

Artículo



Revista  
**Ciencia**  
*y Naturaleza*

# Energías limpias aplicando las matemáticas

Yoswaldo Gómez Cabrera  
Eduardo Campos Mercado

1031

Artículo

# 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 01 (1031): 00-00.

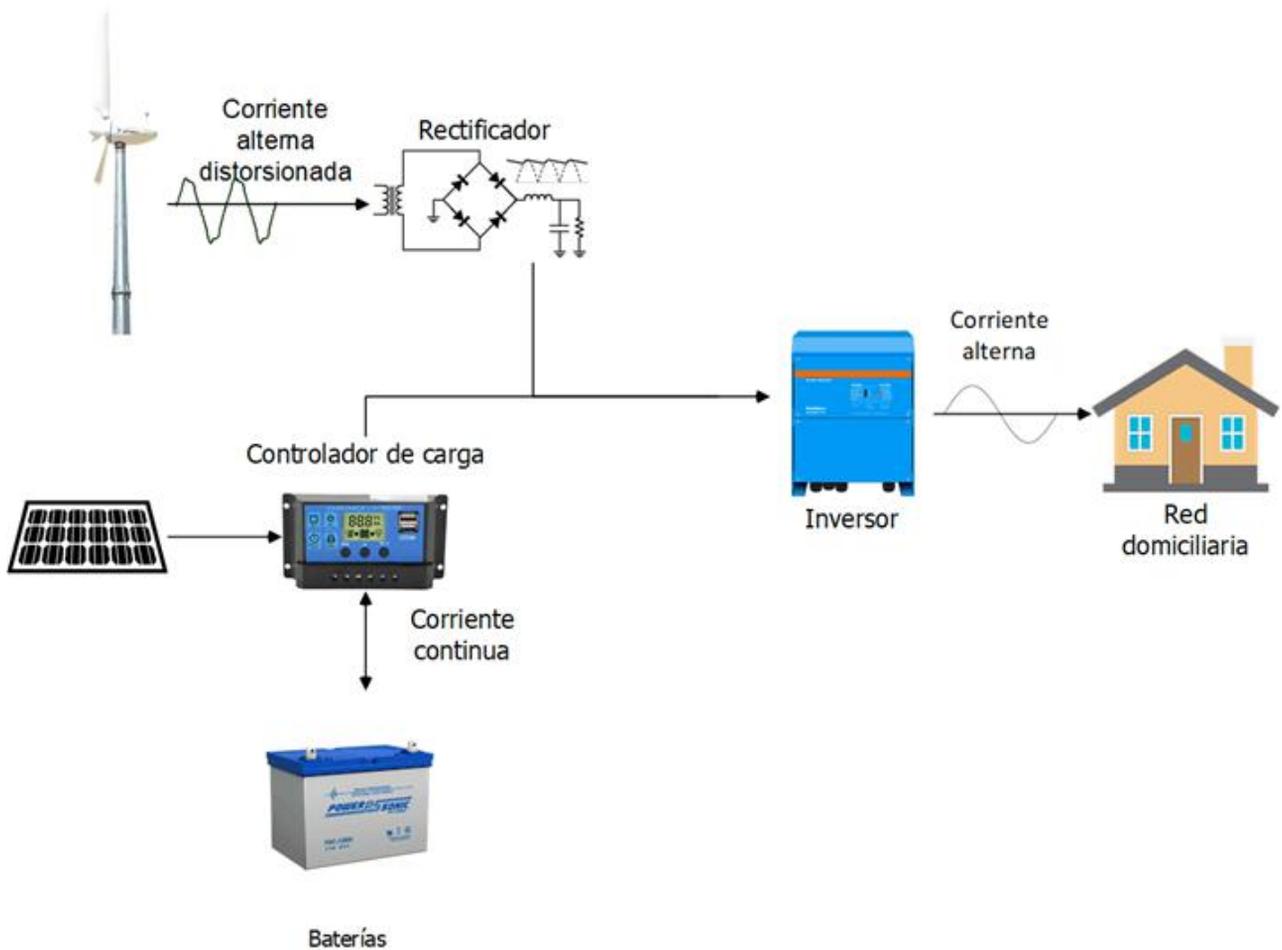


## L La relevancia de las energías limpias

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).

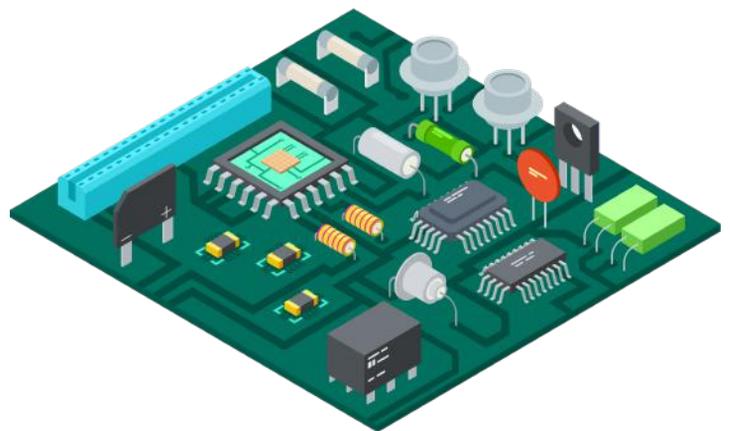


## ¿Qué es un inversor?

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.

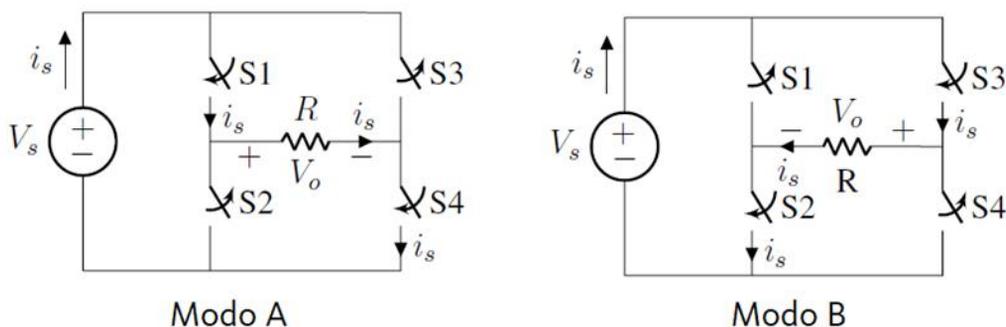




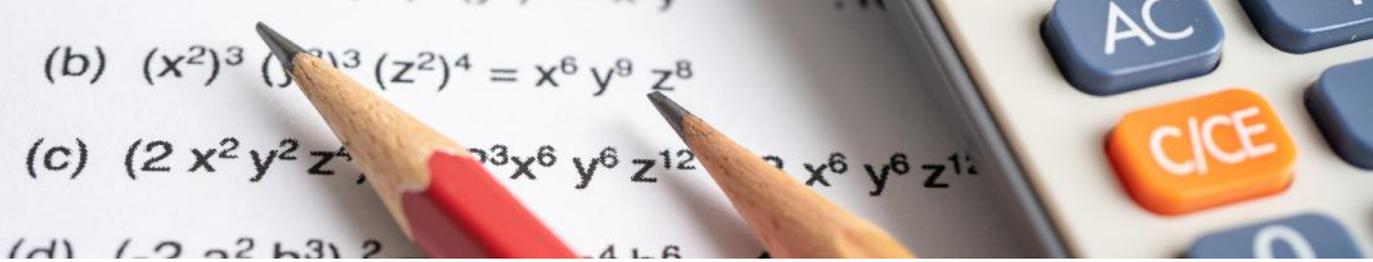
Los cuatro transistores (S1, S2, S3 y S4) conforman la etapa de potencia y funcionan a manera de interruptores que están dispuestos en un arreglo similar a la letra H, (Figura 3). Los interruptores se activan en parejas siendo que un par conducen corriente y el otro par no, cuando se activa la pareja 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].



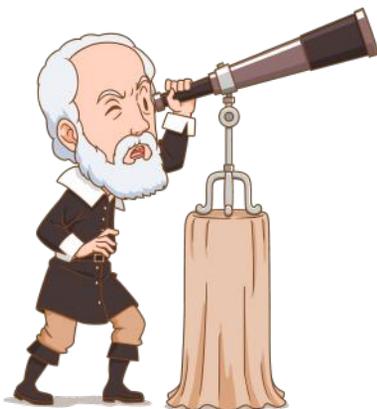
**Figura 3.** Arreglo de transistores en el inversor electrónico de potencia. En el modo A tendremos un voltaje positivo en la carga igual al de la fuente de alimentación del inversor, y en el modo B el voltaje se invierte en la carga.



## 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.

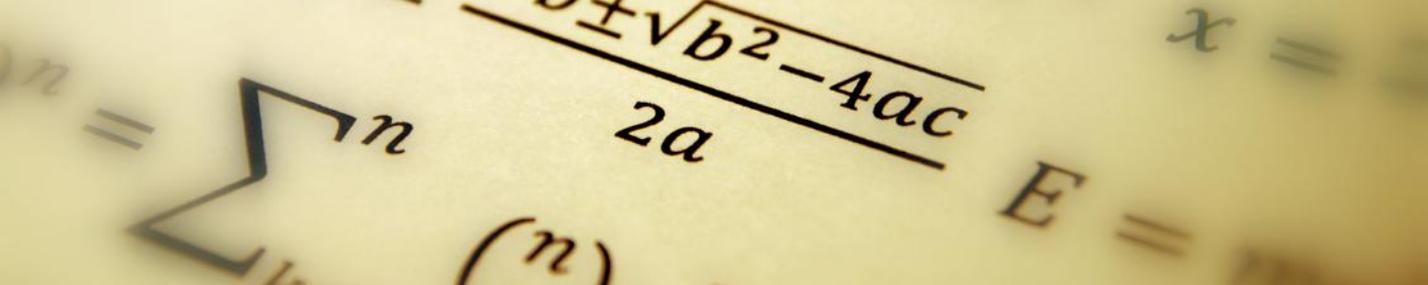
A partir de la modelación matemática del inversor electrónico de potencia es posible analizar su comportamiento para proponer algoritmos de control que alcancen el objetivo de regular el voltaje de salida de la misma. Es aquí donde realmente toma importancia la aplicación de las matemáticas, con la finalidad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



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

**Galileo Galilei**

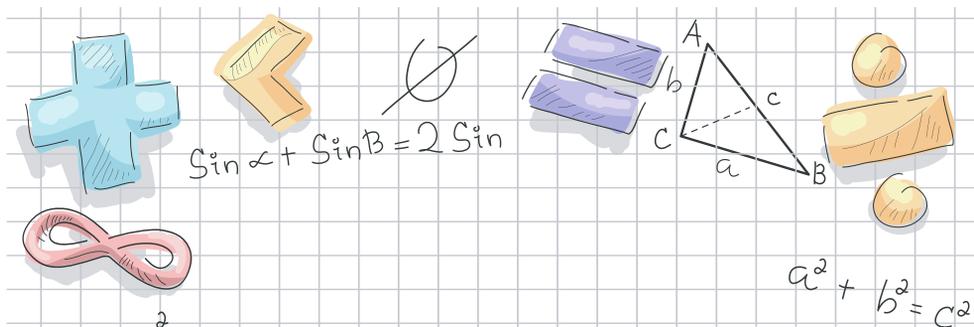
Los sistemas de control son capaces de manipular una o varias variables del sistema, un ejemplo es cuando una persona toma una ducha. Para regular la temperatura del agua, la persona ajusta las válvulas de agua fría y caliente. Si el agua caliente fuera de repente más caliente (perturbación de temperatura), 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 $\Omega$

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

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



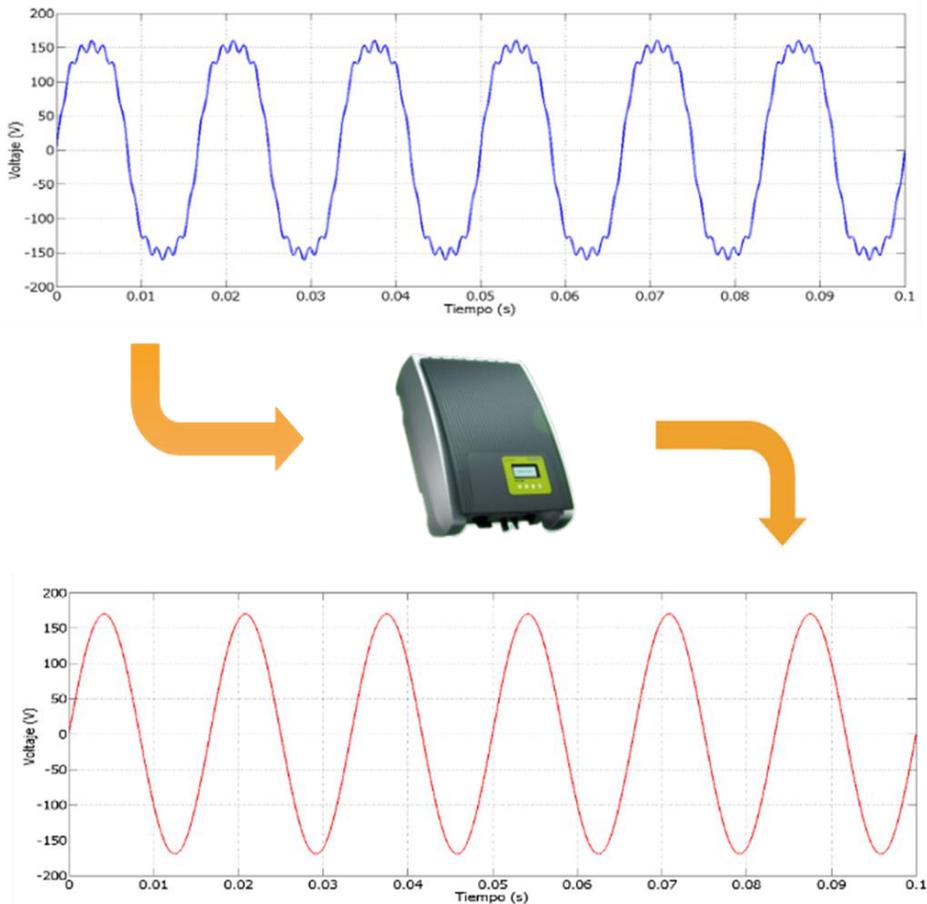
$$z_1 = v_c - v_r \quad (3)$$

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

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

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

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), seagul (pixabay), 3k des111gn, Malchev, BlueRingMedia bluringmedia, 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 CONACYT-Universidad del Istmo.  
Contacto: [ecampos@conacyt.mx](mailto:ecampos@conacyt.mx)