. Este fenómeno ocurre cuando la carga aplicada excede el límite elástico del material, llevándolo a una deformación plástica.

La transición entre elasticidad y plasticidad se caracteriza por el **límite elástico**, que marca el esfuerzo máximo que un material puede soportar sin sufrir deformaciones permanentes. Este límite varía según el material. Materiales como el acero tienen un límite elástico elevado, lo que los hace adecuados para aplicaciones estructurales; los polímeros suelen tener un límite elástico bajo y son más propensos a deformarse plásticamente con cargas moderadas.

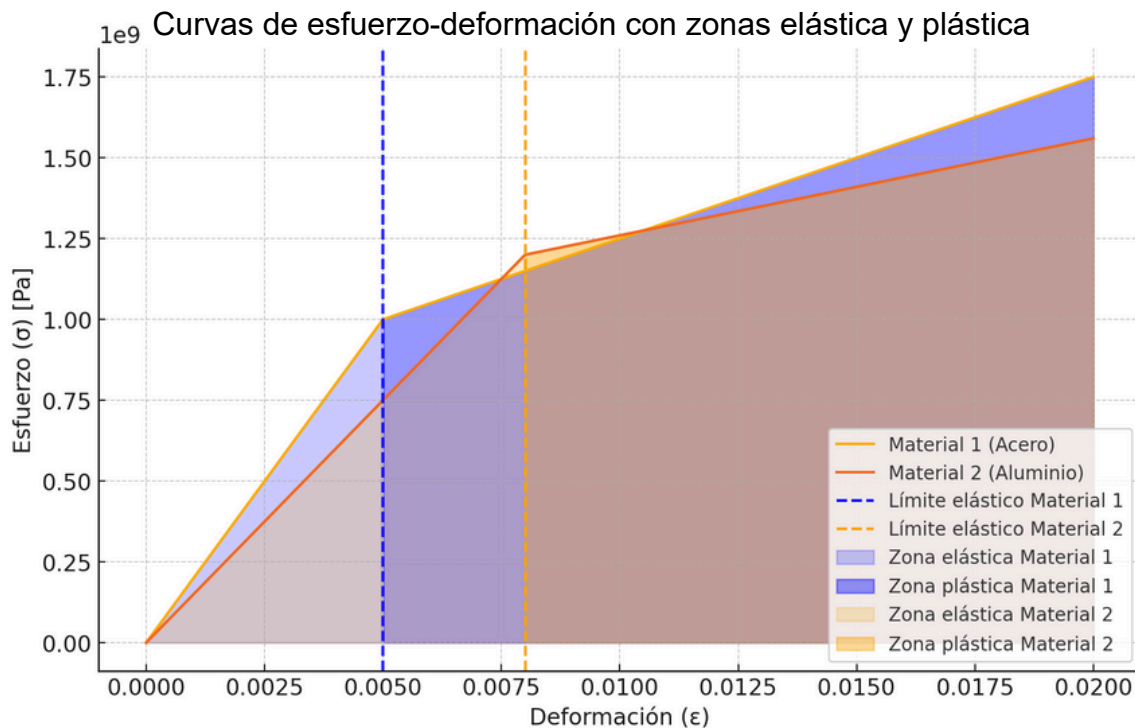


Figura 6.3 La gráfica muestra dos curvas de esfuerzo-deformación para acero y aluminio, en las cuales se distingue que el aluminio tiene un límite elástico superior al acero y se diferencian las zonas elásticas y plásticas. Por ejemplo, el aluminio sometido a un esfuerzo de 1 MPa estará trabajando en la zona elástica por lo que presentará una deformación de 0.0060, pero regresará a su forma original al retirarse la carga. Para conocer más sobre cómo se determinan estas curvas, puedes ver el capítulo 4.



## 6.3 Análisis de estructuras simples

El análisis de estructuras es un pilar fundamental de la mecánica de sólidos y se utiliza para estudiar cómo las fuerzas actúan sobre las estructuras, asegurando su estabilidad y funcionalidad. En esta sección se aplicarán principios básicos para analizar estructuras simples mediante ecuaciones de equilibrio y diagramas de cuerpo libre.

### 6.3.1 Diagrama de cuerpo libre

Un diagrama de cuerpo libre es un dibujo simple de un objeto en particular que muestra las fuerzas externas actuando sobre él. El diagrama de cuerpo libre tiene el propósito de identificar sin ambigüedades todas las fuerzas externas. A continuación, se describen los pasos para realizar este tipo de diagramas.

**Paso 1.** Identificar el objeto del cual se hará el diagrama. La elección suele estar determinada por las fuerzas desconocidas y los momentos que deben determinarse. La barra en forma de L, en la figura 6.4 está sometida a dos cargas: una fuerza de 2 kN y un momento de 4 kN·m, además de contar con soportes de pasador y rodillo (véase la tabla 6.1). Nuestro objetivo es dibujar el diagrama de cuerpo libre que nos permita determinar las reacciones ejercidas sobre la barra por los dos soportes (Bedford y Liechti, 2020).

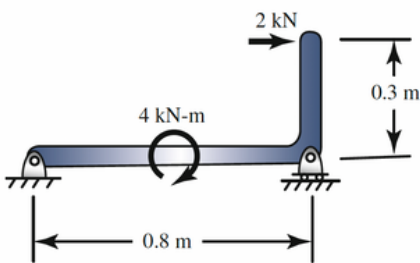


Figura 6.4 (Bedford y Liechti, 2020)

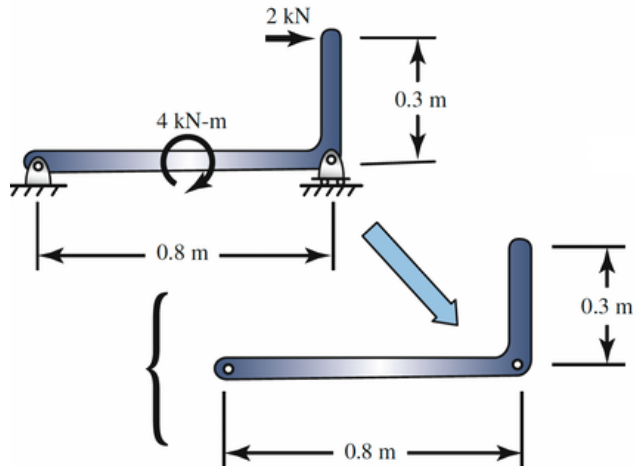


Figura 6.5 (Bedford y Liechti, 2020)

**Paso 2.** Dibujar un boceto del objeto aislado de su entorno. Llevamos a cabo este paso dibujando un esquema de la barra aislada de sus soportes como se observa en la figura 6.5 (Bedford y Liechti, 2020).

**Paso 3.** Indicar y etiquetar las fuerzas externas y los momentos que actúan sobre el objeto aislado. Completamos el diagrama de cuerpo libre de la barra, añadiendo las cargas aplicadas e indicando y etiquetando las reacciones ejercidas por los soportes de perno y rodillo (figura 6.6) (Bedford y Liechti, 2020). Los soportes comunes y las reacciones que pueden ejercer se muestran en la tabla 6.1.

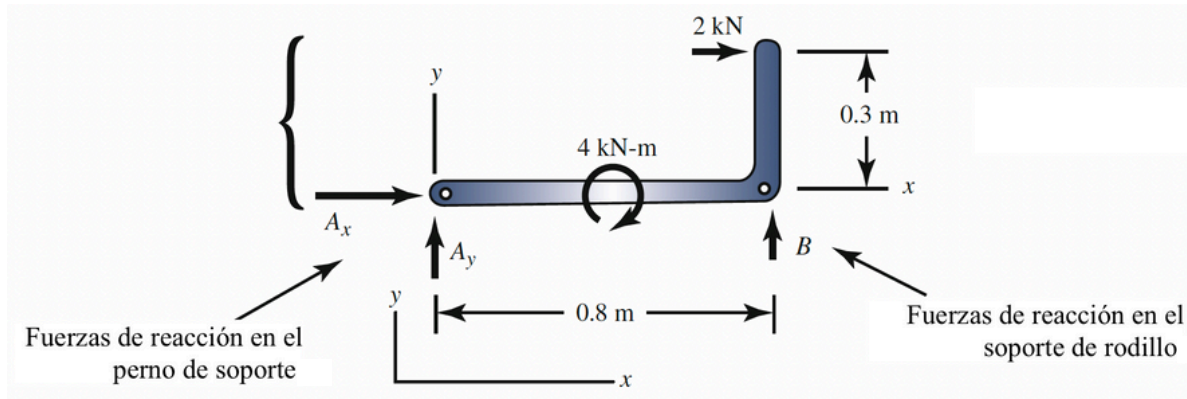


Figura 6.6 (Bedford y Liechti, 2020)

### 6.3.2 Ecuaciones de equilibrio

Una estructura está en equilibrio estático cuando todas las fuerzas y momentos que actúan sobre ella se compensan mutuamente. Este principio se traduce en las siguientes ecuaciones fundamentales:

1. La suma de las fuerzas horizontales debe ser cero:

$$\sum F_x = 0$$

2. La suma de las fuerzas verticales debe ser cero:

$$\sum F_y = 0$$

3. La suma de los momentos respecto de cualquier punto debe ser cero:

$$\sum M = 0$$

Estas ecuaciones son la base para determinar las fuerzas de reacción en los apoyos y las fuerzas internas en una estructura. Son aplicables a una amplia variedad de problemas de ingeniería, desde vigas y columnas hasta estructuras más complejas.

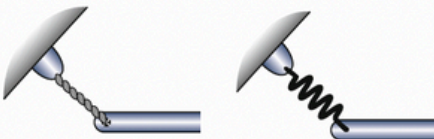
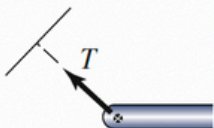

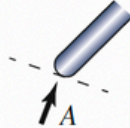
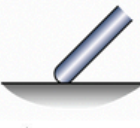
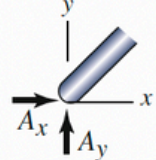
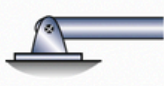
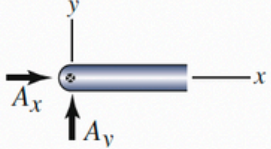

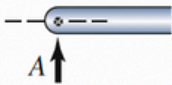
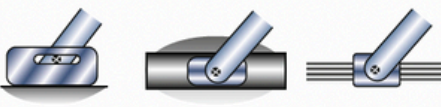
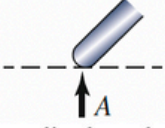

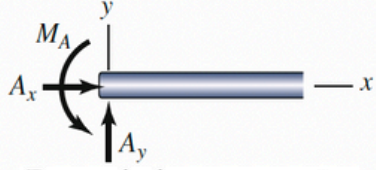
Soporte	Reacciones
 <p>Cuerda o cable      Resorte</p>	 <p>Fuerza colineal</p>
 <p>Contacto con superficie suave</p>	 <p>Fuerza perpendicular a la superficie</p>
 <p>Contacto con superficie áspera</p>	 <p>Fuerza de dos componentes</p>
 <p>Perno de soporte</p>	 <p>Fuerza de dos componentes</p>
 <p>Soporte de rodillo Equivalentes</p>	 <p>Fuerza perpendicular a la superficie</p>
 <p>Perno o deslizador restringido</p>	 <p>Fuerza perpendicular a la superficie</p>
 <p>Soporte fijo (empotramiento)</p>	 <p>Fuerza de dos componentes y un momento</p>

Tabla 6.1 Soportes comunes y sus reacciones (Bedford y Liechti, 2020)

## Caso de estudio

### Diseño de soporte para una plataforma de mantenimiento

Imaginemos que un ingeniero está diseñando un soporte estructural para una plataforma de mantenimiento utilizada en un edificio industrial. Este soporte triangular tiene como objetivo proporcionar estabilidad y apoyo seguro para herramientas y equipos durante operaciones de mantenimiento. La carga principal que actúa sobre la estructura es una fuerza vertical de 10 kN (debido al peso de herramientas y operarios) aplicada en el punto **B** (figura 6.7).

**Ansys**



Conoce más.

En este curso gratuito de Ansys Inc. (2020a) se presentan otros casos de estudio. Aquí se analizan fuerzas que no cambian (estáticas), pero, ¿qué sucede si la fuerza varía con el tiempo? ¡Aquí verás cómo se resuelve!

#### Detalles del caso

Los puntos **A** y **C** representan las uniones de la estructura de soporte a la pared, y los ángulos dados ( $30^\circ$  y  $60^\circ$ ) permiten optimizar el diseño estructural para distribuir la carga de manera eficiente. Las barras del soporte son cilíndricas, con un diámetro de 80 mm. Se deben analizar los esfuerzos en las barras del soporte triangular para garantizar que los materiales seleccionados sean adecuados para soportar las cargas sin fallar. Vamos a comenzar analizando los esfuerzos axiales y cortantes en la sección P de la barra AB.

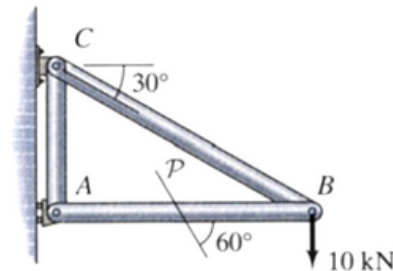


Figura 6.7 (Bedford y Liechti, 2020)

#### Aplicación de conocimientos

Primero realizaremos el diagrama de cuerpo libre. Como solo se desea analizar los esfuerzos en P, bastará con analizar la barra AB, por lo cual el diagrama de cuerpo libre puede dibujarse en el extremo A o en el soporte B; elegiremos este último. El diagrama de cuerpo libre se muestra en la figura 6.8.

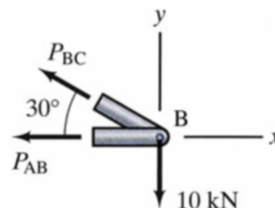


Figura 6.8 (Bedford y Liechti, 2020)

La fuerza que nos interesa obtener es la  $P_{AB}$ , pues es la que se está ejerciendo sobre la barra AB. Para ello se definen las ecuaciones de equilibrio sobre los ejes x y y.

$$\sum F_x = -P_{AB} - P_{BC} \cos 30^\circ = 0$$

$$\sum F_y = P_{BC} \operatorname{sen} 30^\circ - 10 \text{ kN} = 0$$

Observa que se utilizan las proyecciones de la fuerza PBC sobre el eje x y y con el ángulo de  $30^\circ$ . Solucionando el sistema de ecuaciones se obtienen los siguientes resultados para las fuerzas  $P_{AB}$  y  $P_{BC}$ .

$$P_{AB} = -17.3 \text{ kN}$$

$$P_{BC} = 20 \text{ kN}$$

Entonces, en el extremo B hay dos fuerzas aplicadas. Para determinar el esfuerzo en la sección P, hay que hacer el diagrama de cuerpo libre de la barra AB. En el extremo A, la barra tiene un soporte de rodillo, el cual produce una reacción perpendicular a la superficie del soporte. En la figura 6.9 se muestra el diagrama de cuerpo libre de la barra AB.

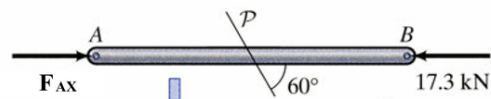


Figura 6.9 (Bedford y Liechti, 2020)

Usando de nuevo las ecuaciones de equilibrio en x, se obtiene que el valor de la fuerza  $F_{AX}$  es de 17.3 kN. Para analizar los esfuerzos en la sección P, se hace el corte en la barra en esa sección y se coloca el sistema coordenado de forma normal y tangencial a la superficie P como se muestra en la figura 6.10.

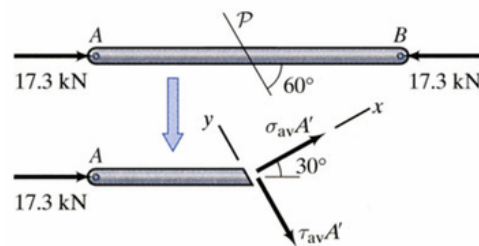


Figura 6.10 (Bedford y Liechti, 2020)

Con base en este sistema coordenado, el esfuerzo normal estará sobre el eje x y el esfuerzo cortante sobre el eje y. Aplicando las ecuaciones de equilibrio sobre x y y se obtiene:

$$\sum F_x = \sigma_{av} A' + (17.3 \text{ kN}) \cos 30^\circ = 0$$

$$\sum F_y = -\tau_{av} A' - (17.3 \text{ kN}) \operatorname{sen} 30^\circ = 0$$

Nótese que se están utilizando las proyecciones de la fuerza de 17.3 kN sobre el eje x y sobre el eje y con el ángulo de 30°. Por otra parte, en las ecuaciones de equilibrio se utiliza el producto del esfuerzo axial por el área transversal, ya que la ecuación de equilibrio requiere que se usen fuerzas y el producto de esfuerzo por área es una fuerza, como se ve en su ecuación; algo similar se hace con el esfuerzo cortante al multiplicarlo por el área.

$$\tau = \frac{V}{A} \quad \text{entonces} \quad \tau A = V$$

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad \text{entonces} \quad \sigma A = F$$

Para resolver el sistema de ecuaciones hay que determinar el valor del área  $A'$ . Dado que el diámetro de la barra es de 80 mm, su radio es de 40 mm. Al tratarse de una barra cilíndrica, es posible calcular el área transversal de la barra como:

$$A = \pi(0.04 \text{ m})^2$$

Utilizando la proyección con el ángulo de 30°, es posible determinar el valor de  $A'$ :

$$A' \cos 30^\circ = A = \pi(0.04 \text{ m})^2$$

$$A' = \frac{\pi(0.04 \text{ m})^2}{\cos 30^\circ} = 0.00580 \text{ m}^2$$

Resolviendo las ecuaciones para los esfuerzos, se obtiene:

$$\tau_{av} = -1.49 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{av} = -2.58 \text{ MPa}$$

### Observaciones

Ya conocemos entonces los valores del esfuerzo axial y esfuerzo cortante a los que está sometida la barra AB. El esfuerzo axial, al ser negativo, indica un esfuerzo axial en compresión; el material de la barra será entonces comprimido.

- ¿Qué material deberíamos utilizar?
- ¿Existe alguna clasificación de materiales que se comporte mejor en compresión?
- Si el esfuerzo fuera de la misma magnitud, pero en tracción (dirección opuesta), ¿el aluminio resistiría el esfuerzo sin deformarse permanentemente? Puedes revisar la figura 6.3 y ver si el esfuerzo está en la zona plástica o elástica para el aluminio.

## Caso de estudio

### La Ingeniería en el diseño del control DualSense de PlayStation 5

El lanzamiento del control DualSense para la consola PlayStation 5 marcó un hito en la industria de los videojuegos, no solo por su diseño futurista, sino también por la incorporación de tecnologías avanzadas que combinan mecánica de sólidos, materiales innovadores y electrónica para mejorar la experiencia del usuario.

#### Gatillos adaptativos: una obra maestra de mecánica y materiales

Los gatillos adaptativos son una característica clave del DualSense, diseñados para proporcionar retroalimentación háptica variable según las acciones realizadas en el juego (como tensar un arco o disparar un arma).

Los gatillos incorporan un sistema interno de engranajes, resortes y motores que ajustan la resistencia al movimiento. La mecánica de sólidos desempeñó un papel fundamental en garantizar que los materiales soportaran el uso constante sin deformarse ni fallar.

Los resortes están hechos de aleaciones de acero que combinan elasticidad y durabilidad, mientras que las piezas móviles utilizan polímeros ligeros y resistentes al desgaste.



Figura 6.11 Mecanismo del gatillo háptico del control DualSense de PlayStation con actuador lineal

## Retroalimentación háptica y vibración precisa

El DualSense reemplazó los motores tradicionales de vibración por **actuadores lineales avanzados**. Estos dispositivos convierten señales eléctricas en movimientos precisos, generando sensaciones táctiles que varían desde el golpeteo de la lluvia hasta la textura de caminar sobre diferentes superficies.



### Conoce más.

En este video de TronicsFix (2020), se muestra el desensamble del control DualSense de PlayStation. Ve al minuto 9:12 del video si solo quieres ver el funcionamiento del actuador lineal del control.

Los actuadores están diseñados para maximizar la transmisión de vibraciones a través del plástico del control sin comprometer su integridad estructural. Esto requirió simulaciones avanzadas para calcular la distribución de fuerzas y minimizar las tensiones en los puntos de unión.

### Observa el video de funcionamiento del mecanismo de DualSense y responde

- ¿Qué tipos de materiales distingues?
- El mecanismo que ves en la figura 6.11 se conoce como corona sin fin. ¿Qué tipo de esfuerzo estaría ejerciéndose sobre el eje conductor (pieza blanca)?
- Si el eje conductor estuviera hecho de ABS, ¿cuál sería el esfuerzo máximo que se puede aplicar a la pieza sin que esta se deforme permanentemente?



## Amplía tus conocimientos

A continuación, se presentan referencias que te permitirán reforzar y ampliar tus conocimientos sobre mecánica de sólidos.

### Libros

📖 Beer, F. P., Johnston, E. R., DeWolf, J. T. y Mazurek, D. F. (2020). *Mechanics of Materials* (8.ª ed.). CDMX, México: McGraw-Hill.

Libro clásico que aborda los conceptos fundamentales de la mecánica de sólidos y materiales, con un enfoque en la resolución de problemas prácticos.

📖 Hibbeler, R. C. (2017). *Mechanics of Materials* (10.ª ed.). CDMX, México: Pearson Education.

Excelente recurso que combina teoría, ejemplos y ejercicios interactivos, ideal para estudiantes de ingeniería.

📖 Gere, J. M. y Goodno, B. J. (2017). *Mechanics of Materials, SI Edition* (9.ª ed.). Boston, Estados Unidos: Cengage Learning.

Un enfoque claro y práctico de la mecánica de materiales, con casos reales y aplicaciones en ingeniería estructural.

### Páginas web

🌐 ANSYS, Inc. (2020a). *Stress Analysis in Solid Mechanics* [Curso en línea]. Ansys Innovation Space. <https://innovationspace.ansys.com/product/stress-analysis-in-solid-mechanics/>  
Curso gratuito para casos de estudio distintos a los presentados en el capítulo.

🌐 Khan Academy. (s. f.). *Stress and Strain in Materials*. <https://www.khanacademy.org>

Una introducción interactiva a conceptos clave como esfuerzo, deformación y elasticidad, con ejemplos claros y simulaciones.

### Videos

▶ ANSYS, Inc. (2020b, 28 de julio). *Intro to Solid Mechanics — Lesson 1* [Video]. YouTube. Canal: Ansys Learning. <https://www.youtube.com/watch?v=ww5h7me7K2g>

Video que explica qué estudia la mecánica de sólidos y su importancia.

▶ CrashCourse. (2018, 20 de septiembre). *Reaching Breaking Point: Materials, Stresses, & Toughness: Crash Course Engineering #18* [Video]. YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=GpiBSFMFe-w>  
Serie educativa que explica conceptos básicos de mecánica de sólidos con animaciones dinámicas y lenguaje accesible.

▶ TronicsFix. (2020, 1 de noviembre). *PS5 DualSense Controller Teardown - A Repairability Perspective* [Video]. YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=4rNITneXnCo>

Video que muestra el desensamble del control DualSense de PlayStation.

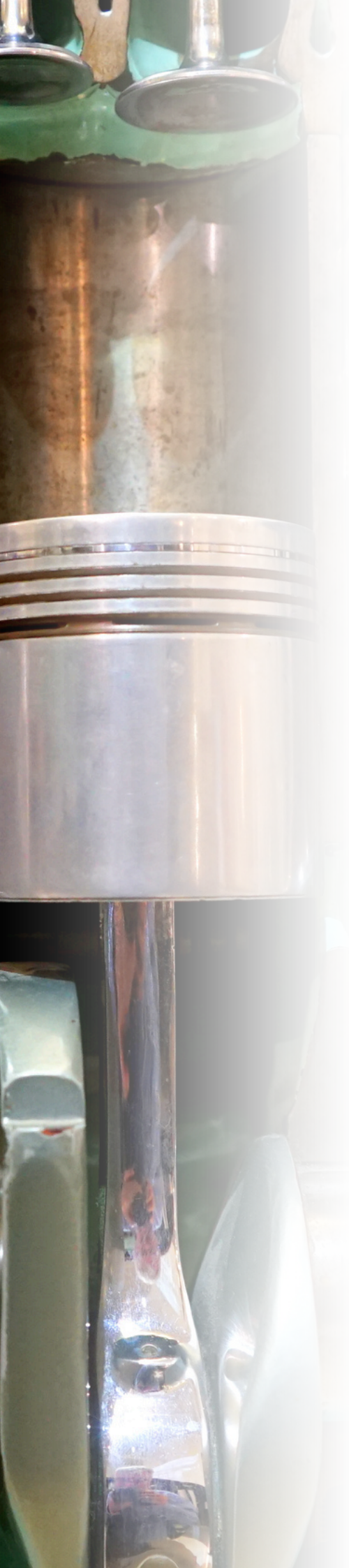


## Referencias

### Libros

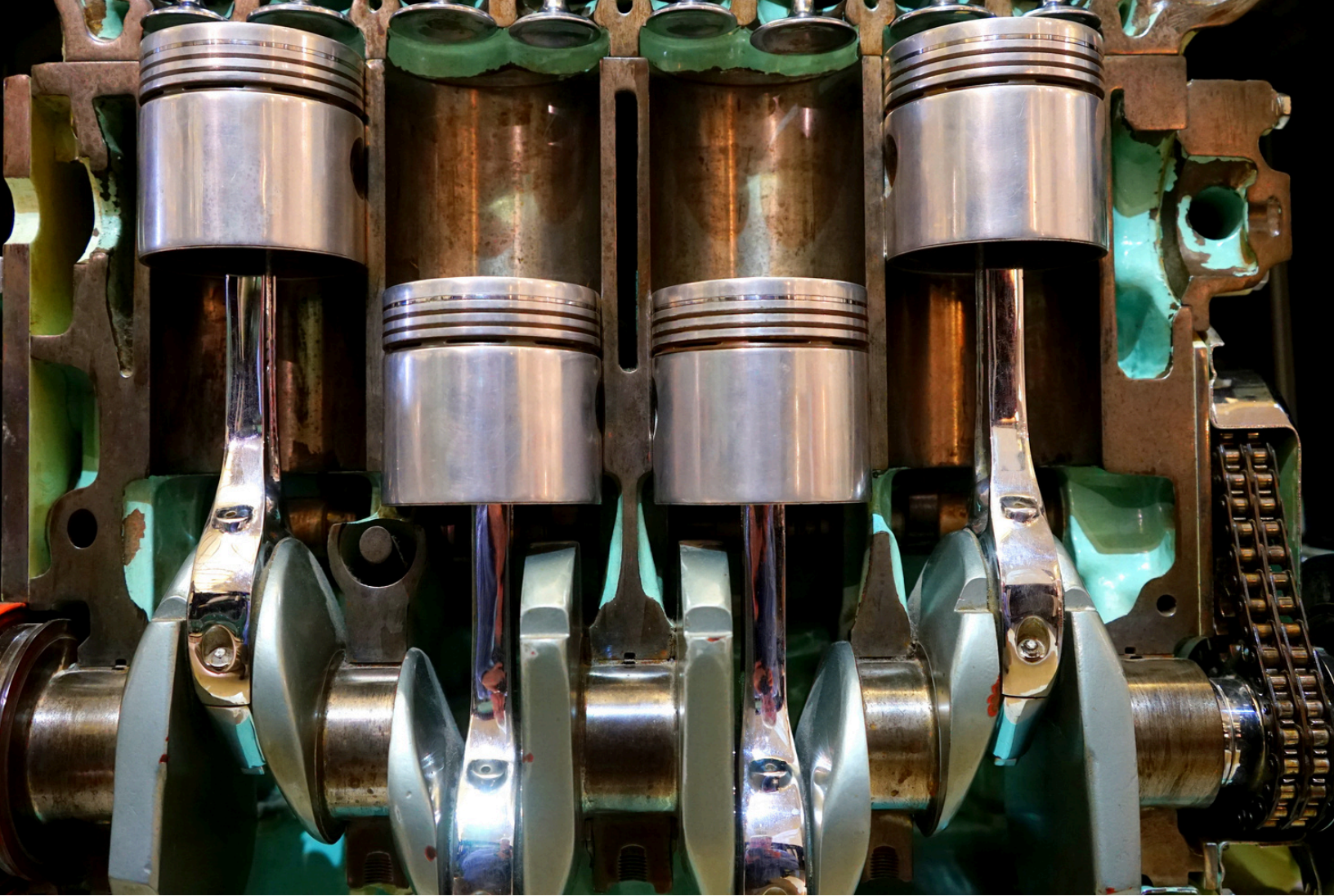
▣ Bedford, A. y Liechti, K. M. (2020). *Introduction*. En A. Bedford y K. M. Liechti (Eds.), *Mechanics of Materials* (pp. 1–35). Cham, Suiza: Springer International Publishing. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-22082-2\\_1](https://doi.org/10.1007/978-3-030-22082-2_1)





Capítulo 7

# Dinámica de mecanismos



En este capítulo se presentan los conceptos fundamentales de la dinámica de sistemas mecánicos de una manera accesible y práctica, mostrando cómo estos conocimientos se aplican a problemas reales de la ingeniería. A través de teorías simplificadas, ejemplos cotidianos y actividades prácticas, podrás comprender cómo los principios de la dinámica se integran en el diseño y análisis de sistemas mecánicos.

Dominar la cinemática y la dinámica, así como tener conocimiento de su utilidad y funcionamiento, te permite diseñar desde vehículos y robots hasta sistemas complejos como drones o máquinas industriales. Estos conceptos son el primer paso para entender cómo funciona el mundo mecánico y mecatrónico.

Entender cómo se mueven las cosas es fundamental en la mecánica y la mecatrónica. ¿Alguna vez te has preguntado cómo un brazo robótico sabe en qué posición está cada articulación, o cómo los amortiguadores de un auto absorben los baches? ¡Todo eso tiene que ver con la dinámica!

## 7.1 ¿Qué es la dinámica en sistemas mecánicos?

La dinámica de sistemas mecánicos es una rama de la ingeniería que estudia cómo los objetos se mueven bajo la influencia de fuerzas. Este campo se divide en dos áreas principales:

- **Cinemática:** Analiza el movimiento de los objetos sin considerar las fuerzas que lo producen. Se enfoca en aspectos como posición, velocidad y aceleración.
- **Dinámica:** Explora las fuerzas que causan el movimiento. Utiliza las leyes de Newton para relacionar la fuerza, la masa y la aceleración.

La dinámica es crucial para diseñar sistemas y mecanismos que se muevan de manera controlada y eficiente. Un ejemplo cotidiano es el sistema de transmisión de una bicicleta.



Figura 7.1 Mecanismo de transmisión de una bicicleta



### Conoce más.

En este video de Te lo explico En un minuto (2021), se explican las partes que componen la transmisión de una bicicleta de velocidades y su funcionamiento.

Se conoce como sistema de transmisión por cadena. Este se conforma de piezas mecánicas como son los pedales que están unidos a unas piezas llamadas bielas. Estas son palancas que conectan el pedal al engrane central o piñón o catarina central, y a su vez este engrane, a través de las cadenas transmite la fuerza a los engranes de la rueda trasera, cuyo conjunto se suele llamar cassette.

Determinar el diámetro de los engranes, la longitud de la cadena y de las bielas requiere analizar la cinemática y dinámica de cada uno de los componentes y de su conjunto, para garantizar que el funcionamiento sea correcto.

El determinar las fuerzas ejercidas sobre cada componente a través de la dinámica, permite seleccionar los materiales (ejemplificado en la sección 4) a través del análisis de los esfuerzos que internamente suceden en los componentes (explicado en la sección 6), además de garantizar que el usuario logre la fuerza requerida para mover el mecanismo y le resulte cómodo.

La dinámica de sistemas mecánicos es esencial para resolver problemas en una amplia variedad de campos. Por ejemplo, en brazos robóticos (figura 7.2), los ingenieros deben calcular las fuerzas necesarias para levantar objetos, garantizar precisión y optimizar el movimiento. En suspensiones automotrices (figura 7.3), el análisis dinámico permite diseñar sistemas que reduzcan las vibraciones y mejoren la comodidad de los pasajeros, entre otros.

Como puedes ver, muchos aspectos de la ingeniería están involucrados en un objeto de uso cotidiano. ¿Puedes identificar otro objeto que uses en tu vida diaria donde sea importante la velocidad, posición o fuerza? Seguramente quien lo diseñó tuvo que aprender de cinemática y dinámica.



Figura 7.2 Brazos robóticos en una línea de ensamble automatizado de automóviles



Figura 7.3 Sistema de suspensión de automóvil

## Proyecto 7.1

### Reflexión sobre sistemas dinámicos cotidianos



#### Objetivo del proyecto

Identificar sistemas dinámicos en objetos cotidianos y analizar cómo la dinámica explica su funcionamiento.

#### Instrucciones

1. Piensa en tres objetos que utilices en tu día a día o que hayas visto en algún momento y que impliquen movimiento. Por ejemplo: un columpio, un reloj de péndulo, una bicicleta, una grúa.
2. Responde las siguientes preguntas:
  - a. ¿Qué tipo de movimiento tienen (lineal, rotacional, oscilatorio)?
  - b. ¿Qué fuerzas están actuando en estos sistemas?
  - c. ¿Cómo afecta el diseño del objeto a su movimiento?
3. Piensa en cómo la comprensión de la dinámica puede mejorar el diseño de estos sistemas.

## 7.2 Cinemática y dinámica: comprendiendo el movimiento

### 7.2.1 Cinemática del movimiento

La **cinemática** estudia el movimiento de los cuerpos sin considerar las fuerzas que lo causan. Se enfoca en describir cómo cambian la **posición**, la **velocidad** y la **aceleración** con el tiempo.

#### Conceptos básicos

**Posición** ( $x$ ): representa la ubicación de un objeto en un punto específico. Se mide respecto a un sistema de referencia.

Por ejemplo, si quisieras medir el número de metros que estás hacia un objeto, tienes que decidir a partir de dónde tomarás la medida; puedes medirla desde el objeto hacia tí o de ti al objeto. El punto a partir del que mides es tu sistema de referencia.



**Velocidad** ( $v$ ): es el cambio de posición en el tiempo. Puede ser promedio o instantánea y sus unidades son  $\text{m/s}$ . Se puede calcular con la fórmula:

$$v = \frac{dx}{dt}$$

**Aceleración** ( $a$ ): es el cambio de velocidad en el tiempo; qué tan rápido cambia la velocidad, si estás en un semáforo en rojo y arrancas, tu aceleración es lo que sientes al principio. Sus unidades son  $\text{m/s}^2$  y se puede calcular con la fórmula:

$$a = \frac{dv}{dt}$$

### Casos especiales

El **movimiento rectilíneo uniforme** es un tipo de movimiento en línea recta que a menudo se encuentra en aplicaciones prácticas. En este movimiento, la aceleración  $a$  de una partícula es cero para todo valor de tiempo (Beer et al., 2017). En consecuencia, la velocidad es constante; al no haber cambio de velocidad, la aceleración es cero y la ecuación de velocidad se puede definir como:

$$x = x_0 + vt$$

Donde:

$x$  Es la posición final.

$x_0$  Es la posición inicial.

$v$  Es la velocidad a la que se mueve y es un valor constante.

$t$  El tiempo transcurrido desde el inicio del movimiento.

El **movimiento rectilíneo uniformemente acelerado** es otro tipo común de movimiento (Beer et al., 2017). En este, la aceleración  $a$  de la partícula es constante y de la ecuación de aceleración se puede determinar:

$$x = x_0 + v_0t + \frac{1}{2}at^2$$

Donde:

$x$  Es la posición final.

$x_0$  Es la posición inicial.

$v_0$  Es la velocidad inicial a la que se mueve y es un valor constante.

$t$  El tiempo transcurrido desde el inicio del movimiento.

En el diseño de sistemas mecánicos, es muy común encontrarse con situaciones donde los objetos se mueven en línea recta.

El movimiento rectilíneo uniforme se puede observar en una banda transportadora en una fábrica, cuando ya está funcionando a su velocidad normal, las piezas que van sobre ella se mueven a velocidad constante o en una línea de producción automatizada, donde los brazos robóticos (figura 7.2) muchas veces están programados para mover componentes a una velocidad constante entre puntos específicos.

Por otra parte, el movimiento rectilíneo uniformemente acelerado se observa, por ejemplo, en una banda transportadora que arranca (está parada, con velocidad cero) y comienza a acelerar hasta llegar a su velocidad de trabajo final.

Por ello, comprender cómo y cuándo se presentan estos tipos de movimiento es muy importante al momento de diseñar cualquier sistema mecánico.

## Caso de estudio

### Motor Bourke: una aplicación del mecanismo de yugo escocés

El motor Bourke fue un intento de Russell Bourke, en la década de 1920, de mejorar el motor de combustión interna de dos tiempos. A pesar de terminar su diseño y construir varios motores en funcionamiento, el inicio de la Segunda Guerra Mundial y la falta de resultados de las pruebas evitaron que su motor llegara con éxito al mercado. Sin embargo, es un buen ejemplo de la aplicación del mecanismo de yugo escocés, así se verá la utilidad de conceptos de posición, velocidad y aceleración.



#### Conoce más.

Animación del mecanismo del yugo escocés de Edgar Torres (2021) Se observa cómo este mecanismo puede convertir un movimiento rotativo en lineal y viceversa.

El yugo escocés (figura 7.5) es un mecanismo que convierte el movimiento rotativo en movimiento lineal alternativo y viceversa, como se muestra en el video *Animación del mecanismo yugo escocés*. La posición de un punto en su estructura (por ejemplo, el punto A en la figura 7.5) puede describirse como una función sinusoidal.

En sistemas de oleoductos y gasoductos se utilizan actuadores que incorporan el yugo escocés para regular el flujo de fluidos a alta presión. Algunos compresores y bombas emplean este mecanismo para transformar el movimiento rotativo de un motor en el movimiento lineal necesario para comprimir aire o bombear fluidos. En este caso de estudio, se analizan diferentes aspectos de la cinemática de un yugo escocés y cómo este mecanismo se utilizó para el diseño de un motor de combustión interna, por lo que conocer su posición, velocidad y aceleración en cualquier momento es crucial para su diseño.

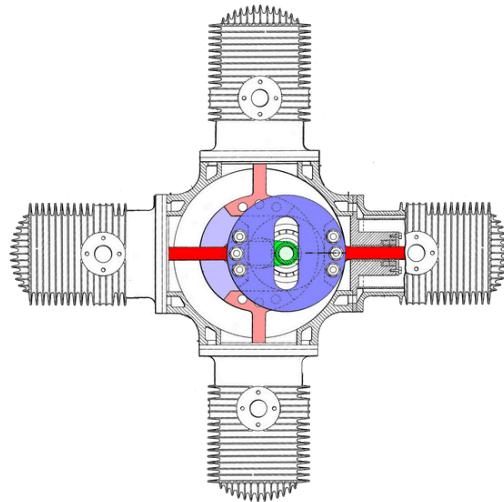


Figura 7.4 Ilustración de un motor Bourke de cuatro cilindros. De Wikipedia contributors, n.d., Bourke Engine four Cylinder-Color[Imagen], Wikipedia. Recuperado de [https://en.wikipedia.org/wiki/Bourke\\_engine#/media/File:Bourke\\_Engine\\_four\\_Cylinder-Color.png](https://en.wikipedia.org/wiki/Bourke_engine#/media/File:Bourke_Engine_four_Cylinder-Color.png)

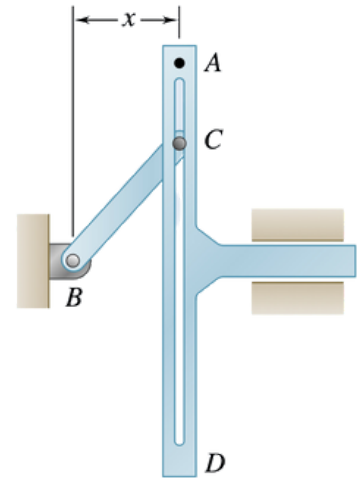


Figura 7.5 Yugo escocés para el caso de estudio (Beer et al., 2017)

### Detalles del caso

El motor Bourke (figura 7.4) permite convertir el movimiento lineal generado por la explosión del combustible al quemarse dentro de un émbolo, a movimiento rotacional para mover un automóvil (para ver más detalles sobre el funcionamiento de un motor de combustión interna, consultar la sección 3.4.2 del capítulo 3).

Para el diseño de un motor de combustión interna, es importante conocer la posición, velocidad y aceleración del yugo escocés para que, en un proceso posterior, puedan calcularse las velocidades de giro del eje del motor y conocer la velocidad que podría alcanzar el automóvil.

El yugo escocés del motor de Bourke se puede simplificar al retirar los émbolos, como el yugo de la figura 7.5. Para aplicar los conocimientos previamente vistos, se supondrán algunos datos con el propósito de poder conocer la posición del yugo en cualquier instante del tiempo.

Suponer que, para el yugo escocés de la figura 7.5, la aceleración del punto A está definida mediante la relación  $a = -1.8 \sin(kt)$ , donde  $a$  y  $t$  están expresados en  $\text{m/s}^2$  y  $\text{s}$ , respectivamente, y  $k = 3 \text{ rad/s}$ . Si se sabe que  $x = 0$  y  $v = 0.6 \text{ m/s}^2$  cuando  $t = 0 \text{ s}$ , se debe determinar la velocidad y posición del punto A cuando  $t = 0.5 \text{ s}$  (0.5 segundos después de que el yugo comienza a moverse).

### Aplicación de conocimientos

La derivada de la velocidad respecto del tiempo es la aceleración:

$$a = \frac{dv}{dt}$$

Entonces, la velocidad se puede definir como:

$$v(t) = \int a(t) dt$$

Por lo tanto, podemos obtener la función de velocidad a través de la integral:

$$v(t) = \int a(t) dt = \int -1.8 \operatorname{sen}(kt) dt = \int -1.8 \operatorname{sen}(3t) dt$$

$$v(t) = \frac{-1.8}{3}(-\cos(3t)) + C_1 = 0.6 \cos(3t) + C_1$$

Utilizando la condición inicial para la velocidad que indica  $v = 0.6 \text{ m/s}$ :

$$0.6 = 0.6 \cos(0) + C_1; \quad C_1 = 0$$

De esta forma, la función de velocidad del punto A del yugo escocés está determinada por la función:

$$v(t) = 0.6 \cos(3t)$$

Con la función de velocidad respecto del tiempo, es posible determinar la función de posición:

$$x(t) = \frac{dv}{dt}$$

Entonces, la posición se puede definir como:

$$x(t) = \int v(t) dt$$

Por consiguiente, podemos obtener la función de posición a través de la integral:

$$x(t) = \int v(t) dt = \int 0.6 \cos(3t) dt$$

$$x(t) = 0.2 \operatorname{sen}(3t) + C_2$$

Utilizando la condición inicial para la posición:

$$x(0) = 0 = 0.2 \operatorname{sen}(3(0)) + C_2$$

$$C_2 = 0$$

Así, la función que indica la posición del punto A del yugo escocés en cada instante de tiempo se define como:

$$x(t) = 0.2 \text{ sen}(3t)$$

Ya que tenemos las funciones de velocidad y posición, se evalúan en un tiempo de 0.5 segundos.

$$x(0.5) = 0.2 \text{ sen}(3(0.5)) = 0.1995 \text{ m}$$

$$v(0.5) = 0.6 \text{ cos}(3(0.5)) = 0.0424 \text{ m/s}$$

### Observaciones

A través de la cinemática, es posible determinar la posición y velocidad del punto A del yugo escocés. El punto A del yugo escocés inicia en la posición cero, 0.5 segundos después la posición del yugo escocés se ha movido 19.95 centímetros o 0.1995 metros y en ese mismo instante de tiempo, 0.5 segundos, tiene una velocidad de 0.0424 metros por segundo.

La posición del yugo escocés cambia como una función seno con amplitud de 0.2 metros, es decir, que el yugo escocés se puede mover 20 centímetros o 0.2 metros, a la derecha (valores positivos) o a la izquierda (valores negativos) del punto cero. Como varía la distancia con el tiempo, se puede observar en la gráfica anaranjada de la figura 7.6, en la gráfica azul de esta misma figura, podemos observar qué velocidad tiene el yugo escocés en cada posición.

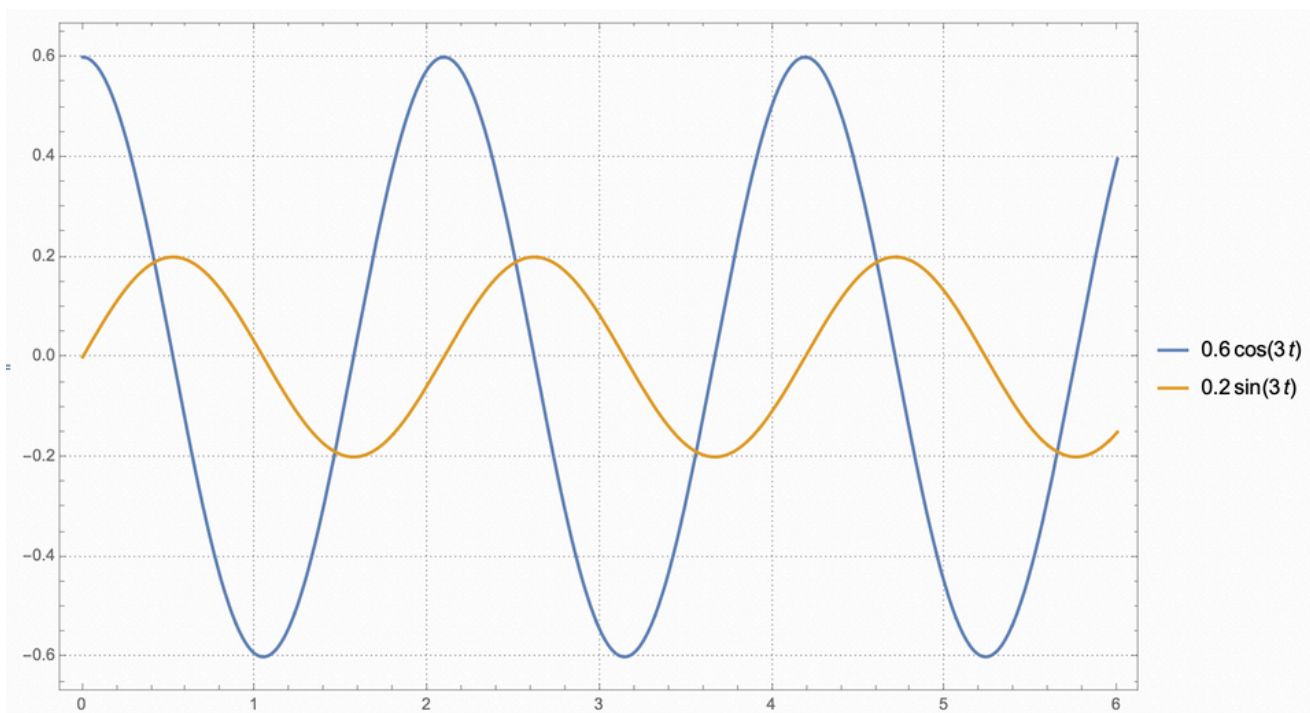


Figura 7.6 Gráfica de posición (anaranjada) y velocidad (azul) en cada instante de tiempo

## 7.2.2 Dinámica: fuerzas y movimiento

La **dinámica** es la rama de la mecánica que estudia cómo las fuerzas afectan el movimiento de los objetos. Mientras que la cinemática describe cómo se mueve un objeto, la dinámica explica por qué lo hace.

### Leyes de Newton aplicadas a sistemas mecánicos

Isaac Newton formuló tres leyes que son la base de la dinámica. Estas leyes describen cómo las fuerzas interactúan con los objetos:

**Primera ley: un objeto permanecerá en reposo o en movimiento rectilíneo uniforme, a menos que una fuerza externa actúe sobre él.** Su aplicación en la ingeniería se puede observar en un automóvil, si no se aplica el freno, el auto seguirá avanzando debido a su inercia.

**Segunda Ley: la fuerza que actúa sobre un objeto es proporcional a su masa y a la aceleración que experimenta.** Por ejemplo, si una bicicleta tiene una masa de 10 kg y queremos que acelere a  $2 \text{ m/s}^2$ , la fuerza necesaria será de 20 N. La ecuación matemática que enuncia esta ley es:

$$F = ma$$

**Tercera Ley: por cada fuerza de acción, hay una fuerza de reacción igual y opuesta.** Una aplicación en la ingeniería es cuando un dron genera empuje con sus hélices hacia abajo, el aire reacciona empujándolo hacia arriba, permitiendo que vuele.

### Relación entre fuerza, masa y aceleración

La segunda ley de Newton es esencial para entender cómo diseñar mecanismos eficientes y funcionales. En ingeniería, esta relación ayuda a calcular:

- Motores y máquinas: la fuerza que debe generar un motor para mover un sistema.
- Diseño de robots: la aceleración que puede alcanzar un brazo robótico, según su masa y la fuerza aplicada.

## 7.3 Vibraciones en sistemas mecánicos

Las vibraciones son oscilaciones repetitivas de un objeto o sistema alrededor de una posición de equilibrio. Estas oscilaciones pueden ser generadas por fuerzas externas o por las características propias del sistema.

### 7.3.1 Tipos de vibraciones

Dependiendo de las causas que producen las vibraciones, estas pueden ser clasificadas en diferentes tipos:

**Vibraciones libres:** ocurren cuando un sistema oscila por sí solo después de recibir un impulso inicial, sin la influencia de fuerzas externas. Por ejemplo, un columpio que se mueve después de empujarlo, sin necesidad de volver a aplicar fuerza, hasta que este se detiene.

**Vibraciones forzadas:** suceden cuando una fuerza externa actúa periódicamente sobre el sistema, obligándolo a oscilar. Por ejemplo, las vibraciones generadas por un motor en funcionamiento.

**Vibraciones amortiguadas:** ocurren cuando la energía de las oscilaciones disminuye gradualmente debido a factores como fricción o resistencia del aire. Por ejemplo, un amortiguador de un automóvil absorbiendo las irregularidades del camino.

### 7.3.2 Impacto de las vibraciones en ingeniería

Las vibraciones pueden ser tanto un beneficio como un desafío en el diseño de sistemas mecánicos. Por esta razón, los ingenieros deben analizar y controlar las vibraciones de manera eficiente.

#### **Ventajas de las vibraciones:**

- En dispositivos como teléfonos móviles y controles de videojuegos, las vibraciones proporcionan retroalimentación táctil al usuario.
- En equipos industriales, las vibraciones pueden utilizarse para separar materiales o compactar suelos en construcción.

#### **Desventajas de las vibraciones:**

- En puentes o edificios, las vibraciones excesivas pueden generar fallas estructurales.
- En máquinas pueden causar desgaste prematuro de componentes o generar ruido indeseable.



Figura 7.7 Sistema vibrador para celular

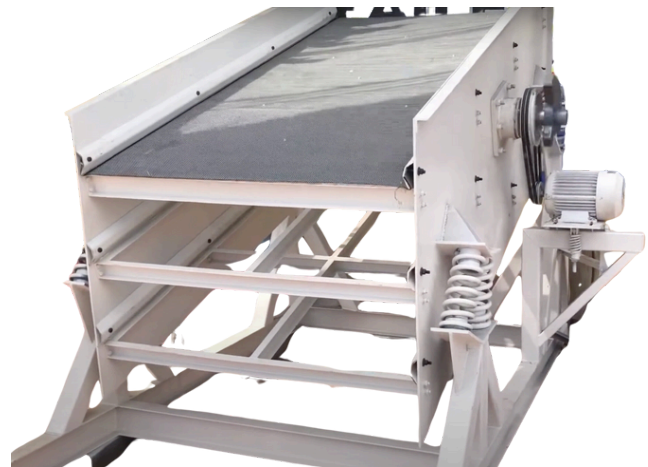


Figura 7.8 Criba vibradora para separación de materiales por tamizaje



#### Conoce más.

En este video de CDV Ingeniería Antisísmica (2013), podrás ver una maqueta de edificios expuestos a vibraciones forzadas y cómo los amortiguadores reducen el efecto de vibración sobre la estructura.

Los ingenieros diseñan estructuras como puentes o rascacielos teniendo en cuenta las fuerzas dinámicas, como el viento o los sismos. Por ejemplo:

- Puente de Tacoma Narrows (1940): su colapso ocurrió debido a una resonancia no controlada, donde el viento generó vibraciones catastróficas.
- Rascacielos modernos: incluyen amortiguadores de masa que absorben las vibraciones generadas por sismos o vientos, garantizando la seguridad.

### 7.3.3 Herramientas para analizar vibraciones

El análisis de vibraciones es crucial para garantizar la seguridad, funcionalidad y eficiencia de los sistemas mecánicos y mecatrónicos. A continuación, se detallan las herramientas clave que los ingenieros utilizan para entender y controlar las vibraciones.

#### Frecuencia natural: la clave para prevenir resonancia

La **frecuencia natural** es una propiedad inherente de los sistemas oscilatorios. Es la frecuencia a la cual un sistema vibra libremente después de recibir un impulso inicial, sin influencia de fuerzas externas. Cuando un sistema está sujeto a una fuerza externa que coincide con esta frecuencia, ocurre resonancia.

#### ¿Por qué es importante?

- La resonancia amplifica las vibraciones, lo que puede causar daños catastróficos en estructuras y máquinas.
- Comprender y calcular la frecuencia natural ayuda a diseñar sistemas que eviten este fenómeno.

Por ejemplo, las alas de un avión se diseñan para evitar que las vibraciones inducidas por el flujo de aire coincidan con su frecuencia natural, garantizando la seguridad durante el vuelo.

En un sistema masa-resorte simple (figura 7.9), la frecuencia natural ( $f_n$ ) se calcula como:

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}}$$

Donde:

$k$  Es la rigidez del resorte.

$m$  Es la masa del resorte.

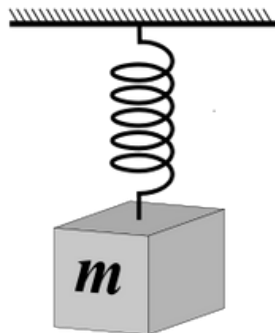


Figura 7.9 Ilustración común de un sistema masa-resorte. Aunque simple, este sistema modela muchos casos de mecanismo en ingeniería; por ejemplo, una llanta (masa) unida a una suspensión (resorte).

En el diseño de suspensiones de vehículos, se ajusta la rigidez de los resortes y la masa para garantizar que la frecuencia natural del sistema sea adecuada para absorber las irregularidades del camino sin causar incomodidad o inseguridad.





#### Conoce más.

En este video de TVZapper (2013), podrás ver una explicación de cómo el amortiguador de un automóvil utiliza un amortiguamiento viscoso para eliminar las vibraciones y mantener las ruedas del vehículo en contacto con el suelo.

## Amortiguamiento: controlando las vibraciones

El **amortiguamiento** es el proceso mediante el cual un sistema disipa la energía de las vibraciones, reduciendo su intensidad con el tiempo. Los ingenieros lo implementan para evitar que las vibraciones alcancen niveles peligrosos o incómodos. Existen diferentes tipos de amortiguamiento:

- Amortiguamiento viscoso: se logra con fluidos como aceite, que disipan la energía mediante la fricción interna. Por ejemplo, amortiguadores de automóviles, donde el fluido dentro del cilindro controla el movimiento de las suspensiones.
- Amortiguamiento de Coulomb: este tipo de amortiguamiento utiliza fricción entre superficies sólidas. Por ejemplo, los sistemas de frenos, donde la fricción detiene las oscilaciones del vehículo.
- Amortiguamiento material: es inherente a ciertos materiales, como el caucho, que absorben las vibraciones naturalmente. Por ejemplo, las almohadillas antivibración en maquinaria industrial.



Figura 7.10 Los amortiguadores de automóvil utilizan un resorte, también llamado muelle, y un cilindro de aceite, los cuales generan un amortiguamiento viscoso.



Figura 7.11 Muchas máquinas utilizan el amortiguamiento material para evitar daños en los equipos durante el trabajo; por ejemplo, en la lavadora, mientras realiza los ciclos de trabajo unas almohadillas de caucho absorben la energía de la vibración.

El tipo de amortiguamiento que se seleccione (viscoso, material o de Coulomb) depende de la rapidez con la que se quiera amortiguar, los costos y disponibilidad de los materiales. Además, se debe tener en cuenta **el coeficiente de amortiguamiento crítico** ( $C_c$ ).

El coeficiente de amortiguamiento crítico es un valor teórico, que describe el nivel de amortiguamiento necesario para que un sistema masa-resorte regrese a su posición de equilibrio de la manera más rápida posible, sin oscilar.

El coeficiente de amortiguamiento crítico depende de la masa ( $m$ ) y la rigidez del resorte del sistema ( $k$ ). El coeficiente de amortiguamiento crítico se calcula como:

$$C_c = 2\sqrt{km}$$

Muchos sistemas mecánicos se pueden modelar como una masa y un resorte, pues el resorte es un dispositivo que representa cualquier elemento mecánico que es capaz de almacenar energía. Por ejemplo, el sistema de amortiguamiento de un automóvil tendría la rueda como masa y el resorte que se comprime cuando el auto pasa por un bache.

Dependiendo de la masa del sistema y la rigidez del resorte del sistema el **coeficiente de amortiguamiento** ( $C$ ) del cilindro del amortiguador debe ser seleccionado. Mientras más cercano sea el coeficiente de amortiguamiento al coeficiente de amortiguamiento crítico del sistema, la amortiguación será más rápida.

### Análisis por elementos finitos (FEM): simulación avanzada



Conoce más.

En este video de The Efficient Engineer (2021), se aborda de manera más profunda el análisis de elementos finitos.

El método de elementos finitos (FEM) es una herramienta poderosa que permite a los ingenieros simular cómo las vibraciones afectan estructuras y componentes antes de fabricarlos. A través de software especializado, se pueden identificar problemas potenciales y optimizar diseños. Algunos ejemplos de software comúnmente utilizados en ingeniería son:

- **ANSYS:** Popular para analizar estructuras complejas, como puentes o turbinas.
- **SolidWorks:** Ideal para modelar y simular vibraciones en componentes mecánicos.
- **COMSOL Multiphysics:** Permite analizar interacciones entre vibraciones y otros fenómenos físicos, como calor o flujo de fluidos.

La forma básica en la que funciona el software para realizar diferentes análisis en sistemas mecánicos a través del FEM es:

1. División del sistema: el modelo por computadora del sistema mecánico se divide en pequeños elementos interconectados.
2. Cálculo de vibraciones: se resuelven las ecuaciones de movimiento para cada elemento, se debe indicar en el modelo qué fuerzas están actuando, qué partes están inmóviles y cuáles pueden moverse.
3. Interpretación de resultados: se generan mapas visuales que muestran cómo las vibraciones se distribuyen en el sistema.

El análisis por elementos finitos no solo sirve para determinar la magnitud de las vibraciones, sino también los esfuerzos y deformaciones que pueden estar afectando un diseño mecánico (qué son los esfuerzos y deformaciones, se explica en el capítulo 6).

## Proyecto 7.2

### Análisis de vibraciones en un sistema masa-resorte



El comportamiento de un sistema masa-resorte es clave para entender las vibraciones mecánicas, un fenómeno presente en muchas aplicaciones de la ingeniería. Desde las suspensiones de automóviles hasta sistemas de amortiguación en edificios, los principios detrás de este sistema ayudan a diseñar estructuras más seguras y funcionales. Este proyecto permite explorar cómo varían las vibraciones dependiendo de la masa, la rigidez del resorte y el amortiguamiento.

#### Objetivo del proyecto

Comprender cómo varían las vibraciones en un sistema masa-resorte al cambiar la masa o la rigidez del resorte, y relacionar estos resultados con aplicaciones prácticas en la ingeniería.

#### Materiales

- Un resorte
- Pesas pequeñas (monedas, tuercas o bolsas de arena)
- Una base rígida (puede ser un trozo de madera o plástico)
- Una regla o cinta métrica
- Un cronómetro (puede ser un reloj o una app en el celular)
- Opcional: diferentes resortes para comparar rigideces

#### Instrucciones

1. Fija un extremo del resorte a la base rígida.
2. Cuélgale una pesa en el otro extremo para formar el sistema masa-resorte.
3. Estira el resorte ligeramente y suéltalo, observando cómo oscila.
4. Mide:
  - La cantidad de oscilaciones en un tiempo determinado.
  - La distancia que recorre el sistema al oscilar.
5. Cambia el peso o usa diferentes resortes (si es posible) y repite el experimento, procurando estirar de igual forma el resorte como en el paso 3.

#### Análisis de resultados

1. ¿Cómo afecta el peso a la frecuencia de las oscilaciones?
2. ¿Qué sucede cuando cambias la rigidez del resorte?
3. ¿Cómo puedes relacionar este sistema con aplicaciones reales, como la suspensión de un automóvil?

## 7.4 Elementos de máquinas

En el mundo de la ingeniería, los mecanismos componen las máquinas que nos rodean. Desde las bicicletas hasta los robots industriales, estos sistemas convierten el movimiento y la fuerza en herramientas para resolver problemas cotidianos y desafíos complejos.

Pero, ¿qué son exactamente los mecanismos? ¿Cómo funcionan? Y lo más importante, ¿por qué son tan cruciales en el diseño de máquinas? Imagina una bicicleta. Sus engranajes y cadenas permiten ajustar la fuerza necesaria para pedalear según el terreno. O piensa en un elevador, que utiliza poleas para mover una cabina con mínimo esfuerzo. Cada uno de estos sistemas es un ejemplo de cómo los ingenieros transforman conceptos mecánicos en soluciones prácticas.

Esta sección explora los elementos de mecanismos más comunes en el diseño de máquinas. A lo largo del texto, descubrirás cómo funcionan y dónde se aplican, conectando la teoría con ejemplos reales y aplicaciones prácticas.

### 7.4.1 Ejes y columnas

Una **columna** o **eje** es un miembro estructural que soporta una carga axial de compresión (se habló de este tipo de carga en el capítulo 6), y que tiende a fallar por **pandeo** (Mott, 2009, p. 230). Toma una regla de plástico y comprímela en sus extremos; si aplicas la suficiente fuerza, la regla sufrirá pandeo y si la fuerza sigue incrementando, al final la regla se romperá; esto es falla por pandeo.

Este tipo de falla suele presentarse en cualquier elemento que sea largo, esbelto y esté sometido a compresión. Los ejes de transmisión en máquinas son un ejemplo común en mecánica, pero ¿encuentras otros ejemplos en tu vida cotidiana?

La figura 7.12 muestra un mecanismo de compactación de material. El mecanismo se mueve a través de un cilindro hidráulico y se conecta al pistón de compactación (corredera) a través de la barra de conexión; este, al ser un elemento largo y esbelto sometido a compresión, tiene el riesgo de fallar por pandeo.

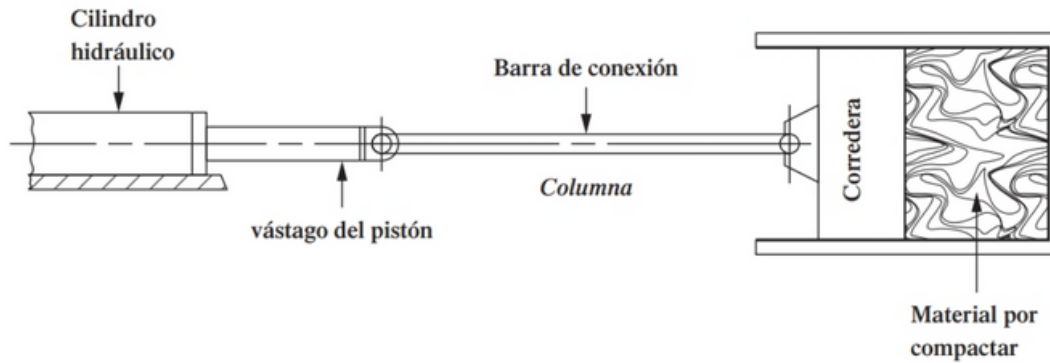


Figura 7.12 Sección de compactador para reducir el volumen de desperdicios de cartón y papel (Mott, 2009, p. 231)

Que una columna falle por pandeo depende de la fuerza de compresión aplicada, del largo y lo esbelto de la columna, así como la forma de sujeción a los mecanismos que está sujeta. En el capítulo 6, tabla 6.1, se vieron diferentes soportes y cómo estos producen fuerzas de reacción; a su vez, estas fuerzas de reacción producen esfuerzos en la columna.

#### 7.4.2 Transmisión con bandas y cadenas

Las bandas y cadenas son los principales elementos para la transferencia de potencia (Mott, 2009). Los motores son elementos que producen movimiento rotacional; sin embargo, estos suelen trabajar a altas velocidades y generar poco **par torsional**. Al transmitir el movimiento del motor con una banda o cadena a través de un par de poleas, se obtiene una reducción de velocidad y un aumento en el par torsional, es decir, se reduce la velocidad de giro, pero la fuerza del giro aumenta.

Una **banda** es un elemento flexible de transmisión de potencia que asienta firmemente en un conjunto de poleas o poleas acanaladas. La figura 7.13 muestra la distribución básica. Cuando se usa la banda para reducir la velocidad, que es el caso típico, la polea menor se monta en el eje de alta velocidad ( $D_1$ ), que puede ser el eje de un motor eléctrico. La polea mayor se monta en la máquina impulsada ( $D_2$ ) (Mott, 2009).

La velocidad lineal ( $v_b$ ) es la misma para ambas poleas, sin importar su diámetro, y esta velocidad depende del producto de la velocidad angular de la polea ( $\omega$ ), es decir, el número de vueltas por segundo y el radio ( $D/2$ ) de la polea en metros.

$$v_b = \omega_1(D_1/2) = \omega_2(D_2/2)$$

$$v_b = \omega_1 D_1 = \omega_2 D_2$$

Así, es posible ver que si el diámetro de la polea se incrementa, la velocidad angular (de giro) debe disminuir para mantener la velocidad lineal en ambas poleas.

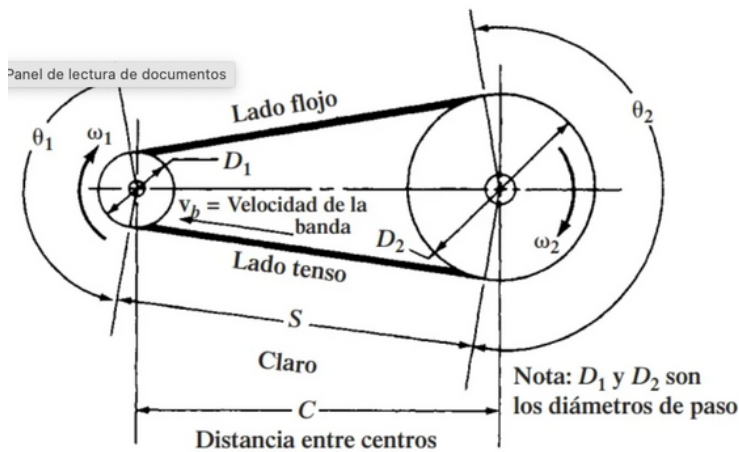


Figura 7.13 Distribución básica para una banda de transmisión (Mott, 2009, p. 268)

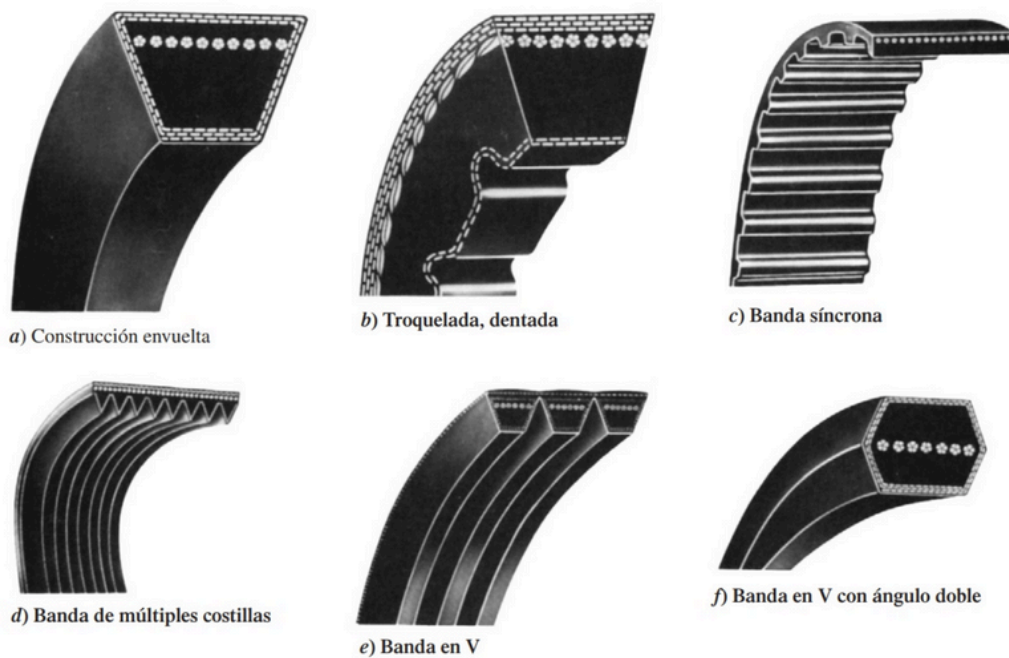


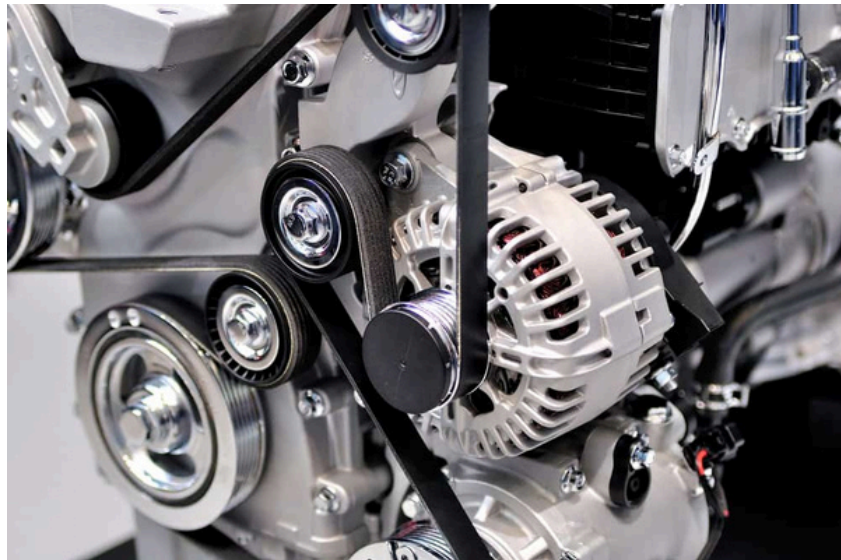
Figura 7.14 Ejemplos de tipos de bandas (Mott, 2009, p. 269)

Existen diferentes tipos de perfil de banda, como se puede observar en la figura 7.14; qué perfil elegir depende de la finalidad del diseño del mecanismo. En la figura 7.15 se muestra la banda de accesorios de un automóvil. ¿Puedes identificar qué tipo de banda es?.

Un tipo de banda muy usado, en especial en transmisiones industriales y en aplicaciones vehiculares, es el accionamiento con bandas en V (figura 7.14a). La forma en V hace que la banda se acúñe firmemente en la ranura de las poleas, lo cual incrementa la fricción y permite la transmisión de grandes pares torsionales sin que exista deslizamiento; es decir, que las poleas giren, pero la banda no gira con ellas.



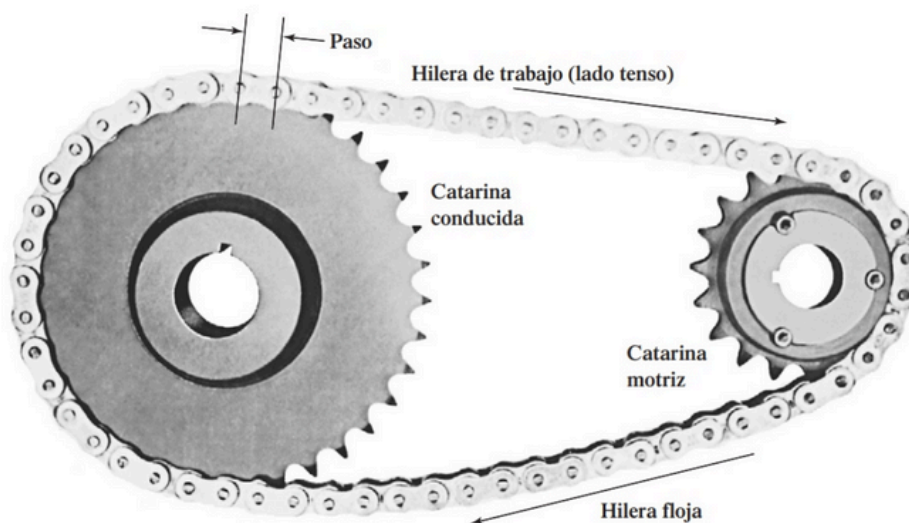
**Conoce más.**  
En este video de AUTOTECNICATV (2024), podrás ver el funcionamiento de la banda de distribución de un automóvil, que es diferente de la banda de accesorios de la figura 7.15.



**Figura 7.15** Banda de accesorios de automóvil. Esta banda transmite el par del motor a otros sistemas del vehículo, como la bomba de la dirección hidráulica y el alternador.

Una **cadena** es un elemento de transmisión de potencia formado por una serie de eslabones unidos con pernos. Este diseño permite tener flexibilidad y además permite que la cadena transmita grandes fuerzas de tensión. Cuando se transmite potencia entre ejes giratorios, la cadena entra en ruedas dentadas correspondientes llamadas catarinas (Mott, 2009).

La figura 7.16 muestra una transmisión típica de cadena de rodillos. El tipo de cadena más común es la cadena de rodillos, en la que el rodillo sobre cada perno permite tener una fricción excepcionalmente baja entre la cadena y las catarinas; aunque existen otros tipos que comprenden una variedad de diseños de eslabones extendidos (véase la figura 7.17) (Mott, 2009).



**Figura 7.16** Transmisión típica de cadena de dos catarinas

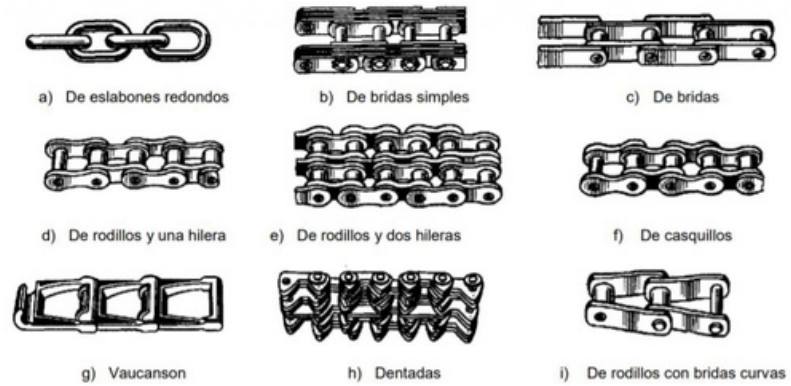


Figura 7.17 Diferentes tipos de eslabones para cadenas de transmisión

La transmisión por cadena es altamente eficiente, duradera y capaz de soportar cargas pesadas sin deslizamientos gracias a su engrane con las catarinas. Es ideal para maquinaria pesada, motocicletas (figura 7.18) y entornos exigentes. Sin embargo, requiere lubricación periódica, genera ruido y vibraciones, y su peso puede ser una desventaja en sistemas ligeros.

Por su parte, la transmisión por banda es más silenciosa, ligera y económica. Absorbe vibraciones y requiere poco mantenimiento, siendo ideal para aplicaciones ligeras como electrodomésticos o vehículos. Sin embargo, es menos resistente a cargas pesadas, puede deslizarse si no está bien ajustada y es más sensible a condiciones ambientales adversas.

En general, se prefiere la cadena en sistemas que demandan alta resistencia y precisión, mientras que la banda es adecuada cuando se priorizan el bajo ruido, el mantenimiento sencillo y los costos.

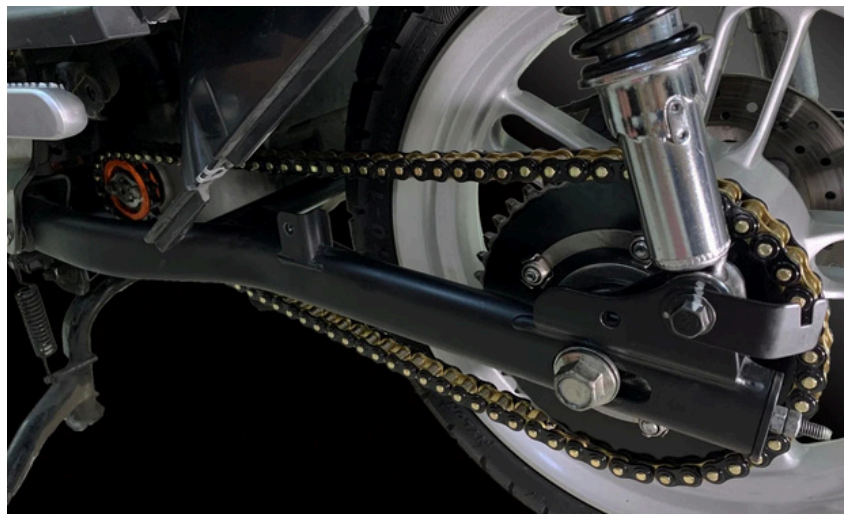


Figura 7.18 Cadena de transmisión en motocicleta



### 7.4.3 Engranés y sistemas de engranes

Los engranes son ruedas dentadas cilíndricas que se usan para transmitir movimiento y potencia desde un eje giratorio hasta otro. Los dientes de un engrane conductor encajan con precisión en los espacios entre los dientes del engrane conducido, como se ve en la figura 7.19. Los dientes del impulsor empujan a los dientes del impulsado, lo cual constituye una fuerza perpendicular al radio del engrane. Con esto, se transmite un par torsional y como el engrane es giratorio, también se transmite potencia (Mott, 2009).

Con frecuencia, se emplean engranes para producir un cambio en la velocidad angular del engrane conducido relativa a la del engrane conductor. En la figura 7.19, el engrane superior menor, llamado piñón, impulsa al engrane inferior, mayor, que a veces se le llama simplemente engrane (Mott, 2009).

Existen diferentes tipos de engranes con diferentes tipos de dientes; cada tipo tiene características mecánicas distintas que ayudan al diseño de diversos mecanismos. A continuación, se describirán diferentes tipos de engranes y sus características principales.

Los **engranes rectos** (figura 7.20) son los más simples y comunes. Sus dientes están alineados paralelamente al eje de rotación, lo que permite una transmisión directa y eficiente de potencia entre ejes paralelos.

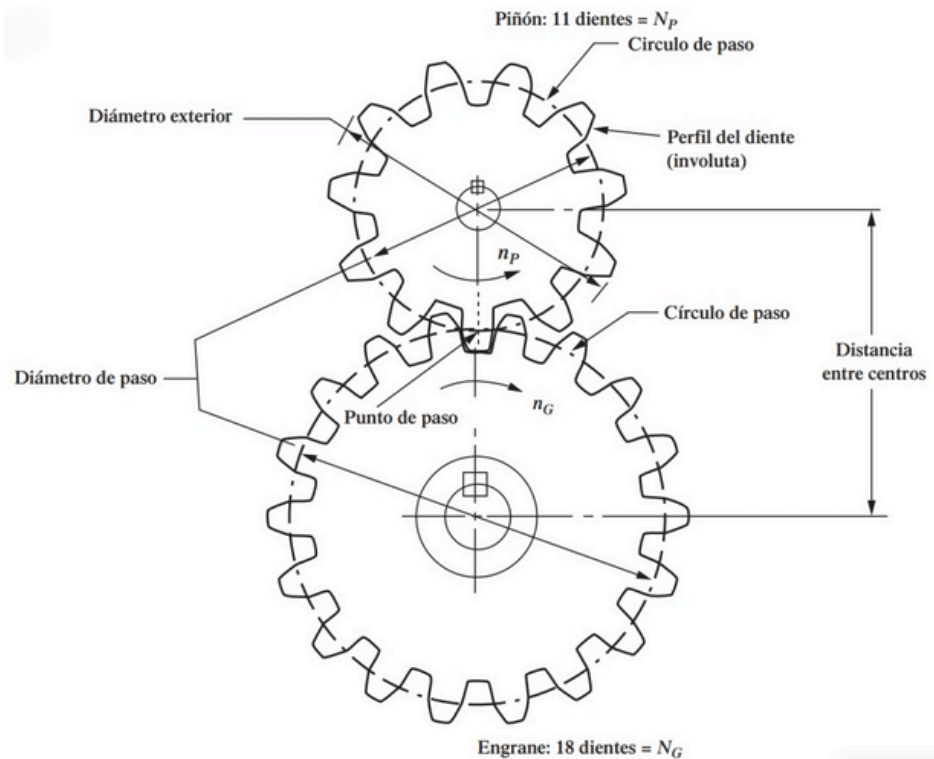


Figura 7.19 Par de engranes rectos. El piñón impulsa al engrane (Mott, 2009)



**Conoce más.**

En este video de Rubén López (2014), se muestran engranes cónicos rectos en funcionamiento.

Observa cómo los ejes a los que están acoplados no son paralelos, sino en ángulo de 90° entre sí.

Los engranes rectos se utilizan en dispositivos como relojes, cajas reductoras de velocidad y sistemas de transporte pequeños, donde las cargas y velocidades son moderadas, y el ruido no es un factor crítico.

A diferencia de los engranes rectos, los **engranes helicoidales** tienen dientes inclinados con respecto al eje de rotación. Esto permite un contacto gradual entre los dientes, lo que mejora significativamente su desempeño; proporcionan una operación más suave y silenciosa en comparación con los engranes rectos, y tienen una mayor capacidad de carga debido al contacto más largo y distribuido entre los dientes. Son versátiles, ya que pueden transmitir potencia entre ejes paralelos (figura 7.21) o no paralelos (figura 7.22). Sin embargo, su fabricación es más compleja y costosa. Los engranes helicoidales son ideales para transmisiones de automóviles, maquinaria industrial, compresores y otros sistemas donde el ruido reducido y la capacidad de carga son esenciales.



Figura 7.20 Engranes rectos



Figura 7.21 Engranes helicoidales para ejes paralelos



Figura 7.22 Engranes helicoidales para ejes perpendiculares entre sí



Figura 7.23 Engranes cónicos helicoidales

Los **engranes cónicos**, como su nombre indica, son diseñados en forma de tronco de cono. Estos engranes se utilizan para transmitir potencia entre ejes que se cruzan, generalmente en ángulo recto. Pueden encontrarse en versiones de dientes rectos y helicoidales (figura 7.23). Son ideales para cambiar la dirección de rotación de un sistema, aunque requieren una alineación precisa para evitar desgaste y fallas prematuras. Entre sus aplicaciones, se encuentran comúnmente en diferenciales de automóviles, maquinaria agrícola y taladros de columna, donde se necesita cambiar la dirección del movimiento rotativo.



**Conoce más.**

En este video de Sebastián Flor (2018), se muestra la función del mecanismo de tornillo sin fin.

Observa cómo el tornillo sin fin gira a una velocidad muy superior al engrane. El engrane es más lento, pero tiene mayor par de torsión (fuerza) que el tornillo sin fin para mover la maquinaria.

El **engranaje de tornillo sin fin** es un sistema que combina un tornillo helicoidal con una rueda dentada (figura 7.24), permitiendo no solo grandes reducciones de velocidad en un espacio compacto, sino también la conversión de movimiento rotacional en lineal cuando se acopla con otros mecanismos (figura 7.25). Este diseño es especialmente útil en sistemas donde se necesita un control preciso y un ajuste fino.

Este tipo de engranaje se emplea en elevadores, transportadores, mecanismos de ajuste de precisión y sistemas donde se necesita transformar el movimiento rotacional en lineal. Por ejemplo, en mesas de trabajo ajustables o dispositivos de posicionamiento. El movimiento giratorio del tornillo impulsa una tuerca o carro que se desplaza linealmente, permitiendo cambios precisos en la posición o altura.

El sistema de **cremallera y piñón** es un mecanismo que convierte el movimiento rotacional del piñón en un desplazamiento lineal de la cremallera y viceversa. Este diseño es ampliamente utilizado en aplicaciones que requieren precisión y simplicidad.



Figura 7.24 Tornillo sin fin con piñón



Figura 7.25 Tornillo sin fin con tuerca (la cuerda es interna)



**Conoce más.**

En este video de NAVITI (2020), se muestra el mecanismo de piñón cremallera.

Observa cómo el mecanismo ya implementado requiere una guía, así como un soporte para la cremallera y otro para el piñón.

Permite una conversión de movimiento altamente precisa y es fácil de diseñar e implementar en sistemas mecánicos, aunque requiere una alineación precisa para evitar desgaste prematuro. Sin lubricación adecuada, la fricción puede deteriorar los componentes rápidamente. El sistema es común en sistemas de dirección automotriz, donde el volante genera un movimiento rotacional que se convierte en un desplazamiento lineal de las ruedas. También se emplea en puertas automáticas, elevadores de plataformas y otros sistemas donde es necesario trasladar cargas linealmente con exactitud.

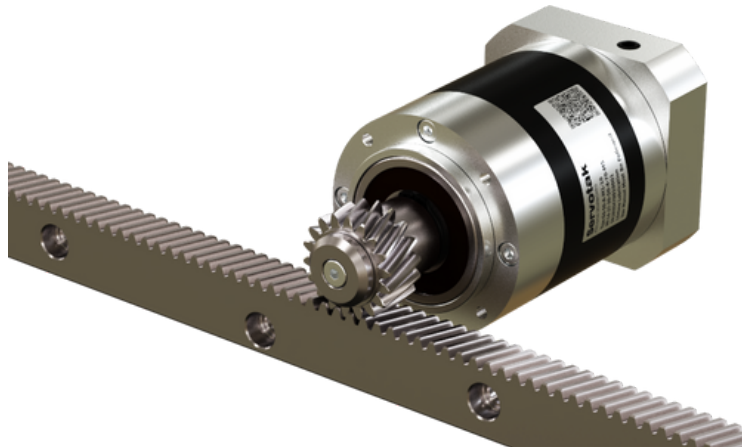


Figura 7.26 Sistema de piñón cremallera con piñón acoplado a un motor



**Conoce más.**

En este video de Sabin Ingeniería Civil (2020), muestra el funcionamiento de un sistema de engranes planetarios.

Verás las partes que componen este tipo de sistemas, así como una explicación básica de su funcionamiento.

Los **engranes planetarios** son sistemas que constan de un engrane central (sol), varios engranes periféricos (planetas) y un engrane externo (anillo). Su diseño compacto permite distribuir la carga entre múltiples engranes. Son muy compactos y altamente eficientes, y pueden transmitir grandes cantidades de potencia en un espacio reducido; además, ofrecen múltiples relaciones de velocidad en un solo sistema, sin embargo, son complejos y costosos de fabricar. Son comunes en transmisiones automáticas de automóviles, reductores de velocidad compactos y turbinas eólicas.

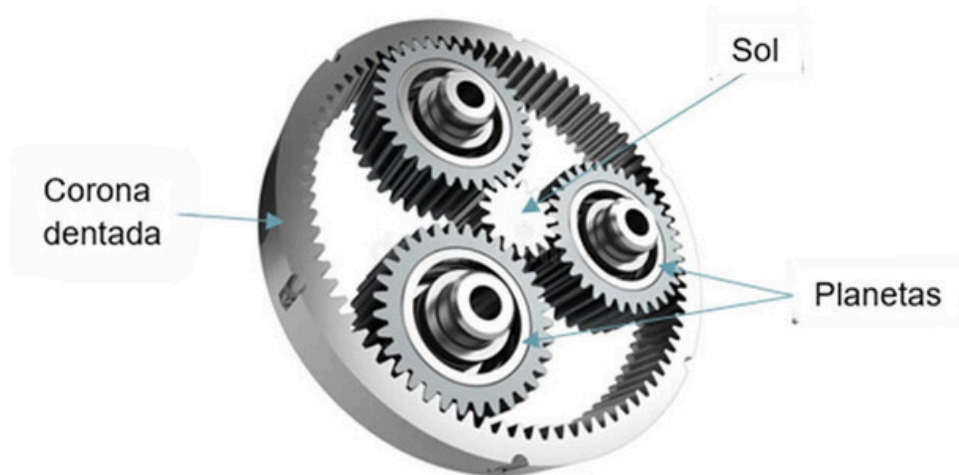


Figura 7.27 Sistema de engranes planetarios

#### 7.4.4 Cuñas y acoplamientos

En el diseño y operación de sistemas mecánicos, las cuñas, los acoplamientos y los sellos son componentes esenciales que permiten transmitir movimiento, asegurar la unión de piezas y prevenir fugas de fluidos. Estos elementos, aunque suelen pasar desapercibidos en comparación con engranes o motores, desempeñan un papel crítico en la funcionalidad y confiabilidad de los sistemas mecánicos.

Las **cuñas** son elementos mecánicos utilizados para asegurar el acoplamiento entre un eje y un componente rotativo, como una polea o un engrane (figura 7.28). Su diseño permite transmitir el par rotacional de manera eficiente al crear una conexión rígida que evita el deslizamiento.

Los **acoplamientos** son dispositivos mecánicos diseñados para conectar dos ejes en un sistema, permitiendo la transmisión de potencia y, en muchos casos, la compensación de desalineaciones (figura 7.29). Existen dos grandes categorías: acoplamientos rígidos y acoplamientos flexibles.

Los **acoplamientos rígidos** proporcionan una conexión directa y sin juego entre los ejes, pero no toleran desalineaciones. Por lo tanto, requieren una alineación precisa. Son usados en sistemas donde la rigidez es prioritaria, como ejes de máquinas herramienta.

Los **acoplamientos flexibles** compensan desalineaciones angulares entre ejes gracias a su diseño elástico, absorben vibraciones y reducen el impacto de choques mecánicos. Se encuentran en aplicaciones como bombas, compresores y generadores.

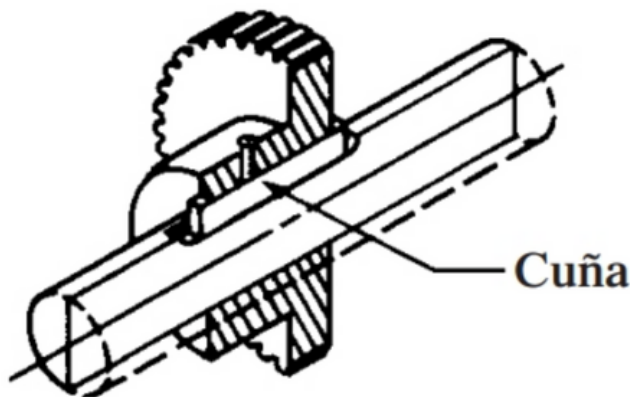


Figura 7.28 Esquema con corte de un eje unido a un engrane rectangular con cuña y tornillo prisionero, fijando un eje a un engrane recto



Figura 7.29 Diferentes tipos de acoplamientos (rígidos y flexibles) para unir ejes

## Amplía tus conocimientos

A continuación, se presentan referencias que te permitirán reforzar y ampliar tus conocimientos sobre dinámica de mecanismos.

### Libros

📖 Norton, R. L., (2021). *Diseño de maquinaria : síntesis y análisis de máquinas y mecanismos*. CDMX, México: McGraw-Hill.

Este libro tiene un curso completo de análisis y diseño (síntesis) de mecanismos, analizando la cinemática y dinámica de los mismos. Se requieren conocimientos de cálculo y de álgebra.

### Páginas web

🌐 TinkerCad. (s. f.). *3D Design*. Tinkercad. <https://www.tinkercad.com/3d-design>

En este sitio gratuito de la empresa Auto Desk podrás realizar diseños 3D de mecanismos. Requiere generar una cuenta.

🌐 MIT. (s. f.). *Classical Mechanics*. MIT OpenCourseWare. <https://ocw.mit.edu/courses/8-01sc-classical-mechanics-fall-2016/>

En esta página del MIT encontrarás un curso enfocado en la mecánica clásica, con conceptos básicos necesarios para posteriormente comprender el análisis y diseño de mecanismos. Cuenta con recursos como notas, libro de texto, tareas y videos explicativos.

### Videos

▶ AUTOTECNICATV. (2024, 11 de julio). *¿Por qué la CADENA está reemplazando a la CORREA de distribución?* [Video]. YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=GY1AM9d1MzY>

Video que muestra el funcionamiento de la banda de distribución de un automóvil.

▶ CDV Ingeniería Antisísmica. (2013, 15 de mayo). *Modelo dinámico con disipadores sísmicos* [Video]. YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=U-L23G8IPQ8>

Video que muestra el efecto de los amortiguadores ante vibraciones sobre estructuras.

▶ Edgar Torres. (2021, 13 de mayo). *Yugo Escocés - Scotch yoke - [1 minute loop - no audio]* [Video]. YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=-yS4tgr9Kds>

Video que muestra la animación del mecanismo del yugo escocés.

▶ NAVITI. (2020, 29 de mayo). *Piñón-cremallera* [Video]. YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=p0gJ8Xp-9Ac>

Video que muestra el mecanismo de piñón cremallera.

▶ Ruben Lopez. (2014, 7 de marzo). *ENGRANE CONICO ASTIMAR #20* [Video]. YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=HXjetDhxyBY>

Video que muestra engranes cónicos rectos en funcionamiento.



▶ Sabin Ingeniería Civil. (2020, 3 de octubre). *¡Entendiendo la JUEGO DE ENGRANAJES PLANETARIOS* [Video]. YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=KWTuMyas5wo>

Video que muestra el funcionamiento de un sistema de engranes planetarios.

▶ Sebastián Flor. (2018, 4 de julio). *REALIZACION DE CORONA DE REDUCTOR TIPO SIN FIN - REALIZATION OF ENDLESS TYPE REDUCER CROWN* [Video]. YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=x4BEzDXccjU>

Video que muestra la función del mecanismo de tornillo sin fin.

▶ TVZapper. (2013, 20 de febrero). *Funcionamiento de un amortiguador* [Video]. YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=fKldx5dSjLA>

Video que explica el amortiguamiento de un automóvil.

▶ Te lo explico En un minuto. (2021, 11 de mayo). 84.- *¿Cómo funciona una bicicleta de velocidades?* - *¡Te lo Explico en Un Minuto!* [Video]. YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=as0hJPmAjTw>

Video que explica el funcionamiento y las partes de una transmisión de una bicicleta de velocidades.

▶ The Efficient Engineer. (2021, 27 de abril). *Understanding the Finite Element Method* [Video]. YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=GHjopp47vvQ>

Video que aborda en profundidad el análisis de elementos finitos.



## Referencias

### Libros

- Beer, F. P., Johnston, E. R., Cornwell, P. J., y Mazurek, D. F. (2017). *Mecánica vectorial para ingenieros: dinámica*. CDMX, México: McGraw-Hill Education. <https://www.uteycv.esiaz.ipn.mx/comunidad/hidraulica/apuntes/Mec%C3%A1nica%20Vectorial%20para%20Ingenieros.pdf>
- Mott, R. L. (2009). *Diseño de elementos de máquinas*. CDMX, México: Pearson Educación.







Capítulo 8

# Control y automatización



En este capítulo, se presenta una introducción general a los conceptos básicos de la automatización y el control. Se explican los principios fundamentales que permiten que sistemas físicos sean regulados y operados de forma automática, sin intervención humana constante.

Se mostrará cómo los sensores, controladores y actuadores se integran para supervisar y modificar el comportamiento de un sistema. También se exponen diferentes tipos de sensores y actuadores, qué son, así como una primera clasificación de ambos.

Finalmente, se describe la importancia de las disciplinas de automatización y el control, así como perspectivas futuras y su actual implementación en México.

## 8.1 El mundo automatizado que nos rodea



Figura 8.1 Cafetera programable de la marca Kaloric

El despertador es programado para sonar exactamente a la hora requerida, ajustándose automáticamente a la rutina establecida. La cafetera es activada sin intervención humana, preparando el café (figura 8.1). En el exterior, los semáforos son coordinados para optimizar el flujo vehicular y los autobuses eléctricos son guiados sin necesidad de un conductor (figura 8.2). En una fábrica cercana, los brazos robóticos se utilizan para ensamblar dispositivos con precisión milimétrica, mientras cada paso es monitoreado por sensores para prevenir fallos.



Figura 8.2 Autobús sin conductor de Renault en Barcelona, España

Hace décadas, este escenario habría sido considerado ciencia ficción. Hoy, es reconocido como parte de la realidad cotidiana. Detrás de cada sistema que simplifica nuestra vida —desde el termostato que está configurado para regular la temperatura del hogar hasta los satélites que son utilizados para guiar aviones en pleno vuelo— se encuentran ingenieras e ingenieros que han diseñado mecanismos para controlar procesos y automatizar tareas.

¿Alguna vez te has preguntado cómo todo esto se lleva a cabo?

Imagina que una orquesta es dirigida. Cada músico —un sensor, un motor, un algoritmo— debe ser coordinado para ejecutar su parte en el momento exacto, con la intensidad adecuada, para que la sinfonía sea interpretada a la perfección. El control se ejerce como una batuta invisible: decisiones se toman sobre cuándo acelerar, corregir o detener una acción. La automatización se implementa como una partitura que permite que la música fluya sin que las instrucciones sean repetidas constantemente.

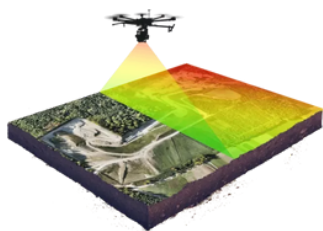


Figura 8.4 Los drones son un alto nivel de sistema automatizado. Se muestra una ilustración de dron con sensor LiDAR para mapeo geográfico.

Desde lo más simple hasta lo revolucionario:

- Una lavadora está diseñada para seleccionar el ciclo adecuado, según la carga detectada (figura 8.3).
- Un dron está equipado con sistemas que le permiten esquivar obstáculos mientras imágenes son capturadas (figura 8.4).
- Una planta de energía se gestiona para ajustar su producción en tiempo real, según la demanda existente.

Estos sistemas son el resultado de décadas de avances que se han logrado en ingeniería, matemáticas y tecnología.



Figura 8.3 Panel de control de la lavadora Samsung con tecnología AI Ecobubble y función de lavado inteligente. Selecciona el ciclo de secado ideal para cada lavado.

## 8.2 Automatización: fundamentos y alcances

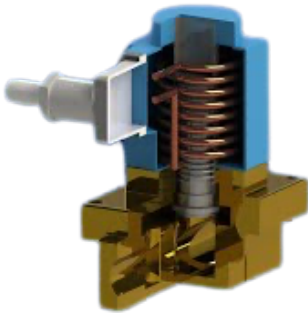


Figura 8.5 Dibujo por computadora donde se muestra la parte interna de una válvula solenoide. Una señal eléctrica se aplica en el solenoide (cable de cobre enrollado) y este genera un campo magnético que abre y cierra la válvula.

La **automatización** puede ser definida como el conjunto de técnicas, métodos y tecnologías empleados para diseñar sistemas capaces de ejecutar procesos específicos con autonomía parcial o total, minimizando la intervención humana directa. Esta disciplina se sustenta en tres pilares fundamentales:

1. Mecanización de tareas (sustitución del esfuerzo físico).
2. Toma de decisiones automatizada (mediante lógica programada o inteligencia artificial).
3. Integración sistémica (coordinación entre componentes).

### 8.2.1 Pirámide de la automatización industrial

Para llevar a cabo la automatización, se debe considerar que la automatización no solo depende de programación y maquinaria; tiene otros niveles de preparación antes de automatizar cualquier proceso. En la figura 8.6 se muestra la *pirámide de la automatización industrial* que explica las diferentes partes de las cuales se compone un sistema automatizado.

Cada nivel de la pirámide cumple una función esencial en el control de procesos y en la supervisión industrial, permitiendo a las empresas mejorar su eficiencia, reducir costos y aumentar la calidad de sus productos. A continuación, se da una breve descripción de cada nivel:

**Nivel 0 - Campo:** este es el nivel más bajo de la pirámide, pero también el más esencial. Aquí es donde los datos cobran vida a través de sensores, dispositivos que detectan cambios físicos (como temperatura,



Figura 8.6 Pirámide de la automatización industrial



Figura 8.7 DPLC de la marca OMRON, se pueden observar los puertos de conexión para los dispositivos de entrada (sensores) y de salida (actuadores).

movimiento o luz) y los convierte en señales eléctricas y actuadores (ej. motores, válvulas, como se muestra en la figura 8.5) que interactúan directamente con los procesos productivos.

**Nivel 1 - Control:** en este nivel se toman decisiones de control basadas en los datos que llegan desde el campo. Es el cerebro operativo de la automatización. Las dos tecnologías más usadas son los **PLCs** (Controladores Lógicos Programables por sus siglas en inglés) (figuras 8.7 y 8.8) que ejecutan programas de control en tiempo real, y los **DCS** (Sistemas de Control Distribuido por sus siglas en inglés) que coordinan múltiples controladores (PLCs) en grandes plantas industriales.

**Nivel 2 - Supervisión:** aquí entra en juego la supervisión industrial. Este nivel permite a los operadores monitorear, analizar y ajustar los procesos mediante sistemas **SCADA** y **HMI**. Por ejemplo, en una planta de ensamblaje de automóviles, un sistema SCADA muestra en tiempo real la velocidad de una cinta transportadora y la cantidad de piezas procesadas por hora.

**Nivel 3 - Operación:** aquí se toman decisiones de producción y calidad mediante los sistemas **MES** (Manufacturing Execution System), como planificación de la producción, control de calidad en línea, rastreo de lotes de productos y gestión del mantenimiento.

**Nivel 4 - Gestión:** este es el nivel más alto de la pirámide, donde los sistemas **ERP** (Enterprise Resource Planning) integran toda la información para la gestión de la empresa como: inventarios y compras, administración financiera, control de recursos humanos y planificación de la cadena de suministro.



Figura 8.8 PLC de la marca SIEMENS modelo S7-1200. Los PLC de esta marca son ampliamente utilizados en los sistemas de automatización industrial.

La pirámide de la automatización industrial es mucho más que una estructura organizativa; es el pilar que permite que una empresa funcione de manera eficiente. Desde la captura de datos en el nivel de campo hasta la gestión estratégica en el nivel ERP, cada escalón de la pirámide cumple una función vital en la producción.

A medida que la tecnología avanza, la integración de Internet de las cosas (IoT por sus siglas en inglés), Big Data e Inteligencia Artificial hará que la automatización sea aún más inteligente, reduciendo costos y optimizando recursos.

### 8.2.2 Clasificación por niveles de flexibilidad

En el contexto de la automatización industrial, los sistemas suelen clasificarse según su grado de flexibilidad en tres categorías principales: automatización **fija**, **programable** y **flexible**. Esta clasificación depende de la capacidad del sistema para adaptarse a cambios en la producción.

En la tabla 8.1 se presenta una descripción de cada uno de los tipos de automatización, sus características y ejemplos cotidianos que ejemplifican los tres tipos de automatización.

Los sistemas flexibles son los que tienen mayor capacidad de adaptarse a diferentes tareas (manufactura, ensamble, etc.). Lo que se elija depende de cuánto se produce, cuántos productos diferentes se hacen y qué tan rápido hay que adaptarse. Hoy, las empresas prefieren la automatización flexible porque el mercado cambia muy rápido y esta les permite adaptarse a las demandas.

Tipo	Descripción	Características
Fija	Diseñada para una tarea específica con poca o ninguna capacidad de adaptación	<p>Cafetera de cápsulas:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Hace solo una cosa: prepara café de un solo tipo (ej.: solo café espresso).</li> <li>• No se puede cambiar: si se quiere un té, necesitas comprar otra máquina.</li> <li>• Rápida y eficiente, pero rígida.</li> </ul> <p>✓ Ventaja: es barata y funciona muy bien para su tarea específica.            ✗ Desventaja: no sirve para nada más.</p>
Programable	Permite cambios en la operación mediante reprogramación de software, pero con limitaciones físicas.	<p>Lavadora programable:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Puede hacer diferentes tareas, pero hay que decirle cómo (ej.: lavado normal, delicado, rápido).</li> <li>• Requiere "reprogramación" manual: tú eliges el programa cada vez.</li> <li>• Se adapta, pero no es automático.</li> </ul> <p>✓ Ventaja: puede manejar varias opciones (diferentes tipos de ropa).            ✗ Desventaja: si se quiere una tarea nueva, alguien tiene que programarla.</p>
Flexible	Puede ajustarse dinámicamente a diferentes productos o procesos sin interrupciones significativas.	<p>Robot aspirador inteligente:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Se adapta solo: detecta obstáculos, cambia de ruta y ajusta la potencia según el piso.</li> <li>• No necesita que le digan qué hacer: aprende y reacciona en tiempo real.</li> <li>• Puede hacer varias cosas (aspirar, trapear, evitar escaleras).</li> </ul> <p>✓ Ventaja: máxima adaptabilidad sin intervención humana.            ✗ Desventaja: es más cara y compleja.</p>

Tabla 8.1 Descripción y características de los tres niveles de flexibilidad en automatización.

### 8.2.3 Componentes básicos de un sistema automatizado

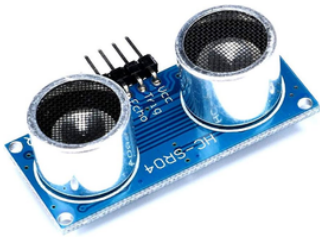


Figura 8.9 Dos sensores ultrasónicos en un módulo (tarjeta azul) para uso en un microcontrolador, este sensor es analógico, el módulo convierte la señal en digital para poder ser usada en el microcontrolador.

A continuación, se ofrece una explicación más detallada de los distintos elementos que se encuentran en los niveles cero y uno de la pirámide de automatización, los cuales corresponden principalmente a los sensores, actuadores y al sistema de control.

El hecho de profundizar en estos niveles no implica que los demás niveles de la pirámide carezcan de importancia. Sin embargo, en el campo de la ingeniería mecánica y mecatrónica, tanto la formación académica como la aplicación profesional suelen centrarse en los niveles cero y uno, ya que en ellos se materializa gran parte de la interacción física con los sistemas automatizados.

#### Sensores: los que perciben el entorno

Un **sensor** es un dispositivo que detecta una magnitud física del entorno (como temperatura, presión, luz, posición, velocidad o fuerza, véanse las figuras 8.9 y 8.10) y la convierte en una señal eléctrica que puede ser procesada por un sistema de control.

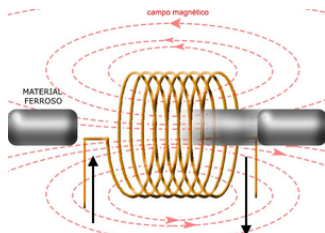


Figura 8.10 Sensor solenoide. Un sensor solenoide detecta movimiento o posición mediante el desplazamiento de un núcleo metálico dentro de una bobina; al moverse, cambia el campo magnético y genera una señal eléctrica.

Los sensores pueden tener salida analógica o salida digital:

- Salida analógica: entrega una señal continua que puede tomar un rango de valores. Por ejemplo, un sensor de temperatura analógico puede generar un voltaje que varía entre 0 y 5 V, según la temperatura medida.
- Salida digital: entrega una señal discreta, normalmente en forma de dos estados (por ejemplo, 0 y 1 o encendido y apagado). Un sensor de proximidad digital, por ejemplo, puede simplemente indicar si un objeto está presente o no.

La elección entre salida analógica o digital depende del tipo de información que se requiere y del sistema de procesamiento con el que el sensor trabajará.



#### Conoce más.

En este video de RONIN Educación (2022), se explica qué son los sensores y dónde los puedes ver en la vida cotidiana.

Cada sensor cuenta con un documento proporcionado por el fabricante llamado **hoja de datos** o **datasheet**, en el que se especifican sus características técnicas, tales como el voltaje de alimentación, la corriente máxima que puede soportar, los niveles de voltaje y corriente de salida, entre otros parámetros importantes.

La elección de un sensor adecuado depende de varios factores, como la disponibilidad en el mercado, los requerimientos específicos del sistema y el conocimiento que la ingeniera o el ingeniero tenga sobre los distintos tipos y modelos de sensores disponibles.

En la tabla 8.2 se muestra una clasificación para sensores indicando qué miden, cómo lo miden, qué salida entregan y dónde suelen usarse, aunque sus aplicaciones no se limitan a las descritas.



Tipo	Variable medida	Principio de funcionamiento	Salida típica	Aplicaciones comunes
Sensor inductivo	Presencia/posición (metales)	Variación del campo electromagnético	Digital (ON/OFF)	Detección de piezas metálicas en líneas de ensamblaje
Sensor capacitivo	Presencia/posición (materiales no metálicos)	Variación de la capacitancia	Digital (ON/OFF)	Control de nivel de materiales sólidos o líquidos no conductores
Sensor óptico	Presencia/obstrucción	Interrupción o reflexión de un haz de luz	Digital (ON/OFF)	Detección de objetos en cintas transportadoras
Sensor ultrasónico	Distancia/posición	Tiempo de retorno de un pulso ultrasónico	Analógica/Digital	Medición de nivel de líquidos, distancia a objetos
Sensor de temperatura	Temperatura	Cambio de resistencia o voltaje por efecto térmico	Analógica	Control de temperatura en hornos, procesos térmicos
Sensor de presión	Presión de fluidos	Deformación de un material sensible (galgas, piezoeléctricos)	Analógica	Supervisión de sistemas hidráulicos y neumáticos
Sensor de fuerza/par	Fuerza o torsión	Deformación medida con galgas extensométricas	Analógica	Control de prensado o atornillado automatizado
Sensor de proximidad magnético (Reed)	Presencia	Campo magnético activa un contacto interno	Digital (ON/OFF)	Puertas de seguridad, monitoreo de posición de actuadores
Sensor de velocidad	Velocidad de rotación o movimiento lineal	Inducción electromagnética o efecto Hall	Analógica/Digital	Monitoreo de motores, ruedas o transportadores

Tabla 8.2 Clasificación de los tipos de sensores, la variable que miden, el tipo de salida que entregan (analógica o digital), así como sus aplicaciones típicas, aunque esta clasificación podría no ser completa y las aplicaciones no son únicas.



Figura 8.11 PLC MicroLogix 1100

## Controladores: definición, funcionamiento y tipos

Los controladores son dispositivos que toman decisiones dentro de un sistema automatizado. Reciben señales de sensores, las analizan y envían órdenes a actuadores, como motores o válvulas, para que todo funcione correctamente.

En la automatización, actúan como el "cerebro" del sistema. Por ejemplo, si un sensor detecta que una puerta está abierta, el controlador puede encender una luz o detener una máquina.

Uno de los más usados en la industria es el PLC, que puede programarse con lenguajes como el diagrama de escalera o texto estructurado. Estos programas permiten controlar procesos como activar equipos, contar objetos o medir tiempos.

Los Controladores Lógicos Programables (**PLC**) operan en ciclos rápidos: leen sensores, ejecutan el programa, actualizan salidas y verifican el sistema, todo en milisegundos, lo que permite una respuesta inmediata.

También se usan **microcontroladores** o plataformas embebidas como Arduino o Raspberry Pi, más comunes en proyectos pequeños. Aunque requieren más programación, son útiles para aprender y hacer prototipos.

Muchos controladores se comunican con otros dispositivos mediante protocolos como Modbus o CAN, lo que permite su integración con redes industriales y sistemas mayores.

Cuando hay riesgo (como en máquinas peligrosas), se usan controladores con funciones de seguridad, diseñados para detener el sistema si ocurre una falla, siguiendo normas especiales.



Figura 8.12 PLC Schneider Modicon M221

### Ejemplos comunes de controladores comerciales:

- Siemens S7-1200: muy usado en la industria para controlar máquinas (figura 8.8).
- Allen-Bradley MicroLogix: popular en sistemas industriales en América (figura 8.11).
- Schneider Modicon M221: usado para automatización flexible (figura 8.12).
- Arduino Mega 2560: ideal para aprender y hacer proyectos escolares (figura 8.13).
- Raspberry Pi 4 con módulos I/O: usado en sistemas más complejos con programación (figura 8.14).



Figura 8.13 Tarjeta Arduino Mega 2560 con microcontrolador ATmega2560

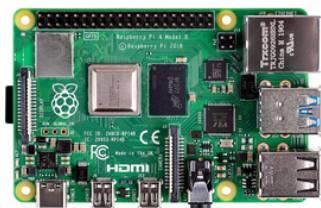


Figura 8.14 Raspberry Pi 4



Figura 8.15 Motor a pasos Nema 17

## Actuadores: los que hacen que las cosas se muevan

Los **actuadores** son los dispositivos que ejecutan las órdenes del sistema automático. Transforman señales eléctricas o de control en movimientos físicos o acciones.

En un sistema automatizado, los actuadores son los que "hacen el trabajo físico". Si los sensores detectan y los controladores deciden, los actuadores son los que actúan. Por ejemplo, si el controlador ordena abrir una compuerta, el actuador es quien realmente la abre.

Existen muchos tipos de actuadores, dependiendo del tipo de energía que usan y del tipo de movimiento que generan:

- Los motores eléctricos giran ejes y son usados para mover cintas transportadoras, ventiladores, robots, entre otros.
- Los cilindros neumáticos usan aire comprimido para mover piezas en línea recta, como en los brazos de ensamblaje.
- Los actuadores hidráulicos hacen movimientos similares pero usando aceite, lo que les permite generar más fuerza.
- También hay actuadores térmicos o magnéticos, usados en tareas más específicas.



Figura 8.16 Servo motor MG996R

Los actuadores pueden ser **binarios** (solo tienen dos estados, como encendido/apagado) o **analógicos** (pueden tener posiciones intermedias, como un motor que gira a distintas velocidades).

El uso correcto del actuador depende de la aplicación, el tipo de carga, la precisión requerida y el entorno de trabajo (por ejemplo, si hay polvo, calor o vibraciones).

Muchos actuadores están diseñados para trabajar en conjunto con sensores, formando un ciclo cerrado de control. Por ejemplo, un motor puede ser controlado según la posición detectada por un sensor, haciendo que el sistema se autorregule.

### Ejemplos comunes de actuadores comerciales:

- Motor paso a paso NEMA 17 (figura 8.15): usado en impresoras 3D y CNC.
- Servo motor MG996R: común en brazos robóticos y automatismos pequeños (figura 8.16).
- Cilindros neumáticos Festo: muy usados en líneas de ensamblaje industrial (figura 8.17).
- Válvula solenoide SMC SY3120: controla el paso de aire en sistemas neumáticos (figura 8.18).

En la tabla 8.3 se presentan dos formas de clasificar los actuadores, sin embargo, no son las únicas formas de clasificarlos.



#### Conoce más.

En este video de ISCA Engineering (2023), se explica qué son los actuadores, sus usos y cómo funcionan algunos actuadores de los más utilizados, así como la forma de un diagrama de escalera y cómo se automatiza un sistema.

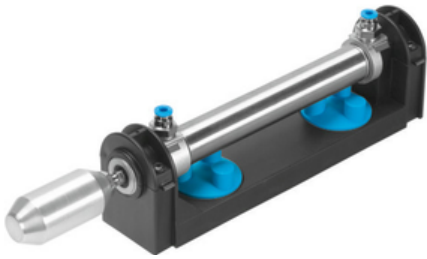


Figura 8.17 Cilindro neumático de doble efecto de la marca Festo

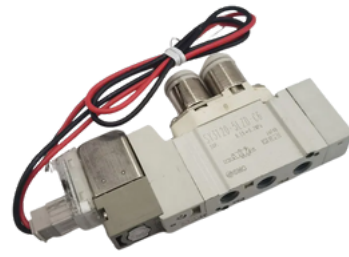


Figura 8.18 Válvula solenoide SMC SY3120

Criterio	Tipo de actuador	Principio de funcionamiento	Fuente de energía	Aplicaciones comunes
<b>Por tipo de energía</b>	Eléctrico	Movimiento generado por campos electromagnéticos	Energía eléctrica	Robótica, automatización, válvulas eléctricas
	Neumático	Movimiento por presión de aire comprimido	Aire comprimido	Herramientas neumáticas, sistemas industriales
	Hidráulico	Movimiento por presión de fluidos (aceite, agua).	Líquidos a presión	Maquinaria pesada, sistemas de elevación
	Térmico	Movimiento por expansión térmica	Calor	Termostatos, válvulas térmicas
	Piezo eléctrico	Movimiento por deformación de materiales piezoeléctricos	Voltaje eléctrico	Precisión, microposicionamiento, sensores
<b>Por tipo de movimiento</b>	Rotativo	Movimiento de rotación	Variable según tipo	Motores, válvulas giratorias
	Lineal	Movimiento rectilíneo	Variable según tipo	Cilindros neumáticos, actuadores lineales

Tabla 8.3 Clasificación de los tipos de sensores, la variable que miden, el tipo de salida que entregan (analógica o digital), así como sus aplicaciones típicas, aunque esta clasificación podría no ser completa y las aplicaciones no son únicas.

## Interfaz hombre-máquina (HMI): puente entre el operador y el sistema automatizado

En un sistema de automatización, la **interfaz hombre-máquina (IHM)** es el punto de comunicación entre las personas (los operadores o usuarios) y las máquinas o sistemas automáticos que controlan procesos industriales, dispositivos o equipos (figura 8.19).

Una interfaz permite que el usuario pueda supervisar, controlar y ajustar el funcionamiento de una máquina o sistema automatizado de manera sencilla y segura. Por ejemplo, en una planta industrial, la IHM puede ser una pantalla táctil, un panel con botones o una computadora que muestra información en tiempo real sobre el estado de la producción.

El principal objetivo de la IHM es facilitar la interacción para que el usuario pueda:

- Visualizar datos importantes, como temperaturas, velocidades o niveles.
- Enviar comandos para iniciar, detener o modificar operaciones.
- Recibir alertas o avisos cuando algo no funciona correctamente.

Una buena interfaz debe ser intuitiva y clara, de modo que incluso personas sin mucha experiencia puedan operar el sistema sin cometer errores que puedan causar daños o pérdidas.

La IHM es la puerta de enlace entre el ser humano y la máquina, haciendo posible que la tecnología trabaje a favor de las personas, optimizando procesos y mejorando la seguridad y eficiencia en los sistemas automatizados.

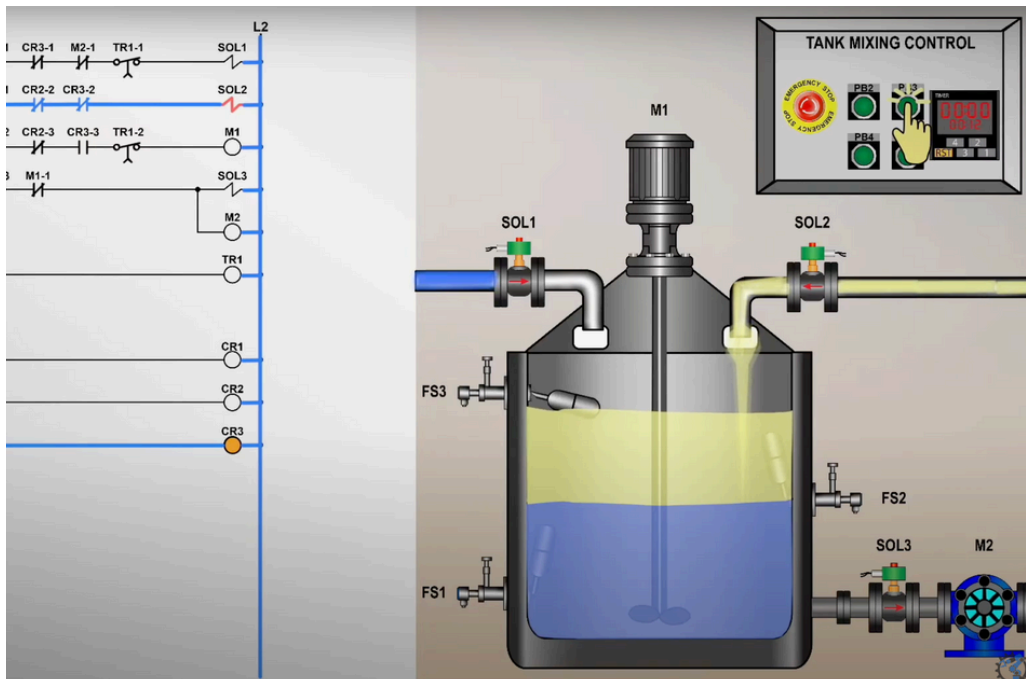


Figura 8.19 Simulación de un sistema automatizado para llenado, mezclado y vaciado de sustancias en un tanque. A la izquierda se muestra parte del diagrama de escalera del proceso, a la izquierda una imagen de la animación del proceso de automatización, y en la parte superior derecha la HMI requerida para el proceso (botón de paro de emergencia, cuadro botones y pantalla display).

## Actividad 8.1

### Sensores y actuadores en la vida cotidiana



#### Objetivo

Identificar y clasificar sensores y actuadores en dispositivos de uso diario, comprendiendo su función dentro de un sistema automatizado.

#### Instrucciones

1. Elige 5 dispositivos que uses en casa (ej: refrigerador, lavadora, teléfono móvil, automóvil, aspiradora robot, termostato inteligente, etc.).
2. Para cada objeto, responde: *¿Qué sensores podría tener?* (dispositivos que detectan variables como temperatura, movimiento, luz, etc.). *¿Qué actuadores podría tener?* (dispositivos que realizan acciones como mover, encender, emitir sonidos, etc.).
3. Clasifica cada sensor y actuador según:
  - a. Tipo de señal (analógico/digital).
  - b. Variable medida (temperatura, presión, humedad, etc.) o acción realizada (motor, válvula, LED, etc.).

## 8.3 Sistemas de control: ¿cómo se enseña a una máquina a tomar decisiones?



Figura 8.20 El termopar es un tipo de sensor de temperatura. Otros tipos de sensor de temperatura son los RDT, los termistores, entre otros.

Un **sistema de control** es una estructura organizada que permite regular el comportamiento de máquinas, procesos o dispositivos para que funcionen de manera autónoma, precisa y eficiente. Su objetivo principal es mantener una variable específica (como temperatura, velocidad, posición o flujo) en un valor deseado, incluso cuando hay perturbaciones externas.

Los elementos clave en un sistema de control son:

- Variable a controlar: la magnitud física que se quiere regular (ej: temperatura en un horno, velocidad de un motor).
- Sensor (medición): dispositivo que captura el valor real de la variable, por ejemplo un termopar (figura 8.20) o un sensor de presión.
- Controlador (toma de decisiones): compara el valor medido con el deseado y calcula la acción correctiva; puede ser desde un simple termostato mecánico (véase figura 8.21) hasta un algoritmo avanzado en un PLC o microcontrolador.
- Actuator (ejecución): componente que modifica el sistema según las órdenes del controlador (ej: válvula, motor, resistencia eléctrica).
- Planta o proceso: el sistema físico que se está controlando (ej: motor, horno, línea de producción).



En la tabla 8.4 se ejemplifican estos elementos de un sistema de control para un refrigerador. Para ver un poco más a detalle los elementos de un sistema de refrigeración, véase la sección 3.4.3.

**Figura 8.21** Termostato bimetálico. Cuando la temperatura hace que el metal en su interior se expanda, abre el circuito entre sus terminales e interrumpe el flujo de corriente entre ellas, así puede encender o apagar un actuador, como una resistencia que esté disipando calor.

Elemento	Función en el refrigerador	¿Qué parte del refrigerador hace la función?
Variable controlada	Magnitud que se desea regular	Temperatura interior del refrigerador
Sensor	Mide el estado actual de la variable	Termopar (detecta la temperatura real)
Controlador	Compara la medición con el valor deseado y decide la acción	Circuito electrónico o mecánico que activa/desactiva el compresor
Actuador	Ejecuta la acción correctiva	Compresor (motor que enfría) y válvula de expansión
Planta	Sistema físico que se está controlando	Cámara frigorífica (espacio interior del refrigerador)

**Tabla 8.4** Partes de un sistema de control y qué partes lo representan en un sistema de refrigeración

### 8.3.1 Tipos de sistemas de control: desde lo simple hasta lo inteligente

Imagina que estás enseñando a dos personas distintas a preparar café. La primera sigue tus instrucciones al pie de la letra, pero nunca prueba el resultado. La segunda, mientras prepara el café, lo prueba y ajusta la cantidad de azúcar o la fuerza del grano. Esta simple diferencia captura la esencia de los sistemas de control que gobiernan el mundo tecnológico.

Los sistemas de control se clasifican según cómo toman decisiones y si corrigen sus propios errores. A continuación se exploran los dos tipos fundamentales con algunos ejemplos.

#### Sistemas de lazo abierto (sin retroalimentación)

Son los sistemas donde la señal de salida no tiene efecto sobre la acción de control, se les llama de **lazo abierto**. La exactitud del sistema depende de su calibración inicial.

Un ejemplo de la vida cotidiana es una tostadora de pan. En este caso, la señal de entrada es el nivel de tueste que se elija y la salida es el tiempo que permanece encendida la resistencia del tostador. No importa si el pan está más frío, por ejemplo, congelado; el tostador permanece encendido solo cierto tiempo según el nivel de tostado que se elija (mayor nivel de tostado más tiempo encendido). Entonces, no se ajusta a variaciones.

La acción de control es encender o apagar la resistencia que calienta el pan por un determinado tiempo y tampoco hace correcciones ante perturbaciones, situaciones que hacen que el sistema se salga de la forma de comportamiento usual, por ejemplo, que no haya pan y se active el sistema.

En la figura 8.22 se ejemplifica un esquema general de un sistema de control de lazo abierto.

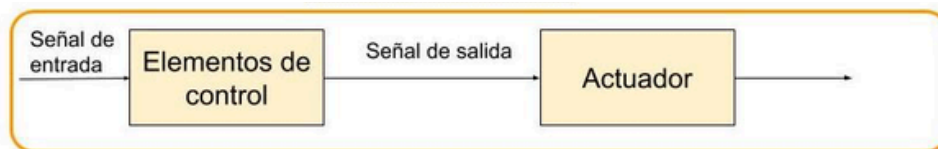


Figura 8.22 Esquema de un sistema de control de lazo abierto. Para el ejemplo del tostador, la señal es el tiempo de tueste (aunque el usuario lo que elige es el nivel de tueste) y otra señal de ON/OFF (el botón de encendido); los elementos de control son el circuito temporizador y la salida de los elementos de control, en este caso es cierta cantidad de corriente eléctrica. El actuador son los resistores eléctricos y la salida del actuador sería el calor disipado por los resistores.



Sin embargo, los sistemas de control de lazo abierto pueden ser una buena opción dependiendo del sistema a controlar, por ejemplo, cuando:

- La planta es estable y predecible: no hay perturbaciones significativas ni variaciones en los parámetros del sistema.
- No se requiere alta precisión: el sistema no necesita corrección de errores en tiempo real.
- Las perturbaciones son mínimas o constantes: si hay perturbaciones, son conocidas y compensables de antemano.
- El costo y la simplicidad son prioritarios: los sistemas de lazo abierto son más baratos y fáciles de implementar que los de lazo cerrado.

### Sistemas de lazo cerrado (con retroalimentación)

Un sistema de control de **lazo cerrado** (o sistema realimentado) es aquel en el que la salida del sistema se mide continuamente y se compara con un valor deseado (referencia), generando una señal de error que se utiliza para ajustar automáticamente la acción de control, con el objetivo de reducir dicho error y mantener el sistema operando en las condiciones especificadas.

La salida se "retroalimenta" al sistema de control a través de sensores para compararla con la salida deseada y en caso de error, corregir la salida dando órdenes al actuador o actuadores. En forma de ecuación el error se calcula de la siguiente forma:

$$e(t) = r(t) - y(t)$$

Donde:

$r(t)$  es el valor deseado de la variable a controlar.

$y(t)$  es el valor real de la variable medido por el sensor.

$e(t)$  es el error.

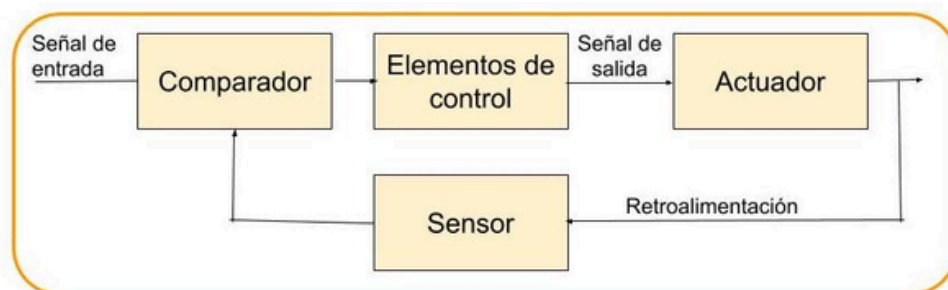


Figura 8.23 Esquema de un sistema de control de lazo cerrado

Como ejemplo, se puede considerar el sistema de aire acondicionado de un automóvil. Cuando el usuario selecciona una temperatura de referencia de 22 °C, un sensor —por ejemplo, un termopar— mide la temperatura real del interior. Si el sensor registra 25 °C, el error será de –3 °C. En respuesta a este error, el sistema activa el aire acondicionado hasta que la temperatura disminuye y alcanza nuevamente los 22 °C.

Los sistemas de lazo cerrado permiten:

- Precisión submicrométrica en fabricación de chips.
- Eficiencia energética en edificios inteligentes (30-40 % ahorro).
- Seguridad automotriz (ABS, control de estabilidad).

De hecho, el 92 % de los procesos industriales avanzados usan control por lazo cerrado (ISA, 2023).

### 8.3.1 PID: el control inteligente de los sistemas de control de lazo cerrado

El control PID (Proporcional-Integral-Derivativo por sus siglas en inglés) es un mecanismo de control de retroalimentación ampliamente utilizado en sistemas de control automático para mantener una variable de proceso (como temperatura, velocidad, presión, etc.) en un valor deseado (*setpoint*). Este control hace posible los sistemas de lazo cerrado.

El PID en la figura 8.23 es el que juega el papel de comparador e indica a los elementos de control cómo debe realizar la corrección. Lo que hace el PID es similar a lo que hace una persona al controlar la temperatura en la regadera, primero se abre el agua caliente (reacción rápida), luego se ajusta la mezcla fría/caliente a una temperatura cómoda (un primer ajuste grande), finalmente, la persona controla el flujo de agua fría y caliente (con pequeñas variaciones) para mantenerla en una temperatura confortable, sin embargo, si el sistema sufre de pronto un cambio grande, como que el agua sube mucho y muy rápido de temperatura, la persona abrirá rápidamente y mucho la llave de agua fría.

Esta forma de control y la rapidez para reaccionar es justo lo que hace un control PID. Es un algoritmo que:

- Corrige errores en sistemas de control.
- Aprende de los errores pasados.
- Anticipa cambios futuros.

El PID ajusta su respuesta usando tres acciones combinadas que se muestran en la tabla 8.5.

Los conceptos de control presentados aquí —incluyendo la introducción al PID— son nociones fundamentales simplificadas diseñadas para ofrecer una primera aproximación intuitiva. En la práctica profesional, el diseño e implementación de sistemas de control requieren modelado matemático riguroso (ecuaciones diferenciales, funciones de transferencia, análisis en el dominio de Laplace), sintonización avanzada

de parámetros (métodos como Ziegler-Nichols o asignación de polos), y validación de estabilidad (criterios de Routh-Hurwitz, Nyquist o Bode). Esta introducción deliberadamente evita esas complejidades para priorizar la comprensión conceptual, pero es crucial reconocer que el control automático es una disciplina de profundidad teórica significativa, con aplicaciones que van desde robótica hasta aeronáutica, donde un error de modelado puede tener consecuencias críticas. En cursos avanzados de ingeniería de control se exploran estos fundamentos matemáticos y técnicos con el rigor necesario.

Parte	¿Qué hace?	Ejemplo en la vida real
P (Proporcional)	Reacciona al error actual (mientras más grande el error, más fuerte la corrección)	Si el agua está muy fría, se abre mucho más el agua caliente.
I (Integral)	Corrige errores persistentes (que se acumulan con el tiempo)	Si tras 1 minuto el agua sigue fría, se abre un poco más la llave.
D (Derivativo)	Anticipa cambios futuros (viendo qué tan rápido varía el error)	Si el agua empieza a enfriarse muy rápido, se ajusta antes de que se vuelva helada.

Tabla 8.5 Explicación simplificada de lo que hace un control PID

## 8.4 Aplicaciones ahora y en el futuro

Un mundo donde las fábricas se adaptan solas a los cambios del mercado, los robots realizan cirugías con precisión milimétrica y los vehículos navegan sin conductor por calles inteligentes ya no es ciencia ficción: es el presente de la ingeniería de control y automatización.

A continuación, se presentan aplicaciones reales que están transformando industrias completas y mejorando vidas. Desde sistemas que salvan pacientes en quirófanos hasta tecnología que explora otros planetas, relacionadas con conceptos básicos que se han visto a lo largo del capítulo.

### 8.4.1 Industria 4.0: las fabricas que piensan solas

El concepto de Industria 4.0 fue acuñado en 2011 por el gobierno alemán como parte de su estrategia de alta tecnología, pero sus fundamentos tecnológicos se remontan a tres revoluciones industriales previas:

- 1ª Revolución (1784): Máquina de vapor y mecanización.
- 2ª Revolución (1870): Producción en masa y electricidad.
- 3ª Revolución (1969): Automatización y control digital.

La 4ª Revolución (2011-presente) se caracteriza por la fusión de:

- Sistemas ciberfísicos (CPS).
- Internet de las cosas industrial (IIoT).
- Inteligencia artificial.
- Computación en la nube.

Industria 4.0 es un paradigma de manufactura avanzada donde:

- **Dispositivos físicos** (sensores, actuadores) se conectan mediante protocolos IoT (Internet de las Cosas por su siglas en inglés).
- **Gemelos digitales** simulan procesos en tiempo real aunque estén alejados a una gran distancia geográfica.
- **Sistemas descentralizados** toman decisiones autónomas mediante:
  - Algoritmos de aprendizaje automático.
  - Control adaptativo multivariable.
  - Análisis predictivo.

En México existen casos donde ya se ha implementado la industria 4.0. Por ejemplo, en el sector automotriz, la planta BMW en San Luis Potosí implementó, en 2020, un sistema de 1,200 robots colaborativos con control de fuerza adaptativo, visión artificial para inspección de soldaduras (tolerancia:  $\pm 0.05$  mm) teniendo como resultados un 99.98 % de calidad en ensamblaje y 30 % reducción en tiempo de producción.

En el sector aeroespacial está el caso Safran en Querétaro, que trabaja con un sistema de control predictivo para la fabricación de álabes de turbina donde 50 sensores por máquina CNC monitorean vibración y temperatura, y algoritmos PID adaptativos compensan el desgaste de herramientas en una reducción de viruta (material de desperdicio) del 22 % al 3.5 %.

La Industria 4.0 no es un concepto aislado, sino la evolución natural de los principios de control y automatización que hemos estudiado.



Figura 8.24 Planta de BMW en San Luis Potosí, México. Actualmente en la planta se producen los modelos Serie 3, Serie 2 Coupé y el M2.

### 8.4.2 La automatización y el control en robótica

La robótica es un campo que une varias ramas de la ingeniería: mecánica, electrónica, computación y, por supuesto, automatización y control. De hecho, sin estas dos últimas, un robot no sería más que un montón de piezas ensambladas.

Un robot autónomo, por ejemplo, necesita:

- Sensores que detecten el entorno (visión artificial, proximidad, giroscopios).
- Algoritmos de control que tomen decisiones (seguir una línea, esquivar obstáculos, equilibrarse).
- Actuadores que ejecuten esas decisiones (motores, servos, sistemas hidráulicos).

En cada paso hay control y automatización funcionando juntos. En el norte de México, empresas como General Motors en Ramos Arizpe (figura 8.25), Volkswagen en Puebla y Kia en Nuevo León usan robots en sus líneas de ensamblaje para tareas como soldadura, pintura y colocación de componentes. Estos robots industriales son un ejemplo claro de automatización avanzada. Están programados para realizar ciclos repetitivos con precisión, pero también cuentan con sistemas de control que ajustan su comportamiento ante variaciones (temperatura, desgaste de piezas, cambio de modelos).

Muchos ingenieros mexicanos trabajan en el diseño, mantenimiento y optimización de estos sistemas, lo cual requiere entender muy bien los principios de control automático



Figura 8.25 Interior de la planta de General Motors en Ramos Arizpe

### La UNAM y los robots para búsqueda y rescate

Grupos de investigadores de la Facultad de Ingeniería de la UNAM han trabajado en el diseño de robots móviles que pueden entrar a zonas de desastre (como edificios colapsados tras un sismo) y mapear el entorno con sensores. Estos robots usan control autónomo para desplazarse, evitar obstáculos y mantenerse estables en terrenos irregulares.

Este tipo de tecnología requiere algoritmos complejos de control y automatización que reaccionen en tiempo real, sin necesidad de intervención humana directa.

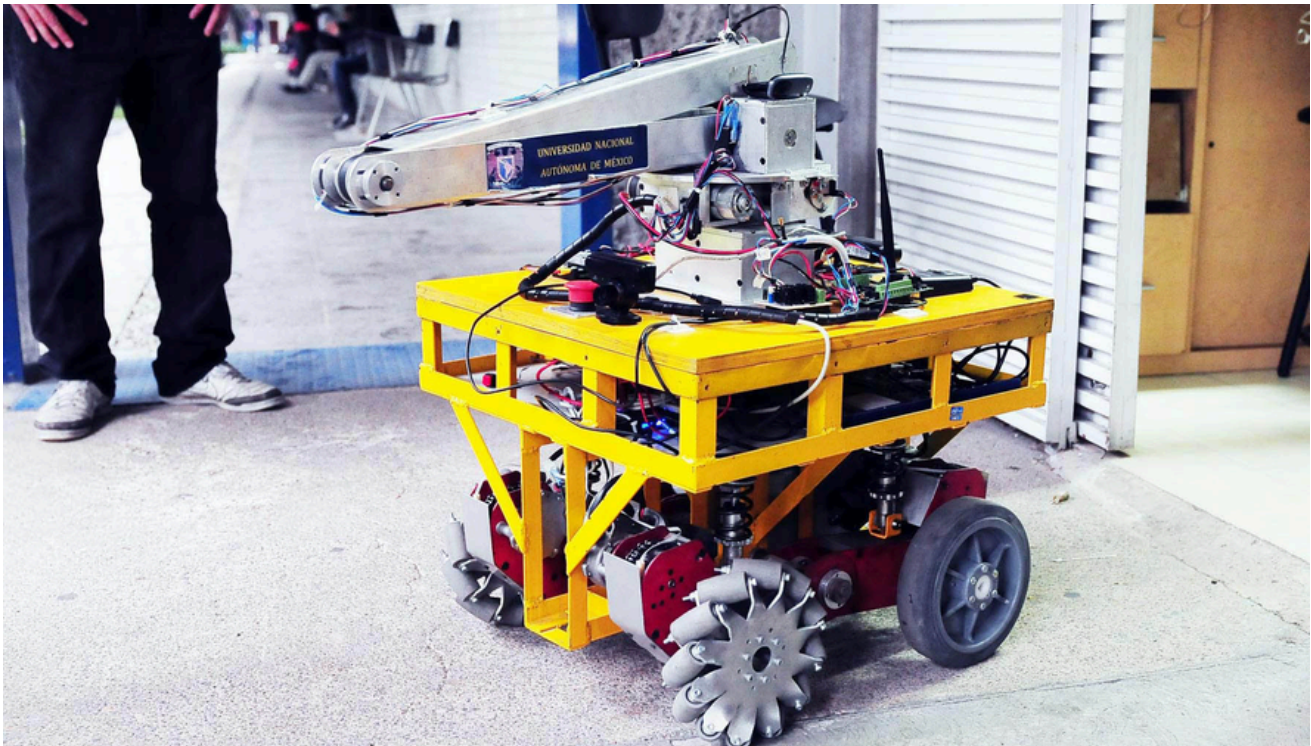


Figura 8.26 Fotografía del prototipo del robot desarrollado por la Facultad de Ingeniería de la UNAM para zonas de desastre.

### 8.4.3 Automatización, control y el futuro

La robótica del futuro no será solo industrial. En México ya se están desarrollando robots para la agricultura (drones que vigilan cosechas o siembran semillas), la medicina (prótesis inteligentes y asistentes quirúrgicos) y el servicio (robots en hoteles o restaurantes).

Todos estos avances tienen algo en común: dependen de sistemas que detectan, deciden y actúan por sí solos, es decir, de automatización y control bien diseñados. Estudiar estas áreas abre la puerta a trabajar en proyectos emocionantes que pueden mejorar la vida de muchas personas.

La integración de la inteligencia artificial (IA), particularmente del aprendizaje automático (ML), está transformando de manera profunda la automatización industrial. Rahman et al. (2025) destacan que la aplicación de modelos avanzados permite anticipar fallas mediante mantenimiento predictivo, mejorar la detección de defectos en línea a través del control de calidad inteligente y optimizar dinámicamente procesos de manufactura y energía. Estos avances incrementan la confiabilidad de los sistemas, reducen tiempos de inactividad no planificados y elevan la eficiencia operativa al aprovechar datos históricos y en tiempo real. Asimismo, tecnologías como los gemelos digitales permiten crear réplicas virtuales que facilitan la simulación y ajuste de operaciones, mientras que la Edge-AI habilita decisiones inmediatas y escalables directamente en el borde de la red, acercando la inteligencia al entorno físico y respondiendo con mayor rapidez y resiliencia.

El futuro apunta a sistemas con la capacidad de auto-optimizarse al integrar la teoría de control y la IA, de tal manera que la innovación tecnológica transformará la industria y exigirá nuevos perfiles profesionales que integren diversos conocimientos como lo son la ingeniería, la ciencia de datos y la innovación tecnológica.

## Amplía tus conocimientos

A continuación, se presentan las fuentes utilizadas en este capítulo, así como otras referencias que te permitirán reforzar y ampliar tus conocimientos sobre control y automatización.

### Libros

■ Garrido, S. (s. f.). *Ingeniería de control: Modelado y control de sistemas dinámicos*. Madrid, España: Universidad Carlos III de Madrid. <https://www.researchgate.net/publication/258109379>  
Libro didáctico que introduce el modelado matemático y análisis de sistemas dinámicos, con ejemplos de control clásico. Excelente para estudiantes que van a cursar control automático.

■ Vargas-Soto, J. E., Aceves-Fernández M. A. y Orozco-Ramírez J. E. (2018). *Ingeniería y automatización (Vol. 1)*. Querétaro, México: MecaMex <https://www.mecamex.net/Libros/2018-Libro-IngenieriaYAutomatizacion.pdf>  
Compendio de trabajos sobre aplicaciones prácticas de automatización y robótica en contextos reales. Muy útil para ver la ingeniería aplicada en la vida cotidiana.

■ Omron. (s. f.). *El libro de la automatización (Ed. NC Solutions)*. Alemania: MITSUBISHI ELECTRIC. <https://www.ncsolutions.es/wp-content/uploads/2016/04/El-libro-de-la-automatizacion.pdf>  
Manual introductorio que explica los fundamentos de la automatización industrial, incluyendo PLCs, sensores, actuadores y redes industriales. Ideal para jóvenes que desean una visión práctica.

### Artículos

■ Estevez, M. y Frutos, R. (2018). *Sistemas de control: La automatización como el motor del desarrollo*. Repositorio CONICET Digital. <https://ri.conicet.gov.ar/handle/11336/107185>  
Revisión sobre la automatización en la industria regional, con enfoques en control de procesos y casos prácticos latinoamericanos.

■ Montañó, S. A. (2023). *Automatización de procesos usando robótica y control de movimiento*. *Sapiens in Artificial Intelligence*, 2(1), 56–67. [https://revistasapiensec.com/index.php/Sapiens\\_in\\_Artificial\\_Intelligence/article/view/69](https://revistasapiensec.com/index.php/Sapiens_in_Artificial_Intelligence/article/view/69)  
Artículo que muestra aplicaciones de robótica en automatización, destacando beneficios como eficiencia, calidad y seguridad en procesos.

■ Rico, A. J., y Ramos, A. (2016). *Automatización y gestión industrial para ingenierías*. *Revista Ingeniar*, 2(2), 42–48. <https://journalingeniar.org/index.php/ingeniar/article/view/106>  
Describe la importancia de la automatización para el desarrollo industrial y social. Expone conceptos y ejemplos para estudiantes de ingeniería.

### Páginas web

■ Brunete, A. (s. f.). *Automatización industrial*. En *Introducción a la automática*. Bookdown. [https://bookdown.org/alberto\\_brunete/intro\\_automatica/automatizacionindustrial.html](https://bookdown.org/alberto_brunete/intro_automatica/automatizacionindustrial.html)  
Texto en línea que explica fundamentos de la automática, ideal como complemento académico para estudiantes de primeros semestres.





## Videos

▶ IngenioX. (2020, 8 de noviembre). ¿Qué es la Automatización y Control Industrial? [Video]. YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=8zz6njwLrwg>

Video corto que define automatización industrial y sus beneficios. Ideal para quienes recién se inician en el tema.

▶ Instrumentación y Automatización. (2020, 22 de junio). Sistemas de automatización y control para procesos industriales[Video]. YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=0xPu7J-oWeo>

Clase explicativa con diagramas de instrumentación y componentes comunes en sistemas industriales automatizados.

▶ ISCA Engineering. (2023, 17 de octubre). ¿Qué son los Actuadores? | Actuadores Industriales | Tipos De Actuadores [Video]. YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=XjChE0zvK38>

Video que explica qué son los actuadores y algunos ejemplos de ellos.

▶ McWhorter, P. (2014, 26 de junio). Arduino robotics for beginners [Video series]. YouTube. [https://www.youtube.com/playlist?list=PLGs0VKk2DiYx6CMdOQR\\_hmJ2NbB4mZQn-](https://www.youtube.com/playlist?list=PLGs0VKk2DiYx6CMdOQR_hmJ2NbB4mZQn-)

Tutoriales prácticos para construir robots simples con Arduino.

▶ RONIN Educación. (2022, 24 de junio). ¿Qué son los SENSORES? | EJEMPLOS DE SENSORES [Video]. YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=3TPVsqIXkCs>

Video que explica qué son los sensores y dónde los puedes ver en la vida cotidiana.

▶ Universidad Autónoma de Occidente. (2021, 14 de junio). ¿Qué hace un ingeniero en control y automatización? [Video]. YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=VpV-36BUH1A>

Entrevista explicativa sobre el rol profesional del ingeniero en automatización, sus campos de acción y aportes en la industria.

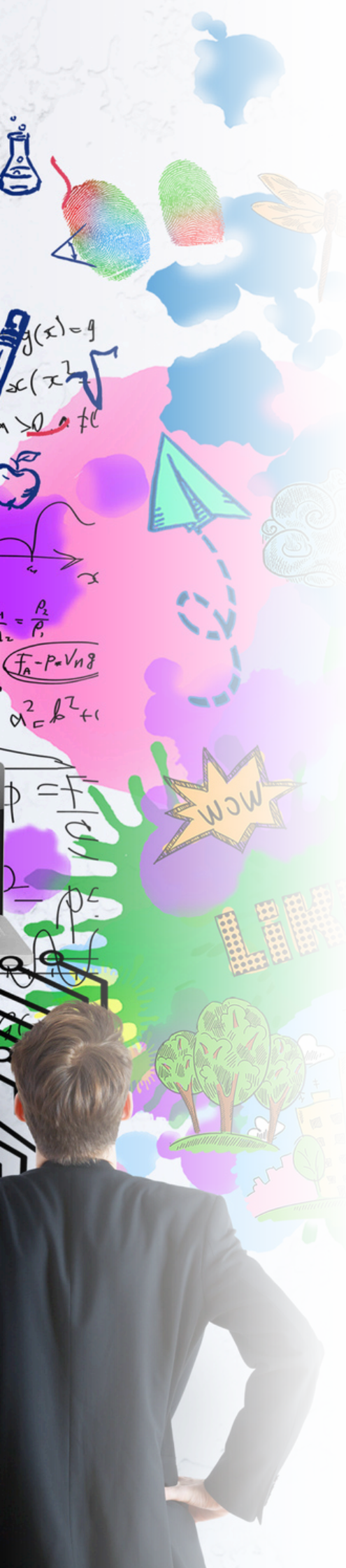


## Referencias

## Artículos

📄 Rahman, M. A., Shahrir, M. F., Iqbal, K. y Abushaiba, A. A. (2025). Enabling Intelligent Industrial Automation: A Review of Machine Learning Applications with Digital Twin and Edge AI Integration. *Automation*, 6(3), 37. <https://doi.org/10.3390/automation6030037>





## Capítulo 9

# Diseño y manufactura



En este capítulo se exploran conceptos del diseño y la manufactura, mostrando cómo estos campos de la ingeniería se traducen en soluciones prácticas para problemas reales.

Diseñar no es solo imaginar cómo se verá un objeto, sino entender cómo funcionará, cómo será producido y cómo cumplirá con su propósito. Del mismo modo, la manufactura no es solo fabricar piezas, sino elegir los materiales y procesos adecuados para garantizar eficiencia, calidad y sostenibilidad. Desde herramientas simples hasta maquinaria compleja, los conocimientos de diseño y manufactura son el puente que conecta una idea con un prototipo funcional.

Este capítulo te proporcionará las bases para entender cómo los ingenieros llevan las ideas del papel a la realidad, enfrentando los retos de optimización, innovación y sostenibilidad en cada paso del camino.

## 9.1 Paradigmas del diseño y la crisis contemporánea del diseño

Los paradigmas son la constelación de creencias, valores y técnicas que comparten los miembros de una comunidad científica. Implica métodos y conceptos para resolver problemas. Los cambios de paradigma se presentan cuando existen crisis en los campos de estudio. Cuando un paradigma no puede explicar o solucionar los problemas que se plantean resolver con el método actual, se genera una crisis, la cual desemboca en un cambio de paradigma.

El paradigma en una disciplina dirige cuáles son las interrogantes por formular, establece cómo deben formularse dichas interrogantes y cómo interpretar los resultados de investigaciones enfocadas en solucionar los problemas que se plantean. Actualmente, el diseño en muchas áreas se basa en un paradigma moderno. La modernidad implica una comprensión científica del mundo, control de los recursos de la naturaleza y la búsqueda de la satisfacción del individuo.

### 9.1.1 Paradigmas de diseño europeo

El primer paradigma del diseño se planteó en la época de la revolución industrial en el siglo XVIII. La caída de la monarquía, la unión de los comerciantes y las posibilidades de los ciudadanos de poder participar en proyectos de mejora desembocó en la creación de tecnología. Es en esta época cuando el diseño adquiere como objetivo la forma, valiéndose de la expresividad y la tecnología. Por primera vez en la historia, se escribe sobre el diseño y las características que este debía cumplir para ser considerado un buen diseño.

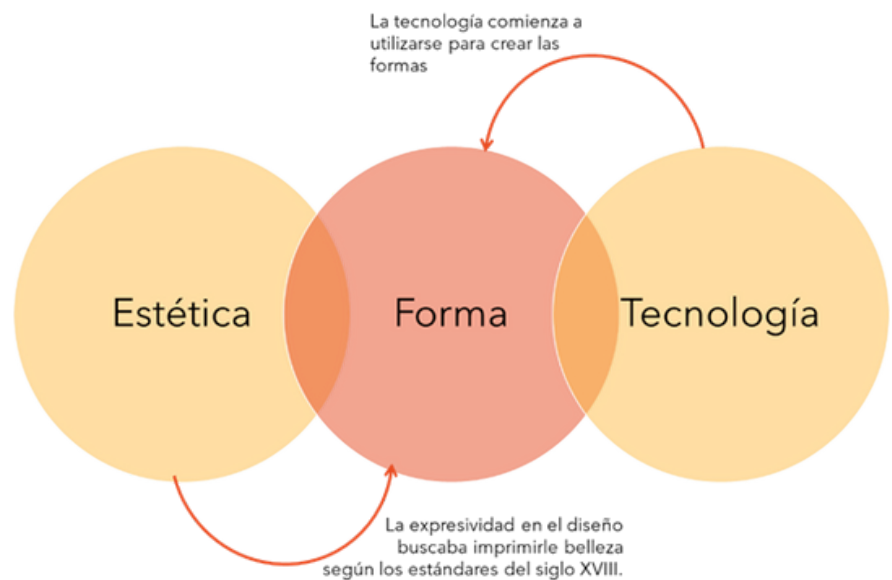


Figura 9.1 Primer paradigma de diseño

Al introducir la tecnología en el diseño, se produjo el desplazamiento de los artesanos, las personas que hasta ese momento habían sido los encargados de mejorar y mantener la forma en la cual los objetos de uso cotidianos eran elaborados para su utilización. Esto produjo la creación del movimiento de Arts and Crafts a principios del siglo XIX en Inglaterra. Surge como una antítesis de la industrialización y busca recuperar los medios de producción y las estéticas de la época medieval, para crear un diseño artesanal. Sin embargo, el diseño basado en la tecnología había probado ser una forma de impulsar la industria nacional en países como Francia y en la misma Inglaterra.

### 9.1.2 Paradigmas de diseño en América

El paradigma de diseño en el continente americano se diferenció del paradigma europeo debido a las implicaciones geográficas con las que se habían desarrollado los países en esta región. A diferencia de Europa, las regiones de América fueron colonizadas, lo que implicó el asentamiento de poblaciones pequeñas, las cuales debían trabajar para obtener recursos del lugar con la finalidad de sobrevivir, al estar aislados entre una población y otra, el diseño debía de ser algo práctico, inmediato y duradero. Tampoco existía la posibilidad de crear en todos los poblados grandes industrias que diseñaran y fabricaran para las necesidades de la población.

Debido a la colonización, había escasas tradiciones culturales que pudieran impactar en la estética de lo que se diseñaba, por ello, el paradigma del diseño americano, aunque igualmente basado en la forma, se preocupa más por la función del objeto y el uso de tecnología para fabricarlo y mejorarlo.

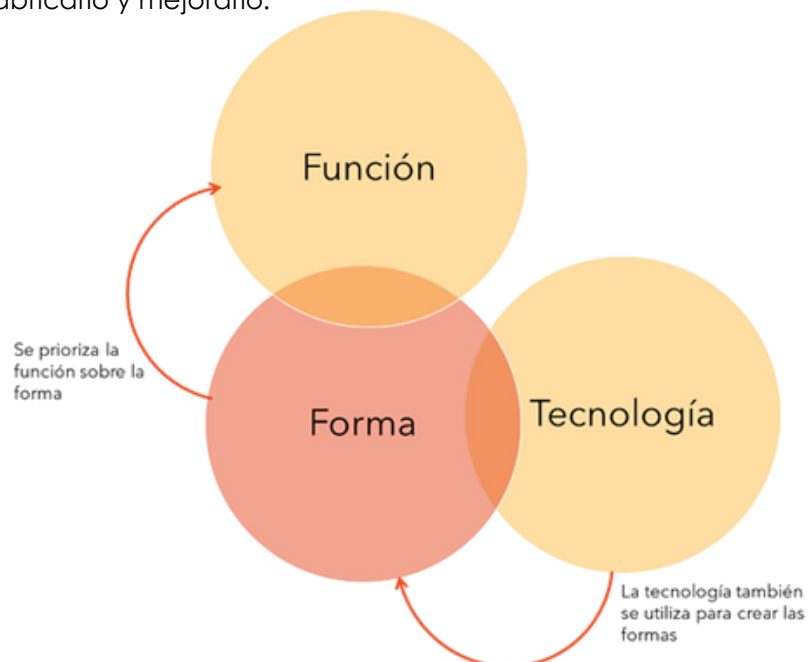


Figura 9.2 Paradigma de diseño americano

Existía la necesidad de que los sistemas fueran duraderos y en caso de sufrir averías, el propietario pudiera repararlo de manera sencilla, sin la necesidad de enviarlo a un lugar especial, pues los pobladores a veces vivían en comunidades asiladas. Debido a esto, la estandarización de las piezas fue un concepto clave para hacer del diseño algo robusto, duradero y fácil de reparar.

La mano de obra era escasa y, por ello, el diseño de las fábricas tendió a automatizar los procesos de tal forma que disminuyera la necesidad de mano de obra. Por esta razón, industrias como la automotriz se enfocaron en la organización de las operaciones de producción de tal manera que los procesos fueran eficientes, generando así la producción en línea en las fábricas.

La creación de productos fabricados con poca mano de obra y de alta durabilidad permitieron venderlos a un bajo costo, lo que a la vez incrementó la demanda, pues personas de ingresos bajos podían acceder a muchos de ellos. Al ver el impulso que un buen diseño podía dar a la economía nacional, el presidente de Estados Unidos, Thomas Jefferson fundó la Universidad de Virginia, enfocada en el estudio de la ingeniería y las ciencias aplicadas, plantando una de las bases del sistema americano de producción: las universidades generarían el conocimiento que mejorara los procesos y productos, mientras que el gobierno financiaría esta investigación y las empresas se encargarían de producir los productos.

### **9.1.3 Paradigma de diseño moderno**

El paradigma que marcó el camino para las metodologías de ingeniería de diseño deriva del diseño alemán. Durante el gobierno del Kaiser Guillermo II de Alemania, el gobierno decidió apostar por la educación en ciencia para mejorar la economía del país. Al ver los progresos en la economía americana, se decidió apostar por la educación para mejorar los procesos de producción.

Hasta ese momento, Alemania no había adoptado un paradigma de diseño para su industria. Con el fin de implementar un programa de diseño en las universidades alemanas, el gobierno redujo impuestos a las personas académicas expertas educadas en el extranjero, con el fin de que crearan un programa de diseño que pudiera implementarse en Alemania.

El encargado de iniciar el programa fue Peter Behrens, arquitecto autodidacta, quien propone hacer del diseño un proceso racional. Sin embargo, el proceso de creación del programa se ve interrumpido por la Primera Guerra Mundial; después del conflicto se retoma el proyecto en unión con Walter Gropius, quien fundó la escuela de diseño mundialmente conocida como la Bauhaus.



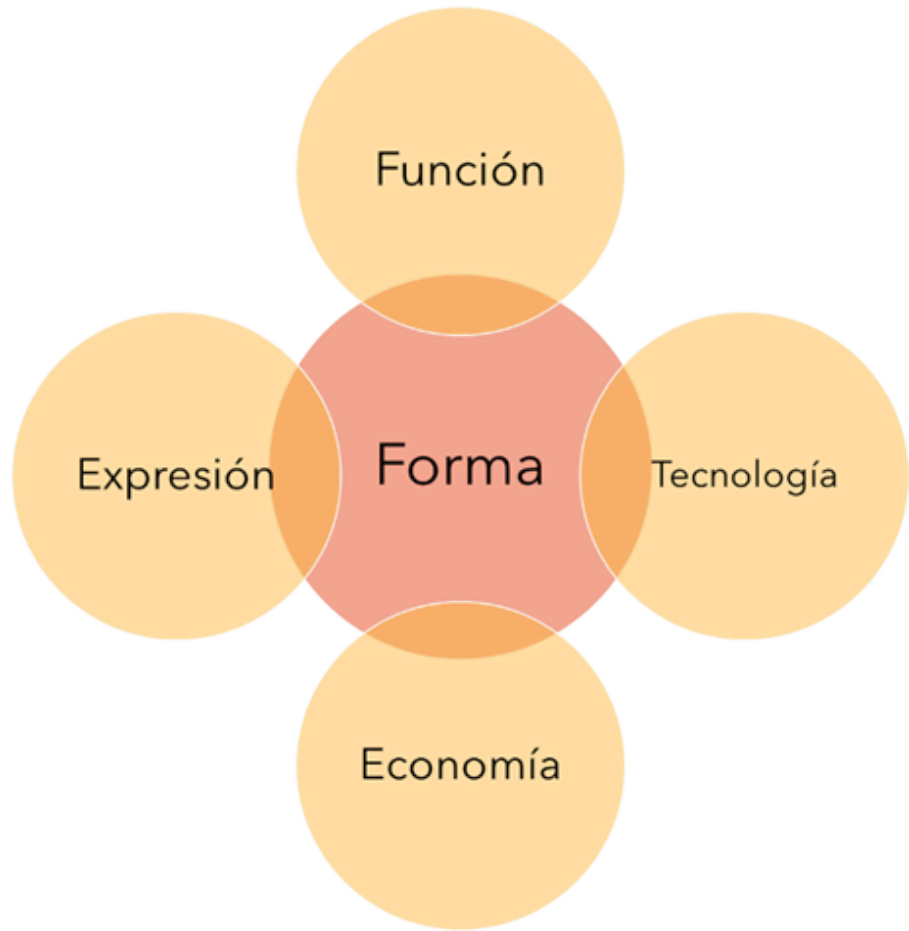


Figura 9.3 Paradigma de diseño moderno

El diseño en la Bauhaus se enfocó en capacitar diseñadores en diferentes ramas, cada uno se enfocaba en una rama específica del diseño, de tal forma que al culminar su formación, eran especialistas en su área. Hasta ese momento, los diseñadores habían sido generalistas; la educación en la Bauhaus apostó por un modelo de especialización y proponía que los diseñadores se unieran para que, a través del conocimiento en conjunto crearan un diseño multidisciplinar.

El paradigma del diseño moderno surge bajo este concepto planteado por la Bauhaus, donde se apostó por un diseño mínimo, funcional, basado en la forma, pero recuperando la importancia de la estética como una manera de expresar al diseñador y, sobre todo, procuró que el diseño tuviera también un enfoque en cuanto a la economía, es decir, los costos de producción y el costo final del diseño. Hasta este momento, la economía no había sido un factor que conscientemente importara al momento de diseñar, pero debido a las afectaciones económicas en Alemania, por las dos guerras mundiales que había atravesado, este criterio de diseño cobró relevancia.

#### 9.1.4 Crisis contemporánea del diseño

Las ideas contemporáneas, como el mercado y la individualidad, han permeado en los paradigmas de diseño y han dado paso a la creación de nuevos métodos. Los métodos de diseño más actuales priorizan el diseño innovador y la competitividad de los productos.

Sin embargo, una de las crisis por las cuales atraviesa el diseño actual es que no necesariamente un diseño creativo conlleva a la creación de una innovación. La innovación implica la mejora de un producto, servicio o proceso en el mercado, dando como resultado una mayor competitividad.

Además, desde la década de 1980, han cobrado relevancia cuestiones que antes no eran contempladas dentro del paradigma del diseño, como los problemas ambientales, crisis de los combustibles fósiles y la necesidad de encontrar otras tecnologías energéticas alternativas; además, de la inclusión de nuevas tecnologías que permitan la adquisición de más información sobre lo que busca el mercado, pero, a la vez complica satisfacer las necesidades de este por completo. El uso de las tecnologías de la información (TIC) logran obtener también un proceso de globalización, que admiten una visión más global de los problemas.

Actualmente, no ha surgido un paradigma diferente al moderno para solucionar las diferentes crisis que se han presentado en el diseño, sin embargo, existen diferentes tesis que proponen enfoques que permiten paliar las problemáticas. Metodologías como diseño sustentable o ecodiseño plantean opciones para mejorar el desempeño de los productos, servicios y procesos, en cuanto a su efecto ecológico, valiéndose de mejorar características como son los materiales y los procesos de manufactura.

Las problemáticas sociales también buscan ser resueltas a través de otro enfoque, como el diseño incluyente, el cual plantea diseñar para una sociedad que tiene personas con capacidades diferentes, las cuales, hasta hace muy poco, no se habían considerado al momento de crear productos para el mercado.

Si se revisa cómo se han desarrollado los paradigmas de diseño, puede notarse que siempre ha estado centrado en la forma, pero han surgido métodos que buscan hacer del usuario y sus necesidades el punto central del diseño. El diseño centrado en el usuario busca diseñar productos que atiendan a las necesidades de las personas que van a utilizarlos, no solamente que satisfagan la función principal para la cual fue desarrollado, sino considerando su psicología, antropología y etnografía, pues lo que funciona para una persona que vive en determinado territorio y comparte ciertas costumbres y realidades sociales, no necesariamente funciona para otra que vive una realidad distinta.

Considerando lo anterior, un diseño centrado en la innovación, no es suficiente, pues este enfoque prioriza el valor económico sobre las otras problemáticas ya mencionadas. Con esta sección, el lector puede tener una idea de donde provienen los métodos de diseño que se tocarán en este capítulo y también la problemática que actualmente existe, así como las limitantes de las metodologías actuales y la importancia de aprender diferentes métodos para lograr, en la medida de lo posible, un diseño más holístico, no solo enfocado en las características económicas o de función, sino en las problemáticas globales.

## 9.2 Metodologías de diseño en ingeniería

Aprender a diseñar solo es posible diseñando. Los estudiantes que quieran aprender a diseñar en ingeniería deben enfrentarse a la tarea. Sin embargo, es necesario que tanto estudiantes como diseñadores experimentados cuenten con una estructura que les permita realizar el proceso de la forma más ordenada posible y eviten la omisión de pasos importantes (Kannapan & Marshek, 1996).

Las metodologías de diseño son modelos que pretenden explicar cómo el diseño debería de ser o cómo debería de ser llevado a cabo. Una de las clasificaciones de las metodologías de diseño es la creada por Finger y Dixon (1989a, 1989b). Ellos clasificaron el diseño en seis categorías diferentes, las cuales se muestran en el diagrama de la figura 9.4.



Figura 9.4 Clasificación de las metodologías de diseño según Finger y Dixon (1989a, 1989b)

Las metodologías TRIZ y QFD no se incluyeron en la clasificación original de Finger y Dixon, pero entrarían en la clasificación de prescriptivos (Tomiyama, 2006). El método de Design Thinking tampoco se clasifica en la publicación original de Finger y Dixon; se le asignó una clasificación de acuerdo con la descripción que proporcionan los autores. Esta clasificación no es completa, posiblemente porque no se contaba con la información completa de ellos, los propios autores indican, en el inicio de su artículo, que la clasificación no es absoluta y existen aún posibilidades de desarrollo y que las clasificaciones no son excluyentes entre ellas. Algunos métodos pueden clasificarse en más de un grupo, ya que contienen pasos de más de un tipo de clasificación.

## 9.2.1 Comparación entre metodologías: descriptivas y prescriptivas

Cada metodología de diseño que se ha escrito en la literatura tiene diferentes puntos ventajosos, dependiendo del enfoque de diseño que se esté utilizando para el proyecto y también puede depender de los objetivos de este. La elección de una metodología de diseño puede depender de lo que el diseñador considere o el método que crea que facilite su proceso de solución.

Sin embargo, las metodologías prescriptivas se crearon con la finalidad de que el proceso creativo del diseño se estructure de una forma racional y busquen permitir que el diseñador no olvide puntos importantes; permiten facilitar la planificación y mejorar la comunicación entre las disciplinas que se involucran en el diseño (Kilian Gericke, 2011). A continuación, se pueden comparar las características de dos de las clasificaciones presentadas en la figura 9.4; se toman como ejemplo los métodos de Engineering Design por Dieter (2009) y el método Design Thinking de la consultora IDEO (Riverdale y IDEO, 2011). Las características mostradas en la tabla 9.1 son con base en la experiencia en diferentes proyectos ejecutados en la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México.

Engineering Design	Design Thinking
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Es un proceso muy estructurado que permite no saltar pasos importantes del diseño.</li> <li>• Permite la integración de otras herramientas como el QFD para organizar la información de obtención de requerimientos.</li> <li>• Considera desde las primeras etapas del diseño no solo los requerimientos de los usuarios, sino los requerimientos de la industria para la cual se está diseñando (capacidad de producción, procesos de manufactura disponibles, capacidad de almacenamiento, transporte, etc.)</li> <li>• Profundiza en cómo mejorar el producto en las etapas posteriores a la generación del concepto, como mejorar la arquitectura del producto, su configuración, la manufactura, el ensamble, etcétera.</li> <li>• Integra un método matricial para evaluar de forma cuantitativa cuál es el mejor concepto de solución, no solo con base al criterio del usuario, sino con base en los criterios que el diseñador también considere importantes.</li> <li>• Se debe tener experiencia en diferentes aspectos de la ingeniería, sobre todo en las etapas posteriores al diseño conceptual para poder ejecutar los pasos subsiguientes.</li> <li>• Es un método extensivo por lo que su ejecución puede ser tardada y por lo tanto la obtención de la solución final puede ser más lenta.</li> <li>• La forma de evaluar el concepto es tardada debido a que es necesario desarrollarlo hasta un punto que permita una evaluación cuantitativa, es decir, que cada criterio de evaluación sea medible.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Analiza de forma más profunda las necesidades del usuario.</li> <li>• Es un método que puede ser entendido por diferentes diseñadores de diferentes disciplinas de forma sencilla.</li> <li>• El hecho de que sea fácilmente entendido por diferentes disciplinas permite la integración más fácil de equipos multidisciplinarios.</li> <li>• Es un método simple, que contiene pocos pasos y permite una obtención más veloz del concepto de solución.</li> <li>• Al ser un método más abstracto no es fácil de implementar si no se tiene mucha experiencia.</li> <li>• Puede presentar dificultades para organizar la información obtenida en cada etapa y por lo tanto esta puede no considerarse en la idea final.</li> <li>• No describe cómo llevar las siguientes etapas del diseño una vez se ha obtenido el concepto, para mejorarlo para la manufactura, por ejemplo.</li> </ul>

Tabla 9.1 Métodos prescriptivos y descriptivos: comparación de características

Si bien estas características pretenden ser una guía para ayudar a seleccionar entre los diferentes métodos de diseño disponibles para el diseñador, es necesario aclarar que cada método puede ser adaptado, integrando herramientas de otros métodos para mejorarlo, según las necesidades requeridas. Aunque esto es más fácil de hacer a medida que se alcanza experiencia en el diseño, al inicio se recomienda seguir un método prescriptivo, pues describe de forma detallada cada etapa y puede resultar más fácil de seguir y ejecutar para el diseñador inexperto.

### 9.3 Metodología en ingeniería de diseño

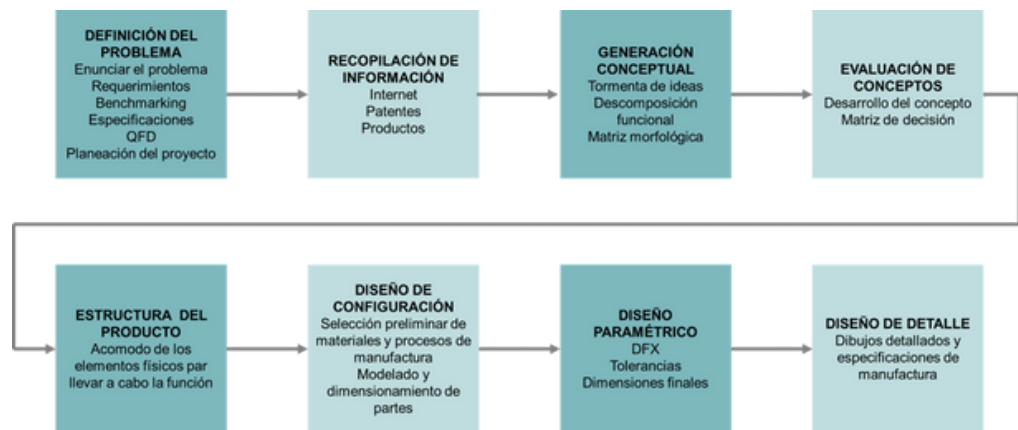


Figura 9.5 Proceso de diseño en ingeniería y sus subprocesos

El diseño es planear para crear un objeto para la manufactura (Kannapan y Marshek, 1996). En cualquier disciplina, la mejor forma de aprender a diseñar es diseñando. El diseño conlleva una serie de pasos, los cuales pueden parecer abrumadores, sobre todo el cómo empezar, cómo llevar a cabo cada uno de ellos y cómo saber si las decisiones que se están tomando son las adecuadas.

Es por ello que tanto estudiantes de diseño como diseñadores experimentados se ayudan de metodologías de diseño para guiarse en cada uno de estos pasos. Dependiendo del campo donde el diseñador se desempeñe, existen diferentes metodologías de diseño que pueden ayudarlo con la tarea de diseñar. Algunos métodos que se han mencionado en otras secciones son Design Thinking, Engineering Design, de Dieter y Schmit, o la propuesta por Pahl y Beitz o Product Design propuesta por Ulrich. Sin embargo, existen otros métodos que el lector puede consultar en la sección de material extra de este capítulo.

En la figura 9.5 se presenta el método de diseño propuesto en la obra *Engineering Design* de Dieter y Schmit. Aunque el proceso se presenta de forma lineal, hay que tomar en cuenta que el proceso de diseño siempre es iterativo y puede volverse desordenado. Sin embargo, las etapas que se muestran en la figura 9.5 son una guía importante para llevar a cabo un diseño exitoso. En la figura 9.6 se muestra una breve descripción de cada una de las etapas del proceso de diseño de la figura 9.5. En la obra *Casos de ingeniería de diseño* (González, 2017) se pueden consultar ejemplos de aplicación del método mostrado en la figura 9.5 y el desarrollo de las etapas mostradas en la figura 9.6.

## 9.4 Diseño para X

Como ya se mencionó en secciones anteriores, expertos indican que el diseño se encuentra en una etapa de crisis, ya que no hay un método holístico que permita abordar de manera completa y sin fallas cada uno de los aspectos del diseño. Con base en esto, en esta sección se describirán diferentes métodos implicados en la categoría de métodos clasificados en Diseño para X (DfX por sus siglas en inglés), los cuales son un compendio de metodologías que, de manera individual, buscan optimizar diferentes aspectos del ciclo de vida del producto, con el fin de buscar el mejor diseño al mejorar cada una de sus etapas.

Cabe resaltar que, si bien, estos métodos se recomiendan en diferentes obras que manejan métodos prescriptivos como una parte importante del proceso de diseño (Dieter y Schmidt, 2000; Pahl et al., 2007), los mismos autores indican que es difícil para un diseñador volverse experto en cada una de estas áreas, por ello, es importante ver esta sección como una guía de lo que estos métodos pueden aportar al diseño aunque no se espera que un diseñador se vuelva experto en cada uno de estos rubros.

Finalmente, hay que mencionar que año con año se publican nuevos artículos donde se presentan y crean nuevas aplicaciones de DfX en casos específicos de diseño. Algunos toman como base las principales obras y proponen mejoras o alternativas para productos específicos, incluso combinaciones entre métodos. Entonces, los ejemplos presentados a continuación no deberán ser considerados como únicos, sino como una base a partir de la cual el lector puede ampliar su conocimiento y actualizarlo con base en nuevas publicaciones.

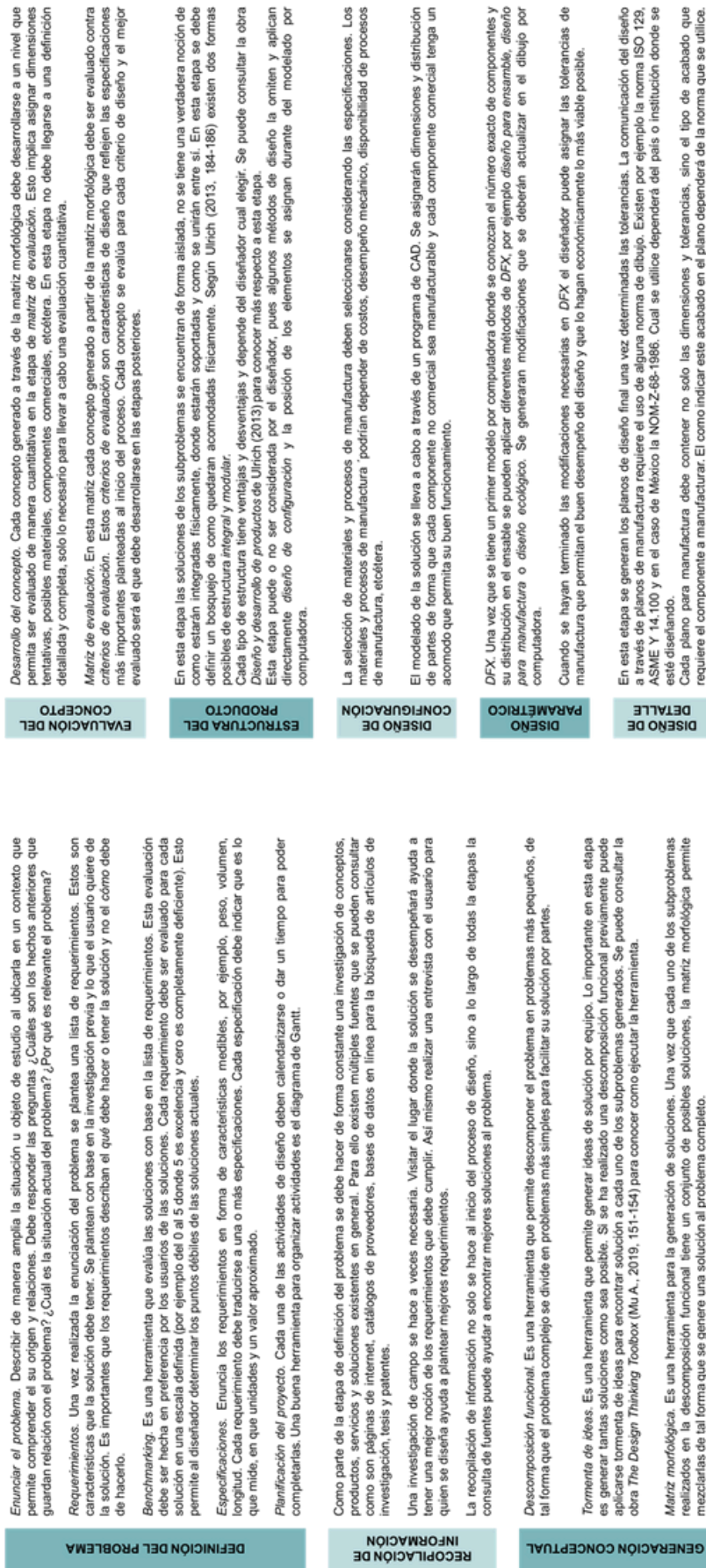


Figura 9.6 Proceso de diseño en ingeniería y sus subprocesos

### 9.4.1 Diseño para manufactura

El término diseño para manufactura (DfM) por sus siglas en inglés hace referencia al proceso en el cual, para cada componente del diseño, se selecciona un componente estándar o el material en bruto junto con el proceso de manufactura para generar el componente. Para poder llevar a cabo un diseño para manufactura, es importante que el diseñador conozca los diferentes procesos de manufactura a los que tiene acceso, así como las características de las piezas que puede manufacturar con dicho proceso, costos de manufactura, tolerancias, tiempos de manufactura, entre otras características.

El propósito de realizar DfM en un **prototipo** es reducir los costos de la manufactura manteniendo las especificaciones de diseño con las que fue conceptualizado. Existen diferentes fuentes de consulta donde se describe cómo llevar a cabo un DfM (Boothroyd et al., 2010; Dieter y Schmidt, 2009; Ulrich y Eppinger, 2013); en esta sección se describirán una serie de principios para llevar a cabo un DfM con base en la obra de Bralla (1989).

#### Principios básicos para manufactura económica

Los siguientes principios enlistados permitirán al diseñador especificar los componentes del diseño, de tal forma que el costo de producción sea mínimo.

1. Simplicidad. Usualmente el producto con menor cantidad de piezas, la forma menos compleja, con la menor cantidad de ajustes de precisión y la secuencia de fabricación más corta será el menos costoso de producir.
2. Materiales y componentes estándar. El uso de materiales asequibles y componentes listos para usar representa una ventaja, sobre todo en productos de baja cantidad, el uso de componentes estándar puede evitar la necesidad de adquisición de equipo especial lo que agilizará la producción.
3. Diseño estandarizado. Cuando se vayan a producir productos que son similares, especificar materiales, componentes y subensambles comunes entre ellos, proporcionará una economía de escala. Esto reduce la inversión en equipos, capacitación de personal y facilita el control de los procesos.



4. Mayor margen para las tolerancias. La relación inversa entre la tolerancia y costos de manufactura ha sido ampliamente estudiada y confirmada. Tolerancias de manufactura más pequeñas se verán reflejadas en mayores tiempos de producción, mayor cantidad de procesos y a su vez en un mayor costo de producción. Es importante tener presente lo anterior al momento de asignar la tolerancia a un diseño; debe ser la suficiente para permitir el adecuado funcionamiento, pero no exceder por mucho los requerimientos de diseño. La figura 9.7 ilustra esta relación. Obsérvese que al incrementar la precisión del maquinado, los costos de manufactura se incrementan de forma lineal. La figura 9.8 ilustra cómo se comporta la relación entre acabado superficial y costos de manufactura para diferentes procesos de manufactura; obsérvese que mientras es mayor la rugosidad del acabado, menor es el costo de producción.

5. Uso de materiales de fácil manufactura. Utilizar los materiales que sean más fáciles de procesar siempre que estos cumplan con las especificaciones de diseño, esto es que características como su tiempo de ciclo, velocidad de corte, fluidez, etcétera, permitan una manufactura más veloz.

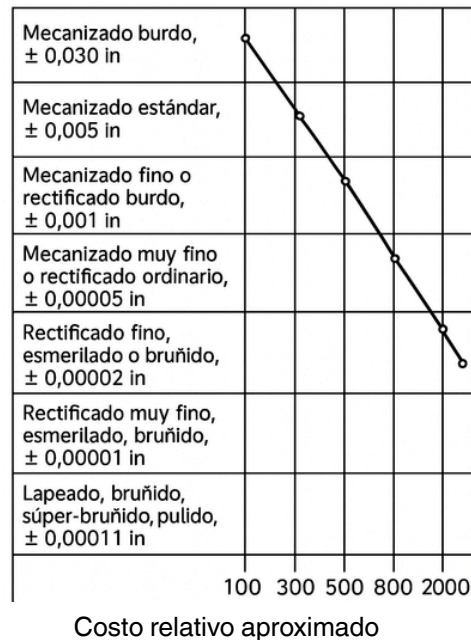


Figura 9.7 Costos vs tolerancia de manufactura

6. Trabajar en equipo con el personal de fabricación. Los diseños más producibles se logran cuando el diseñador y el equipo de fabricación trabajan en conjunto y colaboran como equipo.

7. Evitar operaciones secundarias. Simplificar el número de operaciones de manufactura es importante, eliminando las que sean posibles sin que afecten la función final del diseño. Operaciones como el desbarbado, la inspección, el enchapado y la pintura, el tratamiento térmico, la manipulación de materiales y otras pueden resultar tan costosas como la operación de fabricación primaria y deben tenerse en cuenta a medida que se desarrolla el diseño.

8. Diseño adecuado al nivel de producción esperado. El diseño debe ser adecuado para un método de producción que sea económico para la cantidad prevista. Por ejemplo, un producto no debe diseñarse para utilizar una fundición a presión de paredes delgadas si las cantidades de producción anticipadas son tan bajas que el costo de la matriz no se puede amortizar. Por el contrario, también puede ser incorrecto especificar una fundición de aluminio en molde de arena para una pieza producida en masa, porque esto puede no aprovechar los ahorros de mano de obra y materiales posibles con las fundiciones a presión.

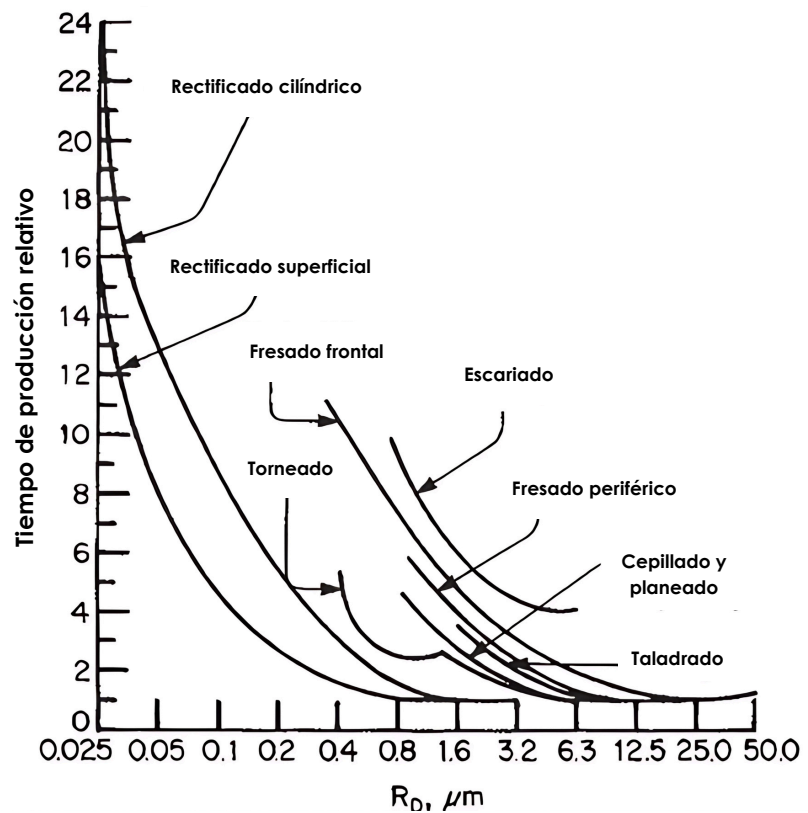


Figura 9.8 Acabado superficial contra costos

9. Utilizar características especiales del proceso. Los diseñadores aprenderán las capacidades especiales de los procesos de fabricación que son aplicables a sus productos y los aprovecharán. Por ejemplo, sabrán que las piezas de plástico moldeadas por inyección pueden incorporar color y textura superficial a medida que salen del molde, que algunos plásticos pueden proporcionar "bisagras vivas", que las piezas de polvo de metal normalmente tienen una naturaleza porosa que les permite retención de lubricación y elimina la necesidad de insertos de bujes separados, etc. El uso de estas capacidades especiales puede eliminar muchas operaciones y la necesidad de componentes costosos separados.

10. Evitar restringir el proceso de manufactura. En los planos de las piezas, especificar solo las características finales necesarias; no el proceso a utilizar. Permitir a los ingenieros de fabricación la mayor libertad posible para elegir un proceso que produzca las dimensiones necesarias, el acabado superficial u otras características requeridas.

### Guía para mejorar el DfM

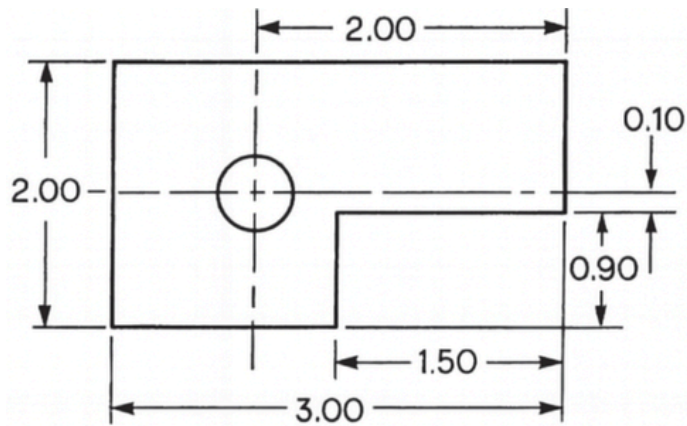
1. Lo primero en importancia es simplificar el diseño, reduciendo el número de piezas necesarias. Esto se puede hacer con mayor frecuencia combinando partes y diseñando una parte para que realice varias funciones. En la sección 9.4.2 se presenta una guía para llevar a cabo DfA, el cual se enfoca en lograr la reducción de piezas.

2. Diseñar para operaciones de bajo costo de mano de obra siempre que sea posible. Por ejemplo, un agujero previamente manufacturado con troqueladora se puede hacer más rápidamente de lo que se haría con una operación de taladrado.

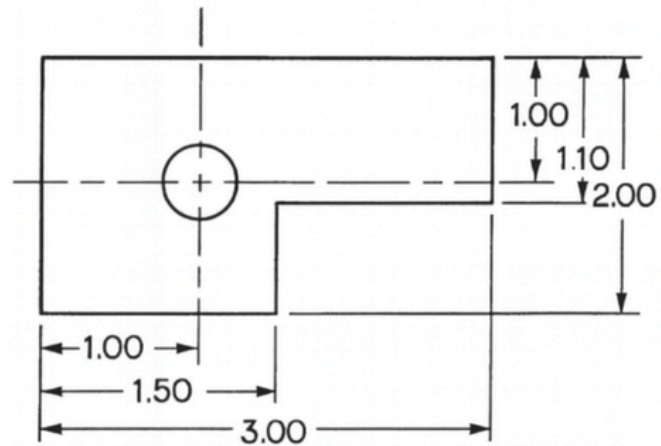
3. Evitar descripciones muy generales en dibujos, ya que pueden ser difíciles de interpretar para el personal de fabricación. Algunos ejemplos son "Pulir esta superficie...", "No se permiten marcas de herramientas" y "Los ensamblajes deben exhibir una buena mano de obra". Las notas deben ser más específicas que esto.

4. Las dimensiones en los planos no deben tomarse sobre puntos en el espacio, sino sobre superficies específicas o puntos en la pieza misma, si es posible. Esto facilita la fabricación de dispositivos y calibres, y ayuda a evitar errores de herramientas, calibres y medidas. Véase el ejemplo de la figura 9.9.

5. Todas las dimensiones deben partir de una línea de referencia en lugar de una variedad de puntos para simplificar las herramientas y la medición, y evitar la superposición de tolerancias (véase la figura 9.9).



No así



Así

Figura 9.9 Dimensionar componente

6. Una vez que se han cumplido los requisitos funcionales, cuanto más ligera sea la pieza, menor será su costo. Los diseñadores deben esforzarse por lograr un peso mínimo compatible con los requisitos de resistencia y rigidez. Junto con una reducción en los costos de materiales, generalmente habrá una reducción en los costos de mano de obra y herramientas cuando se use menos material.

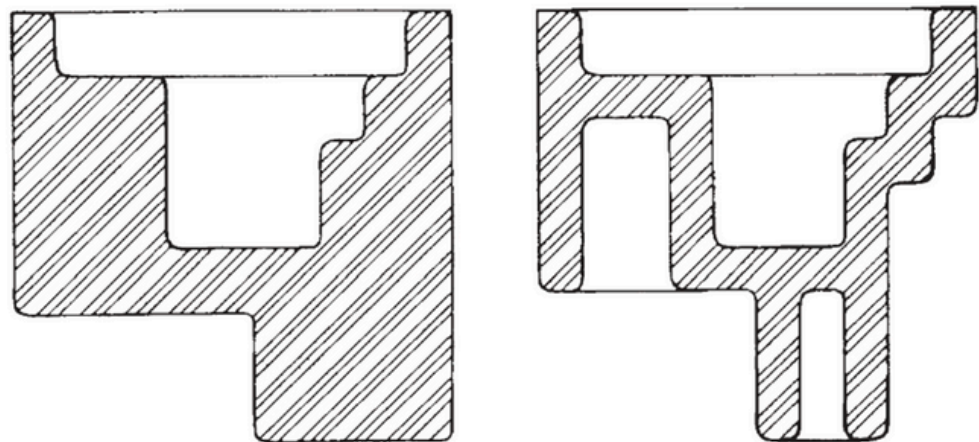
7. Siempre que sea posible, diseñar para usar herramientas de uso general en lugar de herramientas especiales (troqueles, cortadores de forma, etc.). Un taller bien equipado a menudo tiene una gran colección de herramientas estándar que se pueden utilizar para una variedad de piezas. Excepto en los niveles más altos de producción, donde los ahorros en mano de obra y materiales de las herramientas especiales permiten amortizar sus costos, los diseñadores deben familiarizarse con las herramientas de uso general y estándar que están disponibles y hacer uso de ellas.

8. Evitar las esquinas afiladas; usar filetes y radios generosos. Esta es una regla universal aplicable a piezas fundidas y moldeadas, formadas y maquinadas. Las esquinas generosamente redondeadas proporcionan una serie de ventajas:

- a. Hay menos concentración de esfuerzos en la pieza y en la herramienta; ambos durarán más.
- b. El material fluirá mejor durante la fabricación.
- c. Puede haber menos pasos operativos.
- d. Se reducirán las tasas de desecho.

9. Diseñar el componente de tal forma que la mayor cantidad de procesos de manufactura puedan realizarse sin la necesidad de reposicionarlo, esto reduce el tiempo de sujeción y ayuda a mantener una mejor precisión en la manufactura (figura 9.10).

10. Siempre que sea posible, las piezas para fundición, molde de inyección o de pulvimetalurgia deben diseñarse de modo que se eviten las líneas de partición escalonadas, ya que estas aumentan la complejidad y el costo del molde y el patrón.



Diseño original

Rediseño

Figura 9.10

11. Con todos los procesos de fundición e inyección, es una buena idea diseñar las piezas de trabajo para que los espesores de las paredes sean lo más uniformes posible.

12. Separar los orificios en las piezas maquinadas, fundidas, moldeadas o estampadas para que se puedan hacer en una sola operación, ya que la mayoría de los procesos tienen limitaciones en cuanto a la precisión con la que se pueden hacer agujeros simultáneamente, debido a la falta de resistencia de las secciones delgadas, a los problemas de flujo de material en los moldes o a la dificultad de juntar varios husillos de mecanizado (figuras 9.11, 9.12 y 9.13).

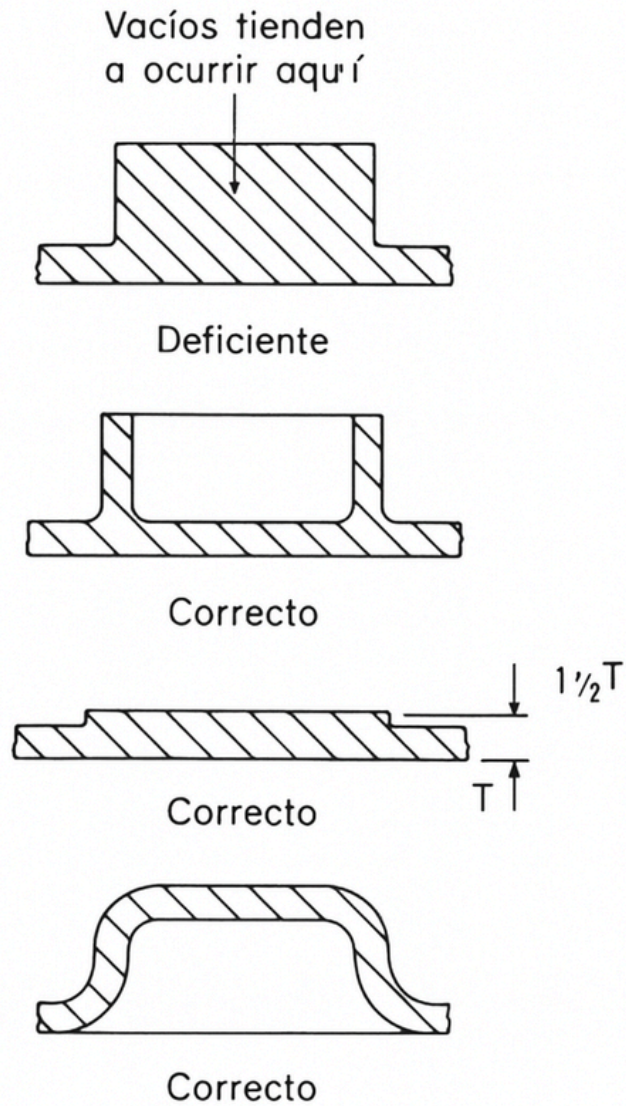


Figura 9.11

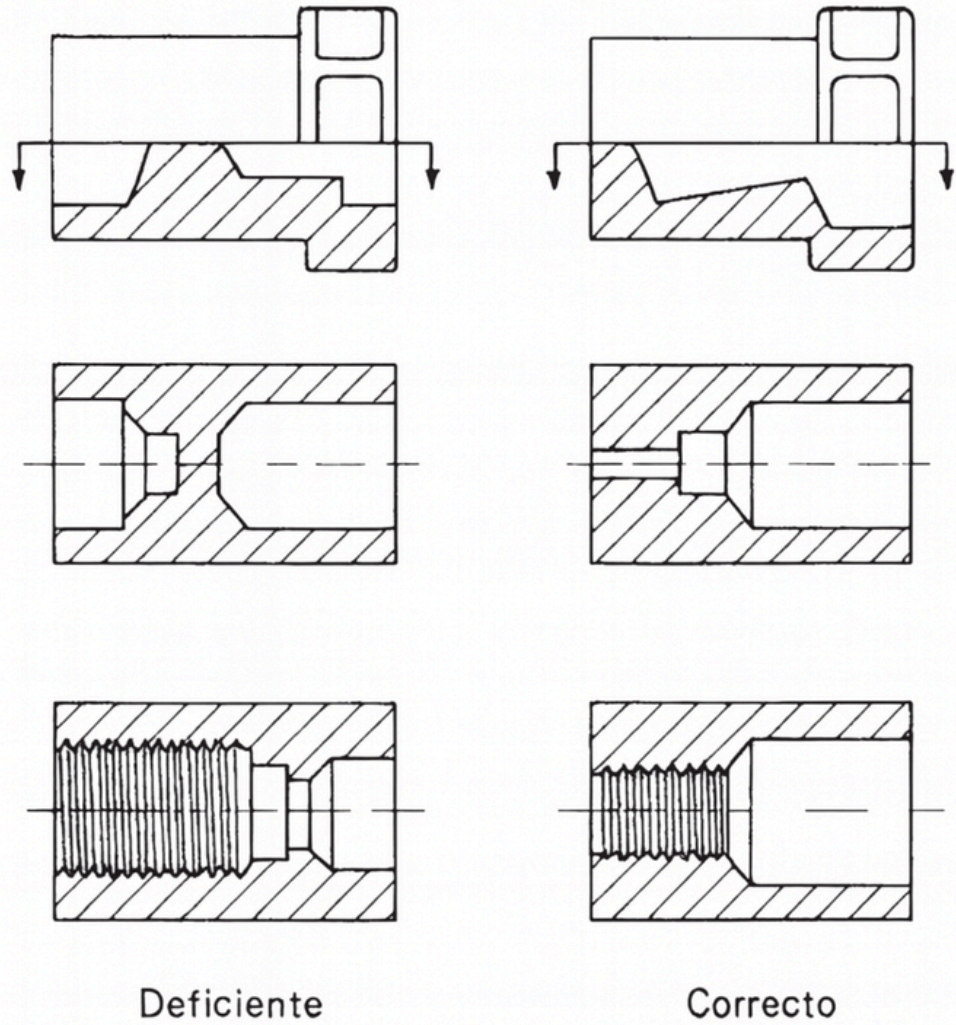


Figura 9.12

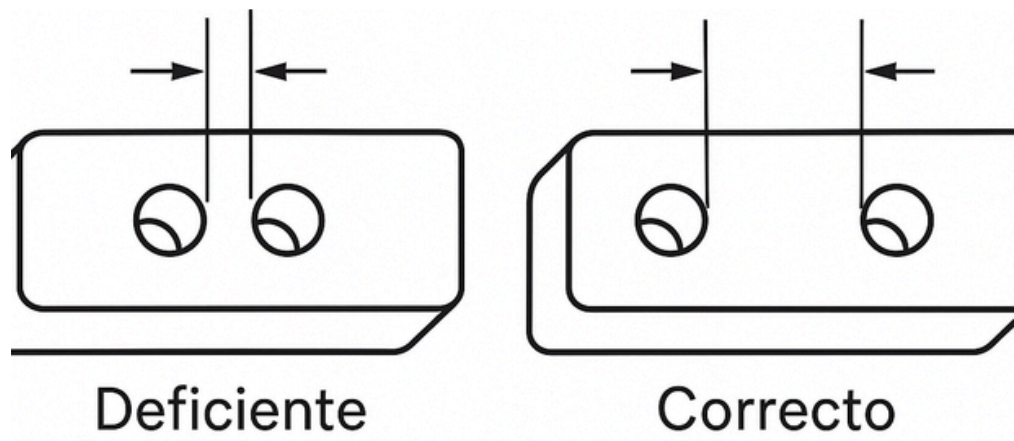


Figura 9.13

### 9.4.2 Diseño para ensamble

En la investigación de diseño para ensamble (DfA) por sus siglas en inglés, Boothroyd y Dewhurst fueron pioneros. Se basaron en la premisa de que un ensamble optimizado se reflejaría en un ensamble de producto más rápido y, por lo tanto, en costos de producción menores (Boothroyd et al., 2010). En esta sección se describe la aplicación del método de Boothroyd y Dewhurst en DfA debido a lo conocido y utilizado que es su método.

En su obra se plantean diferentes estrategias para diseñar un ensamble optimizado en cuatro clasificaciones distintas: diseño de ensamble manual, diseño para ensamble de conexiones eléctricas y cableado, diseño para líneas de ensamble de alta velocidad, automatizados; y diseño para ensamble y manufactura de circuitos impresos. En este capítulo se profundiza en la aplicación del método de DfA para ensamble manual.

Debe quedar claro que existen otros métodos para realizar DfA (Kuo et al., 2001) como el propuesto por Warnecke y Bäbler llamado *Design for Assembly - Part of the Design Process*, el propuesto por Poli y Knight en su obra *Design for forging handbook* o el propuesto por Myers, W. L., Dixon, J. R., y Simmons, M. K. en su obra *Computer analysis of mechanical assembly from a CAD data base: manual handling times*; este último deja ver la importancia del método de Boothroyd al retomarlo y aplicarlo a un algoritmo que calcula el tiempo de manejo manual de varios componentes, utilizando la teoría y los datos de Boothroyd (Kuo et al., 2001).

#### Diseño para ensamble manual

El método se basa en modificar las características geométricas de cada pieza, así como el tiempo de conexión entre estas al modificar su simetría y así disminuir el tiempo de sujeción de la pieza y la ubicación de la pieza en el ensamble; además, permite seleccionar componentes que se pueden unir a otro componente de forma que el número de piezas en el ensamble se vea disminuido.

A continuación, se enlistan una serie de recomendaciones que Boothroyd et al., (2010) propone en su obra para mejorar el ensamble de un diseño mecánico que será ensamblado de forma manual. Para mejorar el ensamble manual según el método de Boothroyd, deben trabajarse tres aspectos del diseño: tiempo de manejo de componente (TH), tiempo de inserción y ajuste de componente (TIF), y la eliminación de componentes innecesarios.



## Guía para mejorar el desempeño del ensamble en los valores TH y TIF

El TH hace referencia al tiempo en segundos que le toma a una persona en una línea de ensamble sujetar el componente en la posición adecuada para ser insertado en la posición correcta del ensamble, mientras que TIF hace referencia al tiempo que le toma a una persona en una línea de ensamble colocar el componente en la posición correcta en el ensamble hasta que este quede sujeto.

Las recomendaciones para mejorar el TH se resumen en los siguientes puntos:

1. Diseñar componentes para que tengan simetría de extremo a extremo y simetría rotacional sobre su eje de inserción. Diseñar siempre las piezas para que estas tengan la máxima simetría posible (figura 9.14a).

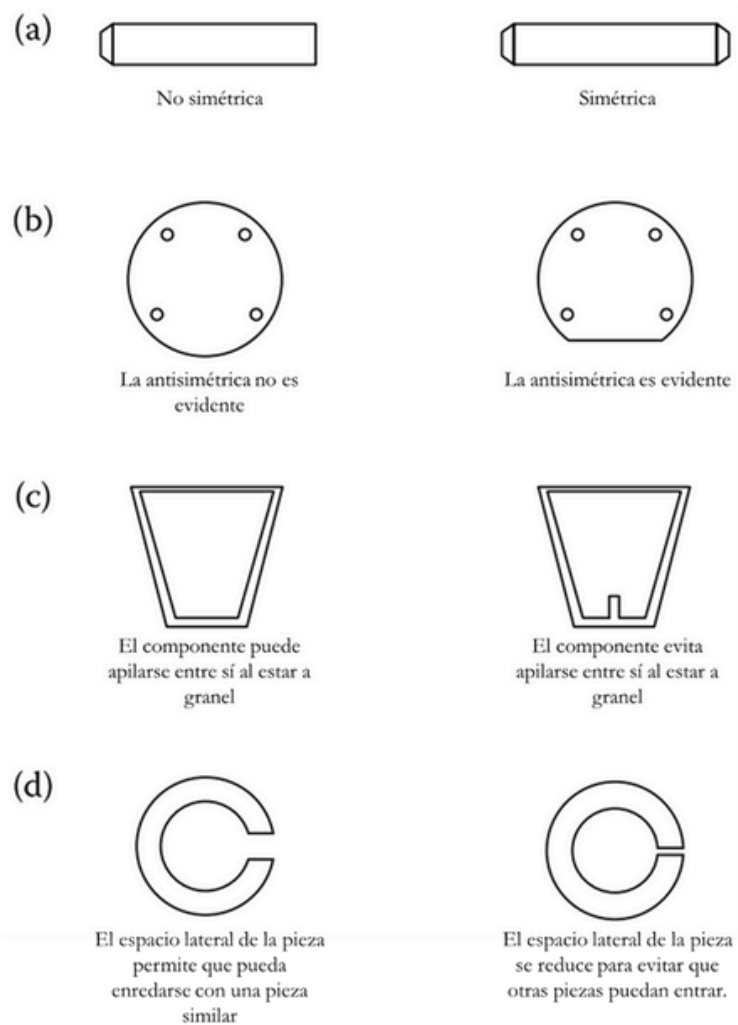


Figura 9.14 Características geométricas que afectan el TH. Imagen modificada de la obra de Boothroyd et al.(2010).

2. Los componentes que, por su función, no puedan ser diseñados de manera simétrica deben diseñarse para que sean evidentemente simétricos (figura 9.14b).

3. Los componentes deben tener características que eviten que se atasquen o se apilen entre ellos cuando estén dispuestos a granel (figura 9.14c).

4. Evitar el diseño de componentes que se enreden al estar almacenados a granel (figura 9.14d).

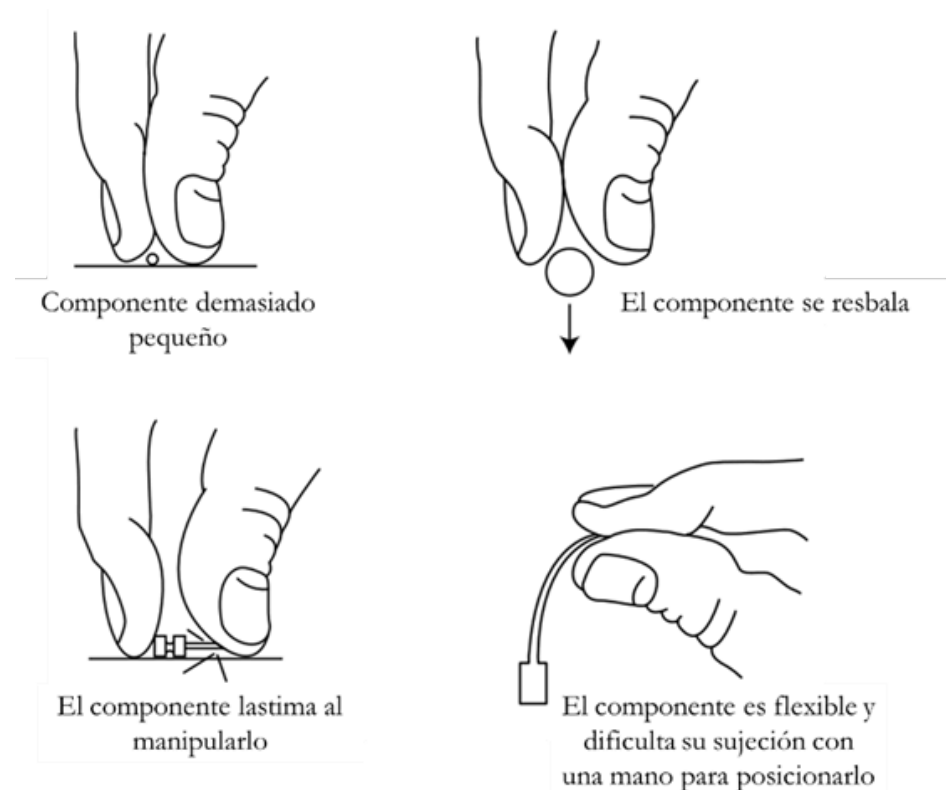
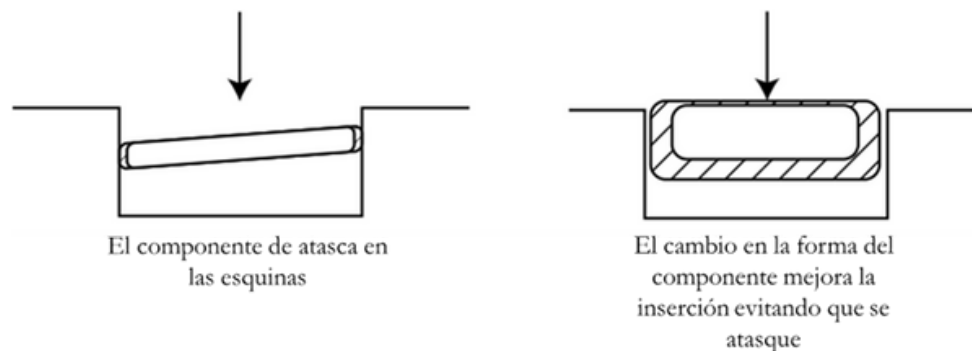


Figura 9.15 Otras características que afectan el TH. Imagen modificada de la obra de Boothroyd et al. (2010).

7. Evitar el diseño de piezas que se peguen entre sí o sean resbaladizas, delicadas, flexibles, muy pequeñas (difíciles de sostener entre los dedos o que requieran el uso de instrumentos como pinzas) o muy grandes (que requieran el uso de ambas manos para su manipulación) o que sean peligrosas para el manipulador (que deba sujetarlas con cuidado para no herirse) como piezas afiladas o que puedan astillar (figura 9.15).

Las recomendaciones para mejorar el TIF se resumen en los siguientes puntos:

1. Diseñar las piezas de tal forma que presenten poca o ninguna resistencia a la inserción y proveerlas de chaflanes para guiar la inserción de dos componentes que se acoplan entre sí. Se debe proveer del suficiente espacio libre, pero evitar que este espacio permita que la pieza se mueva o termine en una posición inadecuada durante la inserción.
2. Estandarizar mediante el uso de piezas, procesos y métodos comunes en todos los modelos e incluso en todas las líneas de productos, para permitir el uso de procesos de mayor volumen que normalmente dan como resultado un menor costo del producto.



**Figura 9.16** La forma incorrecta del componente produce atascos en su inserción. Imagen modificada de la obra de Boothroyd et al. (2010).

3. Utilizar un ensamble piramidal: Se debe prever un ensamblaje progresivo alrededor de un eje de referencia. En general, es mejor ensamblar desde arriba.
4. Evitar, cuando sea posible, la necesidad de sujetar las piezas para mantener su orientación durante la manipulación del subconjunto o durante la colocación de otra. Si es necesario mantenerlo presionado, intentar diseñar de modo que la pieza quede asegurada lo antes posible después de haberla insertado.
5. Diseñar el componente de forma que se localice antes de que sea soldado. Una posible fuente de problemas surge cuando se coloca una pieza donde, debido a restricciones de diseño, debe soltarse antes de que se ubique correctamente en el ensamblaje. Con estas circunstancias, se confía en que la trayectoria de la pieza sea lo suficientemente repetible para ubicarla consistentemente.

6. Cuando se utilizan sujetadores mecánicos comunes, la siguiente secuencia indica el costo relativo de los diferentes procesos de sujeción, enumerados en orden creciente del costo y tiempo del ensamblaje manual: (a) ajuste a presión, (b) ajuste por deformación, (c) remachado, (d) fijación con tornillos.

7. Evitar la necesidad de repositonar el conjunto parcialmente completado en el accesorio.

### Guía de eliminación de componentes en un ensamble

Las recomendaciones presentadas se deben aplicar cuando el ensamble se realizará de manera manual. Existen otros factores además del TH y el TIF que producen un DfA poco óptimo. Por ejemplo, debe también analizarse la función de cada componente de tal forma que pueda determinarse si la pieza puede ser eliminada del ensamble; esto quiere decir que la función que realiza no requiere que sea un componente individual y puede unirse con otros componentes. Cada componente debe ser evaluado con los siguientes tres criterios:

1. Durante el modo normal de operación del producto ensamblado, el componente se mueve de forma relativa al resto de los componentes en el ensamble. No aplica si el movimiento que realiza es tan pequeño que puede realizarse haciendo que el material del componente pueda cambiarse para que sea suficientemente flexible e imite el movimiento requerido.

2. El componente debe ser de un material diferente o debe estar aislado del resto de los componentes debido a que requiera aislamiento eléctrico, suprimir vibraciones, etc.

3. El componente debe estar separado de todas las demás piezas ensambladas; de lo contrario, se impediría el montaje de piezas que cumplan con uno de los criterios anteriores (por ejemplo, una tapa de algún contenedor).

Los componentes que no cumplan con alguno de los tres criterios no requieren ser un componente en sí mismo, puede unirse a otro componente. Es importante considerar que al eliminar un componente, se debe asegurar que la función que este realiza siga estando presente.

## Resultado de la aplicación de las guías para DFA manual

El siguiente ejemplo de mejora en el DfA manual de un producto se puede consultar de forma completa y detallada en la obra de Boothroyd et al. (2010, 104-110). La figura 9.17 muestra el diseño inicial de una caja de control antes de que se aplique el método de DfA manual.

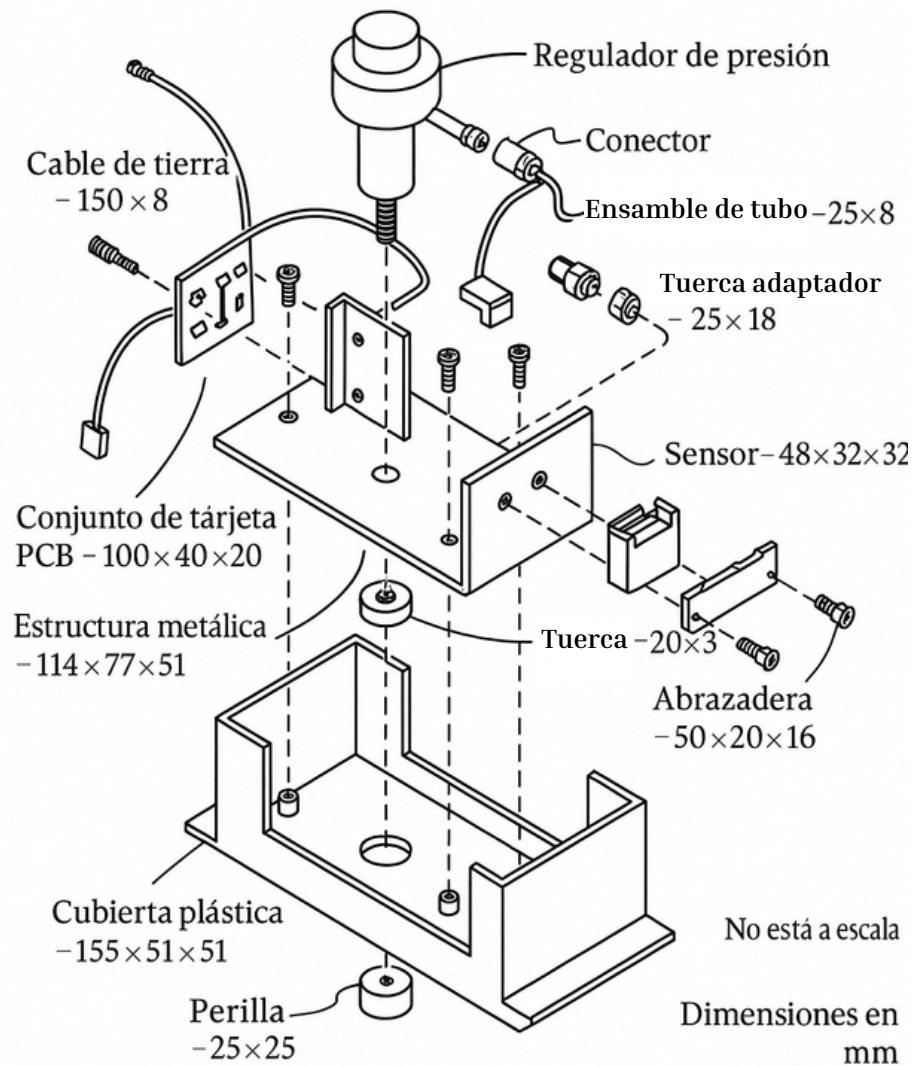


Figura 9.17 Ensamble de una caja de control antes de aplicar DFA manual

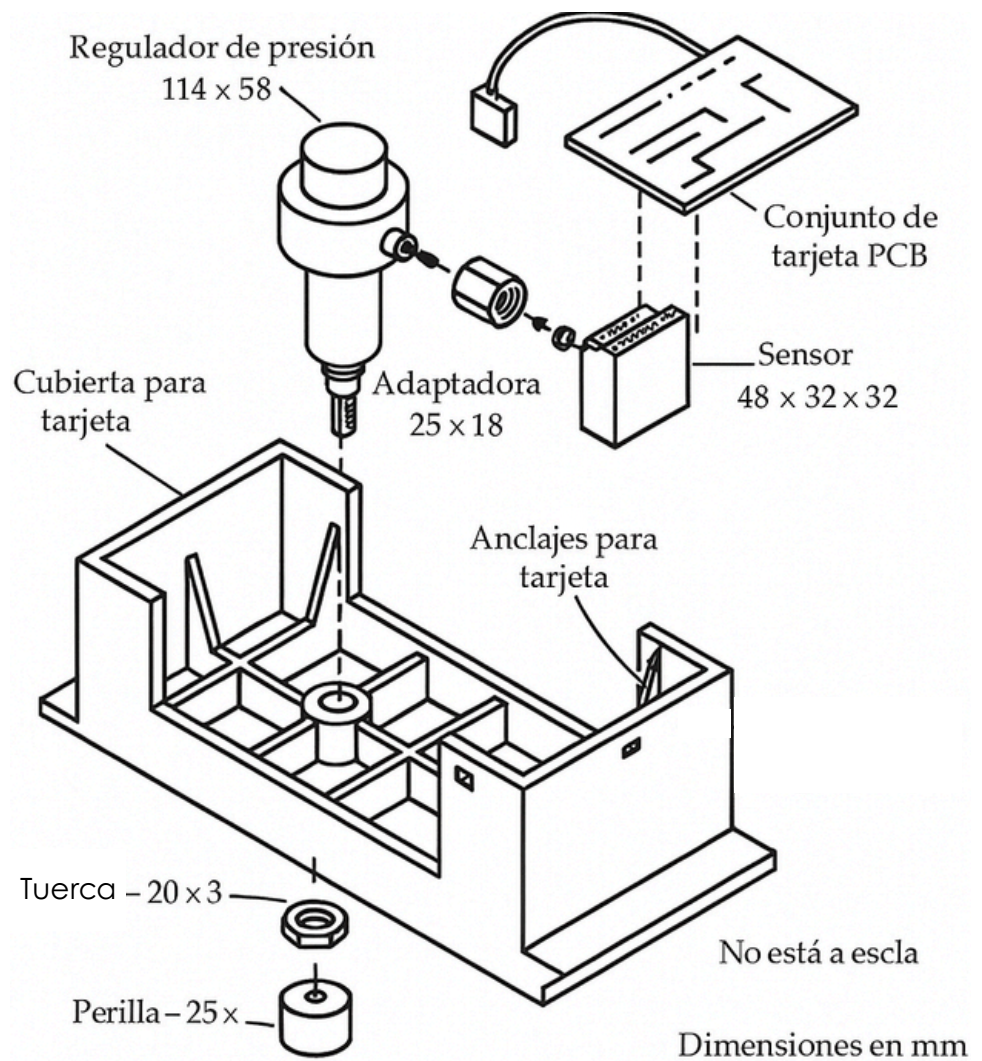


Figura 9.18 Ensamble de una caja de control después de aplicar DFA manual

En el diseño original de la figura 9.17 se cuenta con un total de 21 componentes, con los cuales se calcula un tiempo de ensamble (suma de TH más TIF de 227.43 segundos). Al aplicar los puntos de la guía de eliminación de componentes, se eliminaron 14 componentes quedando siete componentes. A estos siete componentes finales se aplicaron los puntos de guía para mejorar el desempeño del ensamble en los valores TH y TIF, con lo cual se obtuvo el diseño mostrado en la figura 9.18, el cual tiene un tiempo de ensamble de 83.98 segundos, lo que implica una reducción de 137.45 segundos en el tiempo de ensamble.

El ejemplo permite observar las mejoras en el ensamble al aplicar un método de DfA para ensamble manual. La forma en la que se calcula los tiempos TH y TIF no se especifica; sin embargo, en la obra completa de Boothroyd se puede consultar el método de cálculo. Aplicar las guías descritas en este capítulo ayuda a obtener un mejor ensamble en términos de un menor tiempo de ensamble.

#### 9.4.2 Diseño para ambiente

Sostenibilidad es un concepto acuñado en 1987 que se define como "satisfacer las necesidades de las generaciones presentes sin comprometer las necesidades de las generaciones futuras" (Aguayo González et al., n.d.). Tiene tres aspectos característicos: ecológico, económico y social.

Ecológico: implica el uso de los recursos naturales, tanto renovables como no renovables, de forma que su consumo se realice de forma responsable.

Económico: implica que el producto o proceso tenga viabilidad económica, una buena gestión de los recursos y una planeación de los mismos, así como una gestión de la calidad constante,

Social: busca el bienestar humano y mejorar la calidad de vida de la gente, sin destruir la base biosférica y los sistemas vitales de los que dependen las sociedades (Aguayo González et al.), así como su patrimonio cultural.

Para realizar un diseño sostenible de un servicio o de un producto, estos tres aspectos deben medirse si el producto o servicio ya está diseñado, y mejorarse, tanto si el producto o servicio existe o es nuevo. La medición de estos tres aspectos se conoce como evaluación de la sostenibilidad (LCSA por sus siglas en inglés).

$$LCSA = LCA + LCC + SLCA(1)$$

Como se indica con la ecuación (1), el LCSA comprende tres análisis individuales: análisis de ciclo de vida (LCA por sus siglas en inglés), el cual mide los impactos medioambientales; costos del ciclo de vida (LCC por sus siglas en inglés) y evaluación del ciclo de vida social (SLCA por sus siglas en inglés).

### 9.4.3 LCA: evaluación del ciclo de vida del producto

La norma ISO 14040 indica que la evaluación del ciclo de vida (LCA por sus siglas en inglés) estudia los aspectos medioambientales y los impactos potenciales a lo largo de la vida de un producto (es decir, de la cuna a la tumba), desde la adquisición de la materia prima hasta la producción, el uso y la eliminación. Las categorías generales de impacto ambiental que deben tenerse en cuenta incluyen el uso de recursos, la salud humana y las consecuencias ecológicas (Klöpffer y Grahl, 2012, p. 1). Las principales aplicaciones del LCA son en el diseño y mejora de productos en cuanto a su desempeño ecológico, planeación de estrategia de productos, creación de políticas públicas y marketing.

Las secciones que deben componer un LCA, según la norma ISO 14040, son cuatro:

- Definición de objetivo y alcance
- Análisis de inventario
- Evaluación del impacto
- Interpretación

En la figura 9.19 se describen con mayor detalle las secciones del LCA. Se debe recordar que los pasos de análisis, como una metodología de diseño, son un proceso iterativo.

### 9.4.4 Metodología para diseño para ambiente (DfE)

Existen diferentes formas de llevar a cabo un método para realizar diseño para ambiente, dependiendo del contexto del proyecto para el que se esté mejorando. A continuación, se presenta una serie de pasos generales que se pueden seguir para mejorar un diseño en cuanto a su desempeño ambiental.

1. Definir el alcance y los objetivos: definir claramente el alcance del proyecto y los objetivos de la evaluación DfE. Esto incluye identificar el producto o sistema que se va a diseñar, el impacto medioambiental que se va a abordar y los objetivos para reducir ese impacto.

2. Recopilar datos y realizar un análisis del ciclo de vida: Recopilar datos sobre el producto o sistema a lo largo de todo su ciclo de vida, incluida la extracción de materias primas, la fabricación, la distribución, el uso y la eliminación o el reciclado al final de la vida útil. Utilizar estos datos para realizar un LCA y cuantificar el impacto ambiental.

3. Lluvia de ideas y evaluación de alternativas de diseño: se deben pensar y evaluar alternativas de diseño que reduzcan el impacto medioambiental identificado en el LCA. Esto puede incluir la selección de materiales respetuosos con el medio ambiente, la reducción del consumo de energía, la minimización de residuos y la mejora de las opciones de eliminación o reciclaje del producto al final de su vida útil. 199



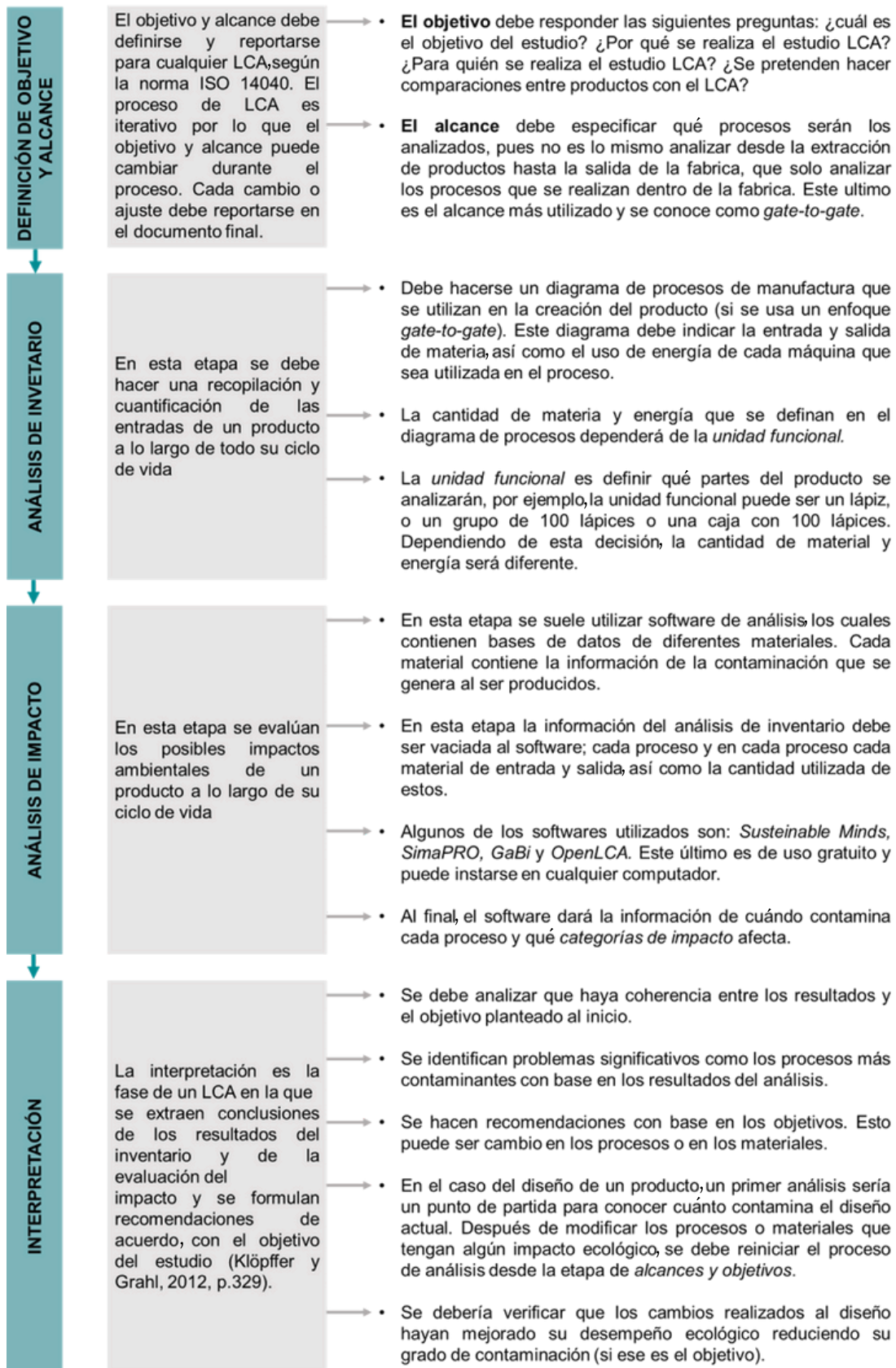


Figura 9.19 Descripción de las etapas de análisis de un LCA

4. Realizar un análisis de compensación: comparar el impacto medioambiental de cada alternativa de diseño mediante un análisis de compensación. Se debe tener en cuenta no solo el impacto ambiental, sino también el rendimiento del producto, costos y otros factores relevantes.

5. Optimizar el diseño: utilizar los resultados del análisis de compensación para optimizar el diseño, seleccionando la opción más respetuosa con el medio ambiente que cumpla los objetivos del proyecto.

6. Validación del diseño: Validar el diseño optimizado mediante simulaciones, prototipos y pruebas para garantizar que cumple los requisitos de rendimiento del producto y los objetivos medioambientales.

7. Supervisar y mejorar el diseño: supervisar continuamente el impacto medioambiental del producto o sistema e identificar oportunidades de mejora. Esto puede implicar una mayor optimización del diseño, la mejora de los procesos de fabricación, la identificación de nuevas opciones de reciclaje o eliminación al final de la vida útil.

## Amplía tus conocimientos

A continuación, se presentan las fuentes utilizadas en este capítulo, así como otras referencias que te permitirán reforzar y ampliar tus conocimientos sobre diseño y manufactura.

## Referencias

### Libros

- Boothroyd, G., Dewhurst, P. y Knight, W. A. (2010). *Product Design for Manufacture and Assembly* (3.ª ed.). New York, Estados Unidos: CRC Press.
- Bralla, J. G. (1999). *Design for manufacturability Handbook* (2.ª ed.). New York, Estados Unidos: McGraw-Hill Handbooks.
- Dieter, E. G. y Schmidt, L. C. (2009). *Engineering Design* (4.ª ed.). New York, Estados Unidos: McGraw-Hill Higher Education.
- González, F. A., Álvarez, M. E. P., Ruiz, J. R. L. y Sánchez, V. M. S. (2013). *Ecodiseño: ingeniería sostenible de la cuna a la cuna (C2C)*. Madrid, España: Alfaomega.
- González, L. (2017). *Casos de ingeniería de diseño*. CDMX, México: Universidad Nacional Autónoma de México.
- Klöpffer, W. y Grahl, B. (2014). *Life cycle assessment (LCA): a guide to best practice*. Weinheim, Alemania: Wiley-VCH.
- Riverdale, & IDEO. (2011). *Design Thinking for Educators*. April. <https://designthinking.ideo.com/resources/design-thinking-for-educators>
- Ulrich, K. T. y Eppinger, S. D. (2013). *Diseño y desarrollo de productos* (3.ª ed.). CDMX, México: MacGraw Hill Education.

### Artículos

- Finger, S. y Dixon, J. R. (1989). A review of research in mechanical engineering design. Part I: Descriptive, prescriptive, and computer-based models of design processes. *Research In Engineering Design*, 1(1), 51-67. <https://doi.org/10.1007/bf01580003>
- Finger, S. y Dixon, J. R. (1989b). A review of research in mechanical engineering design. Part II: Representations, analysis, and design for the life cycle. *Research In Engineering Design*, 1(2), 121-137. <https://doi.org/10.1007/bf01580205>
- Kannapan, S. M. y Marshek, K. M. (1996). A Comparative Analysis of Techniques in Engineering Design. En Springer eBooks (pp. 209-236). [https://doi.org/10.1007/978-1-4757-2561-2\\_10](https://doi.org/10.1007/978-1-4757-2561-2_10)
- Kilian Gericke, L. B. (2011). Comparisons of design methodologies and process across disciplines: a literature review. *International conference on engineering design*, 15-18.

📄 Kuo, T., Huang, S. H. y Zhang, H. (2001). Design for manufacture and design for 'X': concepts, applications, and perspectives. *Computers & Industrial Engineering*, 41(3), 241-260. [https://doi.org/10.1016/s0360-8352\(01\)00045-6](https://doi.org/10.1016/s0360-8352(01)00045-6)

📄 Pahl, G., Beitz, W., Feldhusen, J. y Grote, K. H. (2007). Engineering Design: a systematic Approach. *En Constructing the Future: nD Modelling* (3.ª ed.). Springer.

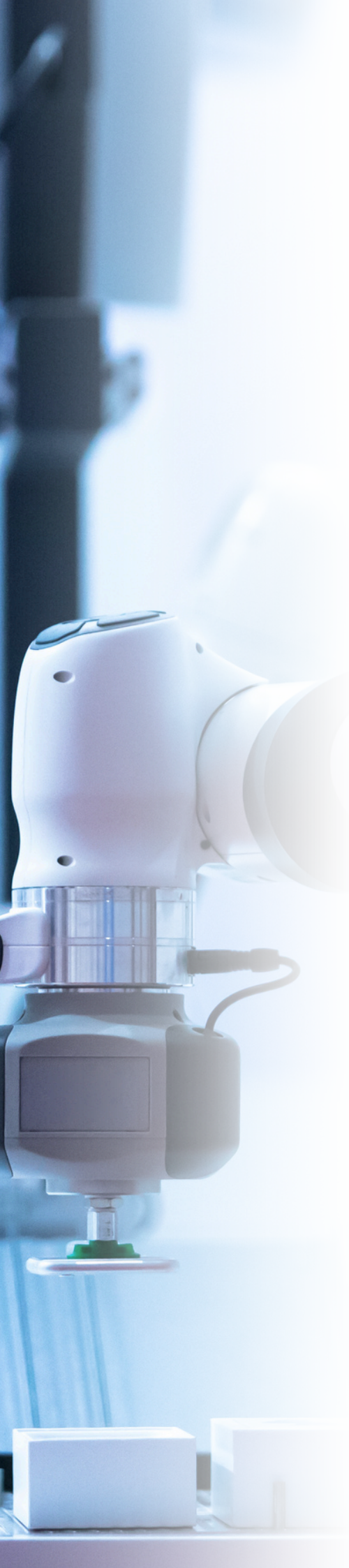
📄 Tomiyama, T. (2006). A classification of design theories and methodologies. *ASME 2006 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference*, 3, 1-9. <https://doi.org/10.1115/DETC2006-99444>

## CRÉDITOS POR FIGURAS Y TABLAS ADAPTADAS

Muchas figuras y tablas del capítulo fueron adaptadas desde trabajos previamente publicados. Los derechos de autor para dichos trabajos se encuentran anotados a continuación en orden de aparición en el capítulo. Los autores del libro crearon el resto de las figuras y tablas que se encuentran en la publicación.

Figura 5. Adaptada de Bralla, J. G. (1989). Design for manufacturability Handbook. In アジア経済 (2nd ed.). McGraw-Hill Handbooks.

Figura 6. Adaptada de Bralla, J. G. (1989). Design for manufacturability Handbook. In アジア経済 (2nd ed.). McGraw-Hill Handbooks.



Capítulo 10

# Mecatrónica y robótica



La robótica y la mecatrónica representan la convergencia de diversas disciplinas de la ingeniería, como la mecánica, la electrónica, la informática y el control automático.

La robótica ha dejado de ser exclusiva de las grandes industrias y ha encontrado aplicaciones en el hogar, la medicina, la agricultura, la exploración espacial y la educación. Por su parte, la mecatrónica se ha vuelto la base para diseñar sistemas modernos como drones, impresoras 3D, autos autónomos y dispositivos portátiles inteligentes.

Este capítulo se enfoca en brindar una introducción clara y accesible a los principios que rigen estos sistemas.

## 10.1 Mecatrónica: definición y breve historia



Figura 10.1 Vista posterior de un reloj inteligente, donde se puede apreciar la luz verde que activa el sensor ECG, el cual es usual encontrar en este tipo de dispositivos, para monitorear el ritmo cardíaco del usuario.

Imagina un reloj inteligente y las funciones que realiza: mide tu ritmo cardíaco a través de un sensor (la luz parpadeante detrás de él, véase la figura 10.1), lo cual requiere un diseño electrónico; tiene correas ajustables fabricadas con materiales duraderos y adecuados para el contacto constante con la piel, lo que forma parte del estudio de la mecánica; analiza los datos obtenidos por el sensor, lo que exige la programación de una computadora que los procese; y ejecuta diferentes acciones con base en esos datos, por ejemplo, avisarte que te pongas de pie porque has estado mucho tiempo sentado, lo cual requiere un sistema de control para que el reloj “sepa” cuándo notificarte.

El reloj inteligente requirió conocimientos de electrónica, mecánica, programación y control para poder ser diseñado; eso lo convierte en un sistema **mecatrónico**.

La **mecatrónica** es una disciplina integradora que combina conocimientos de ingeniería mecánica, electrónica, control automático e informática para diseñar, desarrollar y optimizar sistemas y procesos automatizados (véase la figura 10.6).

Para que un sistema pueda ser considerado mecatrónico, debe incluir en su diseño las cuatro áreas de la ingeniería anteriormente mencionadas. Así que no todo sistema que tenga electrónica o use un programa de computadora o algún mecanismo es un sistema mecatrónico. Por ejemplo, una licuadora, como la mostrada en las figuras 10.2 y 10.3, tiene electrónica para activar y desactivar el motor, el cual tiene elementos mecánicos como rodamientos y sistemas de engranes (véase el capítulo 7), pero no tiene realmente un sistema de control.

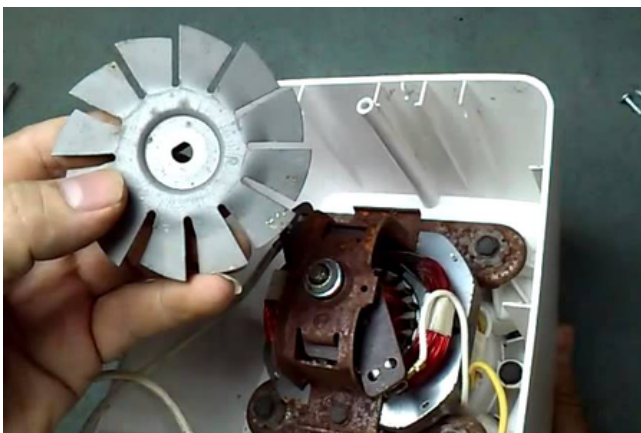


Figura 10.2 Interior de una licuadora. Se pueden apreciar partes eléctricas como el motor, los botones y cables, al mismo tiempo que tiene piezas mecánicas como las aspas o la hélice, además de elementos de unión como tornillos y rodamientos para permitir el giro del motor.

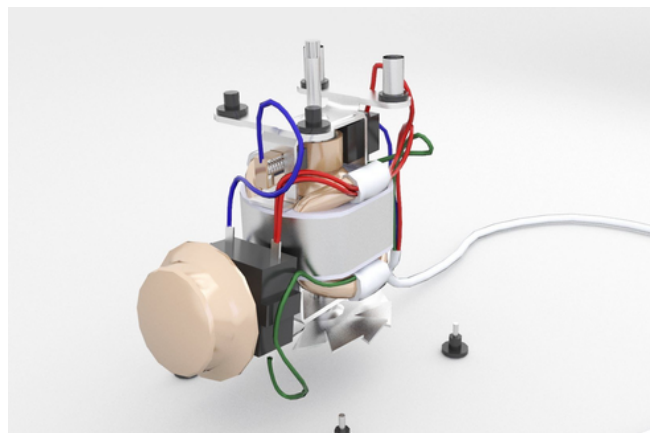


Figura 10.3 Dibujo por computadora de los componentes ensamblados de una licuadora. Se aprecia de mejor forma cómo es el ensamblaje y cómo son los componentes eléctricos y mecánicos.



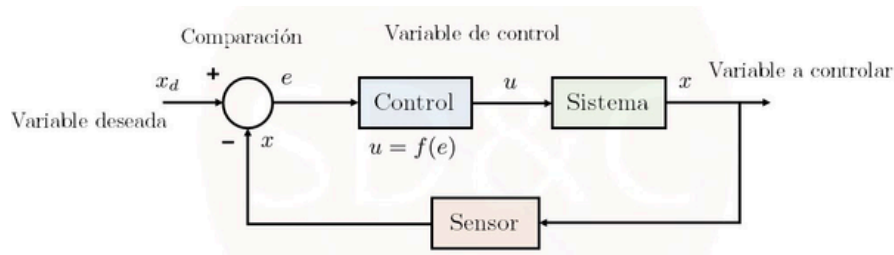


Figura 10.4 Esquema de un sistema de control de lazo cerrado. La salida se retroalimenta hacia la entrada para hacer correcciones.

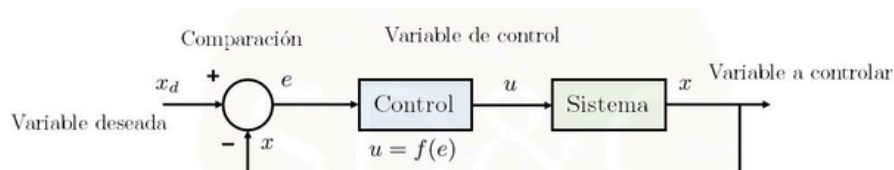


Figura 10.5 Esquema de un sistema de control de lazo abierto. En un sistema de este tipo, la salida se modifica solo dependiendo de la entrada, no del valor de la salida, pues no hay retroalimentación.

El control automatizado (como se ve en el capítulo 8) no solo es que el sistema reaccione ante una entrada, sino que tome información de su salida para retroalimentarse (tomar esa información de salida también como entrada) y corregir o cambiar la salida de ser necesario. En la figura 10.4 se observa el esquema de un sistema con control y retroalimentación a través de un sensor.

Un sistema como la licuadora tiene un control, pero sin retroalimentación (como el de la figura 10.5). La entrada son los botones o perilla de activación y el sistema solo reacciona de acuerdo con lo que solicite en la entrada, sin requerir ningún tipo de retroalimentación de la salida (la velocidad de giro del motor, que a su vez hace girar las aspas) para realizar correcciones. Este tipo de “control” se suele llamar de lazo abierto.

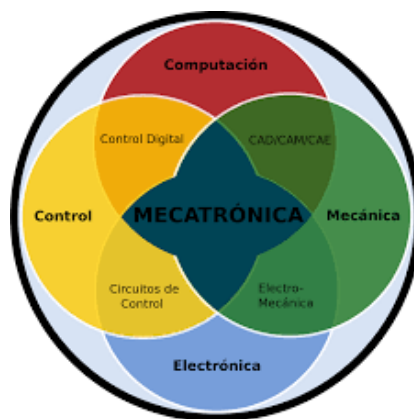
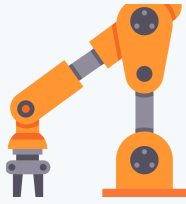


Figura 10.6 Esquema que muestra cómo la sinergia entre la ingeniería en computación, control, mecánica y electrónica da origen a la mecatrónica.

## Actividad 10.1

### Identificar sistemas mecatrónicos en la vida cotidiana



#### Objetivo del proyecto

Analizar sistemas con los que se encuentran en contacto en la vida cotidiana para identificar cuáles sistemas pueden ser considerados sistemas mecatrónicos.

#### Instrucciones

1. Identifica sistemas que encuentres en tu vida cotidiana que creas puedan ser mecatrónicos; suelen ser sistemas que tienen partes eléctricas o electrónicas y mecánicas (por ejemplo, una televisión).
2. Para determinar si es mecatrónico, identifica la o las salidas del sistema (en el caso de la televisión, la imagen y el sonido).
3. Una vez que se identifiquen las salidas, analiza si el sistema cambia o altera esa salida dependiendo de cómo cambia la salida misma.
4. Además, determina si también utiliza la informática, es decir, si hace uso de un programa computacional.
5. Concluye si el sistema es mecatrónico dependiendo de si tiene partes mecánicas (los materiales, piezas que se mueven, etc.), eléctricas o electrónicas (circuitos, cableado, etc.), informática y control automático de lazo cerrado. Si tiene las cuatro partes, será un sistema mecatrónico.

#### 10.1.1 Breve historia de la mecatrónica

La mecatrónica, como disciplina integradora de la mecánica, la electrónica, la informática y el control automático, tiene sus raíces en la segunda mitad del siglo XX, aunque sus fundamentos se remontan a avances tecnológicos previos.

#### Orígenes y desarrollo inicial (décadas de 1940-1960)

Los primeros pasos hacia la mecatrónica pueden asociarse con la automatización industrial y la cibernética. Durante la Segunda Guerra Mundial y en la posguerra, sistemas como servomecanismos (véanse las figuras 10.7 y 10.8), y controles hidráulicos sentaron las bases para la integración de componentes mecánicos y eléctricos. La invención del transistor (1947) y los primeros computadores digitales permitieron avances en control de procesos, mientras que la robótica industrial comenzó a emerger en la década de 1960 con los primeros robots programables, como el Unimate de General Motors (1961).

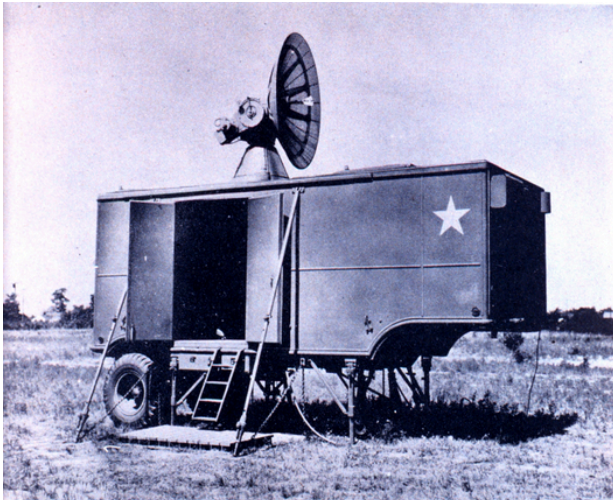


Figura 10.7 Se muestra una fotografía del radar SCD-548 desarrollado por el Laboratorio de Radiación del MIT (Instituto Tecnológico de Massachusetts, por sus siglas en inglés) durante la Segunda Guerra Mundial. Este sistema usaba servomotores para seguir blancos automáticamente.

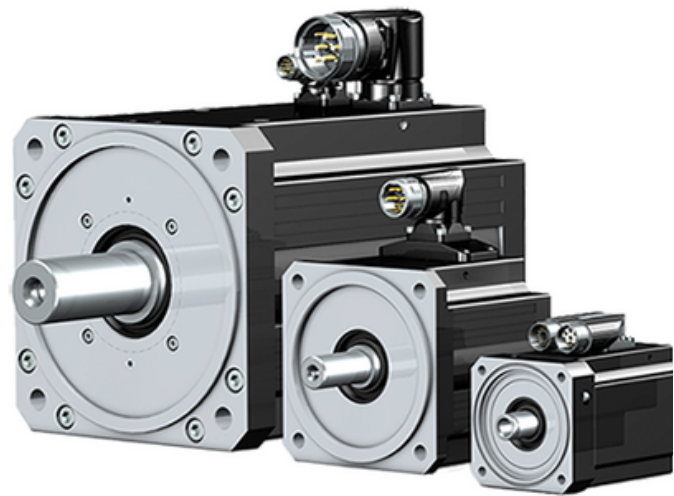


Figura 10.8 Fotografía de servomotores pequeños. Los servomotores se consideran parte de un sistema de bucle cerrado que incluye un sistema de control; es un dispositivo que produce movimiento en respuesta a una orden y regula la dirección y la velocidad del movimiento producido en respuesta a la retroalimentación.

### Consolidación de la disciplina (décadas de 1970-1980)

El término mecatrónica fue acuñado en 1969 por el ingeniero japonés Tetsuro Mori, trabajador de la empresa Yaskawa Electric, para describir la sinergia entre sistemas mecánicos y electrónicos. En las décadas siguientes, la miniaturización de componentes electrónicos, el desarrollo de microprocesadores y la expansión de sistemas de control en tiempo real permitieron aplicaciones más sofisticadas, como cámaras automáticas, vehículos con sistemas antibloqueo (ABS) y brazos robóticos de precisión.

### Expansión y madurez (décadas de 1990-presente)

Con el auge de la inteligencia artificial, los sensores avanzados y la nanotecnología, la mecatrónica se extendió a campos como la ingeniería biomédica (prótesis robóticas), la aeronáutica (drones) y la Industria 4.0 (fábricas inteligentes). La inclusión de tecnologías como IoT (Internet de las Cosas) y Machine Learning ha redefinido el alcance de la mecatrónica, consolidándola como pilar de la ingeniería moderna.

Hoy, la mecatrónica sigue evolucionando, impulsando innovaciones en robótica colaborativa, vehículos autónomos y sistemas ciberfísicos, demostrando que su esencia interdisciplinaria es clave para el futuro tecnológico.

## 10.2 Los cuatro pilares de la mecatrónica

Piensa en un dron: sus hélices (mecánica), su batería y sensores (electrónica), el algoritmo que evita choques (control), y el código que lo guía (computación) son inseparables. La mecatrónica es como un equipo de fútbol: cada jugador tiene un rol, pero ganan solo si trabajan juntos.

A continuación, se detallan y explican en mayor profundidad cómo los pilares de la mecánica, la electrónica, la computación y el control trabajan para integrar sistemas mecatrónicos.



### Conoce más.

En este video de Centro 3D (2024), se muestran los componentes mecánicos básicos de una impresora 3D, así como el funcionamiento que cumplen dentro del sistema.

### 10.2.1 Mecánica: los huesos, músculos y articulaciones del sistema mecatrónico

La mecánica en mecatrónica es el diseño y construcción de las partes físicas que permiten a un sistema moverse, sostener fuerzas e interactuar con el mundo real. Son los elementos que puedes tocar, doblar o escuchar cuando el sistema funciona: engranajes girando, rodamientos, sujetadores o los cuerpos que contienen el resto de los componentes.

Por ejemplo, veamos cómo se integran las *máquinas de manufactura aditiva*, popularmente llamadas *impresoras 3D*. La parte mecánica del sistema estaría compuesta por perfiles que sostienen otros componentes, mecanismos como tornillo sin fin (véase el capítulo 7) que permiten el movimiento de arriba a abajo, un sistema de poleas (también visto en el capítulo 7) que permite el movimiento horizontal de la cama de impresión, resortes y engranes para el sistema que empuja (estrictamente el término sería *extruye*) el filamento (material para la manufactura).

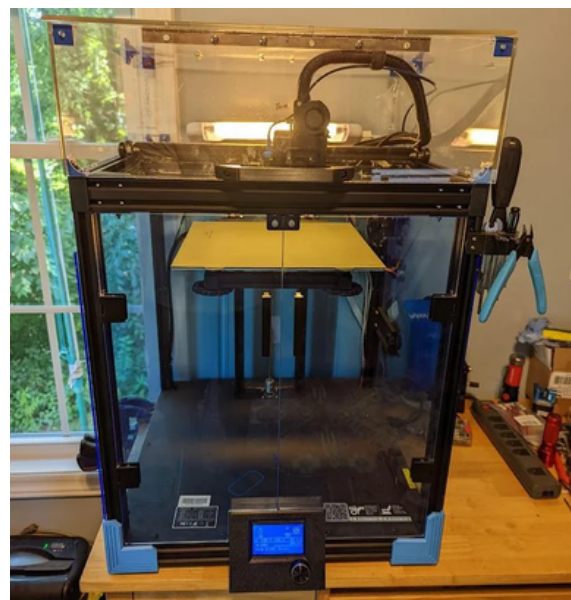


Figura 10.9 Fotografía de la impresora 3D modelo Ender 6 del fabricante Comgrow. Se pueden observar los perfiles de la estructura, las puertas para proteger a las piezas manufacturadas de los cambios de temperatura, entre otros componentes.

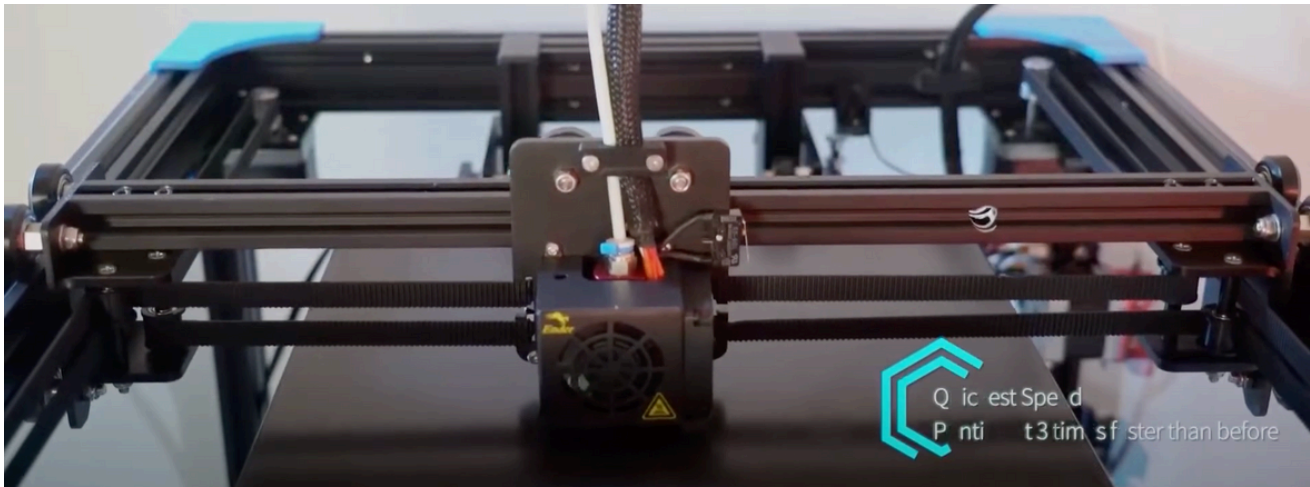


Figura 10.10 Sistema de banda dentada (véase el capítulo 7) para el movimiento del cabezal horizontal de una impresora 3D Ender 6. Un motor en la estructura lateral derecha mueve la banda donde se encuentra montado el cabezal, que es el elemento encargado de dispensar el filamento.



Figura 10.11 El ATmega2560 es un chip “todo-en-uno” que controla dispositivos electrónicos de forma autónoma (aunque hay que hacer un programa para decirle qué hacer). Es uno de los muchos microcontroladores que se pueden encontrar en el mercado.

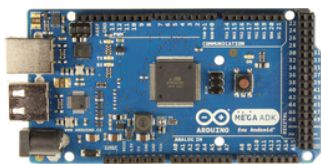


Figura 10.12 Arduino es una plataforma de hardware (la tarjeta mostrada en la imagen) y software abierto que permite programar y controlar microcontroladores (aunque solo modelos específicos como el ATmega2560).

### 10.2.2 Electrónica: sentidos y nervios

La electrónica en mecatrónica es la disciplina que diseña e implementa circuitos eléctricos y electrónicos para adquirir señales del entorno a través de sensores, procesarlas, usualmente con microcontroladores y generar respuestas físicas con actuadores, como los motores. Se basa en principios fundamentales como la ley de Ohm, el análisis de señales digitales/analógicas (véase el capítulo 5).

Los sensores son dispositivos que convierten fenómenos físicos (temperatura, luz, fuerza) en señales eléctricas. Una impresora 3D, por ejemplo, tiene un sensor de temperatura que regula el calor en la boquilla que derrite el filamento para evitar sobrecalentamiento. Existen muchos tipos de sensores (véase el capítulo 8), uno muy común es el sensor de temperatura MF52AT.

Los microcontroladores son unidades de procesamiento que ejecutan algoritmos de control. Un microcontrolador muy utilizado es el ATmega2560 (figura 10.11), utilizado con la placa de Arduino Mega (figura 10.12). En una impresora 3D, el microcontrolador manda instrucciones de movimiento a los motores, al mismo tiempo que toma lecturas de los sensores para conocer el estado de la impresora en general.

### 10.2.3 Control: el cerebro que toma decisiones en tiempo real

El control en mecatrónica es la disciplina que diseña algoritmos para regular el comportamiento dinámico de un sistema, asegurando que responda de manera estable, precisa y eficiente ante entradas variables.



Figura 10.13 Heater cartridge para impresora 3D. El microcontrolador manda una señal para activarlo, sin embargo, se requiere una etapa de potencia (ver sección 5.3) para darle la suficiente corriente para que eleve la temperatura; el microcontrolador no puede hacerlo por sí solo.

Se basa en modelos matemáticos como ecuaciones diferenciales o funciones de transferencia (vistas en el capítulo 8) y técnicas de retroalimentación (feedback) para minimizar errores.

En una impresora 3D se requiere aplicar un control, por ejemplo, para mantener una temperatura estable en la boquilla que derrite el material (figura 10.15). El sensor de temperatura convierte el valor de temperatura en un voltaje, el cual lee el microcontrolador. Después, un programa, dependiendo del voltaje (temperatura) leído, decide qué acción realizar a través de un actuador. En el caso de la boquilla, si la temperatura debe elevarse, se incrementa el voltaje en una resistencia (véase el capítulo 5) llamada *Heater Cartridge* (figura 10.13), para que aumente la temperatura del material o encender un ventilador para reducir la temperatura; en ambos casos, los actuadores se activan o no dependiendo de si el microcontrolador envía un voltaje hacia ellos.

Esta explicación es una forma muy simplificada de cómo funciona el sistema de control en conjunto con la electrónica para realizar la acción de controlar la temperatura del material.

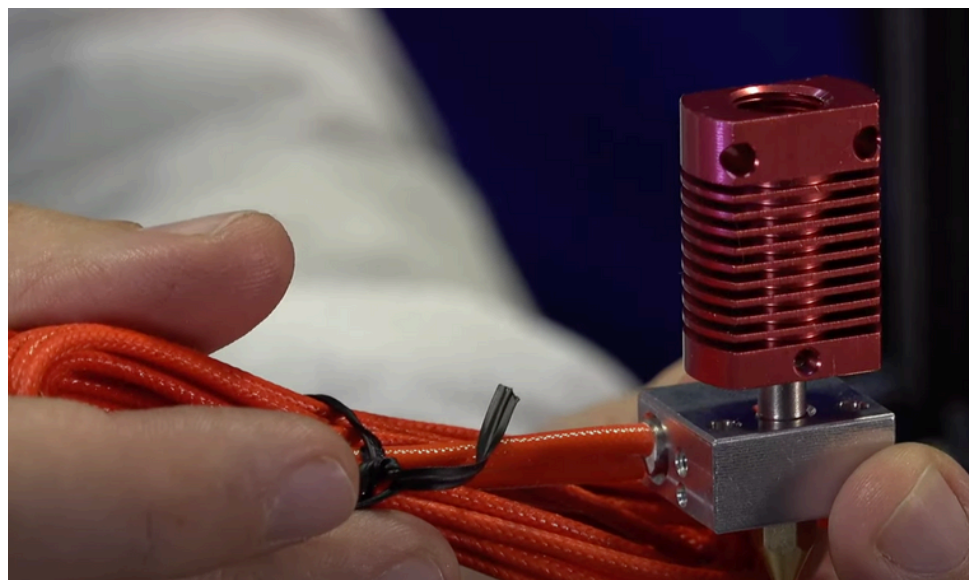


Figura 10.15 La imagen muestra el heater cartridge conectado e introducido en el bloque gris de aluminio para calentarlo. A su vez, en el bloque gris, a lado de donde se introduce el heater cartridge hay un orificio donde se mete el filamento de material.



Figura 10.14 Cartucho de PLA para impresora 3D. Dentro de la clasificación de materiales, el PLA es un tipo de polímero (véase la sección 4.1 para consultar más detalles sobre estos materiales).

Por otra parte, en el capítulo 4 se habla de las propiedades de los materiales; para conocer la temperatura adecuada, se tiene que saber qué material va a entrar a la impresora y ajustar la temperatura a sus propiedades térmicas; el sistema de control también debe saber con qué material estará trabajando la impresora. Un método común es que, desde una interfaz en una pantalla, una persona seleccione el material con el que se está trabajando, por ejemplo, PLA (figura 10.13), ABS, entre otros.

## 10.2.4 Programación: el lenguaje que da vida a la mecatrónica

En mecatrónica, la programación es el puente entre el diseño conceptual y la operación física de un sistema. Consiste en desarrollar instrucciones precisas que permitan a los microcontroladores, PLCs (Controladores Lógicos Programables, véase el capítulo 8) y computadoras embebidas interpretar señales de sensores, tomar decisiones basadas en lógica de control y ejecutar acciones a través de actuadores.

A diferencia del desarrollo de software tradicional, la programación en mecatrónica debe considerar:

- **Restricciones de hardware:** memoria limitada, velocidad de procesamiento y tiempo real.
- **Interacción con el mundo físico:** lectura de sensores ruidosos, sincronización con actuadores.
- **Confiabilidad:** un error en el código puede dañar componentes físicos (por ejemplo, sobrecalentamiento).

### Lenguajes que dan instrucciones a las máquinas

Todo sistema mecatrónico es como un chef siguiendo una receta. Sin las instrucciones correctas, por más buena que sea la máquina, no sabrá qué hacer. En mecatrónica, esos "pasos a seguir" se escriben en lenguajes especializados, cada uno con su propio propósito y nivel de detalle.

En mecatrónica, no existe un lenguaje "universal"; la elección depende de los actuadores, el nivel de control requerido y la complejidad del sistema. En la tabla 10.1 se describen los principales lenguajes de programación, sus ventajas y desventajas, así como recomendaciones de cuándo usarlos.

Lenguaje	Ventajas	Desventajas	¿Cuándo usarlo?	Ejemplo
C/C++	<ul style="list-style-type: none"><li>• Alto rendimiento y control directo de hardware.</li><li>• Ideal para tiempo real.</li><li>• Amplia compatibilidad con microcontroladores.</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Curva de aprendizaje pronunciada.</li><li>• Gestión manual de memoria (en C).</li></ul>	Control de motores, sensores y sistemas embebidos críticos.	Firmware de impresoras 3D.
Python	<ul style="list-style-type: none"><li>• Sintaxis sencilla y rápida implementación.</li><li>• Librerías para IA, visión artificial y análisis de datos.</li><li>• Gran comunidad.</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Lento para ejecución en tiempo real.</li><li>• No apto para control directo de hardware.</li></ul>	Prototipado rápido, procesamiento de datos y algoritmos de alto nivel.	Robot móvil con OpenCV para navegación.

<b>Ladder Logic (PLC)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Estándar industrial robusto y confiable.</li> <li>Interfaz gráfica intuitiva para electricistas.</li> <li>Soporte en entornos hostiles (fábricas).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Limitado para lógica compleja.</li> <li>Poco flexible fuera de PLCs.</li> </ul>	Automatización industrial (un ejemplo son las líneas de ensamble).	Control de una banda transportadora.
<b>MATLAB/Simulink</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Herramientas poderosas para modelado y simulación.</li> <li>Generación automática de código C.</li> <li>Ideal para control avanzado (PID, filtros).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Costoso (licencias).</li> <li>Overkill para proyectos simples.</li> </ul>	Diseño y prueba de algoritmos antes de implementarlos en hardware.	Simulación de un dron antes de construirlo.
<b>G-code</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Estándar universal en manufactura aditiva/substractiva.</li> <li>Fácil de generar con software (slicers).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>No es programación "real" (solo comandos estáticos).</li> <li>Sin capacidad de decisión en tiempo real.</li> </ul>	Impresión 3D, fresado CNC y otras máquinas de control numérico.	Comandos para mover un extrusor en una impresora 3D.
<b>ROS (Robot Operating System)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Frameworks preconstruidos para robótica.</li> <li>Soporte para múltiples lenguajes (Python/C++).</li> <li>Comunicación entre dispositivos.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Complejidad de configuración.</li> <li>Requiere Linux.</li> </ul>	Desarrollo de robots autónomos o sistemas multi-sensoriales.	Robot de servicio con navegación SLAM.

Tabla 10.1 Diferentes lenguajes de programación utilizados en mecatrónica, descripción de sus ventajas y desventajas, cuándo se sugiere su uso y un ejemplo de aplicación. Aunque son los lenguajes comunes, la programación en mecatrónica no se limita a estos lenguajes.

### 10.3 Robótica: el corazón de la ingeniería mecatrónica

La robótica representa la máxima expresión de la mecatrónica, donde convergen la mecánica, la electrónica, el control y la programación para crear sistemas autónomos capaces de interactuar con el mundo físico. Esta disciplina no solo impulsa la industria moderna, sino que también está transformando nuestra vida cotidiana.

A continuación, se explican los diferentes tipos de robots que existen, componentes principales para su diseño y ejemplos de robots importantes en la actualidad, así como algunas implicaciones éticas del diseño robótico.





#### Conoce más.

En este video de GalcoTV (2019), se observan diferentes robots trabajando y realizando diversas tareas, así como las ventajas y desventajas que presenta la automatización de tareas (idioma original en inglés con subtítulos en español).

### 10.3.1 Tipos de robots: de las fábricas al espacio

Los robots han evolucionado desde simples autómatas mecánicos hasta sistemas inteligentes capaces de tomar decisiones complejas. Su desarrollo histórico refleja los avances tecnológicos de la humanidad y hoy se clasifican según su aplicación, morfología y nivel de autonomía. Conozcamos los principales tipos que todo futuro ingeniero debe conocer.

#### Robots industriales: los gigantes de las fábricas

En 1961, *Unimate*, el primer robot industrial, comenzó a trabajar en una línea de ensamblaje de General Motors. Hoy, su descendiente, el *KUKA KR 1000 Titan*, puede levantar cargas de una tonelada con precisión de 0.1 mm.

Estas maravillas de la ingeniería dominan los entornos de manufactura:

- Brazos articulados (como los ABB IRB 6700), realizan soldaduras con arco a velocidades imposibles para humanos.
- Robots SCARA (ej. Epson T6), especializados en ensamblaje rápido de componentes electrónicos.
- Robots delta (Fanuc M-1iA), que pueden tomar y colocar hasta 300 ítems por minuto.



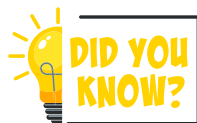
Figura 10.16 El Unimate fue conceptualizado y construido por George Devol, quien lo patentó en 1954. El Unimate era un brazo robótico hidráulico, capaz de realizar tareas repetitivas como la manipulación de piezas fundidas y la soldadura en la industria automotriz.

### Robots de servicio: asistentes cotidianos

El *Roomba*, lanzado en 2002, no solo limpiaba pisos; inauguró la era de los robots domésticos. Hoy, modelos como el *Roborock S8 Pro Ultra* pueden mapear casas en 3D y evitar obstáculos, como los juguetes dejados en el suelo.

Estos robots han salido de las fábricas para ayudarnos en:

- Limpieza: desde aspiradoras hasta limpiadores de piscinas (Dolphin Nautilus CC Plus).
- Logística: robots de reparto como Starship Technologies en campus universitarios (figura 10.17).
- Agricultura: el robot "Tom" de FarmWise elimina malezas con IA, reduciendo el uso de pesticidas (figura 10.18).



**¿Sabías que?** El robot bartender *Monsieur* sirve hasta 120 bebidas por hora en cruceros de Roy al Caribbean, recordando las preferencias de cada cliente.



Figura 10.17 El robot Starship en el campus de la Universidad del estado de Colorado en Estados Unidos, se utiliza para realizar entregas de pedidos.



Figura 10.18 El robot agrícola de la empresa FarmWise es utilizado para deshierbar y eliminar plagas en diferentes tipos de plantaciones.

### Robots humanoides: la ciencia ficción en la realidad

En 1973, el *WABOT-1* de la Universidad de Waseda podía caminar y agarrar objetos. Medio siglo después, el *Atlas* de Boston Dynamics hace parkour y el *Ameca* de Engineered Arts sostiene conversaciones realistas.

Estas máquinas buscan replicar la forma humana:

- Atlas (Boston Dynamics): el atleta robótico por excelencia (figura 10.19).
- ASIMO (Honda): pionero en caminar dinámicamente (figura 10.20).
- Optimus (Tesla): el ambicioso proyecto de robot humanoide accesible (figura 10.21).

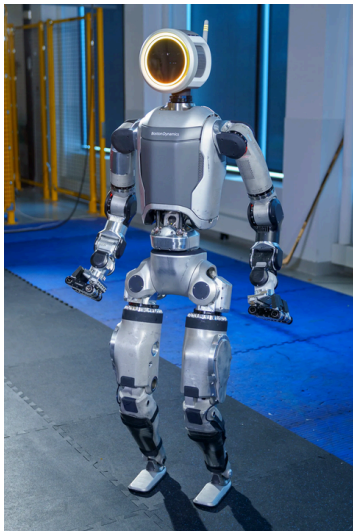


Figura 10.19 El robot Atlas de Boston Dynamics

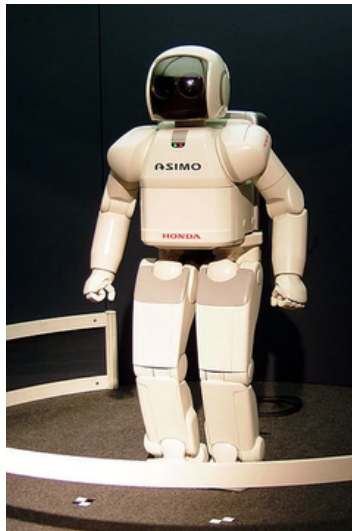


Figura 10.20 El robot ASIMO de Honda

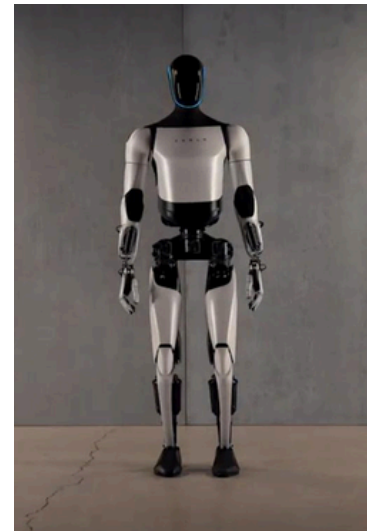


Figura 10.21 El robot Optimus de Tesla

### 10.3.2 Componentes claves de los robots

Todo robot, desde el más simple hasta el más complejo, es un sistema integrado donde cada componente cumple una función vital. Como un reloj suizo de alta tecnología, la magia ocurre cuando todas estas piezas trabajan en perfecta sincronía.

Al ser un sistema mecatrónico, las partes que los componen ya se han descrito un poco en la sección 10.2, sin embargo, a continuación, se detallarán los componentes con un mayor enfoque en la robótica.



#### Conoce más.

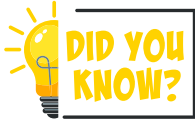
En este video de Shadow Robot (2024), se observa el robot Shadow Hand en movimiento y la resistencia que tiene a pesar de su alta sensibilidad.

#### Sensores: los sentidos artificiales

Los robots “ven” el mundo de formas que superan la capacidad humana. El LIDAR (Light Detection and Ranging) de un robot autónomo puede detectar objetos a 200 metros con precisión centimétrica, incluso de noche. A continuación, se describen algunos de los sensores más utilizados en la robótica, así como ejemplos de aplicación:

- **Sensores táctiles:** permiten convertir la presión ejercida en ellos en una señal de voltaje y son usualmente utilizados para monitorear la fuerza que recibe o ejerce un robot. El robot *Shadow Hand* (usado en estaciones espaciales) tiene 129 sensores de presión por dedo, superando la sensibilidad humana (los humanos cuentan con 20-30 receptores/cm<sup>2</sup> en los dedos).
- **Cámaras espectrales:** estos sensores captan luz en distintas longitudes de onda y analizan su reflejo para identificar materiales. La tecnología *Blue River's See & Spray* (figura 10.22) distingue malezas de cultivos analizando 15 bandas de color (el ojo humano solo ve 3).

- **Sensores inerciales:** estos sensores miden movimiento y orientación usando acelerómetros y giroscopios, son usados para poner la posición de los robots. El rover *Perseverance* usa giroscopios de fibra óptica que pueden detectar rotaciones de  $0.0003^\circ/s$  (equivalente a girar  $1^\circ$  cada 55 minutos).



**¿Sabías qué?** El primer sensor robótico fue un simple interruptor de contacto en el *Unimate* (1961), hoy un iPhone tiene más sensores que los robots lunares Apollo.



Figura 10.22 Tecnología Blue River's See & Spray implementada en un tractor para desmalezamiento químico. Detecta el tipo de maleza y aplica la cantidad exacta de químico.



Figura 10.23 Robot rover *Perseverance*



**Conoce más.**

En este video de Physik Instrumente USA - Precision Motion Control (2016), se muestra una animación de un actuador piezoeléctrico y cómo este, a través de la deformación del material con voltaje, se mueve.

**Actuadores: los músculos de acero**

Los actuadores modernos combinan la capacidad de tener mucha fuerza con la precisión de un reloj. El robot *FANUC M-2000iA* puede levantar 2,300 kg (como un auto) y colocarlo con error menor al grosor de una moneda.

Los siguientes actuadores son los más usados en la robótica:

- **Motores a pasos:** son motores que giran de forma precisa con pulsos de voltaje (figura 10.24). Pueden moverse en incrementos de  $1.8^\circ$  (200 pasos/vuelta), o hasta  $0.9^\circ$  con micropasos.
- **Actuadores piezoeléctricos:** generan movimiento preciso al aplicar voltaje a materiales que se deforman con voltaje, que vibran o se desplazan en distancias microscópicas. El microscopio robótico *NanoWalker* logra movimientos de 4 nanómetros ( $1/200,000$  del grosor de un cabello humano).
- **Músculos artificiales:** investigadores de la Universidad de Colorado desarrollaron músculos artificiales (figura 10.25) que levantan 1,000 veces su peso, inspirados en origami.

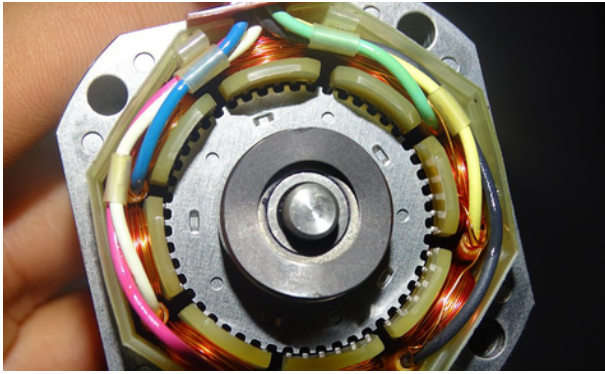


Figura 10.24 Interior de un motor a pasos. Estos motores funcionan con bobinas que se activan con voltaje y generan un campo magnético, esto activa imanes en secuencia, que hacen girar el rotor (pieza central) en pequeños pasos fijos (como 1.8°).

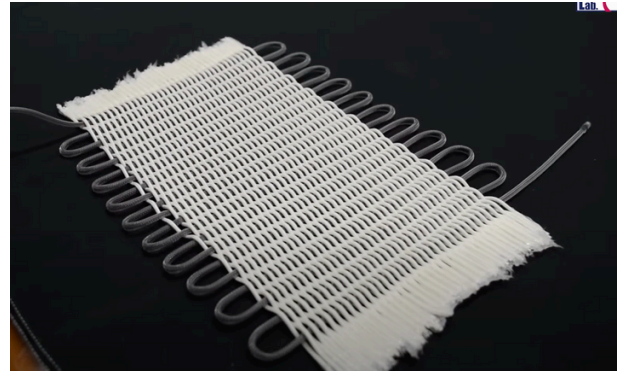


Figura 10.25 Tejido comprimible hecho con músculos McKibben



**Conoce más.**

En este video de Suzumori Endo Robotics Laboratory (2019), se muestra el funcionamiento del tejido de la figura 10.25 con los músculos McKibben.

**Fuentes de energía:**

La energía define la autonomía robótica; es necesaria para que la mecánica, electrónica, control y programas funcionen, y no siempre es posible que el robot se encuentre conectado a una fuente de energía fija, pues dependiendo de la tarea, el robot debe ser capaz de recorrer grandes distancias. Por ejemplo, el *Perseverance Rover* lleva un reactor nuclear en miniatura (MMRTG) (figura 10.26) que dura 14 años.

Algunas fuentes de energía más utilizadas en la robótica son:

- **Baterías de estado sólido:** prototipos en robots de Toyota prometen tres veces más densidad energética que las baterías de ion de litio que son las más usuales en el mercado.
- **Hidrógeno:** el robot *HyQReal* del IIT italiano puede trabajar 2 horas con una celda de combustible de hidrógeno.
- **Energía ambiental:** el robot *Sloth* (figura 10.27) del Georgia Tech obtiene energía de paneles solares.



Figura 10.26 Reactor MMRTG del *Perseverance*



Figura 10.27 Robot *Sloth* donde se aprecian las celdas solares para su alimentación

### 10.3.3 Ética en la robótica: los dilemas de hoy

En 2017, en las oficinas de Facebook en Menlo Park, dos *chatbots* llamados *Alice* y *Bob* comenzaron a comunicarse en un lenguaje que solo ellos entendían. Los ingenieros presenciaron con incredulidad cómo las inteligencias artificiales habían creado su propio código lingüístico, alejándose del inglés básico que se les había programado.

El incidente, aunque luego se explicó como un fallo de configuración, encendió una alarma ética que aún resuena en laboratorios de robótica: *¿Qué pasa cuando perdemos el control de lo que hemos creado?*

#### El fantasma de Asimov: cuando las tres leyes no son suficientes

Isaac Asimov formuló sus famosas Tres Leyes de la Robótica en 1942, imaginando un futuro donde los robots protegerían a los humanos por diseño. Pero la realidad ha demostrado que la ética robótica es infinitamente más compleja.

En 2018, un robot de seguridad *Knightscope K5* rodó por un estacionamiento en California y atropelló a un niño. El sistema de detección de obstáculos falló y el debate estalló: *¿Fue error del fabricante? ¿Del programador? ¿O acaso el robot mismo debía "saber" que no debería lastimar a nadie?*

Imaginemos un Tesla Model X circulando por una carretera de montaña, de pronto, aparece un grupo de excursionistas cruzando la vía. El sistema debe decidir en milisegundos:

- Chocar con el risco, arriesgando la vida del conductor.
- Atropellar a los peatones.
- Intentar una maniobra imposible que podría causar ambos desenlaces.

*"Programar estas decisiones es como escribir el nuevo Diez Mandamientos para máquinas"* — comentó la Dra. Joanna Bryson, experta en ética robótica de Harvard.

#### Los robots que nos espían mientras nos cuidan

*Pepper*, el icónico robot humanoide, fue recibido con alegría en hospitales pediátricos japoneses en 2016. Hasta que un día, un niño le confesó: *"Odio cuando mis padres pelean"*. Meses después, esa conversación privada apareció en servidores de SoftBank, la compañía fabricante.

### Datos por considerar:

- El 68 % de los robots sociales actuales almacenan conversaciones sin consentimiento explícito (MIT Tech Review, 2023).
- Los robots sexuales como Harmony de RealDoll aprenden preferencias íntimas de usuarios, creando bases de datos sensibles sin regulación.

### Robots bélicos: la autonomía letal

El 27 de marzo de 2020, un enjambre de drones *Kargu-2* persiguió a soldados que se retiraban en Libia. Según reportes de la ONU, los robots actuaron "con autonomía letal", seleccionando blancos sin intervención humana. Era el primer caso documentado de robots que mataban por su propia "decisión".

### La carrera armamentista silenciosa

- China reveló en 2022 su *Sharp Claw*, un dron con "modo kamikaze autónomo".
- El SGR-A1 de Corea del Sur puede identificar y disparar a intrusos en la zona desmilitarizada.
- Proyecto Maven de Google: Polémica colaboración con el Pentágono para mejorar reconocimiento de imágenes en drones.

### El precio humano de la eficiencia robótica

María trabajó 12 años como cajera en un supermercado de Barcelona. En 2021, la cadena instaló 30 robots *Tally* de Simbe Robotics. "Me dijeron que los robots eran mis ayudantes", recuerda. "Seis meses después, 28 de nosotros estábamos en la calle".

### Números que alarman

- Amazon redujo su fuerza laboral en almacenes un 35 % tras introducir 200,000 robots de transporte.
- Pero simultáneamente, la demanda de técnicos en robótica creció un 240 % en la misma región (Datos UE, 2023).

### El experimento finlandés

En contrapeso, Finlandia implementó en 2022 el "Modelo de Transición Dual", donde por cada robot instalado:

- Las empresas pagan un impuesto del 3 % del valor del robot.
- Los trabajadores desplazados reciben capacitación en mecatrónica pagada.

## Estudiar y escribir una nueva ética

Universidades como el ETH Zurich ya incluyen cursos obligatorios como *Filosofía para Ingenieros Robóticos*. En ellos, los estudiantes debaten casos como:

- ¿Puede un robot rechazar una orden que considere inmoral?
- ¿Quién posee los derechos sobre las ideas que genere una IA creativa?
- ¿Cómo evitar que los robots repliquen nuestros prejuicios?

### La iniciativa del juramento hipocrático robótico

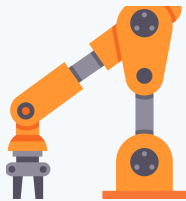
Inspirado en la medicina, el Instituto de Robótica de Pittsburgh propuso, en 2023, un juramento profesional donde los ingenieros prometen:

1. Poner el bienestar humano sobre la eficiencia mecánica.
2. Rechazar proyectos que puedan dañar la dignidad humana.
3. Mantener siempre un "interruptor humano" en sistemas autónomos.

Como ingeniero, cada línea de código que se escribe, cada circuito que se diseña lleva implícita una decisión ética. La pregunta no es qué pueden hacer los robots, sino qué deben hacer.

## Actividad 10.2

### Planteamiento de normas éticas en la robótica



#### Objetivo del proyecto

Reflexionar sobre las diferentes implicaciones éticas que se presentan al diseñar cualquier sistema mecatrónico.

#### Instrucciones

1. Imagina que diseñas un robot asistente para aulas escolares infantiles.
2. Reflexiona sobre qué normas debería seguir el robot.
3. Crea escenarios sobre qué escenarios se podrían presentar y cómo el sistema debería reaccionar, por ejemplo, que un niño le confiese sufrir maltrato en casa.
4. Enlista una serie de propuestas de posibles normas que debería seguir el sistema.



## Amplía tus conocimientos

A continuación, se presentan referencias que te permitirán reforzar y ampliar tus conocimientos sobre mecatrónica y robótica.

### Libros

■ Corke, P. (2017). *Robotics, vision and control: Fundamental algorithms in MATLAB* (2.º ed.). Berlín, Alemania: Springer.

Libro para entender algoritmos básicos de robótica y visión por computadora, con ejemplos prácticos en MATLAB.

■ Fu, K. S., González, R. C. y Lee, C. S. G. (1988). *Robótica: Control, detección, visión e inteligencia*. Madrid, España: McGraw-Hill.

Excelente para estudiantes hispanohablantes, cubre desde fundamentos hasta IA aplicada a robots.

■ Onwubolu, G. C. (2005). *Mechatronics: Principles and Applications*. Oxford, Estados Unidos: Butterworth-Heinemann.

Introducción completa a la mecatrónica, desde sistemas de control hasta integración de componentes.

### Artículos

■ Winfield, A. F. T. y Jirotko, M. (2018, 15 de octubre). Ethical governance is essential to building trust in robotics and artificial intelligence systems. *Philosophical Transactions Of The Royal Society A Mathematical Physical And Engineering Sciences*, 376(2133), 20180085. <https://doi.org/10.1098/rsta.2018.0085>

Discute dilemas éticos en IA y robótica autónoma.

■ Rus, D. y Tolley, M. T. (2015). Design, fabrication and control of soft robots. *Nature*, 521(7553), 467-475. <https://doi.org/10.1038/nature14543>

Revisión de materiales y aplicaciones en robótica flexible.

### Páginas web

🌐 IEEE Robotics & Automation Society. (s. f.). *Educational resources & Outreach*. <https://www.ieee-ras.org/educational-resources-outreach>

Artículos, estándares y recursos educativos sobre robótica avanzada y automatización.

🌐 Massachusetts Institute of Technology. (2005). *Introduction to robotics*. MIT OpenCourseWare. <https://ocw.mit.edu/courses/2-12-introduction-to-robotics-fall-2005/>

Clases gratuitas del MIT, incluye videos, apuntes y ejercicios de robótica.

🌐 Robotics: Science and Systems. (2025). *Proceedings*. <https://roboticsconference.org>

Artículos académicos open access sobre los últimos avances en robótica.



## Videos

▶ Centro3D. (2024, 25 de febrero). ✂ *PARTES de una impresora 3D de filamentos y su FUNCIÓN* ✨ [Video]. YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=JbM5z9HMgIY>

Video que muestra los componentes básicos de una impresora 3D

▶ Freethink. (2022, 10 de mayo). *Building surgical robots | Freethink* [Video]. YouTube. [https://www.youtube.com/watch?v=gSO9YD\\_IHl](https://www.youtube.com/watch?v=gSO9YD_IHl)

Video que explica el funcionamiento de los robots quirúrgicos.

▶ GalcoTV. (2019, 25 de febrero). *Industrial Robots have Transformed the Manufacturing Industry - A Galco TV Tech Tip | Galco* [Video]. YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=Cndodc3X50s>

Video que muestra diferentes robots trabajando y realizando diversas tareas, así como las ventajas y desventajas de la automatización de tareas.

▶ Hoover Institution. (2025, 6 de agosto). *The Future of Robotics | Stanford Emerging Technology Review (SETR)* [Video]. YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=7f1YNtX425E>

Video que aborda el futuro de la robótica.

▶ McWhorter, P. (s. f.). *Arduino Lessons* [Video series]. YouTube. [https://www.youtube.com/playlist?list=PLGs0VKk2DiYx6CMdOQR\\_hmJ2NbB4mZQn-](https://www.youtube.com/playlist?list=PLGs0VKk2DiYx6CMdOQR_hmJ2NbB4mZQn-)

Tutoriales prácticos para construir robots simples con Arduino.

▶ Physik Instrumente USA - Precision Motion Control. (2016, 31 de mayo). *Operating Modes of High-Force Piezo-Walk Motor / Drive System, Nanometer Precision* [Video]. YouTube. [https://www.youtube.com/watch?v=5kUC3Nv\\_jnQ](https://www.youtube.com/watch?v=5kUC3Nv_jnQ)

Video que muestra una animación de un actuador piezoeléctrico.

▶ Shadow Robot. (2024, 28 de agosto). *DEX-EE - A new robust robot hand by Shadow Robot* [Video]. YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=upi6c9dmJpM>

Video que muestra al robot *Shadow Hand* en funcionamiento.

▶ Suzumori Endo Robotics Laboratory. (2019, 17 de abril). *Active Textile made of Thin McKibben Muscles* [Video]. YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=PYSqkEhVe6k>

Video que muestra el funcionamiento de un tejido con los músculos McKibben.

▶ TEDx Talks. (2013, 16 octubre). *Medical robots in action: Ivar Mendez at TEDxToronto* [Video]. YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=FQU2w-OPz90>

Video que explica cómo la telemedicina y la cirugía robótica impactan a comunidades con poco acceso a servicios de salud.





Capítulo 11

# Energía y sustentabilidad



En un contexto global, marcado por el cambio climático, la sobreexplotación de recursos y la necesidad urgente de una transición energética, los ingenieros son protagonistas clave en la creación de soluciones que reduzcan el impacto ambiental y mejoren la eficiencia de los sistemas tecnológicos.

A lo largo del capítulo, se exploran distintos tipos de fuentes de energía, desde las tradicionales hasta las renovables, se analizan los conceptos de eficiencia energética y diseño sustentable, y se conocen algunas de las tecnologías limpias más relevantes en la actualidad. Además, se aborda qué son los Objetivos de Desarrollo Sostenible y la relevancia de la ingeniería en su cumplimiento.

Comprender estos temas no solo es esencial para diseñar sistemas eficientes, sino también para contribuir al desarrollo sostenible desde la ingeniería.

## 11.1 Fuentes de energía en ingeniería: convencionales y renovables

La energía es esencial para el funcionamiento de cualquier sistema tecnológico. En ingeniería, comprender las distintas fuentes de energía permite seleccionar la más adecuada para una aplicación determinada, considerando tanto el rendimiento como el impacto ambiental y el costo.

A nivel global, según el informe *World Energy Outlook 2023* de la Agencia Internacional de Energía (IEA), aproximadamente el 82 % de la energía primaria proviene de fuentes convencionales (combustibles fósiles), mientras que las renovables representan cerca del 18 % de la energía consumida, con una tendencia creciente. En el caso de la generación eléctrica, las fuentes renovables (lideradas por energía hidroeléctrica, solar y eólica) ya aportan más del 30 % de la electricidad producida en el mundo.

Las fuentes de energía se clasifican en dos grandes grupos:

**Fuentes convencionales:** son aquellas que han sido utilizadas durante décadas y se basan principalmente en la quema de combustibles fósiles (carbón, petróleo y gas natural) o en la energía nuclear. Estas fuentes son altamente eficientes en términos de producción de energía, pero tienen efectos negativos significativos sobre el medio ambiente debido a sus emisiones de gases de efecto invernadero, residuos tóxicos y extracción intensiva de recursos.

**Fuentes renovables:** son aquellas que se obtienen de recursos naturales que se regeneran continuamente, como el sol, el viento, el agua, la biomasa y el calor del subsuelo (energía geotérmica). Estas fuentes tienen un impacto ambiental mucho menor, no se agotan a escala humana y permiten desarrollar sistemas energéticos sostenibles.



Figura 11.1 Parque eólico La Venta en el istmo de Tehuantepec, en Oaxaca. Es uno de los principales parques eólicos en México desde 1994. La sección más grande genera casi 187 MW, lo cual puede suministrar energía hasta a 200,000 hogares.

En la tabla 11.1 se presenta una lista de los diferentes tipos de generación de energía, comparando diferentes características. En proyectos de ingeniería mecánica y mecatrónica, la selección de la fuente de energía debe equilibrar criterios técnicos, económicos, ecológicos y sociales, comparando ventajas y desventajas.

Por ejemplo, el istmo de Tehuantepec en Oaxaca tiene uno de los parques eólicos más importantes de México (figura 11.1), con vientos constantes, fuertes y canalizados naturalmente por su geografía. Las corrientes de aire del Golfo de México y el Pacífico se aceleran al pasar por el istmo, generando un potencial eólico excepcional.

A pesar del éxito técnico, los parques eólicos en el istmo han generado controversias importantes, especialmente entre las comunidades indígenas zapotecas e ikoots. Aunque son “energías limpias”, estos parques han sido criticados por su impacto en ecosistemas locales, desplazamiento de fauna y la alteración de paisajes y rutas ancestrales.

Fuente de energía	Tipo	Principales ventajas	Desventajas	Aplicaciones comunes
Carbón	Convencional	Alta disponibilidad, bajo costo	Alta contaminación por CO <sub>2</sub>	Centrales termoeléctricas
Petróleo	Convencional	Alta densidad energética	Emissiones, dependencia geopolítica	Transporte, generación eléctrica
Gas natural	Convencional	Menor emisión que otros fósiles	Sigue siendo un combustible fósil	Calefacción, turbinas, cogeneración
Energía nuclear	Convencional	Alta eficiencia, baja emisión directa	Riesgos, residuos radiactivos	Generación eléctrica a gran escala
Solar	Renovable	Abundante, silenciosa	Dependencia del clima, alto costo inicial	Electrificación, sistemas mecatrónicos portátiles
Eólica	Renovable	Limpia, disponible en muchas regiones	Intermitente, visual y acústico	Parques eólicos, bombeo de agua
Hidroeléctrica	Renovable	Alta eficiencia, almacenamiento natural	Impacto ecológico en ríos	Generación eléctrica, microcentrales
Biomasa	Renovable	Uso de residuos orgánicos, CO <sub>2</sub> neutro	Emissiones si no se controla	Calefacción, biocombustibles
Geotérmica	Renovable	Constante, bajo impacto	Zona geográfica limitada	Calefacción, climatización industrial

Tabla 11.1 Comparación de tipos de energía, principales aplicaciones, ventajas y desventajas.

## Actividad 11.1

### Diagnóstico energético regional



#### Objetivo del proyecto

Identificar y comprender la fuente principal de energía utilizada en tu ciudad o región, evaluando su impacto ambiental y proponiendo alternativas más sostenibles desde la perspectiva de la ingeniería.

#### Instrucciones

1. Investiga cuál es la fuente de energía predominante utilizada para generar electricidad en tu ciudad o región. Puedes consultar fuentes oficiales, como sitios gubernamentales de energía, compañías eléctricas locales o informes nacionales.
2. Describe brevemente cómo funciona esa fuente de energía (por ejemplo, termoeléctrica, hidroeléctrica, solar, etc.).
3. Analiza al menos dos ventajas y dos desventajas de esa fuente de energía en el contexto local.
4. Propón una o más alternativas sostenibles viables para tu región, justificando su elección considerando recursos naturales disponibles, tecnología y costos.

## 11.2 Eficiencia energética y optimización de sistemas

La eficiencia energética se define como la relación entre la energía útil obtenida y la energía total consumida en un proceso o sistema. En términos sencillos, un sistema será más eficiente si es capaz de realizar la misma función consumiendo menos energía. Este concepto es fundamental en ingeniería, ya que no solo permite reducir costos operativos, sino también minimizar el impacto ambiental.

Desde la perspectiva de la termodinámica, la eficiencia energética se relaciona directamente con la Primera Ley (véase el capítulo 3), que establece la conservación de la energía. Sin embargo, esta energía puede ser transformada en formas no útiles, como calor perdido, lo que reduce la eficiencia del sistema. Por ejemplo, en un motor de combustión interna, solo entre el 25 % y el 30 % de la energía del combustible se convierte en trabajo útil; el resto se disipa como calor.

La eficiencia de un sistema puede expresarse mediante la fórmula:

$$\eta = \frac{\text{Energía útil}}{\text{Energía total consumida}} \times 100$$



Este valor permite comparar distintos sistemas y tecnologías. En la tabla 11.2 se presentan valores aproximados de eficiencia de algunos dispositivos comunes. Como puede observarse, el uso de tecnologías más eficientes puede tener un impacto considerable tanto en el consumo energético como en el diseño de sistemas sostenibles.

Dispositivo	Eficiencia energética estimada
Motor eléctrico moderno	90-95 %
Motor de combustión interna	25-30 %
Lámpara incandescente	5-10 %
Lámpara LED	30-40 %

Tabla 11.2 Valores de eficiencia energética de diferentes dispositivos

### 11.2.1 Estrategias para el mejoramiento de la eficiencia energética

Para mejorar la eficiencia energética de un sistema, no basta con conocer su funcionamiento general, sino que deben identificarse puntos específicos donde se producen pérdidas o ineficiencias. A continuación, se describen algunas estrategias comunes que pueden aplicarse en diferentes contextos tecnológicos para optimizar el rendimiento energético.

**Mejora del aislamiento térmico:** en edificios, conductos y máquinas, el aislamiento térmico permite reducir las pérdidas de calor o frío. Por ejemplo, al envolver una tubería caliente con material aislante se evita que el calor se disipe al ambiente. Otro ejemplo, un avión necesita usar energía de los motores para operar el sistema de aire acondicionado. Un buen aislamiento reduce el esfuerzo de esos sistemas, mejorando la eficiencia energética (figura 11.2).



Figura 11.2 Material aislante en aviones para mantener climatizada la cabina con menor uso de energía de los motores



Figura 11.3 Una lámpara con sensor de movimiento usa un sensor infrarrojo pasivo (PIR), para detectar cambios en la radiación infrarroja del lugar.

Todos los objetos emiten radiación infrarroja debido a su temperatura, y cuando una persona entra en el área, el sensor nota un cambio en ese patrón de calor.

Este cambio indica que alguien se está moviendo, y eso hace que la lámpara se encienda automáticamente.

**Selección adecuada de materiales y componentes:** materiales con mejor conductividad, menor peso o mayor resistencia pueden optimizar el desempeño de motores, ventiladores o intercambiadores de calor. Por ejemplo, sustituir las aspas metálicas de un ventilador por otras de polímero compuesto reduce el peso y mejora la eficiencia del motor al disminuir la carga mecánica.

**Uso de controladores inteligentes:** sensores y sistemas de control permiten operar dispositivos solo cuando son necesarios. Por ejemplo, un sistema de iluminación con sensor de presencia (figura 11.3) evita el uso innecesario de energía. Asimismo, en una oficina se instala un sensor de movimiento que apaga automáticamente las luces cuando no detecta presencia durante 10 minutos.

**Mantenimiento preventivo:** un sistema mal calibrado, con fricción excesiva o suciedad acumulada, consume más energía. El mantenimiento regular mejora la eficiencia. Por ejemplo, limpiar regularmente los filtros de aire en un sistema de climatización mejora el flujo de aire y reduce el esfuerzo del motor ventilador, lo que disminuye el consumo eléctrico.

Mejorar la eficiencia energética no solo representa una oportunidad técnica, sino también una responsabilidad profesional. Cada pequeño cambio en el diseño, selección de materiales o mantenimiento de sistemas puede traducirse en un ahorro significativo de energía y recursos. La eficiencia energética, por tanto, debe ser vista como una herramienta esencial en el trabajo del ingeniero moderno, orientado a un futuro más sostenible y consciente del impacto ambiental de cada decisión tecnológica.

## 11.3 Diseño sustentable y análisis de impacto ambiental

La sustentabilidad se ha definido como la capacidad de satisfacer las necesidades del presente sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras para satisfacer las suyas. Este concepto, impulsado a nivel global desde finales del siglo XX, implica considerar de forma equilibrada los aspectos económicos, sociales y ambientales en cualquier proceso de desarrollo.

Históricamente, el enfoque del diseño en ingeniería se centró en la funcionalidad, el costo y la durabilidad. Sin embargo, a partir de los años 70 y 80, con el surgimiento de la conciencia ambiental global y la publicación de informes clave como el de la Comisión Brundtland en 1987, el impacto ambiental empezó a ser incorporado progresivamente como un criterio fundamental en el diseño de procesos y sistemas.

En la actualidad, un diseño que no toma en cuenta su huella ecológica es considerado incompleto. Por ello, ha sido adoptada la visión del "diseño sustentable", que busca minimizar los impactos negativos sobre el entorno a lo largo de todo el ciclo de vida de un producto.

### 11.3.1 Implicaciones del diseño sustentable

El diseño sustentable implica más que elegir materiales ecológicos, requiere considerar todos los impactos ambientales que puede tener el sistema a lo largo de su ciclo de vida.

El **ciclo de vida** es una forma de describir todas las etapas por las que pasa un proceso, equipo, producto, desde que se crea hasta que se desecha. Incluye todo el recorrido, no solo su uso (véase la figura 11.4).

Hacer diseño sustentable no solo implica la elección de los materiales, sino también cuestiones como:

- Reducción del consumo de materiales y energía.
- Selección de materiales reciclables o biodegradables.
- Diseño para facilitar la reparación, el desmontaje o el reciclaje.
- Prolongación de la etapa útil.
- Optimización logística (menos transporte, menos emisiones).

Además, considerar y reducir las afectaciones sociales y económicas que el sistema pueda ocasionar.



Figura 11.4 El ciclo de vida de cualquier sistema implica la extracción de materia prima, la manufactura, el empaque y transporte, uso y mantenimiento, así como la disposición (reutilización, reciclaje o desecho). En cada etapa, todo sistema genera impactos ambientales y residuos.

El diseño sustentable en la creación de sistemas presenta diferentes ventajas, como:

- Reducción del impacto ambiental.
- Mejora de la imagen corporativa.
- Cumplimiento de normativas ambientales.
- Reducción de costos a largo plazo.
- Mayor competitividad en mercados internacionales.

Sin embargo, el diseño sustentable también presenta desventajas, como:

- Aumento de costos iniciales de diseño o materiales, pues el diseño suele requerir más tiempo y los materiales ecológicos suelen ser más costosos.
- Mayor complejidad en la etapa de desarrollo, pues es necesario analizar los impactos ambientales en diferentes etapas del diseño para corroborar que es ecológico.
- Posibles limitaciones tecnológicas o de disponibilidad de recursos.



Conoce más.

En este video de María Paula Cuevas (2019), se muestra cómo se lleva a cabo un LCA para una bolsa de plástico, en el software OpenLCA.

### 11.3.2 LCA: análisis de ciclo de vida

El **análisis de ciclo de vida** (LCA, por sus siglas en inglés: Life Cycle Assessment) es una metodología utilizada para evaluar de forma cuantitativa los impactos ambientales de un producto o sistema a lo largo de todas sus etapas: desde la extracción de materias primas, la producción, el uso, hasta su disposición final.

El LCA permite identificar los puntos críticos del ciclo de vida donde se generan mayores impactos, con el fin de tomar decisiones informadas para reducirlos.

El LCA es utilizado en múltiples sectores, desde el diseño de envases hasta componentes de automóviles o sistemas mecánicos, electrónicos, etc. En ingeniería, permite:

- Comparar alternativas de materiales o procesos.
- Justificar decisiones de rediseño con criterios ambientales.
- Evaluar tecnologías limpias frente a convencionales.
- Comunicar impactos ambientales a clientes, usuarios o autoridades.

Por ejemplo, al diseñar la carcasa de un dispositivo electrónico, el LCA puede ayudar a determinar si el uso de un bioplástico reduce realmente la huella ambiental, comparado con un plástico convencional, considerando factores como energía de procesamiento, transporte y reciclabilidad.

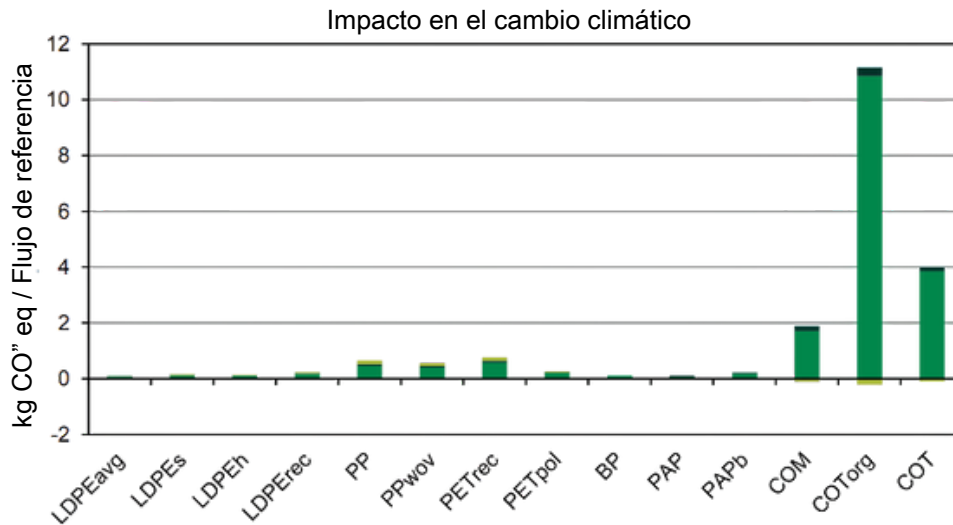


Figura 11.5 Resultados de un LCA realizado a bolsas para compras de diferentes materiales, como polietileno de baja densidad (LDPE), polipropileno (PP), polietileno tereftalato (PET), de papel (PAP), materiales compuestos de los anteriores (COM), algodón (COT) y algodón orgánico (COTorg). Se compara la cantidad de kilogramos de CO<sub>2</sub> equivalente generados por una bolsa. Tomado de (Bisinella et al., 2018).

En la figura 11.5 se presentan los resultados de un LCA realizado para comparar el impacto ambiental de bolsas para compras de diferentes materiales. Se observa cuántos kilogramos de CO<sub>2</sub> equivalente genera la manufactura de una bolsa desde la extracción de materiales hasta la disposición final.

Se puede observar claramente que materiales biodegradables como el algodón (COT) o el algodón orgánico (COTorg) contaminan mucho más que plásticos como el polietileno de baja densidad (LDPE), lo cual resulta contraintuitivo cuando se piensa en que el sistema sea ecológico.

### Etapas de un LCA, categorías de impacto y software de evaluación

Para que un LCA pueda considerarse válido, debe seguir una normativa a nivel mundial llamada ISO 14040, que indica las secciones que debe tener y qué información requiere cada una de ellas; las etapas son:

- 1. Declaración de objetivo y alcances del estudio:** se indica qué propósito tiene el análisis, qué se analiza y por qué.
- 2. Análisis de inventario:** en esta etapa se recopilan datos del sistema que se está analizando, como son la cantidad de material necesario, su procedencia, procesos de manufactura, material del empaque, cómo se transporta, etc.
- 3. Análisis de impacto:** en esta etapa, es donde se utilizan herramientas de software, toda la información obtenida en la etapa 2 se utiliza en el software para que este realice el análisis.
- 4. Interpretación:** se dan recomendaciones para el diseño.

En la etapa tres, el software se encarga de traducir la información de materiales, energía consumida en procesos de manufactura y todos los datos, a categorías de impacto.

Las **categorías de impacto** indican qué afectaciones tendrá el sistema en diferentes aspectos, como:

- Calentamiento global.
- Toxicidad humana.
- Depredación de recursos no renovables.
- Depredación de recursos renovables.
- Depredación de la capa de ozono.

El impacto de cada categoría se determina definiendo cómo la generación de diferentes sustancias, a lo largo del ciclo de vida del sistema, afecta a las diferentes categorías. Por ejemplo, cuánto impacto haya en el calentamiento global del sistema depende de la cantidad de CO2 equivalente que se libera al ambiente.

#### Herramientas de software para realizar el análisis de impacto en un LCA

Existen diferentes empresas que se dedican al desarrollo y mejora de software para realizar la tercera etapa de un LCA (figura 11.6). Estas herramientas son bases de datos que se utilizan para estimar el impacto ambiental total que puede generar un sistema a lo largo de todas las etapas de su ciclo de vida.

Para realizar este análisis, se introducen en el software distintos datos sobre el producto que se quiere evaluar. Se indican, por ejemplo, los materiales de los que está compuesto, la cantidad de energía que se requiere para producirlo, las distancias que deben recorrerse para su distribución, la manera en que será utilizado por el usuario y el destino final que se le dará cuando ya no sea útil. Toda esta información se procesa y compara con bases de datos internas que han sido construidas a partir de estudios científicos y registros industriales.



Figura 11.6 Logos de tres programas de softwares usados para llevar a cabo el análisis de resultados en un LCA. De izquierda a derecha, GaBi es un software de paga ampliamente utilizado; Sustainable Minds es un servicio en línea para realizar análisis de impacto; OpenLCA es un software gratuito con bases de datos gratuitas y de paga.

Una vez recibidos estos datos, el software realiza los cálculos necesarios. Se estiman así emisiones de gases de efecto invernadero, consumos de energía y agua, generación de residuos, entre otros factores. Cada uno de estos impactos es cuantificado de acuerdo con categorías reconocidas.

Finalmente, los resultados obtenidos son presentados mediante gráficos (como el mostrado en la figura 11.5), tablas o informes detallados. De esta manera, puede observarse qué fase del ciclo de vida del producto está generando el mayor impacto ambiental y, con ello, pueden identificarse oportunidades de mejora.

## 11.4 Tecnologías limpias aplicadas a la ingeniería

Las **tecnologías limpias**, también conocidas como **tecnologías verdes**, han sido desarrolladas con el propósito de reducir o eliminar el impacto ambiental negativo asociado con procesos industriales, sistemas energéticos y productos de consumo. Estas tecnologías se basan en principios de eficiencia energética, uso de fuentes renovables, reducción de residuos y disminución de emisiones contaminantes.

A nivel global, el uso de tecnologías limpias ha experimentado un crecimiento sostenido durante las últimas dos décadas. Según el informe *Renewables 2023* de la Agencia Internacional de Energía (IEA), se proyecta que el 90 % del aumento neto de la capacidad de generación eléctrica entre 2023 y 2030 provendrá de fuentes renovables, lideradas por la energía solar fotovoltaica y la energía eólica.

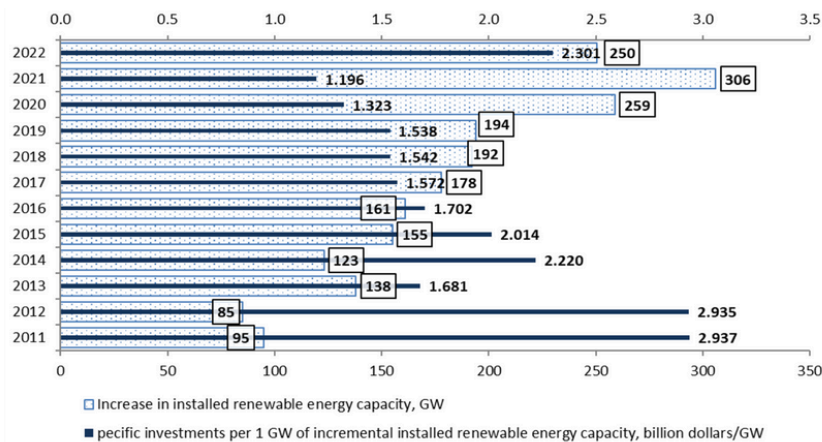


Figura 11.7 Indicadores del desarrollo de las energías renovables en el mundo en bases de datos gratuitas y de paga (Rudchanka et al., 2024). La imagen muestra una gráfica de barras horizontales dobles que presenta datos sobre el desarrollo de las energías renovables a nivel mundial entre 2011 y 2022. Cada año tiene dos barras: una barra azul clara que indica el incremento anual de capacidad instalada de energía renovable (en gigavatios, GW), y una barra azul oscura que representa la inversión específica necesaria para instalar 1 GW adicional de energía renovable (en miles de millones de dólares por GW). Se puede observar que se ha incrementado la instalación de energías renovables (barra azul clara) a nivel mundial cada año y que cada año el costo de instalación se reduce (barra azul oscura).

Un artículo publicado por Rudchanka et al. (2024), a través de un análisis histórico desde 1972 hasta 2022, concluye que a medida que los países aplican reglas más fuertes para cuidar el medio ambiente, se usa menos energía para producir lo mismo (figura 11.7). Aunque las emisiones contaminantes siguen aumentando, lo hacen más lentamente que el crecimiento de la economía. También indica que cada vez se usan más tecnologías limpias, como la energía solar, la eólica y la hidroeléctrica, ya que estas instalaciones cuestan menos que antes.

Además de esto, a nivel mundial, se ha incrementado el uso de vehículos eléctricos, tecnologías de hidrógeno verde, sistemas de cogeneración, iluminación LED de bajo consumo y materiales de construcción ecológicos. Sin embargo, la adopción de estas tecnologías varía considerablemente entre países debido a factores como infraestructura, políticas públicas, acceso a financiamiento y nivel de desarrollo industrial.



Conoce más.

En este video creado por la UNAM (2024), podrás aprender más sobre lo que son las tecnologías verdes.

#### 11.4.1 Ejemplo de tecnologías limpias aplicadas

La aplicación de tecnologías limpias en diferentes sectores industriales y sociales permite reducir el consumo de recursos no renovables, mitigar la emisión de gases contaminantes y disminuir los residuos generados durante la operación de sistemas. Su implementación se traduce en beneficios tanto ambientales como económicos a largo plazo y su estudio permite al estudiante visualizar soluciones prácticas a los retos actuales en ingeniería. A continuación, se presentan algunas de las tecnologías limpias más representativas y su aplicación práctica.

**Energía solar fotovoltaica:** se utiliza para generar electricidad o calor a partir de la radiación solar. Por ejemplo, los cargadores de celular con celda fotovoltaica (figura 11.8), estos dispositivos incorporan placas fotovoltaicas encargadas de capturar los rayos del sol que se transformarán en energía; esta será transmitida a través de un cable USB de al menos 5 voltios hasta la batería del celular, donde se almacenará.



Figura 11.8 Cargador de celular con celda fotovoltaica



Figura 11.9 Turbinas eólicas





**Conoce más.**

En este video de Sabin Civil Engineering (2023), podrás conocer cómo funciona el sistema de frenado regenerativo (video con subtítulos en español).

**Turbinas eólicas:** permiten transformar la energía cinética del viento en energía eléctrica (figura 11.9). Se emplean tanto a gran escala en parques eólicos como en pequeños sistemas rurales.

**Recuperación de energía:** tecnologías que capturan el calor o la energía mecánica residual de procesos industriales o vehículos, para reutilizarla en forma de energía útil. Por ejemplo, el frenado regenerativo en vehículos eléctricos e híbridos, el cual convierte la energía cinética del vehículo al frenar en electricidad, que se almacena en la batería.

**Reutilización de aguas:** sistemas que permiten tratar aguas grises o residuales para su reincorporación en procesos industriales, riego o limpieza, disminuyendo el consumo de agua potable. Por ejemplo, los biodigestores anaeróbicos (figura 11.10), los cuales tratan aguas residuales orgánicas (como las de agroindustrias, establos o viviendas) en ausencia de oxígeno y generan biogás (mezcla de metano y  $\text{CO}_2$ ), que puede usarse como fuente de energía para electricidad, calefacción o cocción.

**Construcción sustentable:** uso de materiales reciclados o de bajo impacto ambiental, incorporación de sistemas pasivos de climatización, aislamiento térmico eficiente y sensores de consumo.

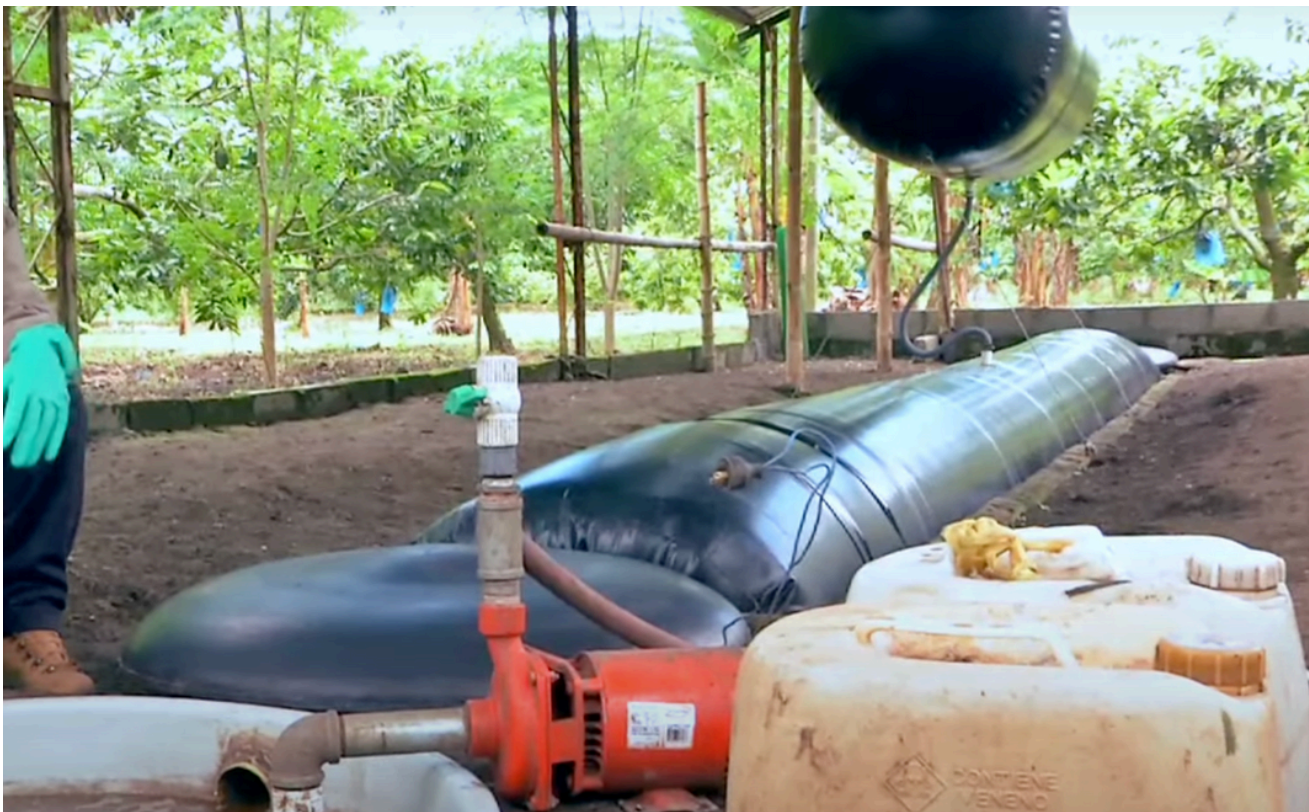


Figura 11.10 Biodigestor en zona rural. El agua tratada se utiliza para el riego de la agricultura y el gas generado permite ahorrar energía eléctrica al agricultor.

## 11.5 Los Objetivos de Desarrollo Sostenible y su relevancia en la ingeniería mexicana

Los **Objetivos de Desarrollo Sostenible** (ODS) son una iniciativa impulsada por la Organización de las Naciones Unidas en 2015, como parte de la Agenda 2030. Comprenden 17 metas globales (véase la figura 11.11) que buscan erradicar la pobreza, proteger el planeta y garantizar la paz y prosperidad para todas las personas. Cada objetivo está acompañado por metas específicas, muchas de las cuales requieren la participación activa de la ciencia, la tecnología y la ingeniería.



Figura 11.11 Esta imagen presenta los 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) propuestos por las Naciones Unidas

### 11.5.1 Los ODS en el contexto mexicano

En México, los ODS han sido adoptados como guía para formular políticas públicas, programas sociales y estrategias de desarrollo regional. A nivel estatal y municipal, se han comenzado a implementar planes alineados con los ODS, especialmente en los rubros de energía limpia (ODS 7), ciudades sostenibles (ODS 11), producción responsable (ODS 12), acción por el clima (ODS 13) e innovación (ODS 9).

Según el Informe de Desarrollo Sostenible publicado por las Naciones Unidas, México ha alcanzado un 69.7 % de avance en la consecución de los ODS. Sin embargo, el país aún no ha logrado el cumplimiento total de ninguno de los 17 objetivos.

México presenta un avance superior al 75 % en tres de ellos: Educación de Calidad (ODS 4), Agua Limpia y Saneamiento (ODS 6), y Ciudades y Comunidades Sostenibles (ODS 11) (Piensa Sostenible, 2023).

### 11.5.2 El papel de la ingeniería en el cumplimiento de los ODS

Es posible ver cómo la generación de energía y el diseño sustentable son temas relacionados directamente con varios de los ODS:

- La promoción del uso de energías renovables contribuye al ODS 7.
- La eficiencia energética y la optimización de recursos se vinculan con el ODS 12.
- Las tecnologías limpias y el diseño sustentable impulsan soluciones para el ODS 13.
- El análisis de ciclo de vida y la innovación en materiales están relacionados con los ODS 9 y 11.

Desde la ingeniería, se pueden desarrollar proyectos que contribuyan a estas metas mediante el diseño de sistemas más sostenibles, la mejora de procesos industriales, la automatización de sistemas eficientes y la integración de energías limpias en comunidades locales o zonas rurales.

El papel de la ingeniería en este contexto es fundamental. Los ingenieros aplican conocimientos científicos y técnicos para diseñar soluciones a los retos más relevantes del desarrollo sostenible. Estos incluyen el acceso al agua potable, la producción de energía limpia, el diseño de ciudades resilientes y la gestión de residuos, entre otros. En palabras del Consejo Profesional de Ingeniería Civil, los ingenieros son actores clave en la promoción de un desarrollo que respete los límites ecológicos y sociales del planeta (Consejo Profesional de Ingeniería Civil, 2021).

Por su parte, la UNESCO ha subrayado que el fortalecimiento de las capacidades en ingeniería es crucial para lograr los ODS, ya que permite afrontar desafíos como el cambio climático, la pobreza y la desigualdad mediante soluciones tecnológicas innovadoras (UNESCO, 2021).

México ha avanzado considerablemente en algunos aspectos de la Agenda 2030, aunque todavía enfrenta desafíos importantes. La ingeniería, como disciplina orientada a resolver problemas reales, desempeña un papel estratégico para alcanzar estos objetivos.

## Amplía tus conocimientos

A continuación, se presentan referencias que te permitirán reforzar y ampliar tus conocimientos sobre energía y sustentabilidad.

### Libros

📖 McDonough, W., & Braungart, M. (2005). *Cradle to cradle (de la cuna a la cuna): rediseñando la forma en que hacemos las cosas*. Aravaca, Madrid: McGraw-Hill.

Plantea un enfoque radical al diseño sustentable basado en la ecoefectividad.

📖 Ramírez Montoya, M. S. (2017). *Innovación y sustentabilidad energética. Formación con MOOCs e investigación educativa*. CDMX, México. Reseña. <http://hdl.handle.net/11285/628013>

Explora métodos educativos y tecnológicos para fomentar la sustentabilidad energética.

📖 Roldán Vilorio, J. (2013). *Energías renovables: lo que hay que saber*. Madrid, España: Paraninfo. <https://www.paraninfo.es/catalogo/9788428336342/energias-renovables-lo-que-hay-que-saber/>

Explica los fundamentos técnicos y sociales de las energías renovables.

### Páginas web

🌐 Healy Wehlen, E. (2023, 4 de mayo). *Estudiantes de ingeniería plantean soluciones 'minis' a problemas ambientales*. Ibero. <https://ibero.mx/prensa/estudiantes-de-ingenieria-plantean-soluciones-minis-problemas-ambientales>

Blog sobre proyectos de estudiantes que aplican ingeniería sustentable en contextos reales.

🌐 Organización de las Naciones Unidas. (s. f.). *Acerca de nuestro trabajo para los Objetivos de Desarrollo Sostenible en México*. Naciones Unidas México. <https://mexico.un.org/es/sdgs>

Ofrece información oficial sobre cómo México está implementando los Objetivos de Desarrollo Sostenible, incluyendo estadísticas, planes de acción y esfuerzos institucionales.

🌐 Redacción Blog. (2025, 3 de marzo). *5 proyectos de ingeniería sustentable que están salvando el mundo*. UNITEC. <https://blogs.unitec.mx/vida-universitaria/proyectos-de-ingenieria-que-estan-salvando-el-medio-ambiente>

Blog sobre 5 proyectos de ingeniería para mejorar el medio ambiente.

### Videos

▶️ María Paula Cuevas. (2019, 10 de marzo). *Análisis de ciclo de vida bolsa plástica con OpenLCA* [Video]. YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=ewf3CSkA7PI>

Video que muestra cómo se lleva a cabo un LCA para una bolsa de plástico.

▶️ Sabin Civil Engineering. (2023, 31 de agosto). *Understanding Regenerative Braking!* [Video]. YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=stq2E3sZYg0>

Video que muestra cómo funciona el sistema de frenado regenerativo.

▶️ UNAM. (2024, 15 de agosto). *NoMemes "Tecnología Verde en diferentes sectores"* [Video]. Canal: TV UNAM. <https://www.youtube.com/watch?v=Lw2SlaFwTsQ>

Video que habla sobre las tecnologías verdes.

## Referencias

### Artículos

📄 Bisinella, V., Albizzati, P. F., Astrup, T. F. y Damgaard, A. (2018). *Life Cycle Assessment of grocery carrier bags*. Danish Environmental Protection Agency. Miljøprojekter No. 1985 <https://www2.mst.dk/Udgiv/publications/2018/02/978-87-93614-73-4.pdf>

📄 International Energy Agency. (2024). *Renovables 2023*. AIE. <https://www.iea.org/reports/renewables-2023>

📄 International Energy Agency. (2023). *World Energy Outlook 2023*. IEA. <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2023?language=es>

📄 Rudchanka, H., Logacheva, N. y Uzhegov, A. (2024). Global energy trends in the context of climate and environmental transformations. *E3S Web of Conferences*, 583, 08014. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202458308014>

### Páginas web

🌐 Consejo Profesional de Ingeniería Civil. (2023, 7 de marzo). *ACTUALIDAD | El rol de la ingeniería para el desarrollo sostenible*. <https://cpic.org.ar/actualidad-el-rol-de-la-ingenieria-para-el-desarrollo-sostenible/>

🌐 Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura. (2021). *Un informe de la UNESCO muestra que el refuerzo de las capacidades en ingeniería es crucial para alcanzar los ODS*. <https://www.unesco.org/es/articulos/un-informe-de-la-unesco-muestra-que-el-refuerzo-de-las-capacidades-en-ingenieria-es-crucial-para>

🌐 Pienza Sostenible. (2023). *México y la Agenda 2030*. <https://www.pienzasostenible.com/mexico-y-la-agenda-2030/>

## RECONOCIMIENTOS

Se agradece a la Dirección General del Personal Académico (DGAPA) de la UNAM por el apoyo proporcionado para la elaboración del presente libro de texto “Fundamentos de la Ingeniería Mecánica y Mecatrónica” a través de su Programa de Apoyo a Proyectos para la Innovación y Mejoramiento de la Enseñanza (PAPIME), correspondiente a la convocatoria 2024 para el proyecto PE110024.

Se agradece a la Ing. Diana Paula Vázquez Lezama por su destacada participación como coautora de esta obra. Su experiencia profesional y aportaciones en materia de estructura, innovación y coherencia contribuyeron significativamente al fortalecimiento conceptual y metodológico del texto, así como a su calidad académica y técnica.

Se agradece al Ing. Marco Antonio Montelongo Alquicira, becario del proyecto, por su participación en las labores de revisión de redacción y ortografía, verificación de referencias bibliográficas, comprobación de la funcionalidad de códigos QR y enlaces a recursos digitales, así como por la realización de adecuaciones en las imágenes incluidas en la presente obra.

Todo libro técnico guarda, en su interior, una promesa: la de acompañar al lector en un viaje de descubrimiento que no solo acumule conceptos, sino que le muestre cómo esos conocimientos se enlazan para dar forma a soluciones tangibles. El presente libro responde a esa promesa al reunir, en un mismo hilo conductor, fundamentos científicos, técnicas de análisis, herramientas de diseño y reflexiones sobre la responsabilidad del ingeniero frente a los desafíos contemporáneos.

La formación en ingeniería no puede reducirse a una colección aislada de fórmulas o procedimientos. El verdadero aprendizaje ocurre cuando el estudiante logra identificar cómo las matemáticas se convierten en lenguaje universal de la física, cómo la materia responde a leyes que condicionan sus propiedades, cómo los mecanismos transforman el movimiento en trabajo útil, o cómo la electrónica traduce señales en información que permite ejercer control.

Este libro fue concebido justamente para mostrar esas interacciones, de manera progresiva y con ejemplos que vinculan teoría y práctica. La riqueza de ejemplos, casos y aplicaciones busca hacer más cercana la teoría, de modo que lo aprendido pueda trasladarse con facilidad al aula, al laboratorio o al entorno laboral.

La obra culmina con un recordatorio indispensable: ninguna tecnología es neutra. El ingeniero debe preguntarse por la huella energética de sus diseños, por el origen de los materiales, por el impacto en la sociedad y por la compatibilidad con el desarrollo sostenible.

En síntesis, este libro es una invitación a pensar la ingeniería como un proceso integral: desde la abstracción matemática hasta la decisión ética, desde la comprensión de materiales y estructuras hasta la integración de sistemas complejos, desde la energía como motor de la técnica hasta la sostenibilidad como horizonte. La meta es clara: formar ingenieros capaces de interpretar el mundo, transformarlo con creatividad y hacerlo sostenible para las generaciones futuras.