

Artículo



Revista

Ciencia
y Naturaleza

Convirtiendo el viento en energía eléctrica

Eduardo Campos Mercado
Jonathan Benítez Ovando
Efraín Dueñas Reyes

1090

Artículo

Convirtiendo el viento en energía eléctrica

Cómo citar este artículo: Campos-Mercado E, Benites-Ovando J, Dueñas-Reyes E. 2024. Convirtiendo el viento en energía eléctrica. Revista Ciencia y Naturaleza (1090).



A photograph of several wind turbines against a sunset sky with large, orange-tinted clouds. The sun is visible on the left side, creating a bright glow. The turbines are in the foreground, with their blades extending across the frame.

Energía en el viento

El aire es una mezcla de gases que se encuentran en la atmósfera terrestre y está compuesta principalmente por nitrógeno, oxígeno, dióxido de carbono, entre otros. Cuando el aire está en movimiento se le llama viento y dicho movimiento es generado gracias a los cambios de temperatura que se producen en el aire debido a la energía solar que llega a nuestro planeta. En consecuencia, podemos notar que el viento es una fuente de energía renovable que siempre hemos tenido disponible y gracias a las tecnologías puede aprovecharse como una fuente principal de energía para producir electricidad.



La energía que nos proporciona el viento, la cual técnicamente la llamamos **energía eólica**, ha sido utilizada principalmente para mover embarcaciones de vela y para hacer funcionar los molinos de viento, los cuales comúnmente son confundidos con los aerogeneradores.



Es importante señalar que un aerogenerador no es lo mismo que un molino de viento, aunque en apariencia son similares y ambos utilizan la energía eólica como principal fuente de energía, son cosas muy diferentes. Una analogía a esto, es como querer pensar que una bicicleta es lo mismo que una motocicleta, ambas nos sirven para transportarnos y tienen dos ruedas, pero en esencia son cosas diferentes. Un aerogenerador entonces, es una máquina que nos permite transformar la energía eólica en energía eléctrica, dicho de otro modo:

“Un aerogenerador convierte la energía cinética del aire en energía eléctrica, la cual es utilizada en una amplia variedad de aplicaciones en nuestra vida diaria”.



En la Figura 1 se muestra el esquema general de un aerogenerador de eje horizontal de baja potencia, el cual está formado principalmente por el rotor eólico, el generador eléctrico y el sistema electrónico de potencia.





El **rotor eólico** es el que se encarga de captar la energía del viento y transmitirla al **generador eléctrico** para producir corriente eléctrica. Sin embargo, es importante resaltar que la energía eléctrica producida tiene variaciones en su amplitud y frecuencia debido a los cambios de velocidad y dirección del viento. El **sistema electrónico** de potencia es el encargado de convertir la energía eléctrica producida para que esta cumpla con las especificaciones técnicas del sistema eléctrico.

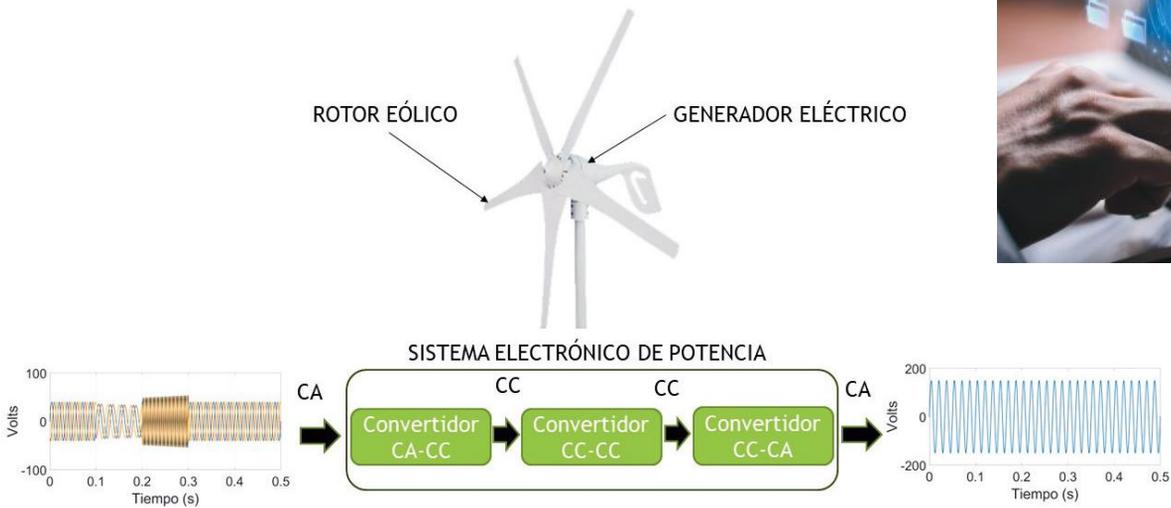


Figura 1. Esquema general de un aerogenerador de eje horizontal de baja potencia.

Sistema electrónico de potencia

En términos generales, los convertidores electrónicos de potencia son dispositivos que permiten convertir la corriente eléctrica en sus diferentes formas, de Corriente Alterna (CA) a Corriente Continua (CC) o viceversa, incluso en la misma forma, pero con diferentes características técnicas. Según la forma en la que se convierte la corriente eléctrica se tienen 4 tipos de convertidores: Rectificador (CA-CC), Inversor (CC-CA), Chopper (CC-CC) y Cicloconvertidor (CA-CA).



En este trabajo nos centraremos en regular el voltaje de salida de un convertidor Chopper, específicamente un convertidor reductor, utilizado en el sistema electrónico de potencia que se ilustra en la Figura 1. Observe, que dicho sistema está formado por un rectificador, un convertidor reductor y un inversor. El rectificador se encarga de convertir la corriente alterna producida por el generador eléctrico, en este caso un generador trifásico de imanes permanentes, en corriente continua, obteniendo una sola señal de voltaje positivo.



Sin embargo, esta señal de voltaje varía debido a los cambios de velocidad que induce el rotor eólico en el generador eléctrico debido a las variaciones en la velocidad del viento. Es por esta razón que se implementa el convertidor reductor, con la finalidad de mantener constante el voltaje de entrada del inversor electrónico de potencia, el cual finalmente produce una señal de voltaje alterno con las especificaciones técnicas necesarias para alimentar los dispositivos que se utilizan en la vida diaria o en su defecto enviar la energía eléctrica producida a la red eléctrica.

Convertidor Reductor

Este tipo de convertidor CC-CC es utilizado para regular el voltaje de salida ($V_s(t)$) por debajo del valor de su voltaje de entrada ($V_e(t)$). La representación del circuito eléctrico es relativamente simple, como se puede observar en la Figura 2.



Note, que sus principales componentes son: un interruptor de potencia (T_{MOSFET}), un diodo (d), una inductancia (L) y un capacitor (C). En este caso en particular se utilizó una carga resistiva (R) para las pruebas experimentales que se explican en la sección de resultados.

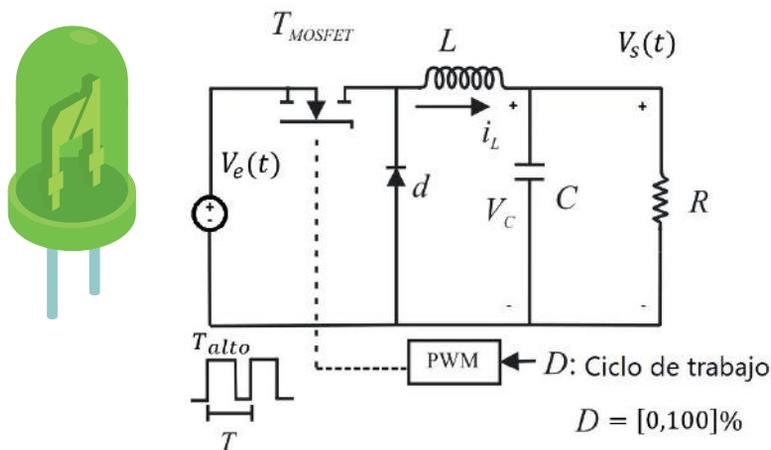
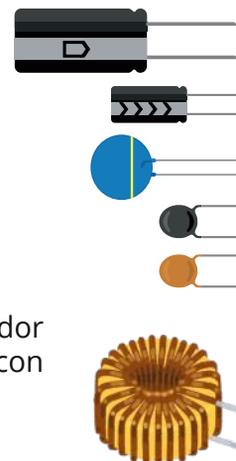
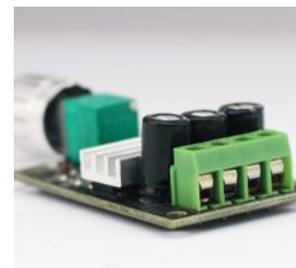


Figura 2. Convertidor reductor (CC-CC) con carga resistiva.



En la Figura 2 se puede observar que el interruptor de potencia está gobernado por una señal que puede adquirir un valor alto o bajo (1 o 0 respectivamente), durante un periodo (T). Esto básicamente hace que el interruptor conecte o desconecte la fuente de alimentación al circuito.



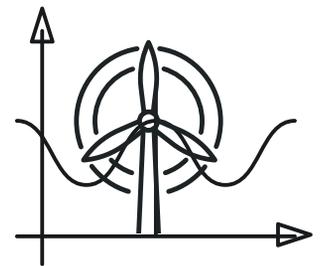
Es importante mencionar, que la relación que existe entre el tiempo que la señal permanece en alto (T_{alto}) y el periodo de dicha señal, se conoce como ciclo de trabajo (D), esto es $D = \left(\frac{T_{alto}}{T}\right)$.





Por cuestiones prácticas, la variación del ciclo de trabajo se representa en términos porcentuales ($D \in [0, 100]\%$). A esta técnica en la que se modifica el ciclo de trabajo de una señal periódica se le conoce como modulación por ancho de pulso o PWM (*Pulse Width Modulation*, por sus siglas en inglés), más detalles sobre dicha técnica ver [1].

Para diseñar y fabricar el convertidor reductor es importante considerar las especificaciones técnicas del generador eléctrico, principalmente el voltaje y la corriente que este produce, además de definir las características de operación que se requieren. En la Tabla 1 se muestran los parámetros obtenidos del convertidor reductor con el que se regula el voltaje que requiere el inversor electrónico de potencia para su correcto funcionamiento.



$V_s(t) = 12V$	$f = 10KHz$	$\Delta V_s(t) = 0.1V$	$\Delta I_s(t) = 0.21_s$	$P_{carga} = 30W$
$V_e(t) = 40V$	$D = 60\%$	$C = 62.5\mu F$	$L = 1.7mH$	

La señal PWM que manipula la operación del interruptor de potencia se produce con una tarjeta Arduino Due, la cual está embarcada con todos los componentes que forman el convertidor reductor, como se muestra en la Figura 3. La tarjeta Arduino Due tiene un microcontrolador en el cual se programa el algoritmo de control que permite calcular el ciclo de trabajo que se requiere durante la operación del convertidor reductor.

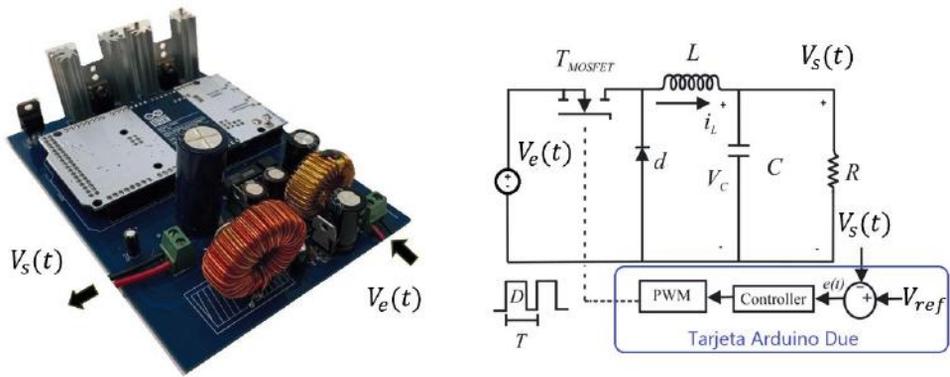


Figura 3. Convertidor reductor (CC-CC) implementado en el Sistema Electrónico de Potencia. Cabe mencionar, que la tarjeta electrónica del convertidor reductor cuenta con más componentes, para el acondicionamiento de señales, que no están representados en el circuito general del mismo convertidor.

Algoritmos de control



Los algoritmos de control son un conjunto de ecuaciones que procesan la información de una o varias variables del sistema, obtenida de los sensores, para manipular la señal de salida con el objetivo de alcanzar los valores de referencia establecidos según las necesidades de operación de dicho sistema. En este caso, el objetivo es regular el voltaje de salida del convertidor reductor a un valor constante, para lo cual, se ha

propuesto implementar un algoritmo de control por modos deslizantes con una acción integral con ganancia variable; para más detalles sobre el desarrollo analítico del controlador consultar [2]. Ahora, considerando los parámetros de diseño mostrados en la Tabla 1, se tiene que el voltaje de salida $V_s(t)$ será igual a 12V siempre y cuando el voltaje de entra $V_e(t)$ sea igual a 20V y el ciclo de trabajo (D) sea del 60%.



Sin embargo, ya se ha dicho que el voltaje $V_e(t)$, el cual será producido por el rectificador, no se mantendrá constante debido a los cambios de velocidad que genera el rotor eólico en el generador eléctrico. En consecuencia, es necesario implementar un controlador que manipule el valor del ciclo de trabajo ($D(t)$) de la señal PWM para que el voltaje de salida del convertidor reductor se mantenga en el valor de referencia ($V_{ref} = 12V$). Con base en lo anterior, se define el error del sistema como:

$$e(t) = V_{ref} - V_s(t) \quad (1)$$

y el controlador propuesto mediante la siguiente expresión

$$D(t) = K \operatorname{sgn}(e(t) + \alpha \dot{e}(t)) + K_i(t) \int_0^t e(\gamma) d\gamma \quad (2)$$

con

$$K, \alpha > 0; \quad K_i(t) = \begin{cases} b \left| \int_0^t e(\gamma) d\gamma \right|^{(\mu-1)} & \text{si } \left| \int_0^t e(\gamma) d\gamma \right| > d \\ bd^{(\mu-1)} & \text{si } \left| \int_0^t e(\gamma) d\gamma \right| \leq d \end{cases} \quad b, d > 0; \mu \in [0,1] \quad (3)$$

donde $K_i(t)$ es la ganancia variable que permite acotar la acción integral.

Resultados experimentales

Normalmente la variación repentina de la velocidad del viento tiene mayor efecto en la dinámica de los aerogeneradores de baja potencia en comparación con los de alta potencia. Por esta razón, es de suma importancia incorporar al sistema electrónico de potencia un convertidor CC-CC que regule el voltaje de entrada al inversor. En la Figura 4 se muestra la plataforma experimental que se ha desarrollado para evaluar el desempeño del algoritmo de control implementado en el convertidor reductor cuando el aerogenerador está sometido a ráfagas Extremas de Operación (EO) como se describe en la norma IEC 61400-2, más detalles ver [3].



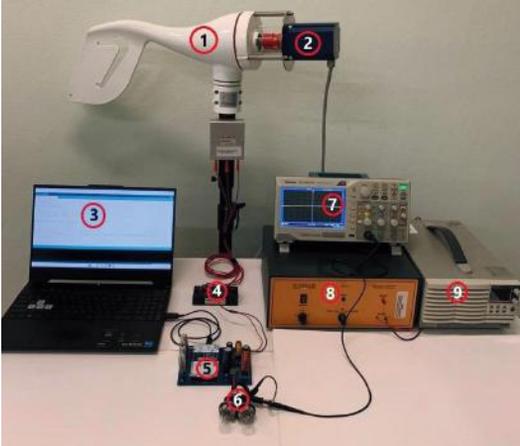


Figura 4. Plataforma experimental para validar la operación del convertidor reductor ante ráfagas de viento, formada por un (1) aerogenerador de baja potencia modificado, (2) motor a pasos acoplado, (3) generador eléctrico para emular el rotor eólico, (4) rectificador trifásico, (5) convertidor reductor, (6) dos focos incandescentes conectados en paralelo como carga resistiva, (7) osciloscopio para medir el voltaje de entrada ($V_e(t)$) y salida ($V_s(t)$) del convertidor reductor, (8) una fuente de alimentación con entrada analógica para variar la velocidad angular del motor a pasos y (9) una fuente de alimentación programable.

La fuente de alimentación programable genera una señal de voltaje utilizando la información obtenida de una estación meteorológica para que el motor a pasos emule el comportamiento del rotor eólico ante la presencia de la ráfaga de viento mostrada en la Figura 5.

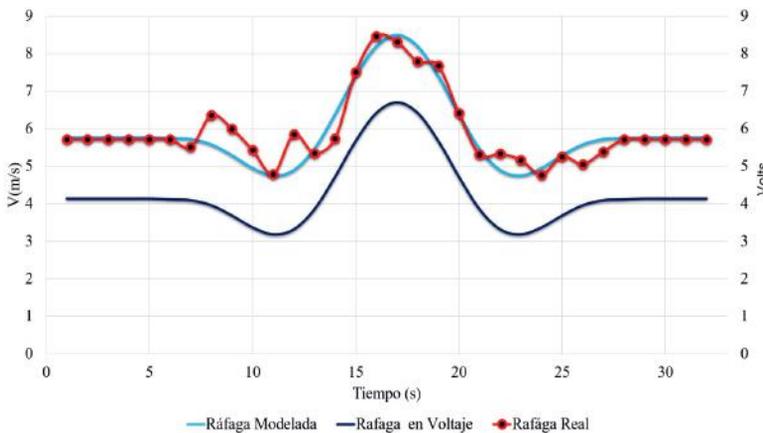
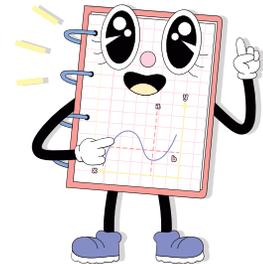


Figura 5. Ráfaga EO detectada en los datos adquiridos por la estación meteorológica instalada en la Ventosa, Oaxaca, México.



Una vez emulada la dinámica del rotor eólico ante una ráfaga de viento, se puede observar que el voltaje $V_e(t)$ producido por el rectificador, conectado al aerogenerador, varía proporcionalmente a la velocidad de dicha ráfaga de viento, como se aprecia en la Figura 6.

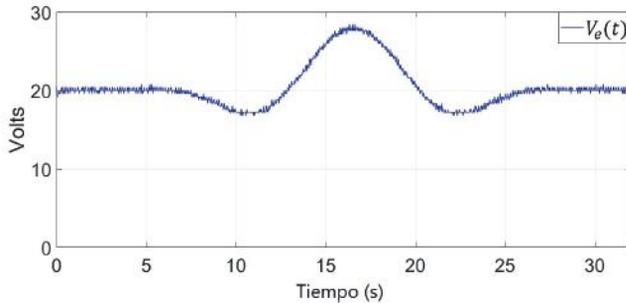


Figura 6. Voltaje de entrada $v_e(t)$ al convertidor reductor producido por el rectificador.



Lazo abierto

Las pruebas del sistema en lazo abierto hacen referencia a que no se utilizó ningún algoritmo de control para manipular el ciclo de trabajo (D) de la señal PWM generada por la tarjeta Arduino Due. En este caso se le asigna un valor constante según los parámetros obtenidos en el diseño, los cuales por fines prácticos se han mostrado en la Tabla 1, esto es $D = 60\%$ como se puede observar en la Figura 7. Es importante mencionar que debido a la resolución de la tarjeta Arduino Due, el valor del ciclo de trabajo opera en el intervalo $D \in [0, 1024]$, siendo el valor de 1024 equivalente al 100%.

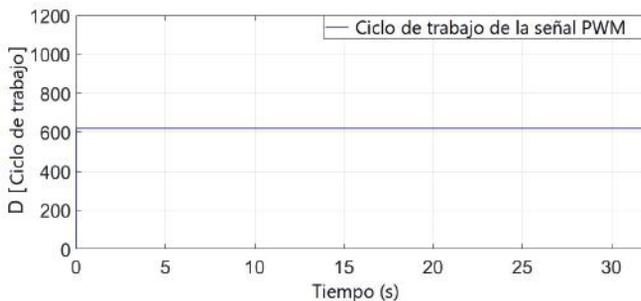
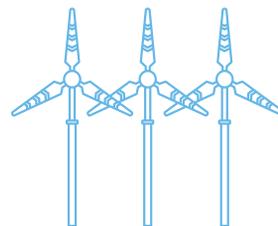


Figura 7. Ciclo de trabajo (D) de la señal PWM obtenido con los parámetros de diseño.



En la Figura 8 se puede observar que durante los primeros 5 segundos el voltaje de salida ($V_s(t)$) del convertidor reductor se mantiene en el valor de referencia (V_{ref}). Sin embargo, cuando se tiene la presencia de la ráfaga EO el desempeño del convertidor se ve afectado por la variación del voltaje $V_e(t)$.

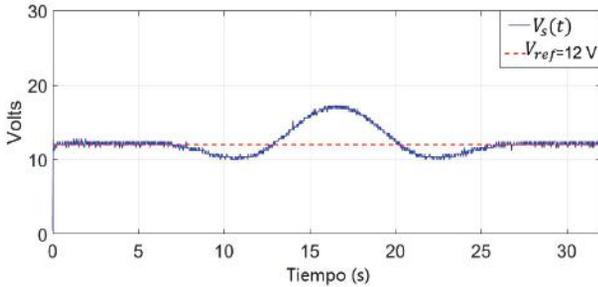


Figura 8. Voltaje de salida ($V_s(t)$) del convertidor reductor en lazo abierto.



Lazo cerrado

Cuando se menciona que el sistema está en lazo cerrado, quiere decir que se ha implementado un algoritmo de control con el cual se ajusta el valor de D para la operación del Mosfet. En este caso, se implementa en la tarjeta Arduino Due el algoritmo de control descrito en la ecuación (2) para manipular el ciclo de trabajo (D) de la señal PWM, como se puede apreciar en la Figura 9, con la finalidad de mantener el voltaje de salida ($V_s(t)$) lo más cercano posible al valor de referencia (V_{ref}).

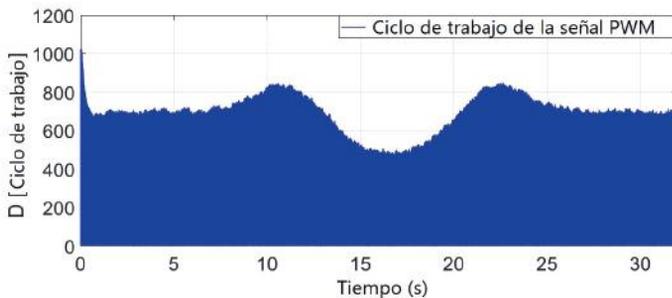


Figura 9. Ciclo de trabajo (D) de la señal PWM generado por el algoritmo de control propuesto.



Cabe mencionar que las pruebas experimentales del sistema en lazo cerrado se realizaron bajo las mismas condiciones que las pruebas realizadas con el sistema en lazo abierto, de ahí la importancia de contar con una plataforma experimental que permita replicar las condiciones experimentales las veces que sean necesarias. Finalmente, en la Figura 10 se puede observar que se cumple con el objetivo de control, es decir el voltaje de salida ($V_s(t)$) del convertidor reductor se mantiene muy cercano al valor de referencia ante la presencia de la ráfaga EO.

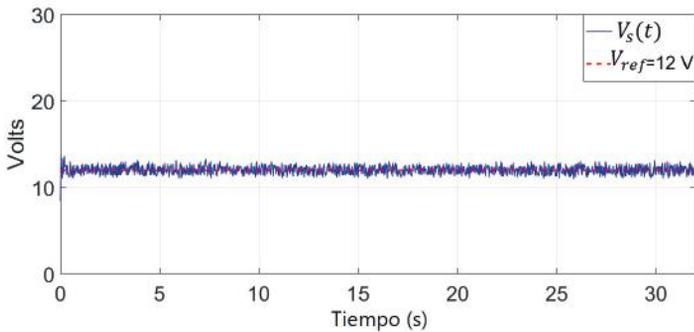


Figura 10. Voltaje de salida ($V_s(t)$) del convertidor reductor en lazo cerrado.



Para llevar



Los avances tecnológicos y científicos son fundamentales para mejorar el rendimiento de los aerogeneradores, con lo cual es posible transformar la energía cinética del aire en energía eléctrica. Con el desarrollo de la plataforma experimental se pudo validar el desempeño del algoritmo de control propuesto para mitigar el efecto de las ráfagas Extremas de Operación en el sistema electrónico de potencia. Con base en los resultados obtenidos se puede afirmar, desde el punto de vista práctico, que se cumplió con el objetivo de mantener constante el voltaje de salida del convertidor reductor ante la presencia de ráfagas Extremas de Operación, las cuales generalmente no son consideradas para el diseño del sistema electrónico de potencia, y en consecuencia degradan su desempeño o en el peor de los casos, los dispositivos de electrónica de potencia sufren daños permanentes. 

Agradecimientos

Al CONAHCYT por el apoyo al proyecto 75 de Cátedras y a la Universidad del Istmo por las facilidades que nos ha dado para utilizar el equipo del laboratorio de energías renovables.



Conceptos

La **energía cinética** (K) de un cuerpo depende de su masa y su velocidad, está expresada en Joules (J), ver [4]. Su expresión matemática es: $K \equiv \frac{1}{2}mv^2$

“Un **sistema** es una combinación de componentes que actúan juntos y realizan un objetivo determinado. Un sistema no está necesariamente limitado a los sistemas físicos. El concepto de sistema se puede aplicar a fenómenos abstractos y dinámicos, como los que se encuentran en la economía. Por tanto, la palabra sistema debe interpretarse en un sentido amplio que comprenda sistemas físicos, biológicos, económicos y similares” (Katsuhiko,2010, p.3). [5]

Para Consulta

- [1] Erickson R.W., Maksimovic D. “Fundamentals of Power Electronics”. Springer, New York, USA, 2001.
- [2] E. Campos-Mercado, E. F. Mendoza-Santos, J. A. Torres-Muñoz, et All. “Nonlinear Controller for the Set-Point Regulation of a Buck Converter System”, Energies, pp. 1-19, 2021.
- [3] International Standard Norme Internationale IEC 61400-2, IEC 61400-2, Geneva, Switzerland, 2013.
- [4] Serway, Raymond A., Jewett y John W. “Physics for Scientists and Engineers”, Thomson-Brooks/Cole, sexta edición, 2004.
- [5] Katsuhiko Ogata. “Ingeniería de control moderna”, Pearson, Quinta edición, Madrid, 2010.

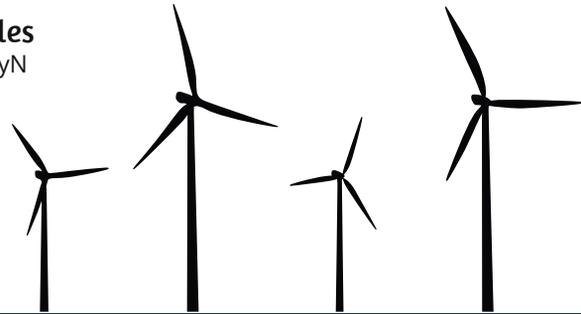


Crédito de imágenes en orden de aparición: Hidesy (Getty Images Signature, GIS), Gangtae, peterschreiber.media (GI), Pexels (Pixabay, P), travelview (GI), Bahar Nugroho (Bahar Nugroho's Images), Visual Generation, asliafra (GI), aukidphumsirichat, gopixa (Getty Images Pro, GIP), RZ (GIP), geogif (GI), celaloflaz (GI), Macrovector, Clker-Free-Vector-Images (P), irasutoya (いらすとや), Jeevan GB (GI), baihaki (baihaki's Images), Monsters Visual (monsters-visual), fotoperry (GI), fillicons, Art Alex, christianhorz, alexkava (Изображения пользователя Alexkava), Creative Phone, yankane (GI), Wawa4289 (Wawa6395), NanoStockk (GI), Stagartstud, Giuseppe Ramos G, I love sticky rice (GI), Dapa Images, undefined (Macy's Images), labsas (GIS), Andy Design (Andy Design's Images), anatolir, pedrosala (GI), klyaksun, Roundicons Pro, Biletskiy_Evgeniy (GI) Giuseppe Ramos J, GraphicsRF, pedrosala (GI), Graphic Nehar, Rido, OpenClipart-Vectors (P), olgarai, hidesey (GIS). Crédito de figuras: Proporcionadas por los autores.

Diseño: Isis G. Tovar De La Cruz

Beatriz Escobar Morales

Editor Asociado Revista CyN



Eduardo campos mercado

Doctor en Ciencias con especialidad en control automático. Investigador por México CONAHCYT-Universidad del Istmo, campus Tehuantepec.

Contacto: ecampos@conahcyt.mx



Jonathan Benítez Ovando

Ingeniero electromecánico en automatización industrial, por el Instituto Tecnológico de Estudios Superiores de Los Cabos BCS. Actualmente estudiantes de la Maestría en Ciencias en Energía Eólica en la Universidad del Istmo, campus Tehuantepec.

Contacto: jonbenova@gmail.com



Efraín Dueñas Reyes



Maestro en Ciencias en Electrónica. Actualmente profesor de la Universidad del Istmo, campus Tehuantepec.

Contacto: eduenas@sandunga.unistmo.edu.mx





Campos-Mercado E, Benites-Ovando J, Dueñas-Reyes E. 2024. Convirtiendo el viento en energía eléctrica. Revista Ciencia y Naturaleza (1090).