



Revista

# Ciencia *y Naturaleza*

**Más allá de lo evidente:**  
aprendizaje en  
robótica médica



**Número Especial**

**El Control Automático  
en la Cotidianeidad**

**Mayo-Agosto 2023**

[www.revistacyn.com](http://www.revistacyn.com)

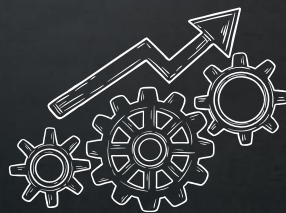


# Contenido

**Ciencia**  
sin complicaciones

7

*Transforma*



*el Mundo*

**Energías limpias**  
aplicando las matemáticas

9



**Formula E,**  
una carrera por la innovación

23





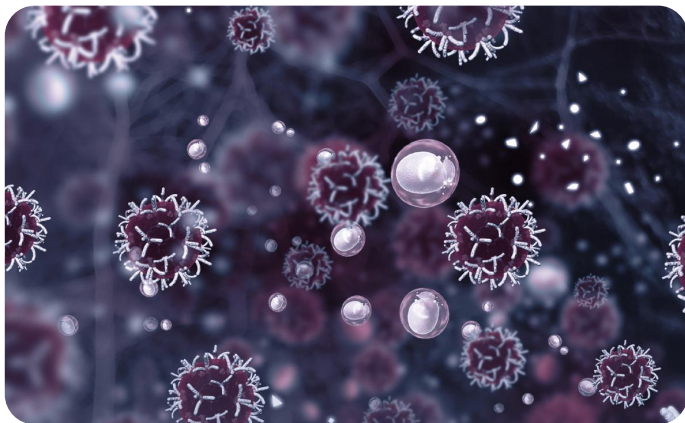
**Más allá de lo evidente:  
aprendizaje en robótica  
médica**

37



**Algoritmos de control  
para el aprovechamiento de  
las energías renovables**

53



**Modelado de enfermedades  
infecciosas mediante  
ecuaciones integrales con  
retardo**

65



**Importancia del Internet  
de las Cosas:  
la Automatización de Procesos  
Industriales**

79



## ¿Quiénes Somos?



Revista

**Ciencia**

*y Naturaleza* esta formada por la comunidad de estudiantes, científicos, técnicos y profesores que dirigen sus esfuerzos en la divulgación y difusión de la Ciencia.

## Nuestro Objetivo



Revista

**Ciencia**

*y Naturaleza* tiene el objetivo de integrar y divulgar temas actuales de Ciencias, Naturaleza, Tecnología y Educación para crear un foro de discusión y aprendizaje para Latinoamérica. Es un espacio con características innovadoras para comunicar temas trascendentes y actuales del quehacer científico.

Revista

**Ciencia**

*y Naturaleza* número 02, correspondiente a mayo-agosto de 2023, es una publicación electrónica cuatrimestral, editada por el Dr. David A. Paz García. <https://www.revistacyn.com/>, editor.ciencia.naturaleza@gmail.com. Bahía del Espíritu Santo 217A, Paraiso del Sol, La Paz, Baja California Sur, C.P. 23085, México. Tel. (612) 1835084. Reservas de Derechos al Uso Exclusivo: 04-2024-112112160400-102, ISSN: En trámite; ambos otorgados por el Instituto Nacional del Derecho de Autor. El contenido de los artículos es responsabilidad exclusiva de los autores y no refleja de manera alguna el punto de vista del Editor ni del Comité Editorial. Queda prohibida la reproducción total o parcial del contenido por cualquier medio sin la autorización expresa del Fundador y Editor en Jefe.





# Directorio



## Comité Editorial

**Dr. David A. Paz García**

Fundador y Editor en Jefe

**M.C. Eduardo Aguayo Leyva**

Editor Asociado

**Dra. Beatriz Escobar Morales**

Editor Asociado

**Dra. Selene Ramos-Ortiz**

Editor Asociado

**Dra. Nuvia Kantún Moreno**

Editor Asociado

**Lic. Diana C. Sánchez Toyos**

Editora Asociada

**Dr. Jorge Rocha**

Editor Asociado

**Dr. Alejandro Valdez Mondragón**

Editor Asociado



## Diseño

**Yareli Tiburcio**

**Isis G. Tovar De La Cruz**



Revista de Divulgación y Difusión





# Revisores

## Jesús Morales Valdez

Co-Editor. Colegio de Ciencia y Tecnología, Universidad Autónoma de la Ciudad de México

## Martha B. Saldívar Márquez

Co-Editor. Centro de Investigación de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional

## Liliam Rodríguez Guerrero

Área Académica de Computación y Electrónica. Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo

## Leopoldo Gil Antonio

TecNM: Tecnológico de Estudios Superiores de Jocotitlán

## Pedro Aguilar Álvarez

TecNM, Instituto Tecnológico de Hermosillo

## Martha Ofelia Valle Solís

Universidad Autónoma de Nayarit, Unidad Académica de Enfermería

## Mario Neria Ramírez

Co-Editor. Instituto de Investigación Aplicada y Tecnológica. Universidad Iberoamericana.

## Andrés J. Rodríguez Torres

Departamento de Control Automático, CINVESTAV-IPN

## Reynaldo Ortiz Pérez

CINVESTAV-IPN

## Jose L. Luna Pineda

Instituto Politécnico Nacional

## Mario A. López Pacheco

Instituto Politécnico Nacional

## Reynaldo Ortiz Pérez

CINVESTAV-IPN

Revisores Anónimos

gracias



# Ciencia sin complicaciones

Cada día representa una oportunidad para hacer mejor las cosas, es así como se puede hacer la diferencia. Las grandes revoluciones comenzaron con una idea y la determinación para hacerla realidad.



En este número especial, la meta es difundir las diferentes tecnologías y desarrollos que están al servicio y beneficio de la sociedad. Se trata del **control automático en la cotidianeidad**, un área multidisciplinaria de la ingeniería, el cual trata de mejorar el desempeño de los sistemas dinámicos mediante la retroalimentación de su estado actual.

Las energías renovables como la eólica y solar son cada vez más importantes como alternativas para producir electricidad, debido a los efectos que el ser humano causa al planeta. Yoswaldo Gómez y Eduardo Campos nos explican que la energía producida debe de ser procesada, y para ello, las matemáticas son utilizadas para modelar y analizar el comportamiento de los inversores que son los dispositivos que modulan la corriente eléctrica (página 9). Alejandra Guerra y colaboradores nos cuentan sobre la formula E (pág. 19), una competencia entre autos eléctricos donde la innovación del desarrollo del vehículo en conjunto con el control del motor mediante algoritmos y reducción de la huella de carbono y sus desechos han hecho esta competencia algo sin igual.

**Nuestra Portada** esta dedicada a conocer los avances del aprendizaje en robótica médica. Alejandro Gutierrez y Miguel Padilla, nos llevan de la mano en un excelente artículo de divulgación, pasando por la historia antigua y personajes famosos, donde las capacidades de deducción, las matemáticas y modelos predictivos permiten ver más allá de lo evidente para conocer sobre las aplicaciones de robótica médica. Además, nos cuentan de los avances de sus investigaciones utilizando la teoría de control en sistemas robóticos (pág. 31).

Por su parte, Irandi Gutiérrez y colaboradores nos dan a conocer sobre los algoritmos de control, la conversión de energía eléctrica y modulación para el aprovechamiento de las energías renovables (pág. 37). Reynaldo Ortiz y colaboradores nos explican cómo se pueden utilizar modelos matemáticos para describir la propagación de las enfermedades y por tanto para ayudar a monitorear y tomar medidas ante epidemias (pág. 55).

Finalmente, la revolución digital trajo consigo un aumento en la automatización y control de procesos de fabricación mediante la electrónica y herramientas de información tecnológica. Jesus Morales y Rosario Salazar nos relatan sobre las revoluciones industriales, la interconexión de dispositivos llamado el internet de las cosas y la importancia de la automatización de procesos en la industria como sus retos (pág. 79).

Disfruta del contenido, aprende y transforma el Mundo!



*Dr. David A. Paz García*

Fan de la Naturaleza y aprendiz de Científico  
Editor en Jefe







# Energías limpias aplicando las matemáticas



Yoswaldo Gómez Cabrera  
Eduardo Campos Mercado





# Energías limpias aplicando las matemáticas



**Cómo citar este artículo:** Gómez-Cabrera Y, Campos-Mercado E. 2023. Energías limpias aplicando las matemáticas. Revista Ciencia y Naturaleza 02 (1031): 9-21.



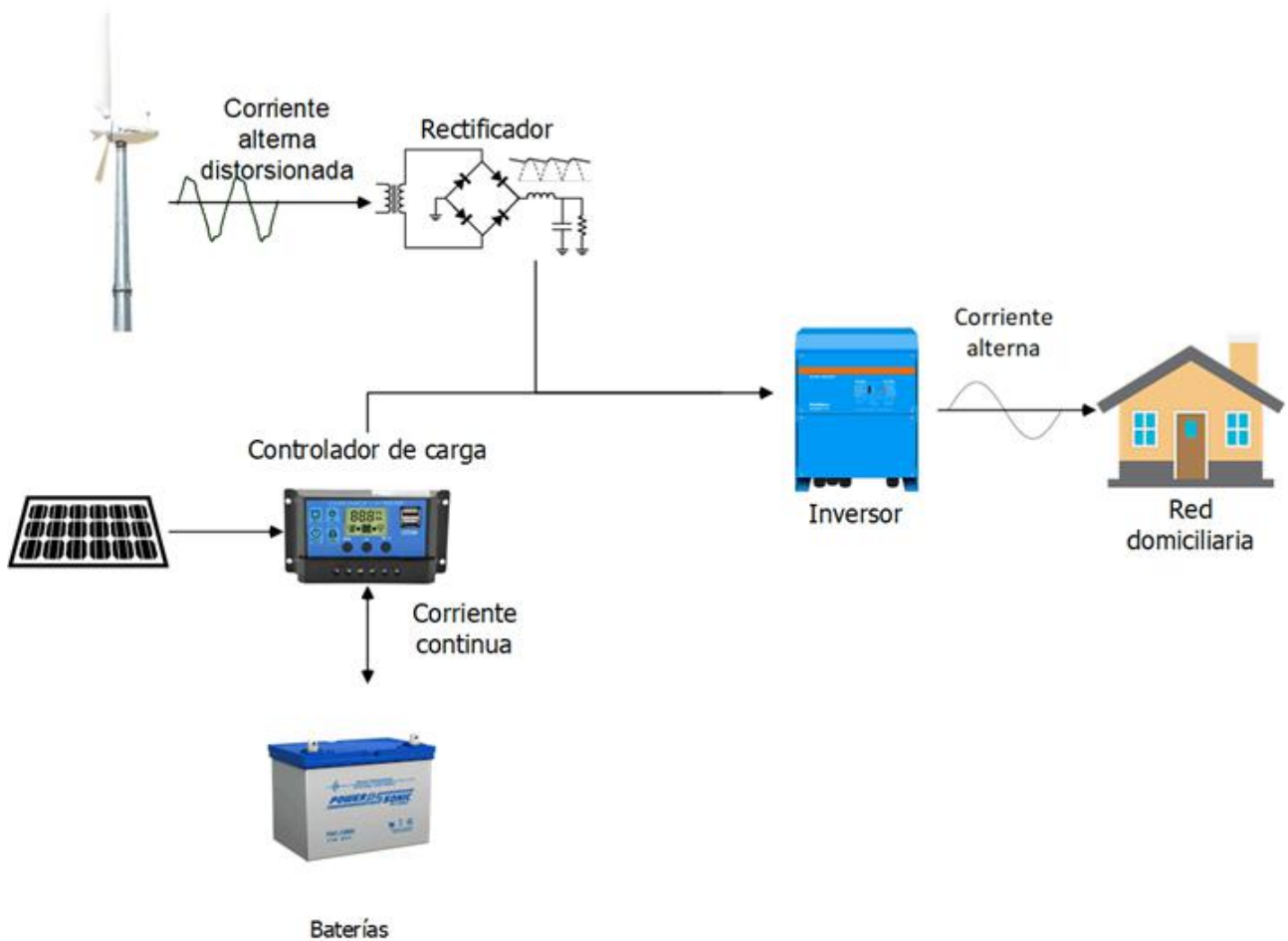


## L La relevancia de las energías limpias

Las energías renovables cada vez cobran mayor relevancia y se prepara el entorno para la reducción de emisiones de carbono a la atmósfera de las economías en las grandes potencias, lo cual favorece al cuidado del planeta. Por ejemplo, en el periódico el País [1] el autor del artículo “Recta final en las negociaciones de Glasgow” señala que Estados Unidos y China tienen planes similares para dejar de depender de los combustibles fósiles y que se pondrá en marcha en las próximas décadas. La energía eólica y solar, se perfilan como las más populares para producir energía eléctrica, esto gracias a la disponibilidad de la energía cinética del viento y a la radiación solar que se tiene en todo el planeta. Cabe mencionar que los aerogeneradores son capaces de aprovechar entre el 40% y 50% de la energía eólica disponible, casi alcanzando el límite teórico del 59% [2].



La implementación de paneles solares y aerogeneradores para producir energía eléctrica ha permitido el crecimiento de los sistemas de generación distribuida, que básicamente es producir energía eléctrica en el sitio donde se requiere (Figura 1). La energía producida tiene que ser procesada por un inversor electrónico de potencia, con la finalidad de obtener las características que marca el Sistema Eléctrico Nacional para evitar daños producidos por el sobrecalentamiento (Figura 2).



**Figura 1.** Esquema general de la generación distribuida eólico-solar. La corriente del aerogenerador es alterna, pero contiene mucho ruido en forma de armónicos, por eso hay que tratarlo e implementar un rectificador junto con el inversor para obtener corriente alterna pura.



**Figura 2.** Problemas más comunes que puede ocasionar los armónicos en la red eléctrica. Causa desde deterioro de cables hasta incendios de máquinas eléctricas (Imagen obtenida de [accentgroup.com](http://accentgroup.com)).

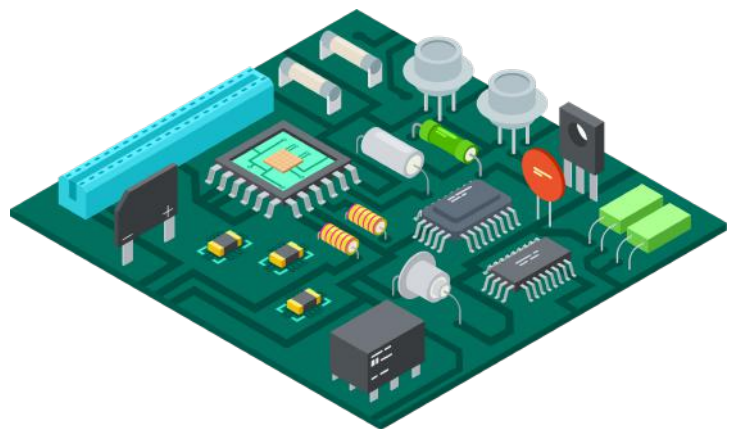
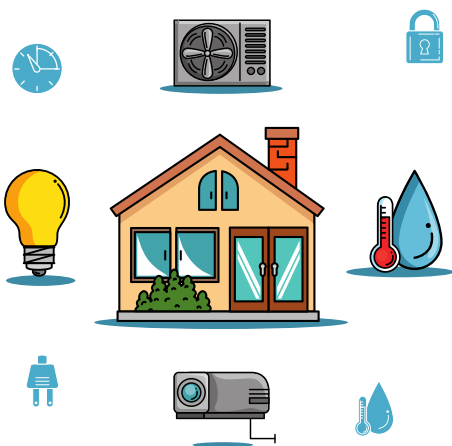


## ¿Qué es un inversor?

Los inversores electrónicos de potencia son dispositivos que permiten convertir la Corriente Continua (CC) en Corriente Alterna (CA) como la que encontramos en los enchufes de una casa. Existen distintos tipos de inversores electrónicos de potencia, pero básicamente todos trabajan con el mismo principio de operación que es su etapa de conmutación, potencia y filtrado.

Es importante mencionar que no todos los inversores electrónicos de potencia producen una señal de corriente alterna sinusoidal, esto es con una forma definida por la función seno. Algunos por simplicidad y reducción de costo, producen una onda cuadrada que degrada la calidad de la energía eléctrica producida, provocando los problemas de sobrecalentamiento y daños a máquinas eléctricas (Figura 1).

Entre los inversores electrónicos de potencia con más aplicaciones en el hogar, destacan los inversores monofásicos gracias a su portabilidad y a sus características eléctricas compatibles con la mayoría de los dispositivos con los que interactuamos a diario. Los principales elementos que forman un inversor monofásico de puente completo son: circuitos compuestos de transistores, bobinas, capacitores y circuitos integrados que se encargan de controlarlo.

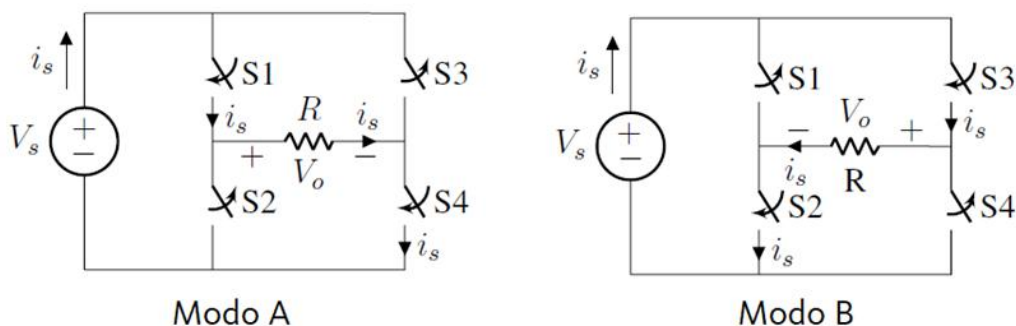




Los cuatro transistores (S1, S2, S3 y S4) conforman la etapa de potencia y funcionan a manera de interruptores que están dispuestos en un arreglo similar a la letra H, (Figura 3). Los interruptores se activan en parejas siendo que un par conducen corriente y el otro par no, cuando se activa la pareja S1 y S4 se produce una tensión positiva con magnitud igual a la de la fuente de CC, activando S2 y S3 tendremos una tensión negativa con la misma magnitud a la de la fuente de CC (Figura 3).

La etapa de conmutación se encarga de gobernar la activación de los transistores de la etapa de potencia mediante una modulación por ancho de pulsos (PWM, por sus siglas en inglés, ver cuadro de conceptos). Esta etapa está constituida por el microcontrolador, un circuito integrado que funciona a manera de una computadora ejecutando la acción de control programada en ella y generando la señal PWM. También existen otros circuitos de acondicionamiento que se encargan de retroalimentar al microcontrolador con señales del exterior para que este las tome en cuenta en sus cálculos.

La etapa de filtrado se conforma por bobinas y capacitores, estos conforman un filtro capaz de reducir el ruido causado por los armónicos en la corriente eléctrica mediante la eliminación de las frecuencias altas contenidas en la corriente eléctrica [3].



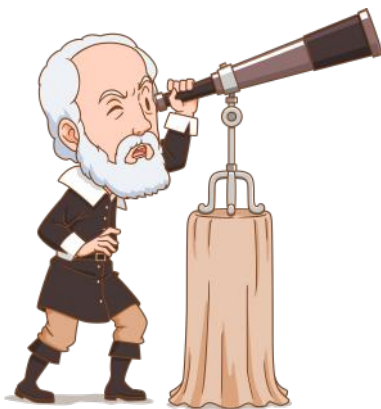
**Figura 3.** Arreglo de transistores en el inversor electrónico de potencia. En el modo A tendremos un voltaje positivo en la carga igual al de la fuente de alimentación del inversor, y en el modo B el voltaje se invierte en la carga.



## Las matemáticas y los inversores

Para poder analizar el comportamiento de los inversores es necesario representar su operación mediante ecuaciones matemáticas. La modelación matemática permite hacer una representación simplificada de un fenómeno físico, social o biológico mediante ecuaciones o fórmulas matemáticas. Los inversores electrónicos de potencia son modelados a través de leyes físicas que estudian los fenómenos eléctricos.

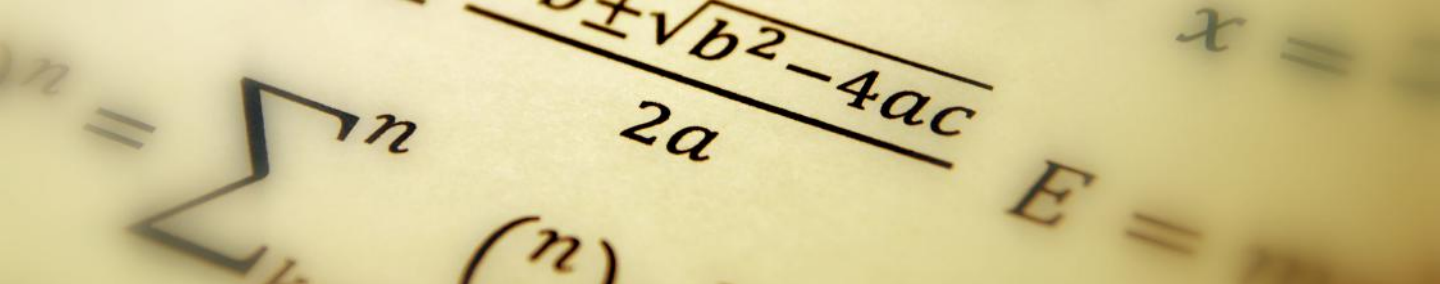
A partir de la modelación matemática del inversor electrónico de potencia es posible analizar su comportamiento para proponer algoritmos de control que alcancen el objetivo de regular el voltaje de salida de la misma. Es aquí donde realmente toma importancia la aplicación de las matemáticas, con la finalidad de mejorar el desempeño de un sistema.



**Las matemáticas son el lenguaje con el que Dios ha escrito el universo**

**Galileo Galilei**

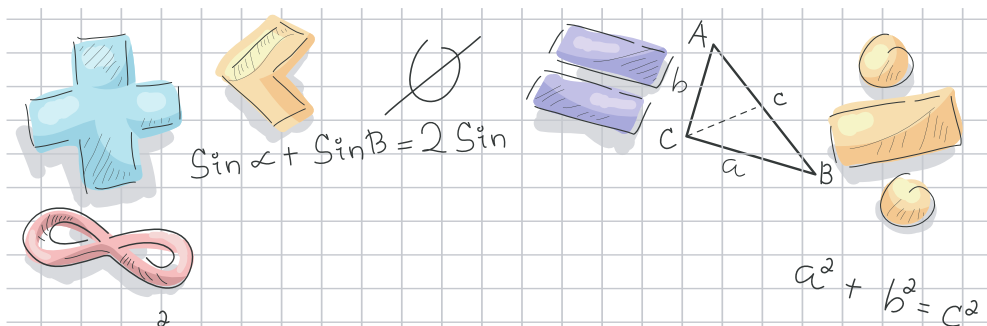
Los sistemas de control son capaces de manipular una o varias variables del sistema, un ejemplo es cuando una persona toma una ducha. Para regular la temperatura del agua, la persona ajusta las válvulas de agua fría y caliente. Si el agua caliente fuera de repente más caliente (perturbación de temperatura), su piel la sentiría y la persona actuaría en respuesta cerrando la válvula del agua caliente o en su defecto abriendo la del agua fría.



En este sencillo ejemplo estamos describiendo un sistema que controla la temperatura del agua con la que se baña una persona, en este caso el individuo en cuestión es el que siente (sensor) y el que actúa para controlar la temperatura (actuador).

En el caso de los inversores electrónicos de potencia la variable que nos interesa controlar es la señal de voltaje que produce este sistema; para esto se requiere de sensores, interruptores de potencia, microcontroladores y en especial de un algoritmo de control que conmute a los interruptores para que el inversor genere un voltaje que alcance la referencia de voltaje de alterna. Es importante señalar que el ingeniero de diseño del sistema de control tiene la tarea de seleccionar el algoritmo de control adecuado para el sistema, además de sintonizar el controlador para que la salida del sistema alcance un voltaje sinusoidal con amplitud constante y con una frecuencia igual a la red eléctrica.

Existen varios algoritmos de control, solo por mencionar algunos tenemos al controlador PID y sus variantes como el PID no lineal que emplea un algoritmo para la modificación de sus ganancias [4], los controladores H infinito [5], controladores lineales cuadráticos, técnicas de control para sistemas no lineales como el control por modos deslizantes [6], backstepping y otras nuevas técnicas basadas en inteligencia artificial. Para este trabajo se empleó una técnica de control no lineal conocido como *backstepping* (ver cuadro de conceptos, [7]).







## Simulación del inversor

La simulación por computadora de un sistema físico que en este caso es un sistema eléctrico permite estudiar y predecir su comportamiento sin tener que fabricarlo, poner en riesgo a alguien, destruir o dañar un dispositivo. Gracias a la simulación podemos analizar el comportamiento del inversor y anticiparse a los problemas que puedan darse al fabricarlo y ponerlo en operación.

El modelo matemático del inversor esta dado por las ecuaciones (1) y (2), donde los parámetros E, L, C y R son constantes cuyos valores se muestran en la Tabla 1. Con el modelo matemático se diseña la ley de control mediante la técnica backstepping, obteniendo las ecuaciones del controlador mostrado en las ecuaciones (3-6), donde c1 y c2 son las ganancias del controlador las cuales son constantes positivas.

**Tabla 1.** Parámetros usados en el inversor en la simulación.

Parámetro	Valor
Fuente de voltaje, E	200 V
Inductancia, L	220 $\mu$ H
Capacitancia, C	200 $\mu$ F
Resistencia, R	20 $\Omega$

$$C \frac{dv_C}{dt} = i_L - \frac{v_C}{R} \quad (1)$$

$$L \frac{di_L}{dt} = Eu - v_C \quad (2)$$



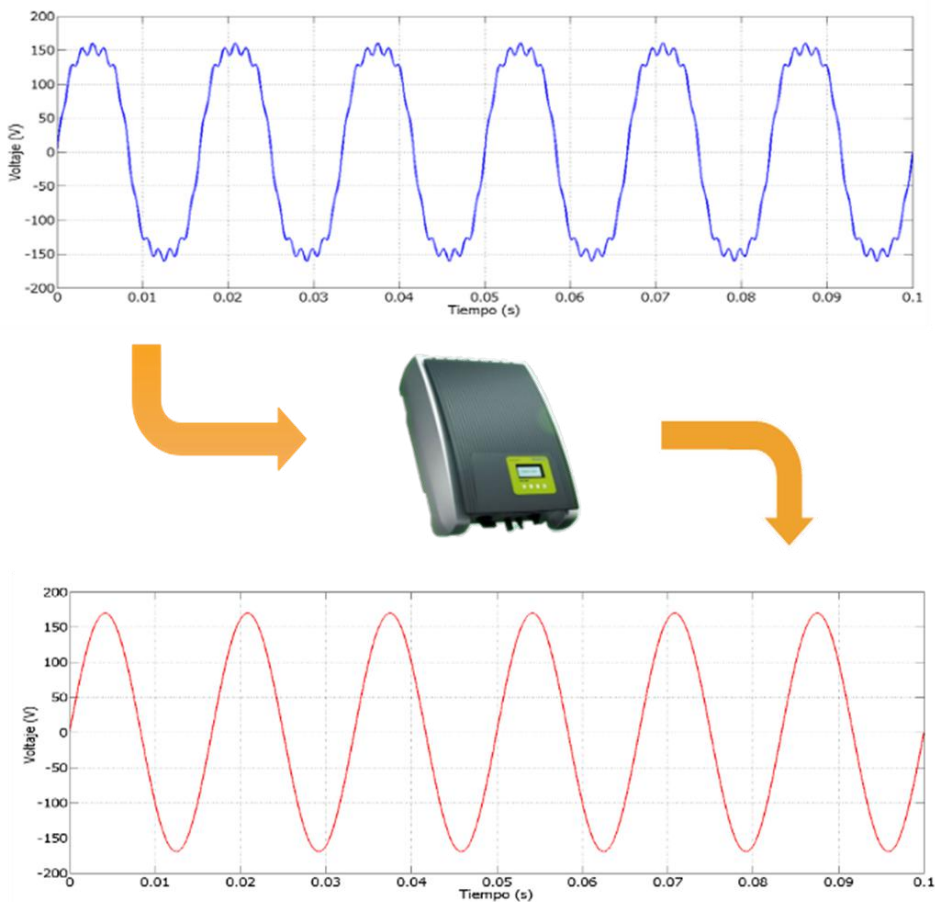
$$z_1 = v_c - v_r \quad (3)$$

$$z_2 = \alpha_1 - \frac{1}{C} i_L - \dot{v}_r \quad (4)$$

$$\alpha_1 = -c_1 z_1 + \frac{1}{RC} \quad (5)$$

$$u = \frac{LC}{E} \left( -c_2 z_2 - z_1 + \frac{v_c}{LC} + \frac{\partial \alpha_1}{\partial v_c} \dot{v}_c + \frac{\partial \alpha_1}{\partial v_r} \dot{v}_r + \ddot{v}_r \right) \quad (6)$$

Como se observó en la Figura 1, la tensión de entrada del inversor puede ser desde un panel fotovoltaico en donde se produce una tensión de corriente continua o de una turbina eólica, donde la tensión es de corriente alterna y que después de la rectificación pasará a corriente continua. Si se conectase directamente un aerogenerador a la red eléctrica sin pasar por el inversor, entonces obtendríamos un resultado similar en la parte superior de la Figura 4. En cambio, rectificar e implementar al inversor electrónico de potencia ayuda a eliminar cualquier distorsión de la señal eléctrica como se observa en la parte inferior de la Figura 4. Los dos principales índices para comparar el voltaje que se obtiene antes y después de implementar un inversor electrónico de potencia son el voltaje eficaz y el índice de distorsión armónica total, la cual se calcula como la suma de los valores eficaces de los armónicos dividido por el valor eficaz de la señal fundamental; para obtener esta descomposición en armónicos se usa la transformada de Fourier. En la Tabla 1 se muestran los resultados del inversor operando sin lazo de control, obteniendo un índice de distorsión armónica mayor al 5% permitidos en la norma IEEE 519-2014; en cambio, aplicando la técnica de control backstepping se obtiene una reducción significativa.



**Figura 4.** Al emplear al inversor electrónico de potencia podemos mejorar la calidad de la energía.

En conclusión, las técnicas o estrategias de control son importantes para los inversores electrónicos de potencia debido a que es necesario que estos operen en diferentes condiciones adaptándose a cambios de carga. Ya sea que en la red eléctrica de nuestros hogares necesitemos de más corriente o que el generador tenga un aumento o disminución de la potencia que puedan suministrar a la red. Las técnicas de control se utilizan para garantizar que los inversores operen dentro de sus límites y produzcan una energía eléctrica estable y de buena calidad. 🍀



**Tabla 2.** Resultados obtenidos de la simulación.

Inversor operando:	Índice de distorsión armónica total	Voltaje eficaz del inversor
En lazo abierto (sin controlador alguno)	7 %	121.2 V
Aplicando la técnica de control backstepping	0.057 %	119.8 V

## Agradecimientos

A la Universidad del Istmo por prestar las instalaciones. Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, por su apoyo económico en la Maestría en Ciencias de la Energía Eólica con beca CVU 1154548.

### *Para Consulta*

1. El País. 11 de noviembre del 2021. Recta final en la negociación en Glasgow. China y Estados Unidos anuncian un plan conjunto para reducir emisiones.
2. Rodríguez-Amenedo JL, Burgos-Díaz J, Arnalte-Gómez S. 2003. Sistemas eólicos de producción de energía eléctrica. Madrid, España. Rueda. 447 pp.
3. Davis N. 2017. Alternating Current, Chapter 8: Low pass filters. All about circuits. <https://www.allaboutcircuits.com/textbook/alternating-current/chpt-8/low-pass-filters/>
4. Campos-Mercado E, Mendoza-Santos ES, Torres-Muñoz JA et al. 2021. Nonlinear controller for the set-point regulation of a buck converter system. Energies 14, 5760.
5. Sánchez-Peña R S. 1999. Introducción a la teoría del control robusto. Asociación Argentina del control automático. Argentina. 338 pp.
6. Mantz R L. 2020. Modos deslizantes de primer orden: Fundamentos y aplicaciones. En Control por modos deslizantes. <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/119828>
7. Khalil H. 2002. Nonlinear designs tools. Backstepping. Nonlinear systems 508-603. Upper Saddle River, NJ. Prentice Hall.



## Cuadro de conceptos

**PWM.** La modulación por ancho de pulso (PWM, por sus siglas en inglés) es una técnica de conmutación que se emplea en la electrónica digital para poder representar valores analógicos a través de pulsos digitales. Con esta técnica el ancho de pulso se promedia a un valor de voltaje analógico. También se usa para modular una señal analógica a través de una serie de pulsos digitales discretos.

**Backstepping.** Es una técnica de control no lineal, recursiva, que permite dividir un sistema no lineal complejo en subsistemas siempre que sea estrictamente realimentado. Al dividir el sistema original se divide el problema obteniendo para cada subsistema una ley de control que lo estabilice y luego pasando al siguiente subsistema de manera escalonada.

**Calidad de energía.** Energía eléctrica con características y condiciones que permiten mantener la operación constante y sin que afecte el desempeño o provoque fallas de equipos o máquinas eléctricas. Las condiciones pueden ser un factor de potencia unitario o cercano a la unidad o mantener la distorsión armónica por debajo de cierto valor.

Crédito de imágenes en orden de aparición: piyaset (Getty Images, GI), BRGFX, zhaojiankang (GI), seagull (pixabay), 3k des111gn, Malchev, BlueRingMedia blueringmedia, Billion Photos, Giuseppe Ramos S, ixdesignlab, Elena Photo, sasirin pamai's Images, Lek Suwarin, fbatista72 (GI), BNPDesignStudio, crstrbrt (GI), masyusha (GI), Shaiith (Getty Images Pro), PIRO4D (pixabay), Jacob Lund.



**Yoswaldo Gómez Cabrera**

Ingeniero en Mecatrónica por la Universidad Tecnológica de la Mixteca. Actualmente estudiante de la maestría en Ciencias de la Energía Eólica por la Universidad del Istmo, campus Tehuantepec.  
Contacto: [waldos\\_96@hotmail.com](mailto:waldos_96@hotmail.com)



**Eduardo Campos Mercado**

Doctor en Ciencias con especialidad en control automático. Investigador por México CONAHCYT-Universidad del Istmo.  
Contacto: [ecampos@conacyt.mx](mailto:ecampos@conacyt.mx)

Revista



# Ciencia *y Naturaleza*



[www.revistacyn.com](http://www.revistacyn.com)



**¡Únete a nuestra  
comunidad!**

**No te pierdas las últimas  
Publicaciones**

**¡Siguenos en Redes Sociales!**





# Formula E, una carrera por la innovación

Alejandra Icxih de la Guerra Carrasco,  
Axel Alejandro Coronado Andrade  
Luis Álvarez-Icaza Longoria

Artículo



# Formula E, una carrera por la innovación



**Cómo citar este artículo:** De la Guerra-Carrasco AI, Coronado-Andrade AA, Alvarez-Icaza Longoria LA. 2023. Formula E, una carrera por la innovación. Revista Ciencia y Naturaleza 02 (1034): 23-36.







L

a Formula E es una carrera entre autos eléctricos monoplace que se realiza en las calles de varias ciudades del mundo. Esta carrera, que cuenta con 11 equipos o escuderías, está en su novena temporada este 2023. Como se menciona en la página oficial de la Formula E, la idea de esta competencia se originó en 2011 como un sueño de su fundador Alejandro Agag y Jean Todt el presidente, en ese entonces, de la Federación Internacional de Automovilismo (FIA por sus siglas en inglés). Alejandro Agag es un político español que encontró en la combinación de los deportes y el ecologismo una nueva carrera. En una entrevista mencionó que su principal motivación para adentrarse en el mundo de los vehículos eléctricos fueron sus hijos. Ser padre le hizo preguntarse qué sería del planeta y qué podría hacer él para ayudar a afrontar los problemas ambientales.



La Formula E tuvo muchas dificultades para arrancar porque se estaba proponiendo algo muy diferente a lo que se hacía en el mundo de las carreras. A pesar de que en algún momento se tuvieron grandes problemas financieros, el proyecto hoy es exitoso e incluso se ha expandido con más escuderías y patrocinadores.



## Un recorrido electrizante

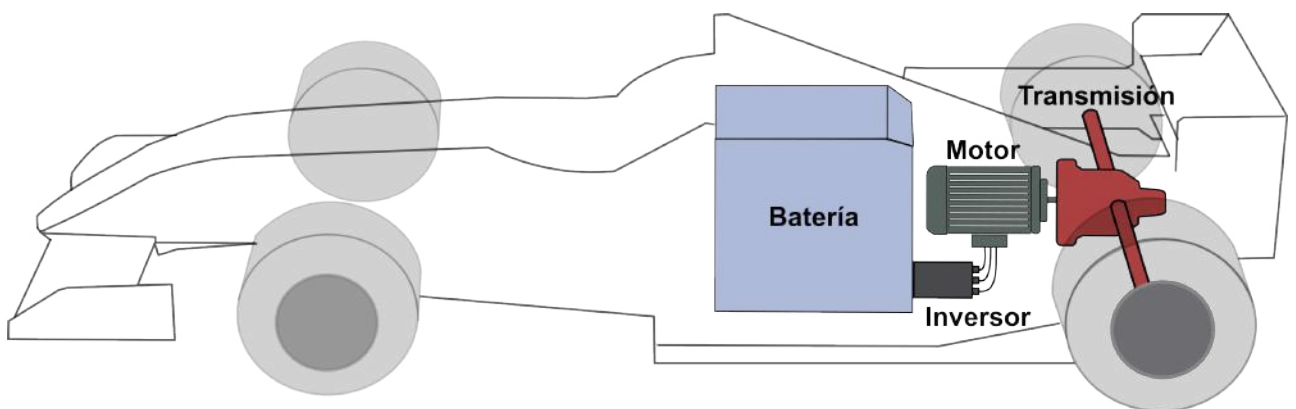
La historia de la Formula E se divide en tres etapas llamadas generaciones que abarcan 9 temporadas y que se describen a continuación. Generación 1 (2014-2017). En la figura 1 se muestra un vehículo con tracción trasera. En esta figura también se muestran los elementos básicos de un vehículo eléctrico: motor eléctrico, inversor, batería, transmisión y llantas.

La Formula E arrancó su primera temporada en 2014 con la primera generación, donde todas las escuderías usaban el mismo auto, el Spark-Renault SRT 01. Este vehículo también tenía tracción trasera con el motor eléctrico montado longitudinalmente. Un inversor iba colocado sobre la batería en la parte trasera del vehículo. El inversor es un dispositivo eléctrico que se encarga de transmitir la señal de control al motor eléctrico. Varios equipos de enfriamiento se distribuyen entre estos elementos para evitar sobrecalentamientos. Desde el inicio, las reglas han determinado que se debe utilizar una transmisión para conectar el movimiento del motor a las llantas. Con la intención de que las llantas duren toda la carrera, el fabricante Michellin, las diseñó empleando un solo material.





La batería fue construida por el fabricante Williams Advanced Engineering de ion-litio con un peso de 250 kilogramos aproximadamente. El diseño limita la potencia de la batería a 200 kW (268 hp) durante la calificación y a 180 kW (240 hp) durante la carrera. Los hp son una medida propuesta por James Watt para comparar la potencia de una máquina de vapor con la potencia de los caballos de tiro. En la actualidad se ha extendido este concepto para comparar motor de combustión, turbinas, motores eléctricos, etc. La limitación de la batería implica que se limita la velocidad máxima del vehículo. En cuanto a la aceleración, los autos de esta generación podían ir de 0 a 100 kilómetros por hora en 3 segundos. Lo más curioso en esta generación, es que la batería no duraba lo suficiente para el recorrido completo. Además, cambiar la batería en plena carrera era algo complicado y riesgoso, por lo que se usaban dos autos para completar las carreras. Algo que distingue a la Formula E es que, al usar el mismo auto, o un auto similar, las carreras son más competidas que en la Formula 1 donde suelen ganar sólo dos o tres escuderías.

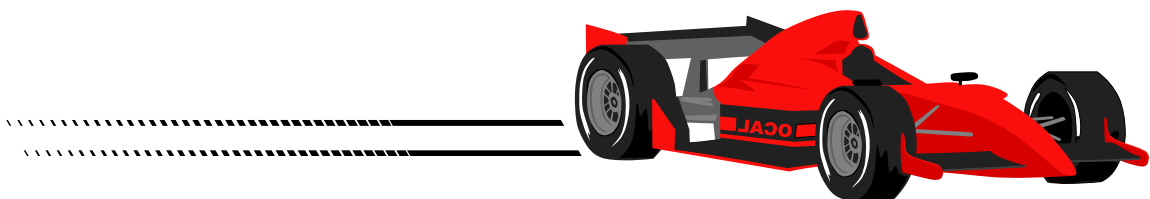


**Figura 1.** En la figura se muestra la ubicación y tamaño aproximados de la batería, el motor, el inversor y la transmisión.



Generación 2 (2018-2021). La segunda generación trajo muchos cambios: un vehículo más ligero, más pequeño y una mejor batería. Esto último, aumentó la potencia del vehículo a 250 kW y eliminó la necesidad de detenerse en los pits, lo que marcó una diferencia con respecto a la Formula 1. Pero lo más importante fue, que cada escudería pudo usar su propio motor, inversor, transmisión y sistema de enfriamiento. Lo anterior, derivó en diseños distintos que ayudaron a darle personalidad a cada competidor. También, a partir de esta generación, las escuderías comenzaron a usar transmisiones más pequeñas y ligeras con menos engranes. En estas dos generaciones se usaban dos tipos de frenos: hidráulico y el modo regenerativo.

Otra innovación de la generación 2 fue el Attack mode, o modo de ataque, donde el vehículo obtiene un aumento momentáneo de potencia al pasar sobre las zonas indicadas de la pista donde hay sensores enterrados que registran la presencia de un vehículo, y a través de un control central, se activa un aumento de potencia para ese vehículo. Este modo representó un reto para los pilotos, dado que las zonas de activación suelen desviar al vehículo del recorrido más conveniente a cambio de obtener la potencia necesaria para poder rebasar a otros competidores. En esta generación también se introdujo el Fan boost, donde los aficionados votan por 5 pilotos que obtienen una inyección de potencia durante 5 segundos en la segunda parte de la carrera. Asimismo a partir de esta generación, se generalizó el uso de halos, que son barras curvas de titanio que rodean la cabina del piloto diseñadas para protegerlo en el caso de una colisión o accidente. En los halos de cada competidor se instalaron leds que cambian de color para indicarle al público que el auto se encuentra usando el Fan boost si la luz es magenta o el modo de ataque si la luz es azul.



**Generación 3 (2022-presente).** En esta generación, la directiva de la Formula E planteó un rediseño del auto para disminuir peso e incluir un motor más poderoso. En total, el nuevo diseño restó 60 kilogramos al peso total del auto al eliminar el freno hidráulico y disminuir el tamaño de la batería. Además, la generación 3 es toda una revolución al incluir una transmisión delantera. Lo que quiere decir que en esta generación la potencia aumentará a 350 kW generados en la tracción trasera, mientras los 250 kW de la tracción delantera se destinarán a la carga de la batería y no podrán ser utilizados para tracción. Esto implica que aproximadamente el 40% de la energía usada en la carrera se obtendrá en el momento del frenado, contra un 25% que podían obtener los vehículos de la generación 2. Así los vehículos podrían alcanzar velocidades de aproximadamente 320 kilómetros por hora siempre que la pista se los permita.

**Lo que distingue a la Formula E es que, al usar el mismo auto, o un auto similar, las carreras son más competidas que en la Formula 1 donde suelen ganar dos o tres escuderías.**

## ¿Qué es el control?

El control es un algoritmo, también llamado controlador, que nos ayuda a obtener un comportamiento deseado en alguna señal o variable de interés. Los controladores funcionan manipulando el comportamiento de un sistema a partir del cambio de una señal de error. El error es la comparación entre la señal de interés deseada y la señal de interés medida. Se dice que el control usa retroalimentación cuando la señal del error se usa para modificar la señal del controlador. También existen controladores que no usan la señal de error y que basan sus algoritmos en el uso de temporizadores como en una lavadora.

La medición de las señales se hace usando sensores, el control se programa en computadoras o en microcontroladores y se implementa usando actuadores. Los actuadores son elementos que comunican la señal del controlador al sistema a controlar. Por ejemplo, si el objetivo es llenar un tanque, una válvula puede ser el actuador, el sistema a controlar es el tanque, el control puede ser un relevador y el sensor sería el flotador.



## Frenado regenerativo

Varios vehículos eléctricos usan sólo un pedal, cuando el conductor pisa el pedal se acelera, pero cuando se quita el pie del pedal se frena. Al acelerar, el motor convierte energía eléctrica de la batería en movimiento. Por el contrario, en el frenado el motor pasa a modo generador y ahora convierte el movimiento en energía eléctrica que se almacena en la batería.

El frenado regenerativo ha sido fundamental para permitir que los vehículos terminen las carreras con una sola batería. En el caso de los vehículos de la generación 3, el frenado regenerativo se puede hacer con cualquiera de los dos motores en las transmisiones trasera y delantera, lo que implica un aumento en la energía que se tiene disponible a lo largo de la carrera. Los pilotos que usan el frenado regenerativo para almacenar energía de forma más eficiente pueden conducir más rápido durante mayor tiempo a lo largo de una carrera. Además, el uso del frenado regenerativo también implica que se utiliza menos energía durante las carreras lo que abona a la sostenibilidad del proyecto.



**Alejandro Agag**  
creador de la Formula E

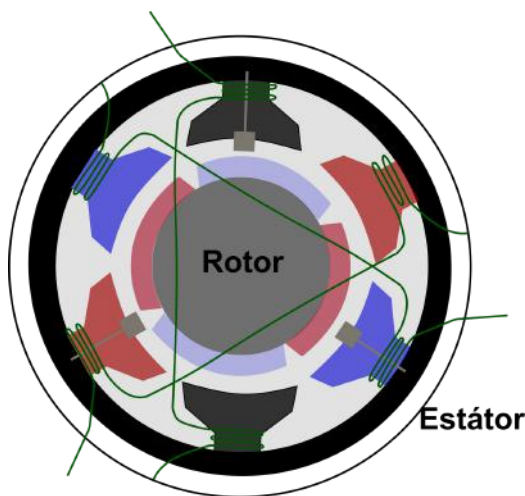
**Son muchos más los que ven los deportes que los documentales de medio ambiente. Así que pensé que el deporte podía jugar un papel para ayudar a la gente a entender lo que está pasando con el planeta**



## Control del motor

Los motores eléctricos montados en los vehículos eléctricos no son del mismo tipo de los que se pueden encontrar en los electrodomésticos del hogar. Los motores comúnmente utilizados en estos vehículos son los llamados motores de imanes permanentes sin escobillas (MIPSE) y a diferencia de otros tipos de motores eléctricos, estos son de menor tamaño, mayor potencia y requieren menor mantenimiento.

Un motor eléctrico se conforma de un rotor y un estator como se muestra en la figura 2 para el caso de un motor de tres fases. El rotor es el componente que gira y normalmente se encuentra en el interior. El estator se mantiene estático y contiene al rotor. En estos motores, un número par de imanes permanentes se encuentran montados en la superficie del rotor y tres conjuntos de embobinados se encuentran montados en la superficie interior del estator. Para producir movimiento del rotor es necesario energizar estas bobinas en la secuencia correcta, la cual depende de la posición del rotor.



**Figura 2.** Estator y rotor de un motor de tres fases.



En el caso de los vehículos eléctricos, el objetivo es controlar la velocidad del eje o flecha del motor eléctrico, los sensores miden corrientes, voltajes, posición y velocidad, finalmente los actuadores son los inversores. Para controlar la velocidad y el par que entregará el motor, no sólo es necesario alimentar los tres embobinados con la secuencia correcta, sino también con la magnitud y frecuencia adecuada, lo que representa un problema de control complejo.

Sin embargo, para facilitar esta tarea, los ingenieros han diseñado una técnica conocida como control de campo orientado. Esta técnica de control básicamente toma la medición de las tres corrientes senoidales del motor y las transforma a un sistema equivalente donde las corrientes a controlar son sólo dos y constantes. Estas consideraciones son válidas si el motor opera a velocidad constante.

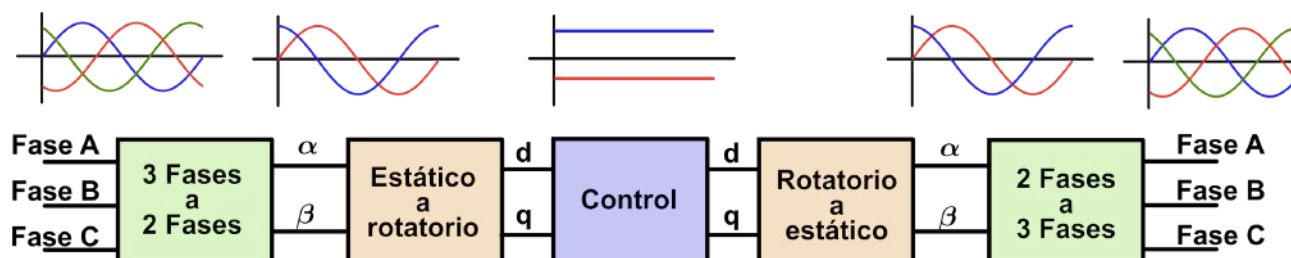
Para llevar estas corrientes al valor que corresponda a la velocidad y par deseados, el diseño debe incluir un controlador típicamente utilizado en la industria y desarrollado en los inicios del siglo XX, conocido como controlador proporcional integral (PI). Un controlador PI es un tipo de controlador de retroalimentación que utiliza un término proporcional (P) y un término integral (I) para controlar la salida de un sistema. El término P ajusta la salida del sistema en función del error actual, y el término I ajusta la salida del sistema en función de la suma de los errores pasados.



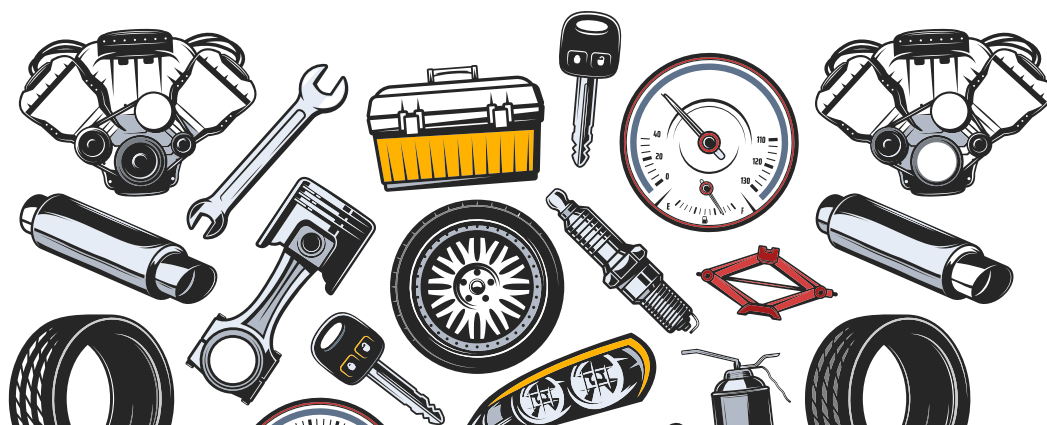




La salida de los controladores PI nos entregan los voltajes que se deben aplicar al motor en el sistema equivalente, por lo cual es necesario transformarlos al sistema original y finalmente aplicarlos al motor por medio del inversor. La figura 3 muestra de manera simplificada esta técnica de control, donde se ilustra la transformación de las tres señales senoidales a dos señales para ser procesadas por el controlador y como después de éste las señales deben volver a transformarse para ser tres señales que son enviadas al inversor. Todo este proceso se realiza dentro de una computadora varias veces por segundo para garantizar que el vehículo se mueva a la velocidad y con el par deseado por el conductor.



**Figura 3.** Transformaciones usadas por el control de campo orientado. Estas operaciones se hacen en una computadora o microcontrolador.





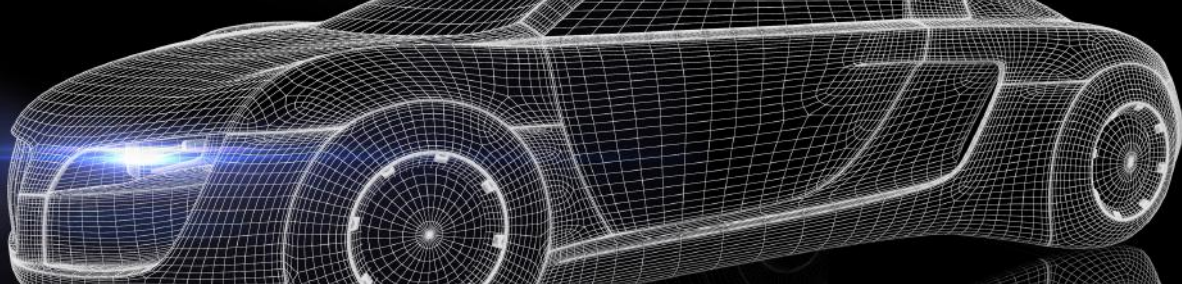
## Diseño sostenible

Existen dos conceptos que parecen sinónimos pero que no lo son, uno de ellos es el desarrollo sustentable, donde se promueve el uso de los recursos naturales de tal forma que se garantice que no se compromete su existencia para las siguientes generaciones. Por otra parte, el desarrollo sostenible también busca proteger los recursos, pero tomando en cuenta cuestiones sociales, económicas y políticas. El desarrollo sostenible promueve un desarrollo económico y social respetuosos con el medio ambiente. En otras palabras, un desarrollo ecológicamente soportable, económicamente viable y socialmente equitativo.

En el sentido del desarrollo sostenible, la fórmula E ha estado desarrollando, de forma paralela al desarrollo del vehículo eléctrico para las carreras, diversos métodos para reducir su huella de carbono y sus desechos. Uno de estos esfuerzos es el *Cycle Thinking*, que busca que los desechos tengan una segunda vida al definir un mecanismo de reciclado de todos los componentes: llantas, elementos de fibra de vidrio, celdas de baterías, etc. Asimismo, este tipo de diseño utiliza materiales que sean sostenibles como en el caso de las llantas, donde se planea usar un 26% de caucho natural y fibras recicladas para su fabricación.

Otra iniciativa que refleja la forma de pensar de la comunidad de escuderías y aficionados es que se motiva a que éstos últimos lleguen a los eventos a pie, en bicicleta o en transporte público para minimizar la huella de carbono de todo el evento. Además, el evento dura sólo un día, durante el que se llevan a cabo la clasificación y la carrera.

**Uno de estos esfuerzos es el *Cycle Thinking*, donde se busca que los desechos tengan una segunda vida al definir un mecanismo de reciclado de todos los componentes: llantas, elementos de fibra de vidrio, celdas de baterías, etc.**



## El futuro es ahora

Una de las motivaciones de los organizadores para crear esta categoría es acercar al público al concepto del vehículo eléctrico. Históricamente, una gran desventaja del vehículo eléctrico ha sido su potencia. Debido a que, aunque menos eficiente, el motor de combustión puede dar mucha potencia y mover cargas grandes. En cambio, los vehículos eléctricos tienen el problema de una batería pesada que ha dificultado el diseño de vehículos de alta potencia. Asimismo, la batería puede limitar el tiempo que el vehículo puede operar sin necesitar una recarga. Por lo tanto, el diseño de los vehículos de la Formula E se ha enfocado en mostrar que se puede tener alta potencia usando más motores, cargando la batería en movimiento, diseñando la transmisión de formas creativas y rediseñando el vehículo para ser más ligero. Estos esfuerzos han derivado en un circuito de carreras cada vez más emocionante que poco a poco se acerca a las velocidades que se manejan en la Formula 1, pero que desde su diseño busca impactar lo menos posible en el ambiente y contribuir a una cultura del reciclaje de materiales.

## Agradecimientos

Este artículo fue realizado con apoyo del proyecto PAPIIT-UNAM IT100623. A Conahcyt por la beca de doctorado de Axel Alejandro Coronado Andrade (CVU 856213).



Crédito de imágenes en orden de aparición: jamesteohart (Getty Images, GI), Photocreo, peepo (Getty Images Signature, GIS), Racha Images, vesvocrea, stevecoleimages (GIS), BNPDesignStudio, Vectortradition, Ahmad wahyu kurniawan, Clker-Free-Vector-Images (pixabay), WinWin.artlab, Marcus Millo (GI), junce (GI), Slab Design Studio, GraphicsRF, lucian coman's Images, Alberto Sava's Images, elsar77 (GI), Kritsanot, zirconicussoicons.



## Para Consulta

1. Chiasson J. 2005. Modeling and high performance control of electric machines. John Wiley & Sons.
2. Coob H. 2022. Formula E Gen3: What is it and what is new. (Autosport). [Link](#)
3. Coordinación de Universidad Abierta, Innovación Educativa y Educación a Distancia de la UNAM. (s.f.). Sostenibilidad y sustentabilidad. [Link](#)
4. Driscoll F (s.f.). Formula E cars how they have evolved become so unique. [Link](#)
5. Formula E. (8 de octubre de 2016). INSIGHT: how the cars have changed. (FIA) [Link](#)
6. Gitlin JM. 2022. Formula E's new electric race car is lighter, more powerful, more nimble. [Link](#)
7. Hewland (s.f.). Formula E Transmission Evolution. [Link](#)
8. Kumar I. 2021. Alejandro Agag: "Hacemos una version verde de los deportes de motor". (euronews) [Link](#)
9. Mitchell S (s.f.). Formula E Gen3 spec revealed. [Link](#)
10. Mraz, S. J. 2022. The Evolution of the Formula E Racecar. [Link](#)
11. Porsche. (s.f.). A beginners guide to formula E. [Link](#)
12. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. 2018. Diferencia entre sustentable y sostenible. [Link](#)
13. Steele B. 2022. Formula E Gen3: The world's most efficient race car. (Engadget) [Link](#)



**Alejandra Icxih de la Guerra Carrasco**

se dedica al diseño de controladores para motores con aplicación en vehículos eléctricos. Ha hecho posdoctorado en el Instituto de Ingeniería de la UNAM y en la UAM Azcapotzalco.

Contacto: [ale\\_delaguerra@comunidad.unam.mx](mailto:ale_delaguerra@comunidad.unam.mx)



**Axel Alejandro Coronado Andrade**

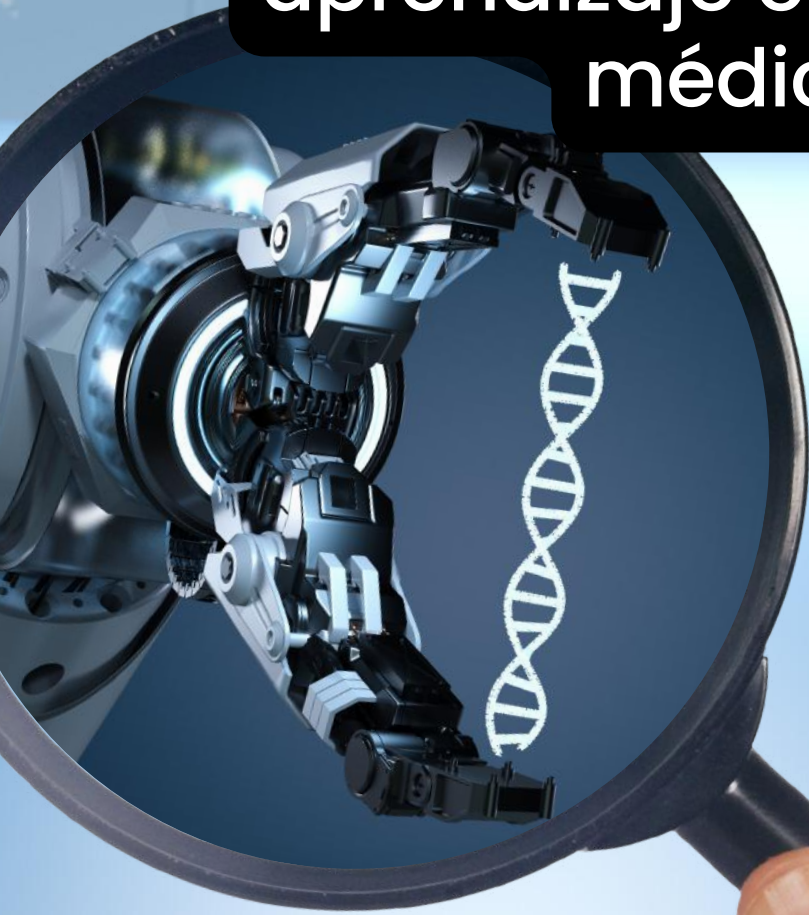
Estudiante de doctorado en ingeniería eléctrica en el Instituto de Ingeniería de la UNAM. Su tema de tesis aborda el diseño observadores y controladores para motores BLDC.



**Luis Álvarez-Icaza**

profesor investigador del Instituto de Ingeniería de la UNAM. Entre sus múltiples áreas de trabajo se encuentra el control de motores para aplicaciones de vehículos eléctricos y aerogeneradores.

**Más allá de lo evidente:  
aprendizaje en robótica  
médica**



**Alejandro Gutierrez Giles  
Miguel Á. Padilla Castañeda**

**1036**



# Más allá de lo evidente: aprendizaje en robótica médica



**Cómo citar este artículo:** Gutierrez Giles A, Padilla Castañeda MA. 2023. Más allá de lo evidente: aprendizaje en robótica médica. Revista Ciencia y Naturaleza 02 (1036): 37-51.





## *¿Se pueden conocer cosas que no se miden directamente?*

**P**or supuesto que sí. Cuando vamos al médico, este puede inferir nuestro estado de salud haciéndonos una serie de preguntas y tomando algunas mediciones como de temperatura, presión, oxigenación, entre otras. Con esta información y su conocimiento previo, el médico hará una estimación del estado general de nuestra salud o incluso diagnosticar alguna enfermedad y su grado de avance.

De manera similar, podemos tener una idea aproximada de la composición de la atmósfera de Júpiter o Saturno sin la necesidad de viajar hasta allá. De nuevo, podemos inferir esta composición a partir de mediciones indirectas como fotografías o espectrogramas.

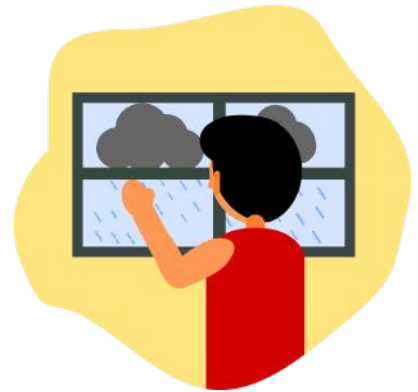




En un ejemplo más cotidiano, podemos saber que está lloviendo sin necesidad de salir al exterior si alguien que viene de afuera entra mojado a nuestra casa. Incluso podríamos estimar la intensidad de la lluvia observando qué tan empapada viene dicha persona. Por supuesto hay otras explicaciones posibles además de la lluvia, por lo que nuestra conclusión dependerá de todo un conjunto de evidencias obtenidas.



Yaroslav Shuraev



*Podemos saber que está lloviendo sin necesidad de salir, si vemos que alguien que viene de afuera entra mojado a nuestra casa.*

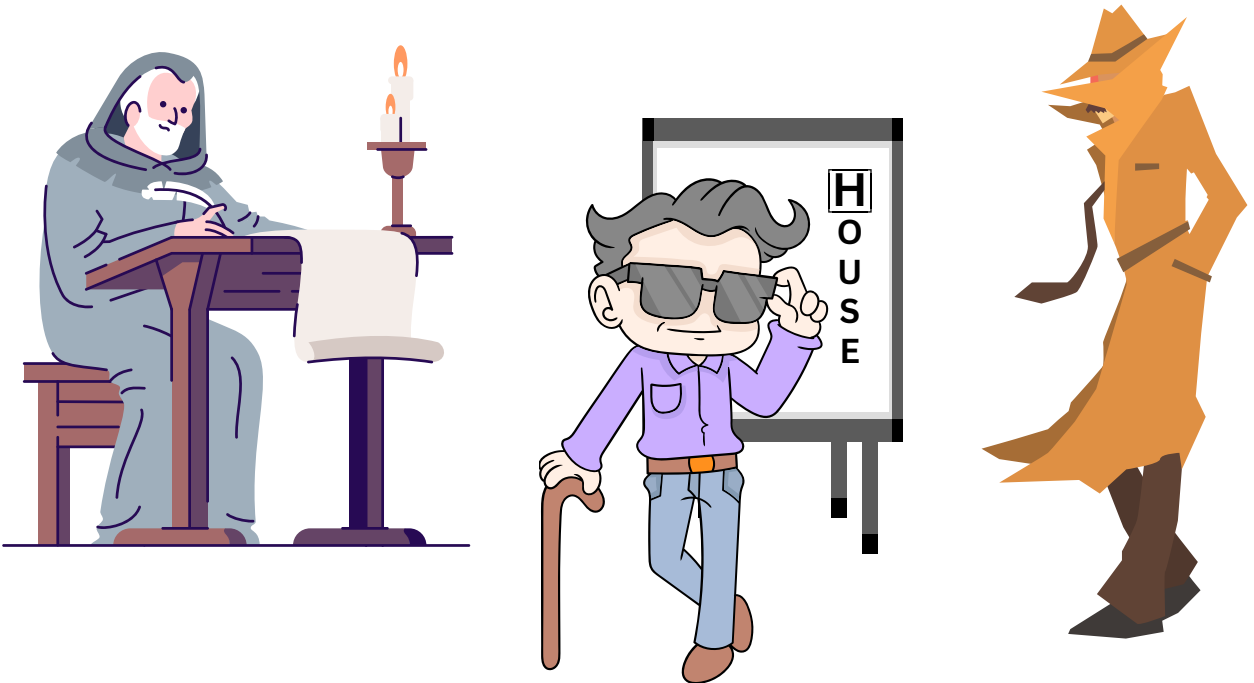
**Figura 1.** Detección indirecta de la lluvia si el perro está mojado.

La estimación se basa en el pensamiento deductivo. Ya desde la antigüedad se utilizaban mediciones indirectas. Por ejemplo, los egipcios fueron capaces de medir la altura de las pirámides de Giza a partir de mediciones de las sombras proyectadas en el suelo a distintas horas del día. En la antigua Grecia, el filósofo Eratóstenes ideó un método para medir la circunferencia de la Tierra basado en la proyección de la sombra de un mismo poste colocado en dos ciudades lejanas a una misma hora del día.





Existen personajes famosos por sus poderes deductivos, por ejemplo, William de Baskerville, al principio del libro *El Nombre de la Rosa* indica dónde se encuentra un caballo perdido sin haberlo visto antes y más aún sin que le preguntaran siquiera si había visto un caballo. En la televisión, otro personaje famoso, el Dr. House, es capaz de diagnosticar a sus pacientes sin estar en la misma habitación que ellos, sólo con la información que recolecta de varias fuentes: sus colaboradores, el entorno, los análisis y prácticamente de cualquier detalle.



No obstante, quizá el deductor más famoso de la historia es el también personaje ficticio Sherlock Holmes, creado por Arthur Conan Doyle. Desde el primer libro en el que aparece el famoso detective, "Estudio en Escarlata", se nos da una prueba de su gran capacidad deductiva al conocer a su futuro compañero de aventuras, el Dr. Watson, y deducir acertadamente que este último había estado en Afganistán ¡Sólo le bastó con mirarlo por unos instantes!



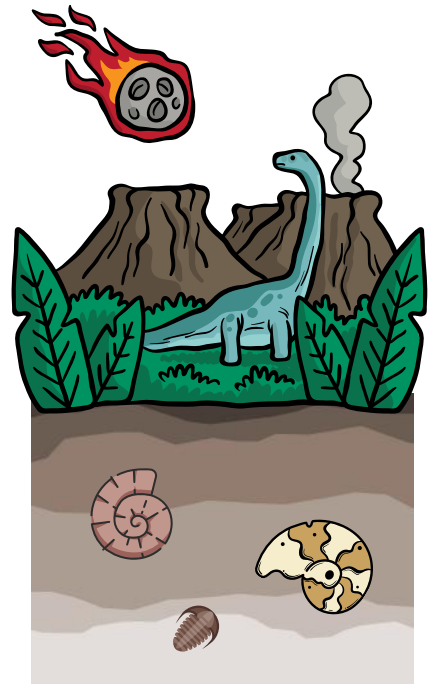
“ **Mi nombre es Sherlock Holmes. Es mi negocio conocer lo que los demás no conocen.** ”



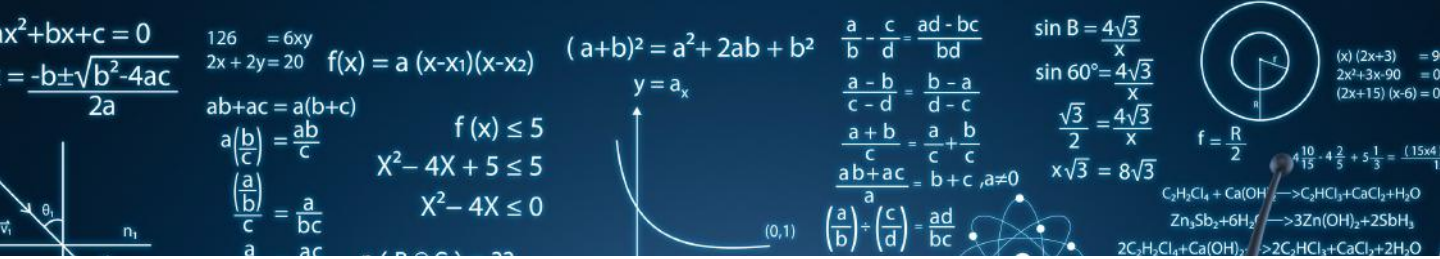
**Sherlock Holmes, personaje creado por Arthur Conan Doyle**



Claramente los personajes citados en el párrafo anterior son todos ficticios y las deducciones que realizan pueden parecer un poco hechas a modo cuando uno quisiera trasladarlas a la realidad. Sin embargo, estos ejemplos sirven para ilustrar un punto: hay información oculta contenida en las cosas que podemos medir u observar fácilmente. La información incluso puede provenir del pasado y quedar grabada en una señal que podemos medir en el presente. Por ejemplo, conocemos la época aproximada en la que se extinguieron los mamuts o la fecha en la que cayó el meteorito en la península de Yucatán gracias a la información que podemos extraer de diversas fuentes.



Si hay información oculta en las mediciones que podemos tomar, entonces es natural pensar que cuanto mayor sea la cantidad de datos que reunamos mayor será el conocimiento de las señales ocultas que podamos obtener. Esto es verdadero hasta cierto punto. En el ejemplo de la lluvia, no nos serviría de mucho fijarnos si la ropa de las personas a nuestro alrededor está mojada si éstos han permanecido todo el día adentro de la casa, no importa si son muchos. En esa situación en particular valdría más la información de una sola persona que viniera del exterior.



Por lo tanto, mucha información no siempre significa mejor conocimiento de lo no medible. Para sistemas físicos sencillos, se puede medir, mediante herramientas matemáticas (por ejemplo, el Gramiano de observabilidad), qué tan buena es una señal para conocer las otras señales que no se están midiendo. Así, por ejemplo, se puede diseñar un automóvil con la menor cantidad de sensores, o los más económicos, para obtener la mayor cantidad de información posible al menor costo posible.

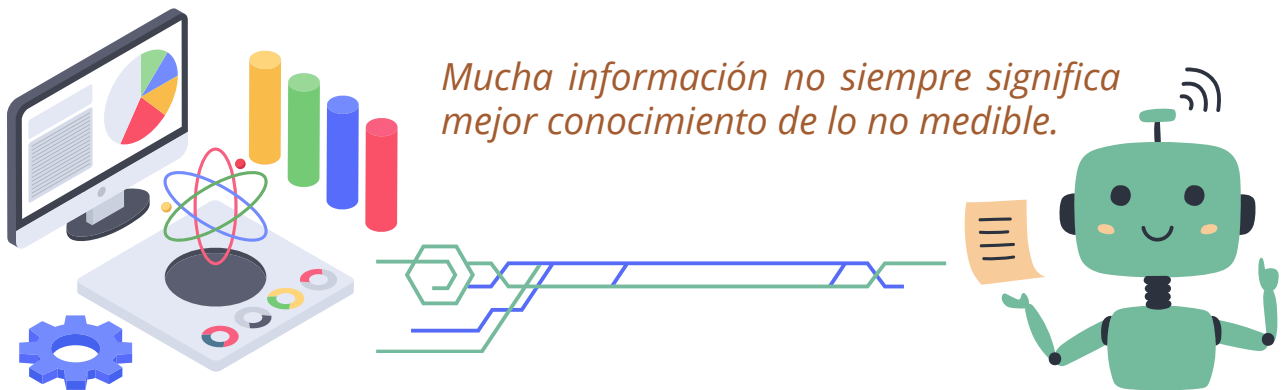


## Estimación de estados y estimación de modelos

Los estados de un sistema nos permiten describir cómo se encuentra dicho sistema en un tiempo específico. Por lo tanto, los estados normalmente están cambiando todo el tiempo. Por ejemplo, la velocidad en un automóvil, la temperatura en un horno o la presión en una tubería. Por otra parte, las características que definen a un modelo, que a su vez representa a un sistema real, no cambian o lo hacen muy lentamente. Por ejemplo, la masa total del automóvil, el espacio en el interior del horno o el diámetro de la tubería. A estas características se les puede llamar parámetros del modelo.

Tanto los estados de un sistema como los parámetros de un modelo pueden conocerse utilizando toda la información a la que tengamos acceso y herramientas matemáticas. Dentro de las herramientas más utilizadas se encuentran el filtro de Kalman, el método de mínimos cuadrados, las redes neuronales, los observadores de estados y los modelos ocultos de Markov.

Entonces podemos conocer el presente y pasado de un sistema utilizando herramientas matemáticas como lo son los observadores de estado o los modelos ocultos de Markov. Una pregunta que surge inmediatamente es si podemos también predecir el futuro. La respuesta es de nuevo sí, aunque aproximadamente. Esto se realiza mediante modelos que pueden ser matemáticos, físicos (por ejemplo a escala), virtuales, etcétera. Nuevamente, la capacidad del modelo para predecir el futuro de nuestro sistema dependerá de la cantidad y de la calidad de la información que le extraigamos mediante mediciones. Lo anterior se conoce como identificación de modelos en la teoría de control. Los modelos no sólo sirven para predecir el futuro y ejecutar acciones con antelación, sino que sirven para simular el comportamiento del sistema real. Algunos ejemplos de modelos entrenados con miles de millones de datos, que han dado mucho de qué hablar en estos últimos días, son el modelo de lenguaje utilizado por ChatGPT y los modelos de creación de imágenes de Midjourney y Dall-E.



*Mucha información no siempre significa mejor conocimiento de lo no medible.*

Tanto los estimadores de estados o señales como los identificadores de parámetros son una parte fundamental de la teoría de control y se encuentran en nuestra cotidianidad, desde la estimación de la inclinación de nuestros teléfonos celulares hasta el cálculo de la velocidad y de la aceleración de nuestro automóvil mediante el Sistema de Posicionamiento Global (GPS, por sus siglas en inglés).



## *Una aplicación en robótica médica*

Cada vez es más frecuente encontrar robots en los quirófanos. A pesar de que hace algunos años existía la falta de confianza en utilizar robots para realizar procedimientos tan críticos y delicados como las cirugías, hoy en día es una realidad en los países más desarrollados. En teoría, los robots pueden ser más precisos para algunas tareas que los propios cirujanos. Además de esto, un cirujano podría operar a distancia utilizando un robot, lo que ahorraría costos y tiempos de traslado de los especialistas. Uno de los sistemas de cirugía apoyada en robots más famosos es el DaVinci mostrado en la Figura 2.



**Figura 2.** Sistema de Cirugía Robótica DaVinci.

Claramente los retos actuales en este tipo de sistemas son muchos. Primero, se debe de garantizar que siempre se van a comportar de manera predecible. También se debe de garantizar que no van a fallar, incluso en las peores condiciones.

Otro reto importante es la esterilización de todas las piezas del robot, en particular las que estarán en contacto con el paciente. Un reto más es el tamaño y el peso del equipo. Para un mejor funcionamiento del robot, este debería de contar con muchos sensores que le permitan conocer su estado, es decir, su posición, velocidad, la fuerza que ejerce sobre el paciente con algún instrumento, etc.



Sin embargo, el agregar muchos sensores no sólo implica que se eleve el costo del equipo, sino también su tamaño y su peso y, por lo tanto, más instrumentos a esterilizar. Esto sin contar el equipo adicional para obtener las señales que generan esos sensores y traducirlas a algún tipo de dato útil para mejorar el procedimiento.



*Es deseable contar con el menor número de sensores que permitan obtener la mayor cantidad de información del robot y del estado del paciente.*



En este sentido, en el Instituto de Ciencias Aplicadas y Tecnología (ICAT) y el Centro de Estudios en Computación Avanzada (CECAv) de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), se han realizado esfuerzos para obtener señales útiles en sistemas robóticos. Por lo regular, sólo se dispone de mediciones de los ángulos de desplazamiento de cada articulación y de las corrientes que se le aplican a cada motor para mover el robot. Se ha demostrado que con estas señales es suficiente para estimar la posición de la punta del robot en el espacio tridimensional, la velocidad del robot y la fuerza que ejerce sobre un objeto. No solamente se pueden estimar estas señales, sino que también se puede inferir la forma del objeto con el que está interactuando el robot y algunas características mecánicas, tales como la elasticidad del objeto.



“



Los libros hablan de otros libros, y en eso reside su verdadera fuerza. ”

William de Baskerville, personaje creado por Umberto Eco



Conocer la fuerza de interacción es muy importante en los sistemas de cirugía teleoperada, debido a que dicha fuerza puede ser transmitida al cirujano como complemento a la información visual que puede estar recibiendo por medio de un monitor. La combinación de estas dos fuentes de información ha demostrado una notable mejoría en el desempeño de procedimientos quirúrgicos teleoperados.

La fuerza de contacto también puede ser utilizada con fines de diagnóstico. Por ejemplo, para detectar ciertos tipos de cáncer como el de próstata y el de mama, el médico normalmente realiza una palpación para detectar tejidos anormales (Figura 3).



En este contexto, en la UNAM se desarrolló un sistema capaz de estimar señales de posición, velocidad y fuerza a partir de las mediciones estándar de un robot que, como se mencionó arriba, son normalmente ángulos y corrientes.

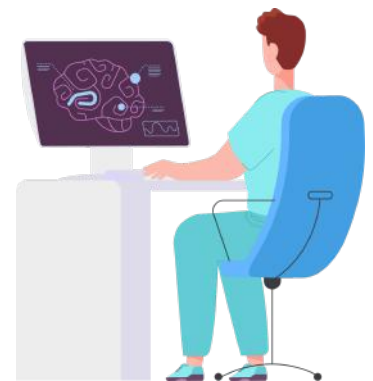
**Figura 3.** Experimento para clasificar automáticamente los tejidos por su elasticidad



Además, a partir de la estimación de estas señales, al mismo tiempo se estima el coeficiente de elasticidad del material con el que está interactuando el robot. Todo esto se logra mediante herramientas matemáticas como modelado dinámico y teoría de control.

El sistema propuesto también permite automatizar el procedimiento de palpación mediante la incorporación de un clasificador Bayesiano (ver video sobre el teorema de Bayes en las referencias). Este tipo de clasificadores se pueden entrenar utilizando algunas mediciones y aprovechando el conocimiento previo que se tenga del sistema. Una vez entrenado el clasificador, el sistema es capaz de detectar a qué tipo de tejido pertenece la muestra con sólo palparlo durante unos segundos (ver el video en el enlace dado en las referencias).

*La fuerza de contacto también puede ser utilizada con fines de diagnóstico. Por ejemplo, para detectar ciertos tipos de cáncer como el de próstata y el de mama*

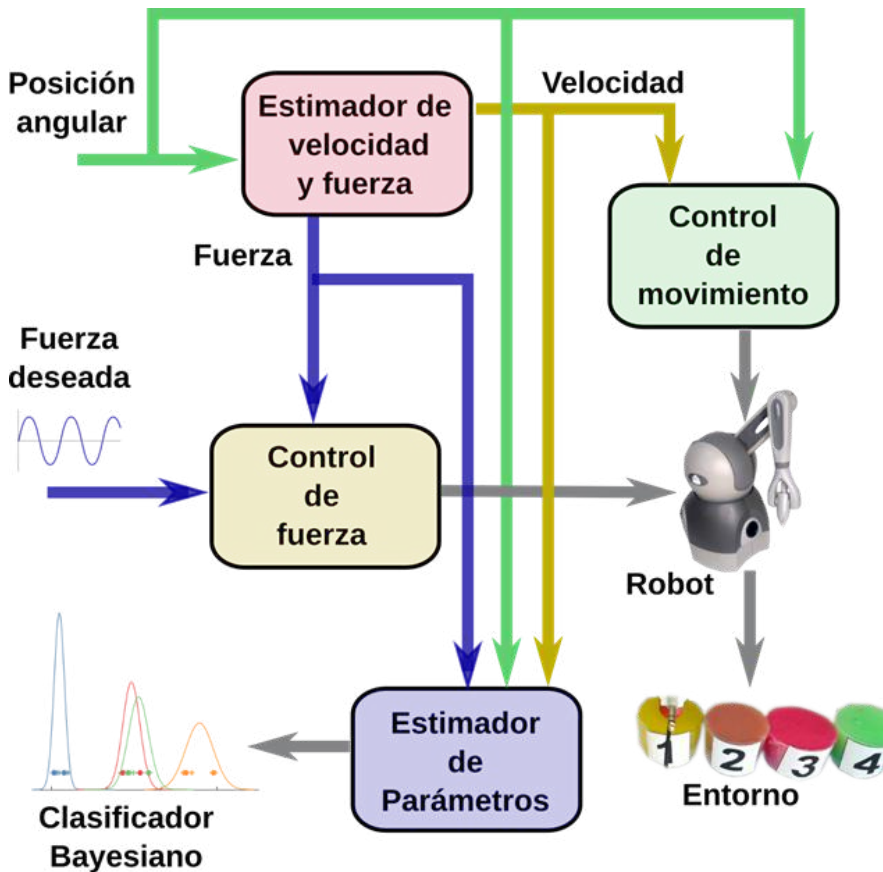


En el desarrollo de este sistema, se tomaron en cuenta algunos aspectos importantes. Primero, la fuerza de palpación no debería ser ni excesiva ni muy ligera. En el primer caso se puede lastimar al paciente, mientras que en el segundo caso no se tendría la información suficiente para identificar el tipo de tejido. Por lo tanto, se tuvo que controlar la fuerza que aplica el robot sobre el tejido, para lo que se utilizó, nuevamente, teoría de control. Segundo, la duración del experimento debía ser lo más corta posible pero suficiente para que el sistema acierte la mayoría de las veces.





Nuevamente, mediante herramientas matemáticas, se llegó a la conclusión de que bastaban dos segundos para identificar el tipo de muestra. Por último, también se consideró que el conjunto de datos para entrenamiento no tendría que ser muy extenso (en la realidad no podemos estar palpando a cientos de pacientes sanos y no sanos). En este sentido, se concluyó que bastaban 32 experimentos para entrenar cada tejido y obtener una probabilidad cercana al 100% de acierto (ver el video de los experimentos en las referencias). En la Figura 4 se muestra un diagrama de bloques del experimento.



**Figura 4.** Diagrama de bloques del sistema robótico de palpación automática



Este es apenas un prototipo experimental y no se ha probado en pacientes reales, dadas las consideraciones técnicas y legales, pero sirvió para validar lo que se había demostrado matemáticamente, es decir, que se pueden conocer muchas cosas no sólo del robot sino externas, con tan solo dos señales por cada articulación del robot.

En conclusión, hay mecanismos para obtener mediciones de forma indirecta en sistemas dinámicos. La teoría de control proporciona diversas herramientas para obtener estas mediciones que pueden ser de estados o de parámetros que definan el comportamiento del sistema. Utilizando estas herramientas de teoría de control, llamadas observadores, somos capaces de identificar y clasificar entre diferentes tipos de tejidos de acuerdo con su elasticidad, además de poder controlar la fuerza que ejercemos sobre ellos para no dañarlos, también utilizando otra herramienta de la teoría de control que son los controladores retroalimentados. 🍀

## *Agradecimientos*

Los autores agradecen al Conahcyt por la financiación del proyecto PCC 319585 y al Centro de Estudios en Computación Avanzada (CECAv) para la realización de este proyecto. Los autores también agradecen a los revisores anónimos por tomarse el tiempo para revisar y aportar observaciones que indudablemente ayudaron a mejorar este artículo.

Crédito de imágenes en orden de aparición: PhonlamaiPhoto's Images, Latino Life, Kittipong Jirasukhanont, 8385 (pixabay), R-Creative, Sketchify Education, sparklestroke, justpictures, NotionPic, RomoloTavani (Getty Images, GI), Aurora.Std, Kishan Singh, ROBOMORFO multimedia (Pexels), Tatiana Nesterenko, AR\_twork, PWei (Getty Images Signature, GIS), Giuseppe Ramos S, heyrabbiticons, Nicolas (Harry Wolf's Images), Maxicons, Rizkreativ, Icons8, Kavic.C, iconsy, Billion Photos, monsitj (Getty Images Pro), Alden (Dshawn Blick's Images), Sketchify, Pinkbrush, ijeab, Visual Generation, Macrovector, irinausmanova, Vadym Terelyuk (GI), Ljudmila Kopecka, Vectortradition, Ekkasit919 (GI), ONYXprj, smartstartst, PepeLaguada (GIS), OpenClipart-Vectors (pixabay).  
Figura 2. Robot Da Vinci Crédito: "180504-N-RM689-0079" by Commander, U.S. 7th Fleet bajo licencia CC BY-SA 2.0.

## Para Consulta



Gutierrez-Giles A, Padilla-Castañeda MA, Alvarez-Icaza L, Gutierrez-Herrera E. 2022. Force-Sensorless Identification and Classification of Tissue Biomechanical Parameters for Robot-Assisted Palpation. *Sensors* 22(22): 8670. <https://doi.org/10.3390/s22228670>



Gutiérrez-Giles A, Arteaga-Pérez MA. 2019. Transparent bilateral teleoperation interacting with unknown remote surfaces with a force/velocity observer design. *International Journal of Control* 92(4): 840-857.



Video: ¿Cómo escapar de la trampa Bayesiana? En el canal Veritasium de Youtube. <https://youtu.be/D7KKIC0LOyw>

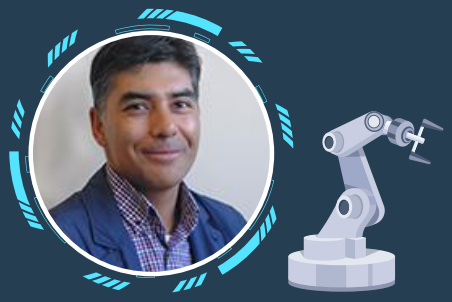
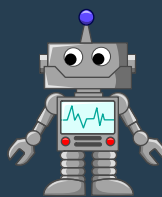


Video sobre los experimentos con el sistema de palpación automática desarrollado en la UNAM. <https://youtu.be/tAgwVmYLzP8>



**Alejandro Gutierrez Giles**

Es Investigador Titular en el Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica (INAOE), adscrito a la Coordinación de Ciencias Computacionales. Es especialista en control automático y ha trabajado en robótica en distintas áreas: industrial, médica y de servicio. **contacto:** [alejandro.giles@inaoep.mx](mailto:alejandro.giles@inaoep.mx)



**Miguel Á. Padilla Castañeda**

Es investigador del Instituto de Ciencias Aplicadas y Tecnología (ICAT) de la UNAM adscrito al grupo de Bioinstrumentación y a la Unidad de Investigación y Desarrollo Tecnológico (UIDT) en el Hospital General de México "Eduardo Liceaga". Trabaja en las áreas de instrumentación biomédica, cirugía asistida por computadora y tecnologías de asistencia y rehabilitación. **contacto:** [miguel.padilla@icat.unam.mx](mailto:miguel.padilla@icat.unam.mx)

Revista



# Ciencia *y Naturaleza*



[www.revistacyn.com](http://www.revistacyn.com)



**¡Únete a nuestra  
comunidad!**

**No te pierdas las últimas  
Publicaciones**

**¡Siguenos en Redes Sociales!**





# Algoritmos de control para el aprovechamiento de las energías renovables

Irandi Gutiérrez Carmona  
Eduardo Campos Mercado  
Luis Angel Otamendi Cruz



Artículo

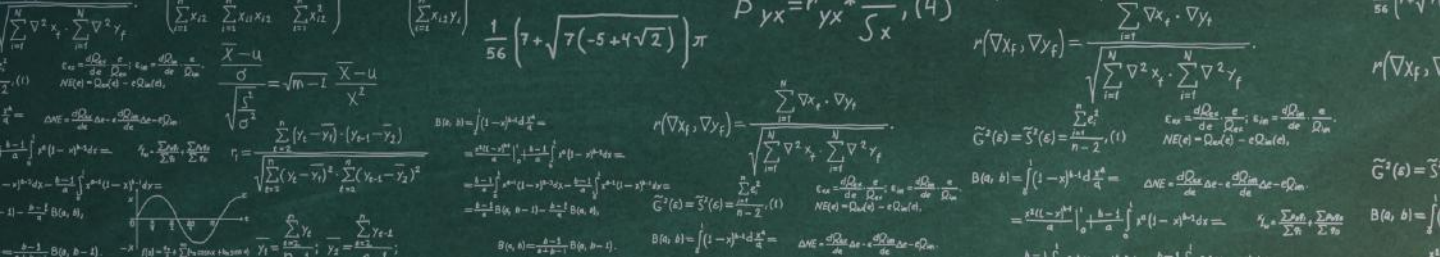


# Algoritmos de control para el aprovechamiento de las energías renovables



**Cómo citar este artículo:** Gutiérrez-Carmona I, Campos-Mercado E, Otamendi-Cruz LA. 2023. Algoritmos de control para el aprovechamiento de las energías renovables. Revista Ciencia y Naturaleza 02 (1035): 53-64.





# Algoritmos de Control

Con el objetivo de maximizar la eficiencia y rendimiento de sistemas dinámicos, se requiere de algoritmos de control eficientes, que permitan adaptarse para garantizar un funcionamiento óptimo. Estos algoritmos se utilizan en los aerogeneradores para controlar y regular sistemas dinámicos. Los aerogeneradores son de las tecnologías más utilizadas en la generación de energía eléctrica, además de ser una fuente sostenible y renovable. Estos sistemas convierten la energía cinética del viento en energía eléctrica, la cual es utilizada para suministrar electricidad a empresas y hogares.

Actualmente, el desarrollo de algoritmos de control es diverso (ver Figura 1), desde las técnicas clásicas que se basan en la teoría de control hasta las más avanzadas sobre aprendizaje automático. Tomando en cuenta estas afirmaciones, es importante conocer los diferentes algoritmos de control para poder seleccionar la mejor opción según las necesidades.

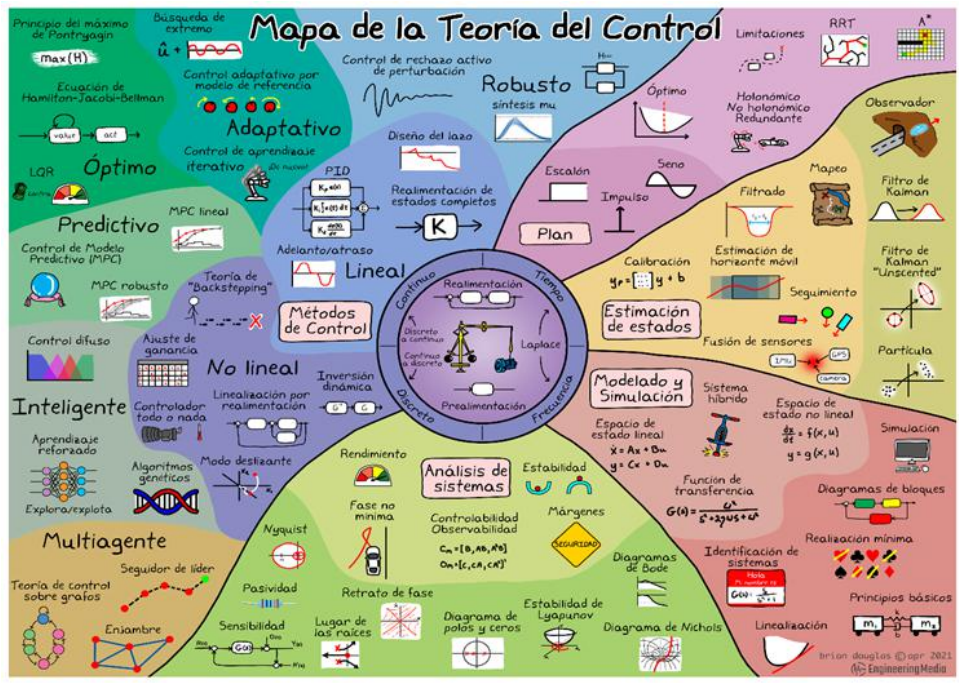


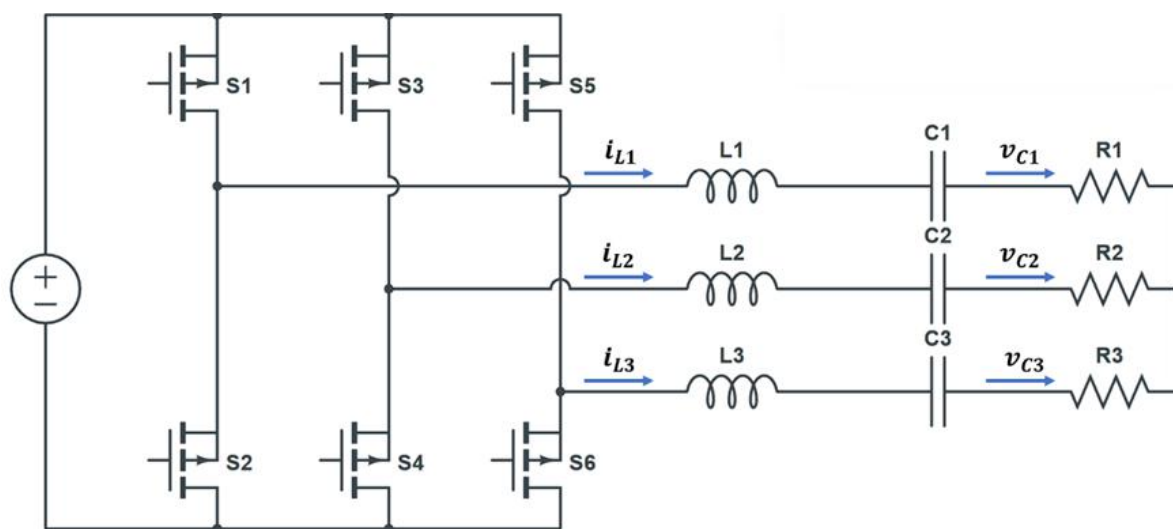
Figura 1. Mapa de la Teoría de Control [1].



## Conversión de energía eléctrica

La conversión de energía eléctrica es un proceso con el cual se puede pasar de corriente continua a corriente alterna o viceversa, con el fin de utilizarla en una aplicación específica. En general, el proceso de conversión, puede involucrar distintos componentes, como convertidores de energía, transformadores e incluso motores eléctricos. Los convertidores de energía llamados “inversores”, convierten la energía de corriente continua (CC) en energía de corriente alterna (CA). Este dispositivo cuenta con diferentes configuraciones: inversor monofásico, inversor trifásico e inversores multinivel.

El proceso de conversión por medio de inversores trifásicos, está dividido en tres etapas principales: modulación, potencia y filtrado. En la Figura 2 se muestra la configuración de un inversor electrónico de potencia trifásico, compuesto por tres ramas de transistores, además de su filtro compuesto por inductancias y capacitancias.



**Figura 2.** Funcionamiento interno del inversor electrónico de potencia trifásico.





Dentro de las etapas principales de la conversión de energía en convertidores electrónicos de potencia trifásicos, como primera etapa se encuentra la modulación, esta es generada a través de una técnica de conmutación, sirve para producir una señal que imita una forma de onda de corriente alterna. Como segunda etapa, la etapa de conmutación se utiliza para controlar los interruptores de potencia del inversor, generalmente MOSFETs o IGBTs, el control de los interruptores varía con respecto al control de modulación de ancho de pulsos (PWM por sus siglas en inglés, Pulse Width Modulation). Por última instancia, la etapa de filtrado funciona para eliminar cualquier ruido o fluctuación que pueda afectar el rendimiento.

En la modulación, las técnicas de conmutación juegan un rol importante. Existen diferentes técnicas de conmutación que abren paso a manipular las características de la señal eléctrica con las características dependiendo las necesidades, generalmente amplitud y frecuencia. Las distintas técnicas de conmutación, como lo son modulación de ancho de pulso de portadora aleatoria y triangular, por inyección de armónicos y pulsos múltiples, tienen diferentes aplicaciones dependiendo del objetivo de control y el sistema a controlar.

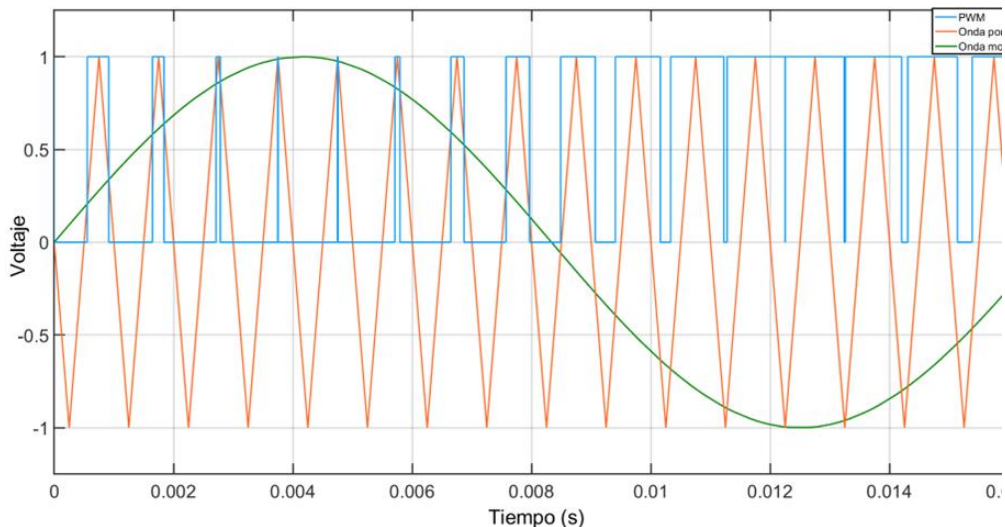
## Técnicas de conmutación

Una técnica de conmutación es una manera de controlar el flujo de energía en un circuito eléctrico por medio de convertidores electrónicos de potencia, ya sea monofásico, trifásico o multinivel. Las diferentes maneras de hacerlo implican diferentes situaciones. Hablando en términos generales, es como cambiar un interruptor de encendido a apagado. En este contexto, dos de las técnicas más populares son: modulación por ancho de pulso senoidal (SPWM, por sus siglas en inglés, Sinusoidal Pulse Width Modulation) y modulación por ancho de pulso de vector espacial (SVPWM, por sus siglas en inglés, Space Vector Pulse Width Modulation).



## Modulación por ancho de pulso senoidal

La técnica SPWM se basa en la comparación de magnitudes entre la señal triangular (onda portadora) y señal sinusoidal (onda moduladora). Es una técnica utilizada para sistemas de conversión de energía. Por medio de un comparador es que se otorgan las instrucciones para que el interruptor actúe de manera adecuada.



**Figura 3.** Representación gráfica de onda moduladora, onda portadora y el tren de pulsos.

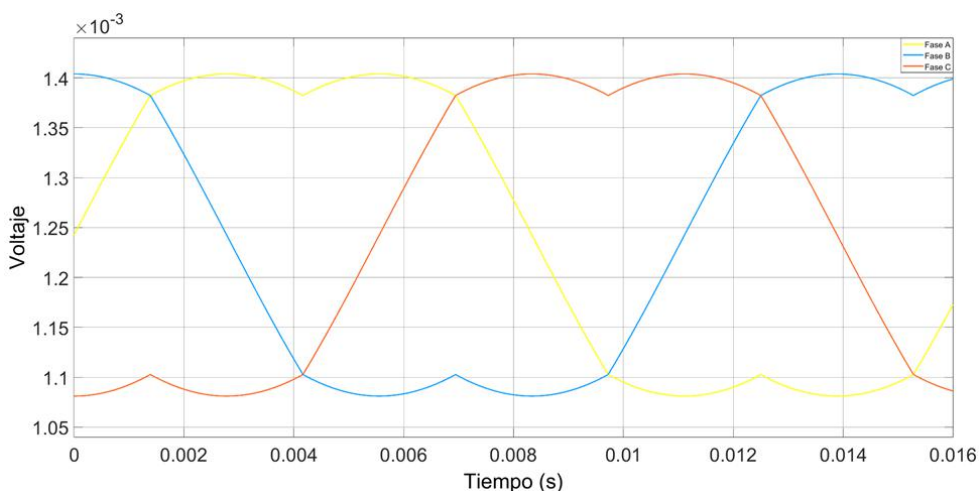
Es importante recordar que el uso de las técnicas de conmutación depende directamente del sistema a controlar, no suelen ser precisas porque no están basadas en una estimación de la salida del sistema, además de que en algunos casos no se conocen los elementos por los que está compuesto el sistema. Dentro de la literatura, es una de las más conocidas y empleadas para realizar comparaciones y aplicaciones que no sean exigentes. A pesar de eso, el desempeño logra ser satisfactorio, incluso, en términos de la rapidez de aplicación y funcionalidad esta es la mejor opción.



## Modulación por ancho de pulso de vector espacial

En la técnica SVPWM, la señal de control se convierte en un vector representado en un marco de referencia de dos dimensiones. Además de presentar magnitud y dirección, se puede generar una señal de control para que los transistores interpreten como deben de funcionar, de tal manera que la cantidad de energía se ajuste a las necesidades del sistema de forma concisa y eficiente. La Figura 4 muestra una forma de onda de doble cresta generada con la SVPWM. La técnica SVPWM tiene una amplia gama de aplicaciones en electrónica de potencia, incluyendo:

- Control de potencia de carga en sistemas de alimentación ininterrumpida (UPS).
- Control de energía suministrada a los sistemas de refrigeración en el procesamiento de alimentos y bebidas.
- Control de energía suministrada al control de procesos en la industria química y petroquímica.



**Figura 4.** Onda resultante de doble cresta del SVPWM.



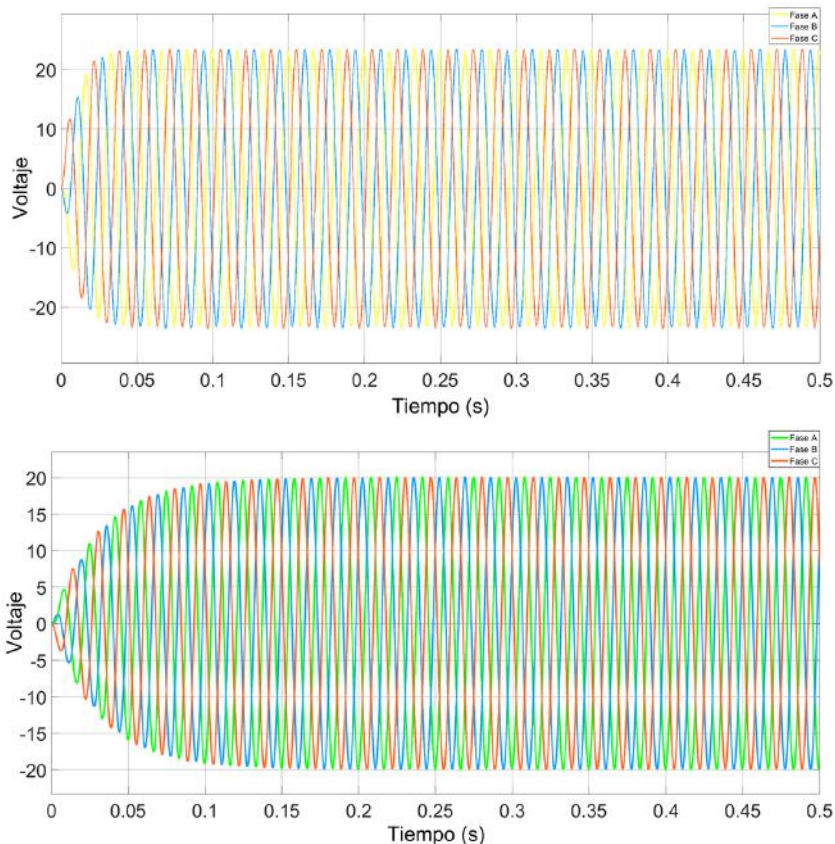
Tanto la técnica de conmutación SPWM y SVPWM son utilizadas en inversores para controlar la forma de onda de la señal de salida. En resumen, las técnicas de conmutación son herramientas para el control eficiente y preciso de la energía en sistemas de electrónica de potencia. La elección de una técnica de conmutación depende de las necesidades, como la potencia, eficiencia energética y la calidad de la señal de salida. Cada técnica tiene sus ventajas y desventajas en términos de complejidad, costo, eficiencia y rendimiento, la elección va a depender de la aplicación específica.

Las técnicas de conmutación pueden mejorar la calidad y eficiencia de la energía en sistemas de electrónica de potencia, lo que se traduce en beneficios tanto económicos como ambientales. La técnica SPWM es una buena opción para aplicaciones que no requieran una forma de onda sinusoidal de alta calidad, en cambio, SVPWM es más adecuada en aplicaciones de alta potencia que requieren una alta eficiencia.

## Comparación entre las técnicas SPWM y SVPWM



La técnica SPWM en donde la distorsión armónica a nivel simulación presenta un rendimiento aceptable desde el punto de vista práctico. El rendimiento a lo largo del tiempo es estable, donde la calidad de energía por medio de esta técnica está por debajo del 5% que es adecuado según la norma IEEE-519. En cambio, la técnica SVPWM genera una mejor calidad de energía, hablando en términos de armónicos. La frecuencia de la onda portadora que se encuentra en la Tabla 1 en ambas técnicas tiene una amplia diferencia, además de su amplitud.



**Figura 5.** Forma de onda de salida de un inversor trifásico (a) SPWM (b) SVPWM.

Como se muestra en la Tabla 1, existen diferencias entre la SPWM y la SVPWM. El filtro que se menciona al inicio, es un componente esencial dentro del sistema con una enorme influencia en el rendimiento. Tanto la SPWM como la SVPWM tienen el mismo objetivo en el sistema, pero con necesidades diferentes. La SVPWM muestra un bajo nivel de distorsión armónica (THD, por sus siglas en inglés) en contraste con la SPWM. Esta diferencia entre las técnicas se extiende desde el diseño y parámetros del filtro, hasta la frecuencia de conmutación y la tensión de referencia.



**Tabla.** Tabla de comparación entre técnicas de conmutación.

Parámetros de SPWM	
$V_{in}$	30 VCD
$f_{ref(rms)} [f_a, f_b, f_c]$	35 V
$L [f_a, f_b, f_c]$	0.027 H
$C [f_a, f_b, f_c]$	230 $\mu F$
$R [f_a, f_b, f_c]$	20 $\Omega$
$F_c [f_a, f_b, f_c]$	5KHz
$F_s [f_a, f_b, f_c]$	60 Hz
Resultados	
$V_{out(rms)} [f_a, f_b, f_c]$	[16.45, 16.49, 16.57] V
THD $[f_a, f_b, f_c]$	[0.6882, 0.597, 0.6543] %

a) Parámetros del sistema SPWM

Parámetros de SVPWM	
$V_{in}$	30 VCD
$f_{ref(rms)} [f_a, f_b, f_c]$	$-63.3 \times 10^{-4}$ V
$L [f_a, f_b, f_c]$	7700 $\mu H$
$C [f_a, f_b, f_c]$	900 $\mu F$
$R [f_a, f_b, f_c]$	20 $\Omega$
$F_c [f_a, f_b, f_c]$	$1 \times 10^5$ Hz
$F_s [f_a, f_b, f_c]$	60 Hz
Resultados	
$V_{out(rms)} [f_a, f_b, f_c]$	14.15 V
THD $[f_a, f_b, f_c]$	[0.3013, 0.2971, 0.2983] %

b) Parámetros del sistema SVPWM


## Conclusiones

La SPWM es una técnica que genera una señal de control a partir de la comparación de magnitudes entre la onda portadora y onda moduladora, empleada en algunas ocasiones para control de potencia de un aerogenerador. Modular es el proceso de incluir información a una señal de forma que se pueda procesar de manera eficiente, esto es de lo que la señal de control se encarga de realizar mediante el cambio de la señal portadora.



La SVPWM representa el estado actual de un sistema dinámico mediante un vector con magnitud y dirección para controlar el sistema en función del ancho de pulso de la señal de control. Además de ser preciso, reduce los problemas de ruido en el sistema. Sin embargo, es más compleja y requiere un procesamiento mayor que el promedio para su implementación.



Comparando estas dos técnicas, SVPWM es superior a SPWM. En primer lugar, SVPWM reduce los armónicos en la señal de salida, lo que significa que la calidad de la señal de salida es sobresaliente, además, tiene una eficiencia de conversión de energía más alta que SPWM. En general, las técnicas de conmutación deben ser seleccionadas según las características del sistema a controlar y el objetivo del control. 

## Conceptos

**Estrategia de control:** Es un plan para dirigir o fijar el comportamiento de un sistema o incluso algún proceso.

**Técnica de conmutación:** Definida como una herramienta o método que explica como un interruptor debe funcionar, "conecta" y "desconecta". Es una forma de controlar la electricidad con el objetivo de tener al sistema en un resultado previamente calculado.

**Calidad de energía:** No es más que la pureza y estabilidad en la energía eléctrica, es importante porque reduce el desgaste en los aparatos electrónicos que se conectan.

## Agradecimientos

Al CONAHCYT por permitirme seguir estudiando con la beca de posgrado CVU 1039422).

## *Para Consulta*

[1] <https://engineeringmedia.com/map-of-control>

[2] Manias SN. 2017. Inverters (DC-AC Converters). In Power Electronics and Motor Drive Systems (pp. 271-500). Elsevier <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-811798-9.00006-8>

[3] Mohammad Noor SZ, Hamzah MK, Abdul Rahman NF, Hapani AF, Idris Z. 2011. XILINX FPGA design for Sinusoidal Pulse Width Modulation (SPWM) control of single-phase matrix converter. In 2011 IEEE Symposium on Industrial Electronics and Applications, ISIEA 2011 (pp. 714–719). <https://doi.org/10.1109/ISIEA.2011.6108810>

[4] Yu X, Feng Y, Man Z. 2020. Terminal Sliding Mode Control – An Overview. In IEEE Open Journal of the Industrial Electronics Society, vol. 2 (pp. 36-52). doi: 10.1109/OJIES.2020.3040412.

[5] Khalil HK. 2002. Nonlinear Systems. Prentice Hall.

[6] Kumar KV, Michael PA, John JP, Kumar SS. 2010. Simulation and comparison of SPWM and SVPWM control for three phase inverter. ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. 5.

Crédito de imágenes en orden de aparición: siriwannapatphotos, peshkov (Getty Images, GI), Smileus (GI), Sketchify, Jupiterimages (Photo Images), Zffoto (GI Pro), scotspencer (GI Signature), gjp311 (GI Pro), phive2015 (GI Pro), Kester (sparklestroke), MarianVejcik (GI Pro), crstrbrt (GI), creativepriyanka, meen\_na (GI), grafismedia.



### **Irandi Gutiérrez Carmona**

Profesor del departamento de ingeniería mecatrónica en el Instituto Tecnológico de Monterrey en Campus Tampico, adscrito al grupo de investigación “conversión, almacenamiento y gestión de la energía” del mismo instituto. Es especialista en control automático y ha trabajado en vibraciones mecánicas, robótica, conversión de energía.

Contacto: [irandi\\_gutierrez@tec.mx](mailto:irandi_gutierrez@tec.mx)



### **Eduardo Campos Mercado**

Doctor en Ciencias con especialidad en control automático. Investigador por México CONAHCYT–Universidad del Istmo.

Contacto: [camposmela@hotmail.com](mailto:camposmela@hotmail.com)



### **Luis Angel Otamendi Cruz**

Ingeniero en Energía por la Universidad Politécnica Metropolitana de Hidalgo. Actualmente estudiante de la maestría en Ciencias de la Energía Eólica por la Universidad del Istmo, campus Tehuantepec.

Contacto: [luis.anglk@gmail.com](mailto:luis.anglk@gmail.com)







# Modelado de enfermedades infecciosas mediante ecuaciones integrales con retardo

Reynaldo Ortiz Perez  
Belem Saldivar  
Sabine Mondié



# Modelado de enfermedades infecciosas mediante ecuaciones integrales con retardo

**Cómo citar este artículo:** Ortiz-Perez R, Saldivar B, Mondié S. 2023. Modelado de enfermedades infecciosas mediante ecuaciones integrales con retardo. Revista Ciencia y Naturaleza 02 (1041): 65-77.

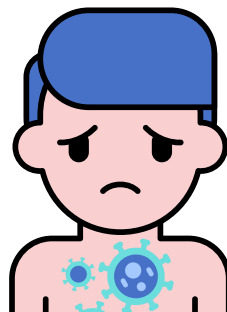
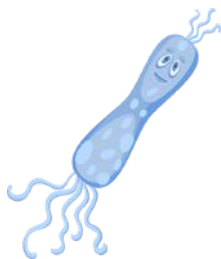


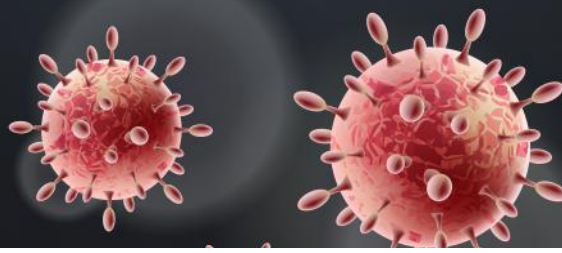


## Propagación de enfermedades

Las enfermedades infecciosas son un problema de salud a nivel mundial, algunas llegan a ser mortales, pueden ser causadas por bacterias, virus u hongos. Dependiendo de la velocidad y la efectividad con la que se propagan estas enfermedades pueden dar lugar a un brote, una epidemia y en casos más graves se puede llegar a una pandemia.

A lo largo de la historia han existido enfermedades letales cuya propagación ha reducido considerablemente a la población mundial de ese entonces. Por ejemplo, según los datos recolectados y de acuerdo con modelos modernos, se estima que la peste bubónica que afectó principalmente al norte de África, Europa y Asia llevó a la muerte a entre 80 y 220 millones de personas. La gripe española infectó a entre 40 y 50 millones de personas y fue letal para entre el 2.5 y 5% de la población mundial. La viruela fue una enfermedad infecciosa de la que se tienen registros de su existencia desde el año 10,000 a.C. y en 1980, se declaró erradicada por la organización mundial de la salud. Sin embargo, durante su existencia se produjeron epidemias periódicas que impactaron en la población mundial, ya que hasta el 30% de los infectados sucumbían ante la enfermedad, y los que sobrevivían, presentaban deformaciones producidas por las cicatrices, mientras que otros además presentaban ceguera. En América, se produjo un colapso demográfico de las poblaciones nativas debido a la introducción de la enfermedad por los colonizadores europeos.

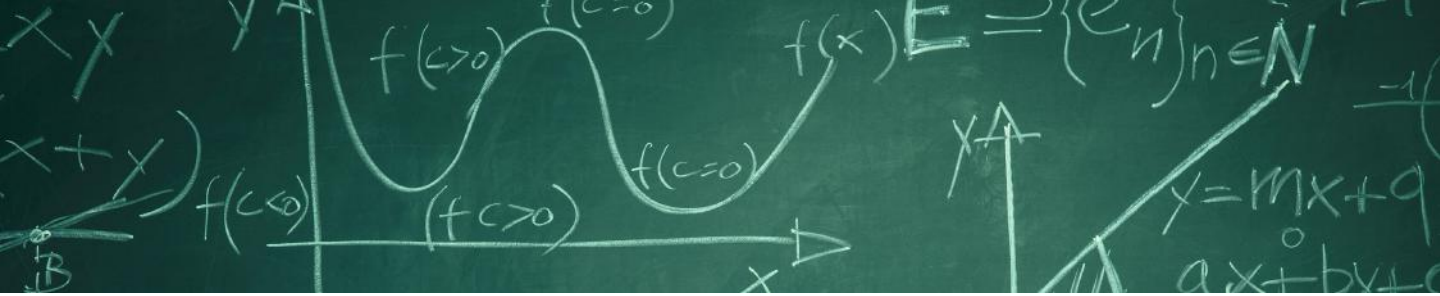




El conocimiento de la letalidad de diferentes enfermedades, así como sus secuelas motivaron a la población a tratar de evitar los contagios adoptando medidas que se siguen utilizando en la actualidad. Disponer de lugares especiales alejados de la población para tratar a los enfermos y aislar a los viajeros durante un periodo de 30 a 40 días antes de permitirles la entrada a las urbes, hoy en día se conoce como cuarentena y fue el principio del distanciamiento social como medida de prevención. Los estudios de las enfermedades y los medios por los que se propaga también ayudaron a prevenir los contagios a través de una mayor higiene y la reducción de la exposición con los infectados. Estos estudios también dieron lugar a las primeras inoculaciones que finalmente llevaron al desarrollo de vacunas para prevenir o reducir los efectos de las enfermedades. En el caso de la viruela, se llevó a cabo un programa de vacunación masiva a nivel global, promovido principalmente por la entonces Unión Soviética, con el que se logró erradicar la enfermedad.

Por otro lado, la vacunación y el desarrollo de tratamientos con antibióticos permiten controlar y evitar grandes brotes de enfermedades infecciosas, como la peste bubónica. Sin embargo, la bacteria que causa la peste bubónica sigue circulando libremente en la naturaleza, con el peligro latente de infectar a los humanos por la picadura de pulgas portadoras o por el contacto con los fluidos de animales enfermos.

En la actualidad, una herramienta de gran utilidad para los diferentes gobiernos e instituciones de salud son los modelos matemáticos que describen la propagación de enfermedades infecciosas. Estos permiten predecir la evolución de un brote y de acuerdo con el número de infectados y la velocidad con la que se propaga la enfermedad, se puede decidir si es necesario tomar medidas de salud pública como el distanciamiento social, la instalación de filtros sanitarios y la vacunación. También se puede observar la efectividad de la aplicación de estas medidas preventivas en la reducción de la propagación de dicha infección entre la población.



Cuando se habla de modelos matemáticos de enfermedades infecciosas lo más común es encontrarse con los modelos clásicos SIR (Susceptible, Infectado, Recuperado), SEIR (Susceptible, Expuesto, Infectado, Recuperado) o alguna de sus variaciones que incluyen etapas adicionales de la enfermedad a través de las que se mueve la población que se infecta. En estos modelos cada etapa de la enfermedad se describe con una ecuación diferencial.

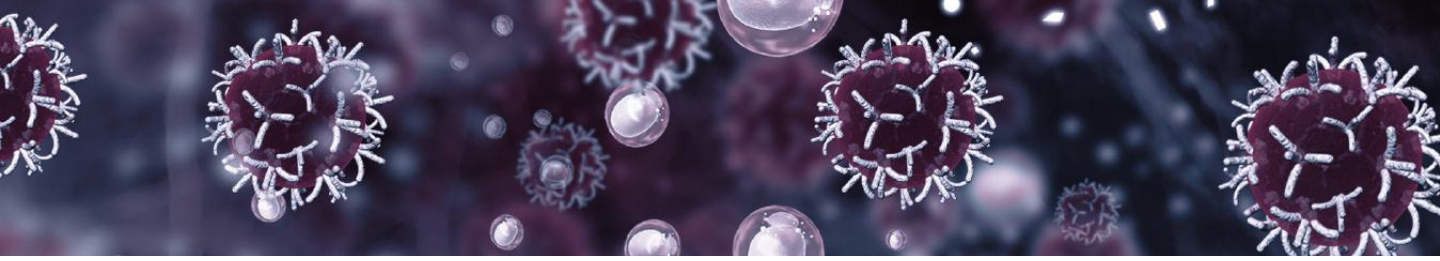
Las ecuaciones integrales con retardo no son ampliamente utilizadas como ocurre, por ejemplo, con las ecuaciones diferenciales. Esta es la razón principal por la que su aplicación y estudio pasan desapercibidos. Sin embargo, las ecuaciones integrales con retardo permiten modelar fenómenos de transporte de materiales, dinámicas internas introducidas por los controles de algunos sistemas con retardo, también modelan dinámicas de población y la propagación de enfermedades infecciosas.

## Ecuaciones integrales con retardo

Las ecuaciones integrales con retardo son un tipo de ecuaciones en las que la función a determinar se encuentra como parte de un integrando, en este caso, el valor de la función desconocida en un instante de tiempo ( $y(t)$ ) depende de sus valores en tiempos pasados. Una ecuación integral con retardo puede definirse como:

$$y(t) = \int_{-h}^0 n(\theta)y(t + \theta)d\theta,$$

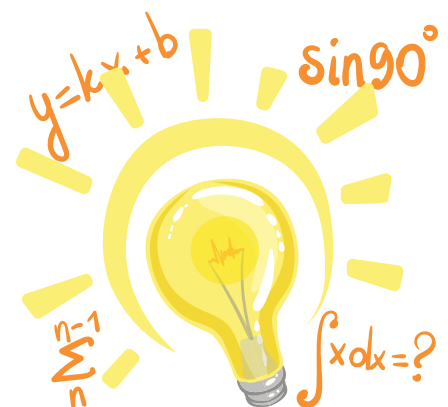
donde  $h$  es el tiempo de retardo y la función  $n(\theta)$  se llama núcleo de la ecuación, la condición inicial es una función que se denota  $\varphi(\theta)$  definida para valores de  $\theta$  entre  $[-h, 0)$ .



A pesar de la poca popularidad de las ecuaciones integrales con retardo, los modelos matemáticos que se obtienen con su uso, constituyen una alternativa que ofrece ventajas frente a los modelos más utilizados descritos por ecuaciones diferenciales. Por ejemplo en el modelado de poblaciones, se considera el rango de edad en la que las hembras son fértiles, así como las probabilidades de dar a luz a otra hembra. Realizando pequeñas modificaciones a los modelos de población y cambiando la interpretación de las variables, se obtienen modelos de propagación de enfermedades infecciosas como viruela, sarampión, paperas, gripe española, influenza y recientemente la enfermedad por coronavirus COVID-19. Los modelos basados en ecuaciones integrales con retardo permiten determinar el número reproductivo efectivo ( $R$ ) por medio de operaciones simples, dando la oportunidad de observar los cambios en el valor de este número. Otra ventaja de las ecuaciones integrales con retardo es que los modelos epidemiológicos se simplifican y se puede reducir a una o dos ecuaciones si se quiere incluir la dinámica del número efectivo reproductivo. Esto a su vez simplifica el desarrollo de simulaciones numéricas.

## Modelado de enfermedades infecciosas

El modelado matemático de diferentes fenómenos y procesos permite realizar simulaciones numéricas para observar su comportamiento bajo diferentes condiciones, lo cual simplifica la toma de decisiones. Es importante mencionar que los modelos matemáticos reducen los costos al disminuir la cantidad de ensayos reales y permiten experimentar en los casos en los que las pruebas llevarían mucho tiempo, como es el caso de las dinámicas de población.

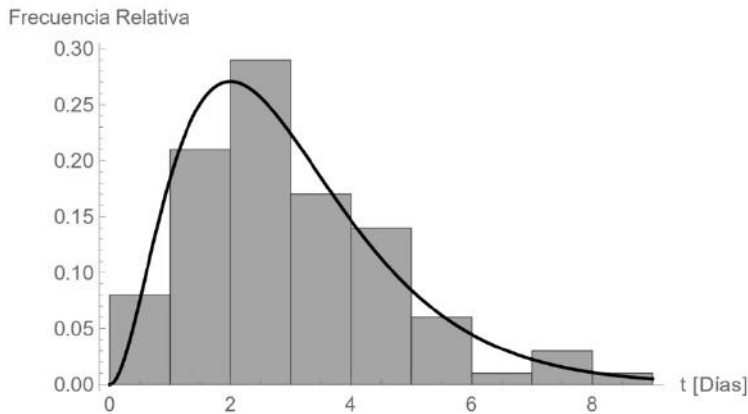


Una de las aplicaciones que en años recientes ha recibido mayor atención por parte de la comunidad científica, en parte debido a la pandemia de SARS-CoV-2, es el análisis de la propagación de enfermedades infecciosas. Debido a esta situación, los modelos de enfermedades comenzaron a tomar mayor importancia. Además de los modelos compartimentales, basados en ecuaciones diferenciales como los SIR o SEIR, se estudiaron modelos de ecuaciones diferenciales con retardos y también modelos basados en ecuaciones integrales con retardos.

El número reproductivo efectivo ( $R$ ) del que se habló tanto en las noticias durante la pandemia de COVID-19 tiene una relación directa con el modelo pues aparece de forma explícita en la ecuación integral con retardo de la forma:

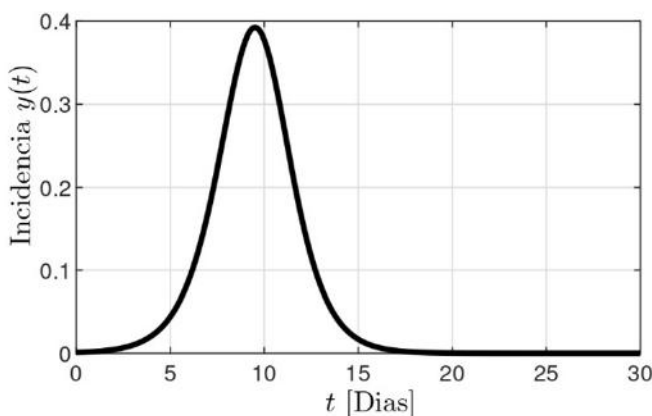
$$y(t) = R \int_{-h}^0 g(\theta)y(t + \theta)d\theta.$$

En esta ecuación, el valor del retardo ( $h$ ) es el tiempo total en que una persona se mantiene infectada, es decir, desde el momento en que tuvo contacto con una persona infectada y adquiere la infección, hasta el momento de su recuperación. La infectividad, que se puede definir como la capacidad de contagiar a otras personas, es variable; aumenta desde el momento de la infección hasta llegar a un punto en que se es más contagioso y, posteriormente, esta capacidad disminuye hasta desaparecer cuando la persona se recupera. Esta variación es capturada en el núcleo de la ecuación integral ( $g(\theta)$ ). Una buena opción para representar el núcleo de la ecuación en este caso es utilizar una distribución gama que, de acuerdo con diferentes investigaciones, es una aproximación biológicamente realista y fácil de caracterizar, pues solo se requiere de dos valores: el factor de forma y el factor de escala. En la práctica, estos valores se determinan usando datos clínicos y realizando un seguimiento de casos. La Figura 1 muestra la aproximación de un histograma de datos mediante una distribución gama.



**Figura 1.** Ejemplo de un histograma de frecuencias y su aproximación mediante una función gama. En los modelos epidemiológicos se realiza una aproximación similar con los datos clínicos y el seguimiento de casos, la función gama obtenida se utiliza como núcleo de la ecuación integral con retardo.

En los modelos integrales no es posible observar la evolución de cada etapa de la enfermedad, es decir, la población susceptible, expuesta, infectada y recuperada como ocurre en los modelos clásicos (modelo SEIR y/o sus variaciones), sino que se muestra la incidencia de la infección en la población. En otras palabras, se observa la proporción de la población que se encuentra infectada en un tiempo determinado, sin importar en qué etapa de la enfermedad se encuentran, es decir, si acaban de adquirir la enfermedad o si están a punto de recuperarse. La Figura 2 muestra el resultado obtenido al simular una ecuación integral con retardo representando la propagación de una enfermedad infecciosa.



**Figura 2.** Simulación de un ejemplo académico de una ecuación integral con retardo modelando la propagación de una infección; el núcleo de la ecuación es una distribución gama, la incidencia muestra el porcentaje de la población infectada en cada instante de tiempo  $t$ .



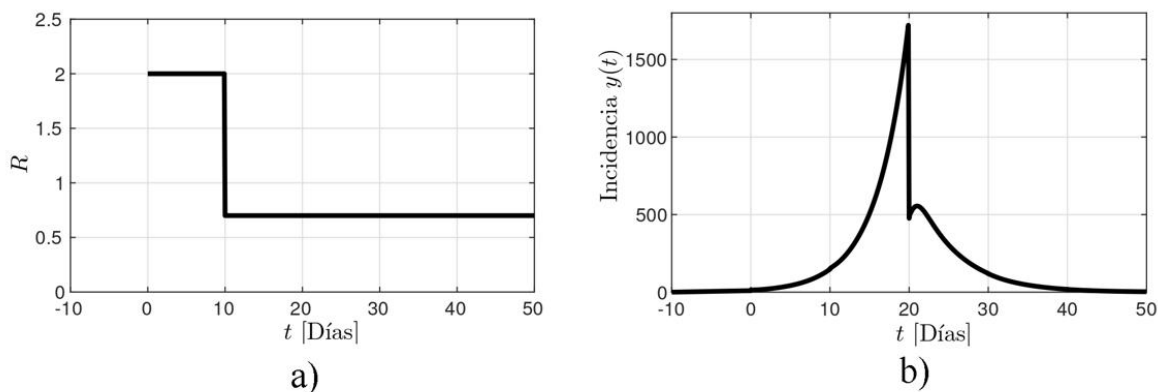


## Monitoreo del número efectivo reproductivo

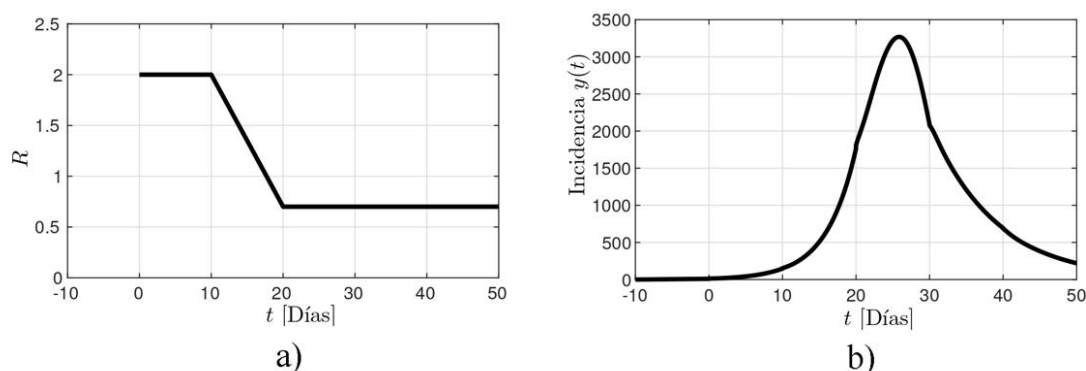
El retardo de los modelos integrales refleja de forma natural el efecto de los cambios en las interacciones de la población debido a la toma de medidas de prevención para reducir los contagios. Es decir, los cambios en la forma en que se propaga la enfermedad no se observan inmediatamente, como ocurre con los modelos que no toman en cuenta los retardos, sino que, al igual que ocurre en la realidad, los cambios se reflejan cierto tiempo después de tomar medidas sanitarias, como el uso de cubre bocas, distanciamiento social y cuarentena. De esta forma, la situación actual es un reflejo de las acciones que la población realizó con anterioridad.

Debido a que el número efectivo reproductivo aparece explícitamente en la ecuación integral, con este tipo de modelos es posible realizar un seguimiento de dicho número. Cabe mencionar que esta es una tarea muy importante, pues los cambios en el número efectivo reproductivo son un indicador de la efectividad de las políticas de salud pública que se hayan aplicado para reducir los contagios entre la población. Si el valor de  $R$  es menor a 1, la enfermedad no tiene potencial de convertirse en epidemia y será un brote que afectará a un pequeño número de individuos (la ecuación es estable). Por el contrario, si el valor es mayor a 1, la enfermedad tiene el potencial de provocar una epidemia (la ecuación es inestable). Los cambios en el número  $R$  y su efecto en la incidencia de la infección sobre la población, así como la influencia del retardo, se muestran en las Figuras 3 y 4.





**Figura 3.** Simulación de una ecuación integral con retardo de 10 días y distribución gama en el núcleo. Se considera una condición inicial constante para los 10 días previos al inicio de la propagación, en este caso la incidencia muestra el número de individuos infectados. a) Durante los 10 días previos al inicio de la propagación de la infección no hay un valor de  $R$  por lo que no se observa en la gráfica, durante los 10 días posteriores al inicio de la propagación de la infección, se considera  $R = 2$ , en el día 10 este valor se reduce abruptamente a  $R = 0.7$ . b) Se observa un crecimiento inicial rápido y posteriormente, al reducir el valor de  $R$ , la incidencia decrece hasta desaparecer, sin embargo, debido al retardo, el efecto del cambio en  $R$  se observa hasta el día 20.



**Figura 4.** Simulación de una ecuación integral con retardo de 10 días y distribución gama en el núcleo, con condición inicial constante para los 10 días previos al inicio de la propagación. La incidencia representa el número de individuos infectados. a) El valor de  $R$  en los 10 días anteriores al inicio de la propagación de la infección no aparece en la gráfica ya que en este periodo de tiempo la ecuación integral aún no actúa. Durante los primeros 10 días de la propagación se considera  $R = 2$ , en el día 10 este valor comienza a disminuir linealmente hasta llegar a  $R = 0.7$  en el día 20. b) Al principio el crecimiento es rápido, durante el periodo en que el valor de  $R$  disminuye, la incidencia llega a un punto máximo para después decrecer, debido al retardo, el efecto del cambio del valor de  $R$  en la propagación de la infección se observa 10 días después.



## Nuevos estudios

Estudios recientes utilizan las ecuaciones integrales con retardo para describir el comportamiento de la enfermedad por COVID-19. Algunos autores defienden el uso de estas ecuaciones por las ventajas que ofrecen, entre ellas la capacidad para monitorear el número efectivo reproductivo para llevar un control de las medidas de prevención de la enfermedad; el aumento o disminución de dicho número es un indicador de la efectividad de las medidas sanitarias tomadas por la población.

Ahora bien, la estabilidad de los modelos infecciosos se deduce mediante el valor del número efectivo reproductivo  $R$ . Concluir sobre la estabilidad del modelo se complica si se considera que el número efectivo reproductivo es una matriz y no un escalar. Una matriz permite considerar las interacciones entre diferentes grupos de la población, donde cada elemento representa el número esperado de infectados, como efecto de las interacciones entre los diferentes grupos. Los análisis de estabilidad que extienden el criterio de Lyapunov permiten realizar el análisis de las ecuaciones, donde  $R$  es una matriz. Cabe mencionar que el criterio de estabilidad que se ha obtenido es simple y proporciona buenos resultados, pues las condiciones de estabilidad resultan necesarias y suficientes.

En caso de que no se quieran aproximar los datos clínicos del núcleo ( $g(\theta)$ ), con las ecuaciones integrales con retardo, se tiene la posibilidad de trabajar directamente con un histograma de dichos datos mediante una ecuación con núcleo constante por segmentos, lo que deriva en una ecuación con retardos múltiples y núcleos constantes que puede expresarse como:

$$y(t) = R \sum_{j=1}^m \int_{-j\bar{h}}^0 a_j y(t + \theta) d\theta,$$



donde  $a_j$  para  $j = 1, \dots, m$  son constantes y  $\bar{h}$  es el retardo base. Gracias a la extensión del criterio de Lyapunov para ecuaciones integrales con retardo, es posible analizar la estabilidad de ecuaciones con múltiples retardos y núcleos constantes, permitiendo analizar directamente un modelo descrito por datos clínicos empleando un núcleo constante por segmentos, sin necesidad de caracterizar la distribución gama. Los estudios de estabilidad donde se compara la ecuación con múltiples retardos y núcleos constantes a partir de un histograma y la ecuación con la aproximación del histograma por una distribución gama, arrojan resultados similares para ambas ecuaciones, dando una ventaja adicional a los modelos epidemiológicos descritos con ecuaciones integrales con retardo que puede ser decisiva a la hora de modelar y simular una epidemia.

## Agradecimientos

Proyecto apoyado por el CONACYT en el año 2023. Propuesta CF-2023-I-722 y proyecto A1-S-24796



### *Para Consulta*

- Lopéz MM, Cardona Zorrilla AF. 2020. La peste negra: el enemigo incorpóreo. *Medicina* 42(2): 196–210.
- Marquez Morfin M, Molina del Villar A. 2010. El otoño de 1918: las repercusiones de la pandemia de gripe en la ciudad de México. *Desacatos: Revista de ciencias sociales* 32: 121-144.
- Fenner F, Henderson DA, Arita I *et al.* 1988. Smallpox and its eradication. *History of International Public Health* (6): 209-245.
- Ortiz R, Saldívar B, Mondié S. 2022. Modeling Infectious Diseases via Integral Delay Equations. *Revista digital AMCA* 5: 374–379.
- Champredon D, Dushoff J, Earn DJD. 2018. Equivalence of the Erlang-distributed SEIR epidemic model and the renewal equation. *SIAM Journal on Applied Mathematics* 78(6): 3258–3278.
- Coale AJ. 1972. *The growth and structure of human populations: A mathematical investigation.* Princeton University Press, Princeton, New Jersey.

- Fodor Z, Katz SD, Kovacs TG. 2020. Why integral equations should be used instead of differential equations to describe the dynamics of epidemics. <https://arxiv.org/abs/2004.07208v2>.
- Vazquez A. 2021. Exact solution of infection dynamics with gamma distribution of generation intervals. *Physical Review E* 103(4): 1–6.
- Wallinga J, Lipsitch M. 2007. How generation intervals shape the relationship between growth rates and reproductive numbers. *Proceedings of the royal society B* 274(6): 599–604.
- Ortiz R, Egorov A, Mondié S. 2022. Necessary and sufficient stability conditions for integral delay systems. *International Journal of Robust and Nonlinear Control* 32(6): 3152–3174.
- Fresnadillo-Martínez MJ, García-Sánchez E, García-Merino E *et al.* 2013 Modelización matemática de la propagación de enfermedades infecciosas: de dónde venimos y hacia dónde vamos. *Revista Española de Quimioterapia* 26(2): 81 – 91.
- Park SW, Champredon D, Weitz JS *et al.* 2019. A practical generation-interval-based approach to inferring the strength of epidemics from their speed. *Epidemics* 27: 12-18.

Crédito de imágenes en orden de aparición: Mohammed Haneefa Nizamudeen (Getty Images, GI), E\_Y\_E (GI Signature), hh5800 (GI Signature), Jelena Stanojkovic (GI), Ca-ssis (GI), Mangostar Studio, Poocho Std., amethyststudio, Tiero, NotionPic, brijith vijayan (GI), Viola08 (GI), Sketchify Education, Marcus Millo (GI), greenleaf123 (GI), metamorworks (GI), Drawlab19, ronstik (GI), wannawit (Good Choice), Greenflash, robuart.



**Reynaldo Ortiz Perez**

Egresado del programa de doctorado del Departamento de Control Automático del CINVESTAV-IPN. Sus áreas de interés son el análisis de sistemas con retardo y sus aplicaciones, sistemas biológicos, robótica, vehículos submarinos autónomos (AUV) e inteligencia artificial.

Contacto: [rortiz@ctrl.cinvestav.mx](mailto:rortiz@ctrl.cinvestav.mx)



**Belem Saldivar**

Investigadora adscrita al Departamento de Control Automático del CINVESTAV-IPN. Sus temas de investigación son control no lineal, sistemas con retardos, sistemas biomédicos, sistemas de energía renovable y control de vibraciones mecánicas.

Contacto: [belem.saldivar@cinvestav.mx](mailto:belem.saldivar@cinvestav.mx)



**Sabine Mondié**

Investigadora adscrita al Departamento de Control Automático del CINVESTAV-IPN. Sus temas de investigación son estructura de sistemas lineales, sistemas con retardos y sistemas biológicos.

Contacto: [smondie@ctrl.cinvestav.mx](mailto:smondie@ctrl.cinvestav.mx)

Revista



# Ciencia *y Naturaleza*



[www.revistacyn.com](http://www.revistacyn.com)



**¡Únete a nuestra  
comunidad!**

**No te pierdas las últimas  
Publicaciones**

**¡Siguenos en Redes Sociales!**



Artículo



Revista

Ciencia  
y Naturaleza

# Importancia del Internet de las Cosas:

## la Automatización de Procesos Industriales

Jesús Morales Valdez  
Rosario Salazar Altamirano

1059

Artículo 

# Importancia del Internet de las Cosas: la Automatización de Procesos Industriales



**Cómo citar este artículo:** Morales-Valdez J, Salazar-Altamirano R. 2023. Importancia del Internet de las Cosas: la Automatización de Procesos Industriales. Revista Ciencia y Naturaleza 02 (1059): 79-98.







## *Preámbulo sobre la automatización de procesos*

En la historia de la automatización, se conoce que la primera revolución industrial surgió con la introducción de equipos de fabricación mecánica, seguida de una segunda que involucró la producción en masa de bienes, mientras que la tercera mejor conocida como revolución digital, comprende desde principios de la década de 1970 hasta la actualidad.



Esta última, se caracteriza por el aumento de la automatización y el control de los procesos de fabricación mediante el uso de la electrónica y las herramientas de información tecnológica (IT). Todas estas revoluciones industriales han dado como resultado crecimiento económico, aumento de la productividad y bienestar con impacto positivo en bienes y servicios de alta calidad, como se describe en la Figura 1.



**Figura 1.** Las revoluciones industriales y sus aspectos más destacados.

Pese a ello, aún existen desafíos que resolver sobre problemas en la planificación y las operaciones de los procesos [1]. La mayoría de ellos son demasiado secuenciales y complejos, orientado a productos específicos.



Hoy en día, los sistemas de fabricación modernos deben ser cada vez más flexibles, reactivos, integrados y rentables, para permitir que las empresas industriales sigan siendo competitivas en una contienda internacional. Al mismo tiempo surgen nuevos desafíos, los productos deben ser más personalizados y ofrecerse en más variantes, deben ajustarse a los requisitos del mercado en menor tiempo, los ciclos de vida de los productos son más cortos que nunca y la competencia global cada vez más fuerte. Por ejemplo, los equipos de cómputo se actualizan en promedio cada 6 meses, incrementando su capacidad de almacenamiento, memorias, hasta el sistema operativo. Otro ejemplo se encuentra en la industria automotriz, donde cada año presentan nuevos modelos de automóviles con tendencia a sustituir los modelos de gasolina por eléctricos.

“No vigiles el ciclo de vida del producto,  
vigile el ciclo de vida del mercado”.

Philip Kotler

Como parte de la continua evolución tecnológica, el panorama industrial mundial ha llegado al borde de una nueva revolución que algunos han denominado Industria 4.0, también llamada industria inteligente.

Un ejemplo cotidiano de desarrollo inteligente es el dispositivo “Alexa” de la compañía Amazon. Que, a través de la interconexión con una red local, permite controlar accesorios y otros dispositivos mediante comandos de voz.





En este sentido, el internet de las cosas se puede entender como el mecanismo por el cual, objetos como televisores, teléfonos inteligentes, electrodomésticos y otros dispositivos se interconectan a internet o entre los diferentes objetos.



Este modelo de fabricación industrial avanzado está representado por un rendimiento inteligente, adaptado a la realidad virtual y digital, ya sea a través de software o mediante inteligencia artificial, y surge como una mejora de las tres revoluciones industriales precedentes, gracias a los avances tecnológicos como el Internet de las Cosas (IoT), los sensores inalámbricos, la minería de datos y la computación en la nube, entre otras tecnologías del universo digital [2].

El término Industria 4.0 apareció publicado por primera vez en noviembre de 2011 a partir de una iniciativa del gobierno alemán sobre una estrategia de alta tecnología para 2020 y desde entonces este concepto se utiliza en Europa y otras partes del mundo.

Aunque no existe una definición clara sobre este concepto, y de acuerdo con algunos autores tampoco se cuenta con ningún principio de diseño explícitamente establecido de la Industria 4.0.

## *El concepto Industria 4.0*

Simboliza la industria inteligente, caracterizada por un óptimo nivel de organización y control sobre todos los elementos que participan a lo largo de la cadena de valor en el proceso de fabricación de un producto, cuyo objetivo es optimizar el rendimiento y la eficiencia productiva, a fin de obtener los máximos resultados posibles. En esta nueva visión, se crean productos personalizados a partir de las necesidades del cliente. Su desarrollo comienza desde la etapa más temprana a partir de la idea del producto, la realización del pedido, pasando por la fabricación y la entrega al cliente final. Este proceso concluye con acciones de reciclaje. Es importante señalar que el núcleo de este enfoque es la interconectividad a través del internet de las cosas, la inteligencia artificial, las comunicaciones de banda ancha, y la disponibilidad de la información en tiempo real a lo largo de toda la cadena de valor [3].

## *Un sistema ciberfísico (CPS, por sus siglas en inglés)*

Es el resultado de la integración de la computación, como software y redes de cómputo con sistemas de diversa naturaleza, que interactúan entre sí gracias al internet de las cosas. Cuyo objetivo es controlar e interactuar con un objeto en el mundo físico. En otras palabras, se trata de sistemas contruidos a partir de la integración de ordenadores y componentes físicos.



La conexión entre personas, objetos y sistemas crea relaciones que enriquecen a todos, generando colaboraciones autoorganizadas y optimizadas en tiempo real, dentro y entre empresas. Estos pueden optimizarse de acuerdo con diferentes criterios, como costos, disponibilidad y consumo de recursos, dando como resultado una industria inteligente, encaminada a la automatización con interconectividad entre los procesos y caracterizada por la disponibilidad de la información en tiempo real dentro de la fábrica y con procesos externos. Esta nueva etapa de la revolución industrial implica la fabricación y realización de tareas por medio de equipos inteligentes, dotados de algoritmos para analizar los datos disponibles y con ello generar autoaprendizaje a través de la minería de datos, para establecer un ambiente mejor organizado dentro de una fábrica (Figura 2).



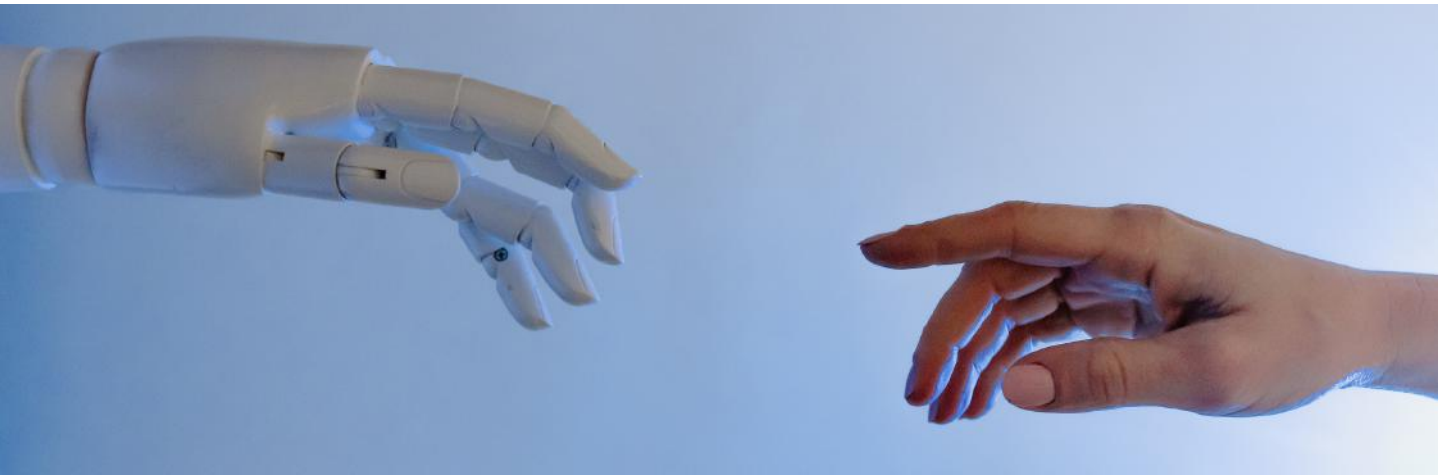
**Figura 2.** Industria 4.0

Un ejemplo de empresa bajo este enfoque es la compañía Amazon, donde todos sus procesos se encuentran optimizados. Cuando un cliente realiza una compra en su portal, está información se comparte en tiempo real a los proveedores, la planta de producción, el departamento de logística, así como la paquetería encargada de realizar la entrega, con el objetivo de optimizar los tiempos en cada etapa.



Por otro lado, aunque el concepto Industria inteligente involucra alrededor de 50 componentes, se han identificado a cuatro de ellos como los elementos clave en la arquitectura de la Industria 4.0: comenzando con 1) los sistemas ciberfísicos (CPS, por sus siglas en inglés), seguido por 2) el internet de las cosas (IoT, por sus siglas en inglés), 3) el internet de servicios (IoS, por sus siglas en inglés) y finalmente, 4) la fábrica inteligente [4].

Algunos ejemplos de sistemas ciberfísicos son el robot “Da Vinci” empleado en operaciones quirúrgicas y las prótesis biónicas colocadas en pacientes que han perdido extremidades.



En el marco de la Industria 4.0, las Fábricas Inteligentes están organizadas por una estructura modular, cuyos procesos son controlados y monitoreados por CPS, los cuales toman decisiones descentralizadas. Esto es posible gracias a la tecnología IoT, que permite la cooperación en tiempo real entre CPSs y operadores, mientras que la tecnología IoS proporciona servicios internos y transversales de la organización en toda la cadena de valor [5].



El Auto Tesla permite conectarse a internet y acceder a nuevas funcionalidades como GPS y sistema de predicción de mantenimiento.

Por esto y más, el concepto Industria 4.0 se ha convertido en un tema cada vez más importante, discutido y siendo investigado por académicos, empresas y consultores.



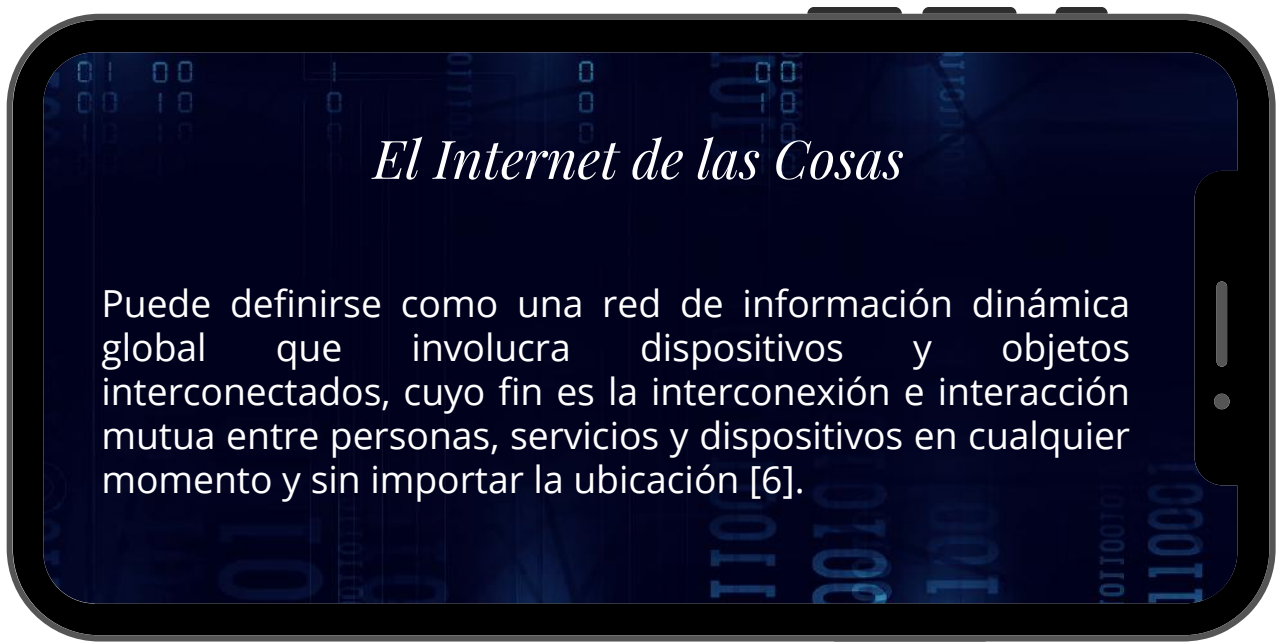
### *Importancia del IOT en la automatización de procesos*

El Internet de las cosas es una tecnología innovadora de rápido crecimiento con diversas aplicaciones, funciones y servicios en la vida cotidiana y en una amplia gama de mercados e industrias. Como resultado, se desarrollan sistemas inteligentes de toma de decisiones en tiempo real, autónomos que reducen la necesidad de participación e intervención humana, atrayendo el interés de industrias y empresas.





Por consiguiente, IoT es considerado como un facilitador de la innovación y explorador de nuevas iniciativas. En el dominio industrial está bien alineado con la arquitectura de las industrias de fabricación inteligente llamada Internet Industrial de las Cosas, que representa el núcleo en industrias modernas y de fabricación bajo el entorno 4.0. La aplicación de esta tecnología junto con el Internet de los Servicios (IoS) dió inicio a la cuarta revolución industrial.



En esta nueva faceta de la Industria 4.0, las fábricas automatizadas están interconectadas en todos sus procesos internos con otros externos, y cuenta de 3 etapas: i) dispositivos publicadores, son aquellos que envían información y la agrupan en un concentrador para posteriormente enviarla a la nube; ii) el servidor, que es donde se almacena la información en la nube, y finalmente iii) los suscriptores, son los elementos finales quienes reciben la información.

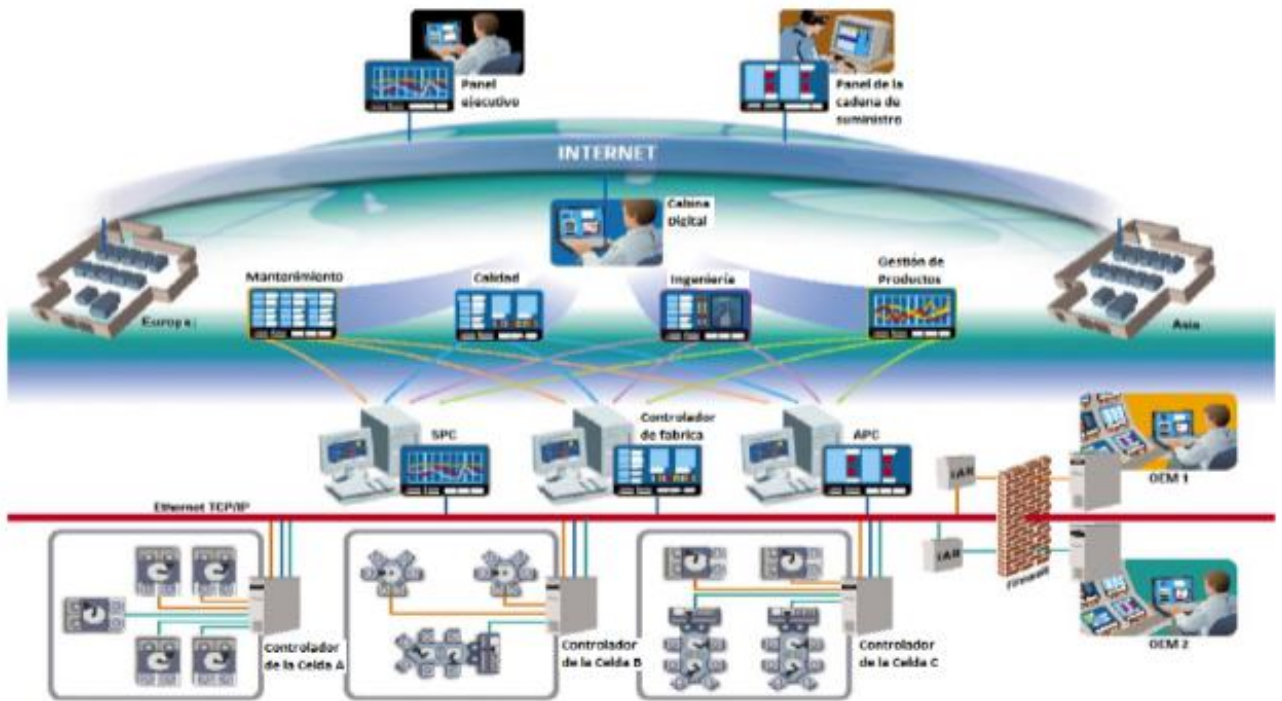


Por ejemplo, los elementos que participan en la automatización de procesos como los controladores industriales de lógica programable (PLCs, por sus siglas en inglés), robots industriales, sensores y actuadores inteligentes, entre otros dispositivos, se encuentran conectados entre sí en tiempo real mediante una red del sistema de información de la fábrica, y a la vez conectados con otras redes de aplicaciones locales y/o remotas de Interfaz Hombre-Maquina (HMI, por sus siglas en inglés) sistema de control supervisado y adquisición de datos (SCADA, por sus siglas en inglés), ver Figura 3.



**Figura 3.** Elementos de un sistema IIoT.

Esta interconexión permite adquirir grandes volúmenes de información, que es analizada para mejorar las diversas etapas en los procesos de fabricación. Generalmente los datos son obtenidos en tiempo real y se almacenan en la nube para que estén a disposición de todos y se puedan examinar en cualquier lugar (Figura 4).



**Figura 4.** Ejemplo de industria 4.0.

De acuerdo con lo anterior, IoT se puede definir como una red en la que los Sistemas Ciberfísicos (CPS) y las entidades inteligentes autoorganizadas, cooperan entre sí para alcanzar objetivos comunes. Entre las ventajas de aplicar IoT se encuentran las siguientes:

1. Este modelo de fabricación avanzada está representado por un rendimiento inteligente, con un enorme impacto económico, ya que promete una eficacia operativa sustancialmente mayor, así como el desarrollo de modelos comerciales, servicios, y productos. Los procesos de producción inteligentes y la autoconfiguración basados en IoT consideran diferentes aspectos, como el tiempo, la calidad, el precio y los aspectos ecológicos.



2. Las Fábricas Inteligentes bajo el esquema de IoT son capaces de adaptarse casi en tiempo real a las demandas del mercado en constante cambio, opciones tecnológicas y regulaciones, debido al intercambio de datos e información entre diferentes dispositivos. Dichos datos podrían representar el estado de producción, el comportamiento del consumo de energía, los movimientos de materiales, los pedidos y comentarios de los clientes, los datos de los proveedores, etc.

3. La integración de Sistemas Ciberfísicos e IoT en la logística para la Industria 4.0 permite un seguimiento en tiempo real de los flujos de materiales, un mejor manejo del transporte y una gestión de riesgos precisa, por mencionar solo algunas perspectivas. De hecho, la Industria 4.0 solo puede convertirse en realidad si la logística es capaz de proporcionar a los sistemas de producción los factores de entrada necesarios en el momento oportuno, con la calidad adecuada y en el lugar apropiado.

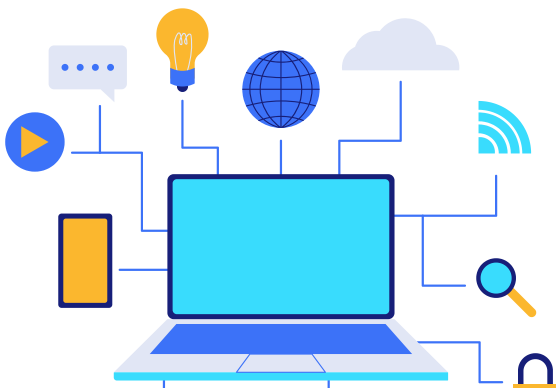
4. Adicionalmente, IoT permite el monitoreo continuo del sistema de producción y la recopilación de datos de rendimiento en tiempo real para predecir fallas y mejorar los procesos de mantenimiento de forma autónoma. Por ejemplo, cuando un sensor sale de su rango de operación, no funciona correctamente y podría provocar una situación adversa en el sistema de producción. Hoy en día, la alarma resultante se puede dirigir al personal de servicio a través del sistema de telefonía móvil en cualquier lugar, y a través del Sistema de Posicionamiento Global (GPS, por sus siglas en inglés) encuentran el lugar con mal funcionamiento. Los sistemas de PC portátiles identifican el elemento dañado y se obtiene toda la información necesaria sobre éste y sus posibles reemplazos al instante a través de canales de comunicación inalámbricos como WLAN.



Paralelo a esto, el proveedor de servicios puede surtir y reemplazar el elemento dañado. Finalmente, se puede verificar el reinicio exitoso del sistema incluso a la distancia mediante dispositivos móviles. Adicional a esto, también se pueden tomar medidas preventivas cuando el consumo de energía supera el nivel normal durante un período de tiempo. Esto ahorrará energía, reducirá el desperdicio de productos defectuosos y evitará averías en la máquina.

5. IoT permite el trabajo distante en cualquier lugar y momento utilizando algún dispositivo digital que se desee, como una computadora, teléfono celular y tableta, entre otros. Esto es posible debido a que la tecnología IoT facilita el acceso a la información disponible en la nube desde cualquier ubicación geográfica.

6. Los sistemas automatizados con base en la tecnología IoT incrementan la productividad industrial, ya que a través del análisis de los datos se pueden tomar las medidas necesarias para prolongar la vida útil de los quipos, lo que lleva a reducir los costos de producción. Además, IoT se puede combinar con algoritmos de autoaprendizaje, aprendizaje máquina y realidad aumentada, que mejoran los sistemas de producción actuales, desarrollando un ambiente mejor organizado y conectado, como sucede con las empresas manufactureras y con la administración de la cadena de suministro [2].





## *Retos del Internet de las Cosas (IOT) en la automatización de procesos*

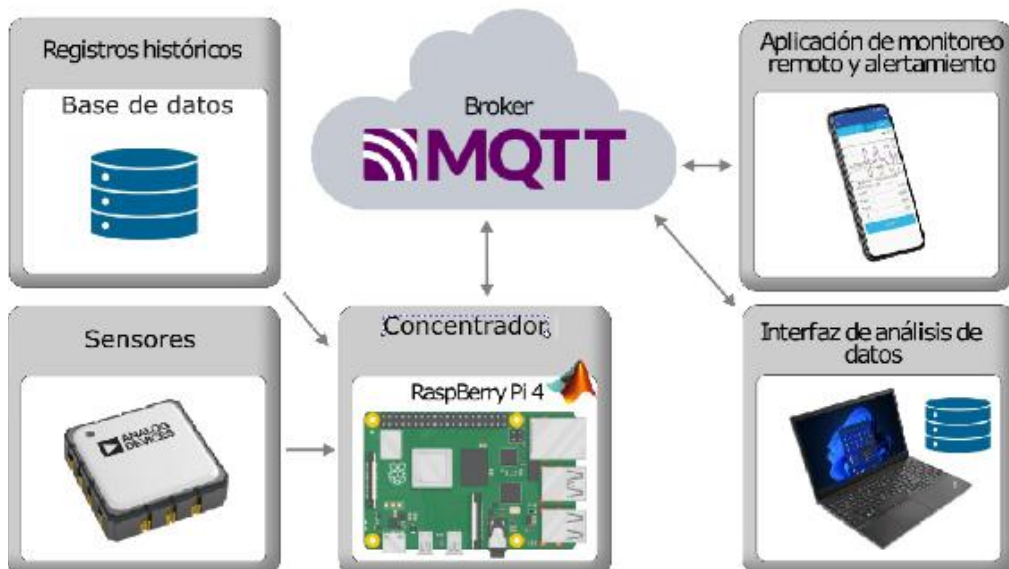
A pesar del creciente interés por el modelo Industrial 4.0, sigue siendo un concepto no consensuado. Todavía hay algunas ideas vagas sobre este nuevo paradigma de fabricación, en cuanto a sus implicaciones y consecuencias. Además, la mayoría de las empresas y fábricas no son conscientes de los desafíos que pueden enfrentar cuando quieren implementar el trasfondo de la Industria 4.0. Tomando en cuenta que IoT es uno de los elementos más importantes para el desarrollo de la Industria 4.0, a continuación, se enuncian algunos de los principales retos a resolver para su implementación:

1. El Internet de las cosas, los servicios, los datos y las personas también abre nuevas posibilidades para el robo de datos, el espionaje industrial y los ataques informáticos (Hackers). Los sistemas IoT son menos seguros de ciberataques, ya que estos se pueden ejecutar desde diversas partes del mundo a partir de un acceso a internet. Lo mismo sucede con los datos almacenada en la nube, pueden ser robados o alterados en cualquier momento, por lo que es primordial garantizar su integridad. Para superar estos problemas, se debe restringir el acceso de dispositivos a los sistemas IoT empleando identidades y claves de usuario, se deben emplear encriptaciones y evitar la instalación de software en los equipos. Estas acciones tienen por objetivo aplazar la vida del sistema IoT.





2. Las estructuras de la Información Tecnológica (IT) de la planta hoy en día están en su mayoría estrictamente centralizadas. Requieren una infraestructura de red potente para enrutar los datos de la tarea entre los dispositivos en tiempo real. El consumo de energía del centro de datos en la nube también puede ser grande y, por lo tanto, aumenta el costo computacional. Además, se deben permitir actualizaciones de tecnología sin necesidad de reprogramar el software de control. Un ejemplo de arquitectura que involucra toda esta estructura (Figura 5).



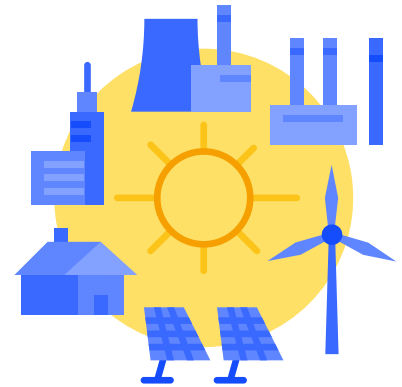
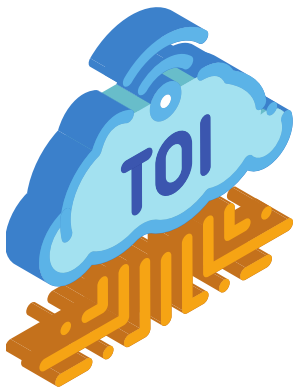
**Figura 5.** Ejemplo de arquitectura en la industria inteligente.

3. Así mismo, numerosos autores afirman que implementar Industria 4.0 es una misión difícil y es probable que tarde algunos años en realizarse. La adopción de este nuevo proceso de fabricación implica varios aspectos y enfrenta diversas dificultades y desafíos, incluidos retos científicos, tecnológicos y económicos, problemas sociales y políticos.



Por mencionar, en el año 2015 solo el 32% de las empresas reportaron contar con la tecnología necesaria para hacer la transferencia tecnológica a la Industria 4.0. El 48% contaba con al menos un elemento para hacer la transición y el 20% no contaba con elementos para transformar su Industria a la 4.0 [7] .

4. La falta de plataformas y protocolos de operación universal. Actualmente empresas como Microsoft, Google, Amazon, pioneras en el desarrollo de tecnología de la información comienzan a desarrollar plataformas como Microsoft Azure, Google Cloud y Amazon Web Service, respectivamente, para desarrollar arquitecturas con base en IoT.



Pese a los retos actuales sobre el desarrollo de la Industria 4.0, ésta representa un área de oportunidad para el desarrollo de tecnologías de vanguardia e innovación. Además, se supone que el impacto económico de esta revolución industrial será enorme, ya que promete una eficacia operativa sustancialmente mayor, así como el desarrollo de modelos comerciales, servicios, y productos.







## *Conclusiones*

Las aplicaciones de la Industria 4.0 tienen el potencial de ser pioneras o crear un impulso para una red de producción y suministro geográficamente diversificada en el mercado crecimiento. Actualmente existe un enorme esfuerzo en el desarrollo de algoritmos sobre inteligencia artificial y minería de datos, que facilitarán el análisis de la información.

Esto también incluye el desarrollo de tecnología de control, sistemas SCADA y experiencia en arquitectura de software específica, por ejemplo, en arquitecturas de seguridad en el contexto del acceso remoto. Estos aspectos son importantes, que se espera sean resueltos en los próximos años.

## *Agradecimientos*

Este artículo fue realizado con el apoyo de la Universidad Autónoma de la Ciudad de México a través del proyecto UACM CCYT-2023-INI-02. Los autores también desean externar su agradecimiento a los revisores anónimos por sus valiosos comentarios y sugerencias que ayudaron a mejorar significativamente la calidad de este trabajo.

Crédito de imágenes en orden de aparición: OpenIcons (Pixabay, P), cwizner (P), metamorworks (Getty Images Pro, GIP), phtorxp (P), sasirin, Grumpy Cow Studios, geralt (P), Foto-Rabe (P), Tumisu (P), Tara Winstead (Pexels, Pex), cimages, Anne, Umnat Seebuaphan's Images, ivanastar (getty Images Signature, GIS), chitsanupong's Images, imaginima (GIS), laddlajutt1722 (P), Josh Sorenson (Pex), Mergy, Awemob Graphics, picjumbo.com (Pex), Giuseppe Ramos J, Angel Baby, peshkov (getty Images, GI), Markus Burkle (Pex), pikepicture, Chattapat, Macrovector, Johnson (P), Magda Ehlers (Pex). Créditos de figuras: figura 2 y 3 Curso de programación del PACSYSTEM Rx3i de Ge Fanuc dictado por RV group. Otras figuras que aparecen en este artículo fueron proporcionadas por los autores.

*Diseño de publicación: David Paz y Rubén Sarmiento*



## Para Consulta

1. Zuehlke D. 2010. Smart factory towards a factory of things. *Ann. Rev. Cont.* 34:129-138.
2. Yan J, Meng Y, Lu L, *et al.* 2017. Industrial big data in an industry 4.0 environment: Challenges, schemes and applications for predictive maintenance. *IEEE Access* 5: 23484-23491.
3. Geissbauer R, Schrauf S, Koch V, *et al.* 2014. Industry 4.0: Opportunities and challenges of the industrial internet. *PwC*: 5-50.
4. Hermann, M, Pentek T, Otto B. 2016. Design principles for industrie 4.0 scenarios. 49th hawaii international conference on system sciences (hicc). 3928-3937.
5. Lasi H, Fettke P, Kemper HG, *et al.* 2014. Industry 4.0. *Business & amp. information systems engineering* 6(4): 239-242.
6. Lampropoulos G, Siakas K, Anastasiadis T. 2018. Internet of things in industry: contemporary application domains, innovative technologies and intelligent manufacturing. *People* 6(7).
7. Schlaepfer RC, Koch M, Merkofer P. 2015. Challenges and solutions for the digital transformation and use of exponential technologies.



**Jesús Morales Valdez**

Profesor Investigador en la Universidad Autónoma de la Ciudad de México (UACM), adscrito al Colegio de Ciencia y Tecnología. Es especialista en el área de Control Automático, con habilidades en automatización, el modelado, estimación e identificación de sistemas dinámicos.

contacto: [jesus.morales@uacm.edu.mx](mailto:jesus.morales@uacm.edu.mx)



**Rosario Salazar Altamirano**

Realizó sus estudios de licenciatura y posgrado en la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). Es especialista en el área Eléctrica, con habilidades en automatización y en el análisis de cargas en líneas de transmisión eléctrica.

contacto: [macusala@hotmail.com](mailto:macusala@hotmail.com)