



# Academic

INTERNATIONAL WORKSHOP  
ADVANCES IN CLEANER PRODUCTION

“CLEANER PRODUCTION FOR ACHIEVING SUSTAINABLE DEVELOPMENT GOALS”

## Controlador Difuso de Voltaje para un Generador Eólico de Imanes Permanentes

PARDO GARCIA, A. <sup>a</sup>; CAZES ORTEGA, R. <sup>a</sup>; DIAZ RODRIGUEZ, J. L. <sup>a</sup>; FANDIÑO PELAYO, J. <sup>b</sup>

*a. Universidad de Pamplona, Pamplona, Norte de Santander, Colombia.*

*b. Universidad de Investigación y Desarrollo, Bucaramanga, Santander, Colombia.*

*apardo13@hotmail.com, cazesrocio@gmail.com, jdiaz@gmail.com, jfandino1@udi.edu.co*

### Abstract

In this article, a diffuse voltage controller is designed to perform the battery charge control, increasing the useful life of the battery, ensuring that the voltage of the three-phase permanent magnet wind generator (PMWG)-rectifier system is improved. The use of clean energies has become more common in our environment due to the low contamination that these systems present, such as wind generation systems. The design and simulation of a controller is done through the fuzzy tool box of the Matlab, a controller in fuzzy logic for a permanent magnets wind generator. With the simulation we can observe the behavior of the controller at different disturbance signals.

*Keywords: Clean energy, fuzzy logic, PM wind generator, wind energy.*

### 1. Introducción

El uso de las energías limpias es cada vez más común en nuestro medio, igual que el uso de sistemas de control automático que permiten mejorar el rendimiento de estos equipos. El análisis de estos sistemas ha permitido que se realicen estudios más detallados de cada uno de sus procesos, efectuados para la producción de energía eléctrica. Uno de estos procesos es la energía eólica; un recurso renovable e inagotable que a partir de la fuerza del viento, permite por medio de un generador producir energía eléctrica.

A mediados del siglo pasado los principios aplicados en la navegación aérea se aplicaron a estas técnicas; básicamente consiste en mover una palas mediante la sustentación que se produce por la velocidad del viento. A partir de los años 70 se puede hablar del nacimiento de una nueva generación de máquinas eólicas. El primer sistema de esta nueva tecnología es un sistema de captación o rotor; compuesto de una serie de aspas que giran alrededor de un eje por efecto del viento y que convierte la energía cinética en mecánica. Los rotores pueden ser de dos tipos de eje vertical y horizontal. De eje vertical es el rotor Savonius, compuesto por dos semicilindros colocados a cierta distancia uno de otro, de tal manera que el aire puede circular en medio de ellos, pero en general es de pequeña potencia (Chen, Y. Pillay P. Khan A. (2004). El aerogenerador Darrieus consta de dos o tres aspas en forma de parábola unidas a un eje vertical por sus extremos. El rotor Giromill es semejante al Darrieus con la particularidad de que sus aspa modifican automáticamente su inclinación en función de la dimensión del viento lo que produce un mejor

“CLEANER PRODUCTION FOR ACHIEVING SUSTAINABLE DEVELOPMENT GOALS”

Barranquilla - Colombia - June 21<sup>st</sup> and 22<sup>nd</sup> - 2018

rendimiento además de arrancar solo, sin ayuda lo que no ocurre con el Darrieus. Los rotores de eje horizontal posteriores en el tiempo están formados generalmente por dos o tres aspas y tienen un rendimiento aerodinámico mayor pero necesitan un viento con una velocidad relativamente elevada para que comiencen a funcionar; del orden de 5 metros por segundo. Esto permite que el rotor gire a ciertas revoluciones lo cual permite la generación de energía eléctrica (Deenma, 2009).

## 2. Energía Eólica

Se ha estado aprovechando la energía del viento durante cientos de años. Desde la antigua Holanda hasta las granjas en los Estados Unidos. Los molinos de viento se han utilizado para bombear agua o moler grano. En la actualidad, el equivalente moderno del aerogenerador, una turbina eólica, puede usar la energía del viento para generar electricidad.

Las turbinas de viento, están montadas en una torre para capturar la mayor cantidad de energía. A 100 pies (30 metros) o más sobre el suelo, pueden aprovechar el viento más rápido y menos turbulento. Las turbinas captan la energía del viento con sus palas similares a hélices. Usualmente, dos o tres cuchillas están montadas en un eje para formar un rotor.

Una cuchilla actúa como un ala de avión. Cuando sopla el viento, se forma una bolsa de aire a baja presión en el lado a favor del viento de la cuchilla. La bolsa de aire de baja presión tira de la cuchilla hacia ella y hace girar el rotor; a esto se le llama elevación. La fuerza del levantamiento es en realidad mucho más fuerte que la fuerza del viento contra el lado frontal de la cuchilla, que se llama arrastre. La combinación de elevación y arrastre hace que el rotor gire como una hélice y el eje giratorio hace girar un generador para producir electricidad ( J. Kelly , 2017), (Manwell, J. F. McGowan J. Rogers G. A. L. 2002)..

Este tipo de energía es la producida por el viento a través de los aerogeneradores, los cuales son capaces de producir electricidad a partir de las corrientes de aires. La energía eólica es una de las fuentes de energía más antiguas que el hombre ha utilizado, desde las embarcaciones a vela y más tarde con los molinos de viento, que buscaban transformar la fuerza del viento en energía mecánica. Cada aerogenerador lleva una veleta en la parte superior que le facilita la dirección del viento, ello le permite girar sobre la torre y orientarse automáticamente; las palas también giran sobre su eje para ofrecer una máxima resistencia. La fuerza del viento; es decir la energía cinética, contenida en el movimiento de las corrientes de aire, hace girar las palas. Estas están diseñadas para captar al máximo su energía y pueden llegar a medir más de 60 metros de longitud cada una.

Están fabricadas por materiales más ligeros y resistentes para facilitar su movimiento. Por esta razón pueden producir energía con vientos muy suaves, desde unos 11Km/h: mientras que con vientos muy fuertes como por ejemplo 90Km/h, las palas se ponen en bandera y el aerogenerador se frena por motivos de seguridad. Las palas están unidas al aerogenerador a través del buje, que a su vez está acoplado al eje lento. El eje lento se llama así porque gira a la misma velocidad de las palas; entre unas 7 y 12 vueltas por minuto. Para producir electricidad, es necesario aumentar la velocidad a la que gira el eje lento; esa es la función de la multiplicadora que eleva dicha velocidad más de cien veces y la transfiere al eje rápido. El eje rápido que gira a más de 1500 vueltas por minuto, está unido a un generador. Este generador aprovecha la energía cinética del eje rápido, para transformarla en electricidad, una forma de energía fácil de transportar y de utilizar. La electricidad producida por el generador como corriente continua es conducida por el interior de la torre, hasta su base; allí un convertidor la transforma, en corriente alterna, que es la que utilizamos normalmente. Y un transformador eleva el voltaje para transportarlo por el interior del parque (Conrado Moreno , 2008).

## 3. Generadores Síncronos de Imanes Permanentes

Un generador síncrono de imán permanente es donde se ha modificado el embobinado de excitación, habitualmente en el rotor, con un sistema compuesto por imanes permanentes que proporciona un campo de excitación constante. Sus siglas en inglés son PMG (Permanent Magnet Generator) y difiere mucho de

ser un generador síncrono normal, ya que en un generador normal se controla el voltaje de salida mediante la excitatriz del generador, mientras que en un PMG la excitación es constante por lo que al generador se tiene el voltaje de salida sin opción de regulación. Los PMG se usan en aquellos casos en los que no interesa que el voltaje caiga en cierto grado o siempre que se use electrónica a la salida del generador. La electrónica puede volver un rango de voltajes variables en un voltaje continuo de valor constante (OBEKI, 2014).

Un generador eléctrico generalmente consta de dos partes; estator y rotor. Existen varios tipos de generadores eléctricos, como generadores de corriente continua, generadores de corriente alterna, generadores de vehículos, generadores eléctricos de energía humana, y otros.

Las partes giratorias y estacionarias de una máquina eléctrica se pueden llamar rotor y estator respectivamente. El rotor o estator de las máquinas eléctricas actúa como un componente productor de energía y se denomina armadura. Los electroimanes o imanes permanentes montados en el estator o rotor se utilizan para proporcionar el campo magnético de una máquina eléctrica. El generador en el que se utiliza el imán permanente en lugar de la bobina para proporcionar un campo de excitación se denomina generador síncrono de imán permanente o también se denomina simplemente generador síncrono (Martínez Quintero, Díaz Rodríguez, & Pardo García, 2012).

En general, el generador síncrono consta de dos partes, rotor y estator. La parte del rotor consta de polos de campo y la parte del estator se compone de conductores de la armadura. La rotación de polos de campo en presencia de conductores de armadura induce un voltaje alterno que da como resultado la generación de energía eléctrica (Bermeo, y otros, 2015). Para el control de estos generadores síncronos se han empleado diferentes técnicas; una de ellas es la que se usa a partir de la identificación de componentes del sistema en relación al diseño del control de los mismos. La identificación del sistema se considera como una parte fundamental del controlador (Restrepo Chaustre, Becerra Vargas, & Pardo García, 2015). A esto se le conoce como un controlador adaptable y se utiliza básicamente para controlar sistemas cuyas características dinámicas varían con el tiempo. Una de las formas de controlar la velocidad, es a través de los modos deslizantes (Tapia O. , Aguilar M. , & Ramírez , 2004).

El principio de funcionamiento del generador síncrono es la inducción electromagnética. Si existe un movimiento relativo entre el flujo y los conductores, entonces se induce una FEM en los conductores. Los generadores sincrónicos están diseñados para satisfacer las necesidades de los clientes. El diseño automatizado y las soluciones estandarizadas son necesarias para simplificar la modificación de los generadores para diferentes clientes y aplicaciones y para acelerar el proceso de indagación. Uno de los problemas que a veces se pueden generar son los bajos voltajes, por eso muchos estudios se basan en mejorar esto a través del control de voltajes. Una solución es implementar una excitación con un devanado auxiliar que utilice la potencia en armónicos de densidad de flujo en espacio de aire para suministrar al regulador de voltaje automático. Con esto se crea una solución estándar para el devanado auxiliar y el sistema regulador de voltaje. Se estudian diferentes soluciones de devanado auxiliar y se selecciona la solución óptima para los generadores síncronos de bajo voltaje. El dimensionamiento analítico de la solución de devanado auxiliar seleccionado se implementa como un programa de computadora. Los requisitos son establecidos para la excitación según diferentes estándares y clasificación y de esta manera se determina el regulador de voltaje automático provisto de embobinado auxiliar y se implementa una solución para el sistema regulador de voltaje. Encauzando el problema desde el punto de vista del generador y centrándose en la etapa de entrada del convertidor de potencia; que está conformado por un rectificador trifásico pasivo, un convertidor DC-DC tipo boost y un inversor de conexión a red. Para minimizar el factor  $THD_i$  de las corrientes de salida del aerogenerador y aumentar el factor de potencia del mismo, el convertidor DC-DC funciona en conducción discontinua, usando un principio aplicado a rectificadores trifásicos con corrección del factor de potencia front-end para un sistema de alimentación con conexión a una red eléctrica de amplitud y frecuencia nominal fijas (Carranza Castillo, 2012).

La no linealidad en el transformador de desplazamiento de fase y los reactores de interface limitan la

mejora en  $THD_i$ . En general, todos los rectificadores trifásicos de 12 impulsos que usan solo la técnica de desplazamiento de fase tienen las corrientes de entrada  $THD_i$  de 15.22%. En un generador sincrónico, la forma de onda del voltaje generado se sincroniza con la velocidad del rotor. El generador síncrono, bajo el supuesto de sincronización constante reactiva, se puede considerar como representable por un circuito equivalente que comprende una bobina ideal en la que una F.E.M es proporcional a la excitación de campo eléctrico (Fengxiang, W. Qingming, H. Jianlong, B. Jian, P. 2005).

Si se considera un generador síncrono a velocidad constante y con excitación constante en un circuito abierto en la terminal  $V$ , es igual al circuito abierto en la F.E.M ( Vasudevan, Rao, & Rao , 2010).

#### 4. Diseño y Simulación del Controlador

Para el desarrollo del trabajo se tuvo en cuenta los datos tomados de un generador síncrono de imán permanente para la identificación del sistema.

Tabla 1: Datos de Entrada

177.68	178	178.32	178.44	178.83	178.95
179.08	179.15	179.21	179.28	179.34	179.28
179.21	179.15	179.08	178.95	178.83	178.44
178.32	178	177.68			

Tabla 2: Datos de Salida

22.78	22.84	22.89	22.91	23	23.03
23.06	23.09	23.28	23.30	23.36	23.30
23.28	23.09	23.06	23.03	23	22.91
22.89	22.84	22.78			

De acuerdo a estos datos, se empleó la función IDENT de Matlab para obtener la función de transferencia:

$$H(s) = \frac{1.159}{s^2 + 7.251s + 8.982} \quad (1)$$

La mayoría de sistemas de control, se especifican en términos de cantidades en el dominio del tiempo. "Los sistemas que pueden almacenar energía no responden instantáneamente y exhiben respuestas transitorias cada vez que están sujetos a entradas o perturbaciones" (Ogatha & Kuo, 2015). Por esta razón el desempeño de un sistema de control, se define en términos de la respuesta transitoria para una entrada escalón unitario. Normalmente en los sistemas de control, se presentan oscilaciones que en algunos casos son sub amortiguadas o amortiguadas antes de llegar a su estado estable. De esta manera se pueden especificar varias partes de la respuesta transitoria como se muestran en las referencias (Carranza Castillo, 2012).

##### 4.1 Controlador Fuzzy

Par el diseño del controlador difuso se empleó el Toolbox Fuzzy Logic de Matlab. Este permite analizar, diseñar y simular sistemas apoyados en lógica difusa. Para el análisis de la planta a través de la lógica difusa se tuvo en cuenta, la inferencia difusa, más explícitamente la inferencia de Mamdani, basado en sus 4 pasos (González Morcillo, 2011).

Para el controlador fuzzy se tuvieron en cuenta 3 variables lingüísticas: Error, Derivada del Error y voltaje y a partir del análisis se determinaron las siguientes reglas:

Tabla 3: tabla de reglas fuzzy

Error	Derivada del Error	Voltaje
B	NCP	MB
MB	NCP	B
C	N	B
C	C	M
C	P	A
A	NCP	MA
MA	N	M
MA	C	A
MA	P	MA

Donde en el error B es bajo, MB es media baja, C es centro, A es alta y MA es media alta. Para la derivada del error N es negativo, C es cero y P es positivo. Para el voltaje MB es muy bajo, B es bajo, M es medio, A es alto y MA es muy alto.

De esta manera se crea en Simulink de Matlab el controlador Fuzzy:

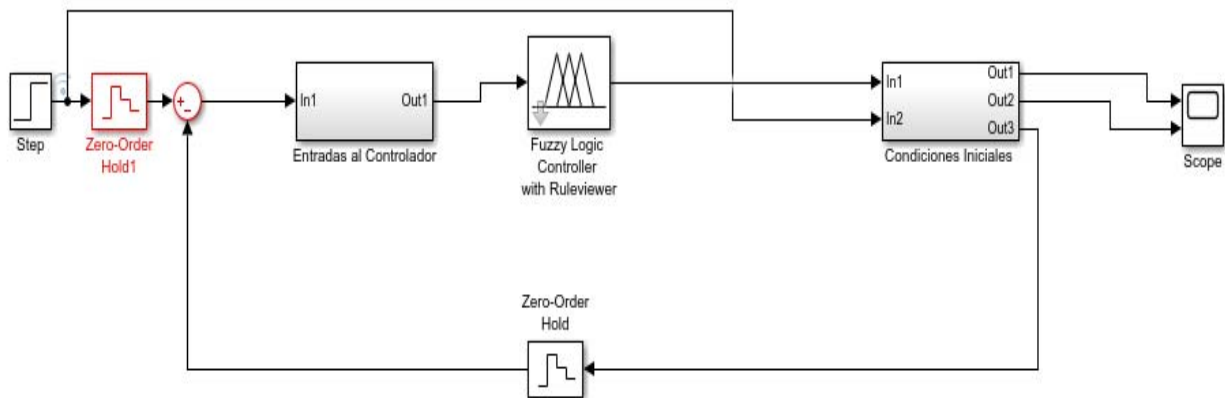


Fig. 1. Controlador Fuzzy en Matlab

A partir del diseño del controlador se obtuvieron las siguientes respuestas de salida de voltaje rectificado del generador trifásico de imanes permanentes:

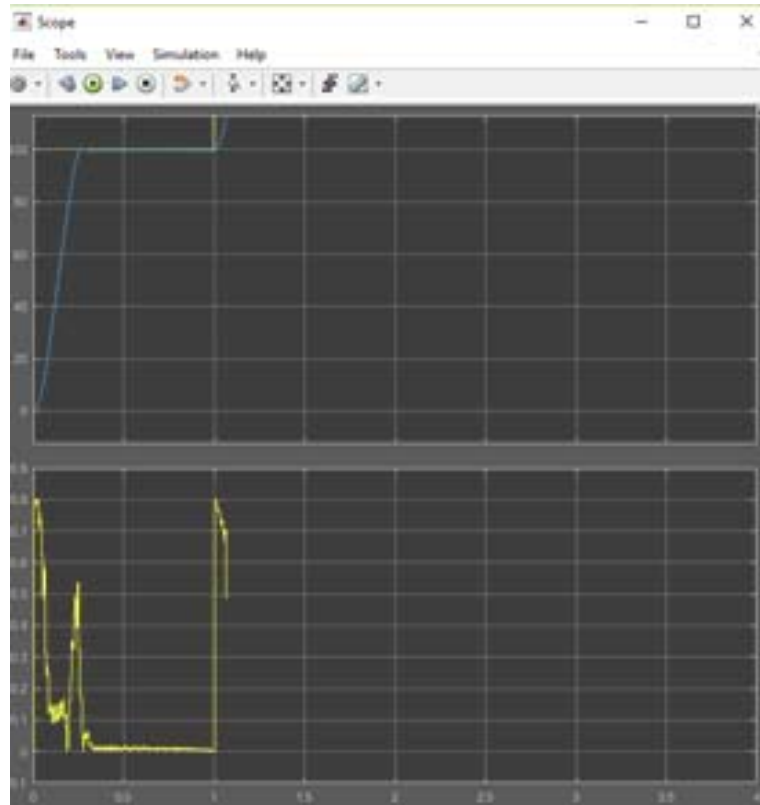


Fig. 2. Graficas de estabilización de voltaje con controlador fuzzy.

En la figura anterior se puede observar que en los casos en que se presentan sobrepasos de voltaje el sistema vuelve nuevamente a estabilizar el nivel de voltaje en la salida del rectificador el cual se utiliza para la cargas de las baterías. Esta clase de sistemas permite mantener estables los niveles de voltaje. En la gráfica se observa un sobre paso del 80% y el controlador fuzzy logra estabilizar este sistema hasta lograr un 0%. De esta forma se comprueba que este sistema puede emplearse para mantener estable los niveles de carga en las baterías utilizadas en un sistema con PMWG, lográndose aumentar la vida útil de estas baterías.

#### 4.2 Baterías de Ciclo Profundo

En los sistemas eólicas las baterías tienen que mantener la energía por un tiempo largo y constantemente se descargan a niveles más bajos. Las baterías de tipo ciclo profundo tienen capas de plomo gruesas, lo cual hace que tengan una vida de durabilidad más larga. Estas baterías son proporcionalmente grandes y pesadas por el plomo. Están conformadas por celdas de 2 voltios nominales que se unen en serie para lograr baterías de 6 a 12 o más voltios dependiendo de las aplicaciones (DeltaVolt, 2010). A nivel mundial hay muchas compañías que se encargan de la fabricación y mejoras de estas baterías. Por ejemplo GE Renewable Energy la cual tiene una plataforma de turbina brillante que incorpora tecnología en la batería. La integración de esta tecnología en las turbinas eólica permite un almacenamiento de energía a corto plazo en el sistema completo de la turbina. Además, permite a los operadores de parques eólicos beneficiarse del almacenamiento de energía sin incurrir en los altos costos de la instalación de la batería a nivel del parque (Leal Gonzalez & Hernandez Cely, 2012). A partir del control de voltaje a la salida del generador se pueden evitar los picos de voltaje que acortarían la vida útil de las baterías.

Este tipo de control también permite el empleo de sistemas híbridos como:

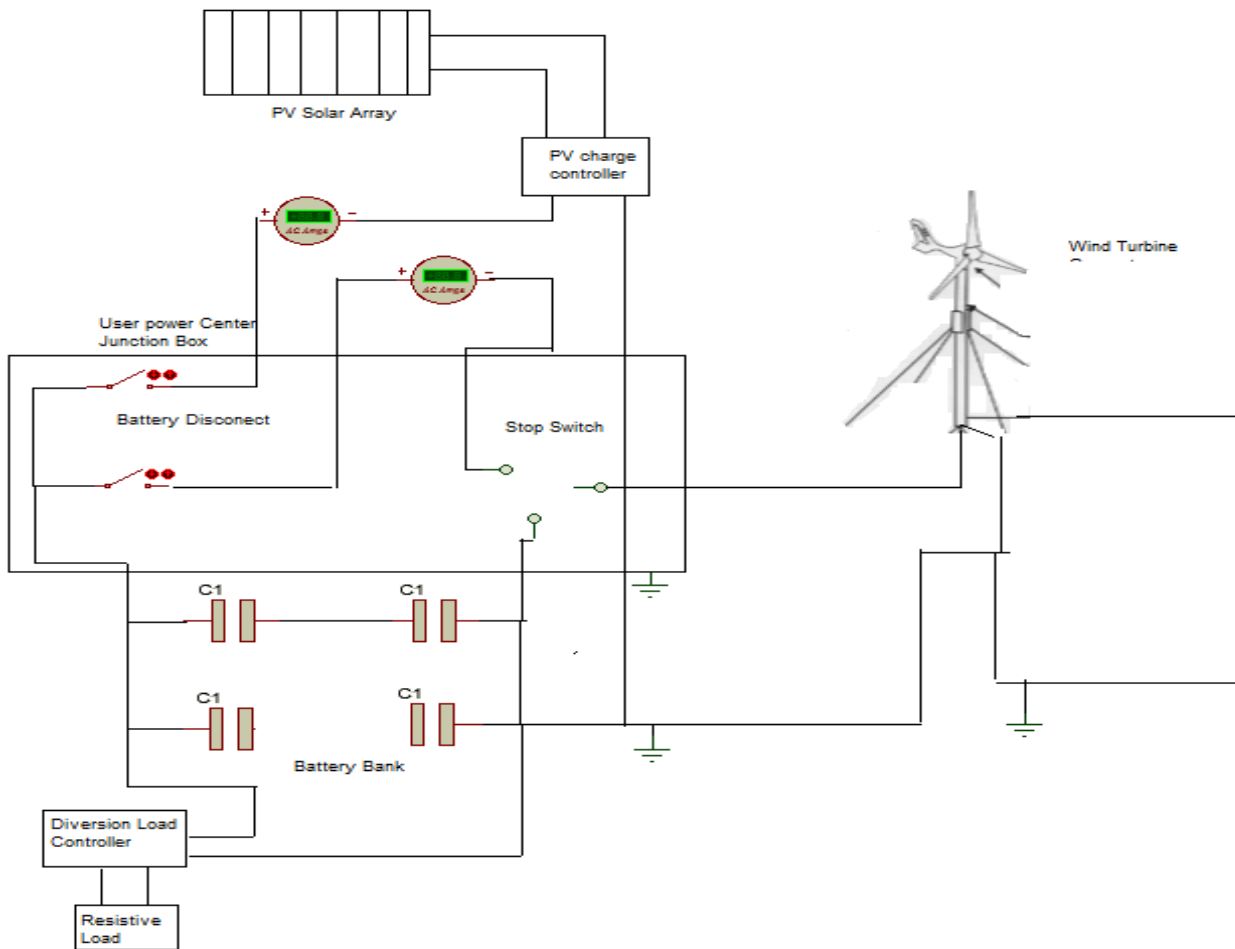


Fig. 3. Conexión Híbrida entre el Generador Síncrono de imán permanente y un panel Solar.

## 5. Conclusiones

A partir del análisis realizado en el control del voltaje del sistema, se pudo determinar que al generarse picos de voltaje en la entrada el controlador Fuzzy regula estos niveles hasta llevarlos a un voltaje adecuado para las baterías. Este tipo de sistemas permiten alargar la vida útil de las baterías debido a que se evitan los sobre voltajes en las mismas. Las baterías de ciclo profundo son adecuadas para conexiones híbridas entre generadores y paneles solares.

## 6. Referencias

- González Morcillo, C. (2011). Logica Difusa. Recuperado el 20 de 02 de 2017, de [http://www.esi.uclm.es/www/cglez/downloads/docencia/2011\\_Softcomputing/LogicaDifusa.pdf](http://www.esi.uclm.es/www/cglez/downloads/docencia/2011_Softcomputing/LogicaDifusa.pdf)
- Kelly , P. (2017). Guía Práctica de Dispositivos de Energía Libre. Obtenido de <http://www.free-energy-info.com/Spanish.html>
- Vasudevan, K., Rao, S., & Rao , P. (2010). Synchronous Generator Operation. Obtenido de [http://www.nptel.ac.in/courses/IIT-MADRAS/Electrical\\_Machines\\_II/pdf/2\\_3.pdf](http://www.nptel.ac.in/courses/IIT-MADRAS/Electrical_Machines_II/pdf/2_3.pdf)

- Bermeo, W. L., De Souza, A. B., Fernandez, T. R., Honorio, D. A., Nogueira dos Reis, L. H., & Barreto, L. H. (2016). Sliding Model Control Applied in Current Loop for a DSP-Based Position Control Applied to Squirrel-Cage Induction Motor. *Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada*. ISSN 1692.7257, v1, n 27.
- Carranza Castillo, O. (2012). Estudio de técnicas de control de rectificadores Boost Trifásicos con filtro LCL para reducción de la distorsión armónica en corriente, aplicadas al procesado eficiente de energía en aerogeneradores síncronos de imanes permanentes operando a velocidad var. Obtenido de <https://riunet.upv.es/handle/10251/14575?show=full>
- Conrado Moreno , F. (07 de 02 de 2008). El rotor de una turbina eólica. Obtenido de <http://www.cubasolar.cu/biblioteca/Energia/Energia38/HTML/articulo04.htm>
- Deenma, G. (2009). Opex Energy (Eolica). Obtenido de [http://opex-energy.com/eolica/tipos\\_aerogeneradores.html](http://opex-energy.com/eolica/tipos_aerogeneradores.html)
- DeltaVolt. (2010). Baterías para Sistemas Solares y Eólicos. Obtenido de <http://deltavolt.pe/energia-renovable/baterias>
- Leal Gonzalez, F. A., & Hernandez Cely, M. M. (2013). Study Wind and Solar Potential of Cucuta, Norte de Santander. *Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada*. ISSN 1692.7257, v2, n 22.
- Martinez Quintero, C., Diaz Rodriguez, J., & Pardo Garcia, A. (2012). Aplicación de Redes Neuronales al Control de Velocidad en Motores de Corriente Alterna. *Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada*. ISSN 1692.7257, v2, n 20.
- OBEKI. (2014). GENERADOR DE IMANES PERMANENTES (PMG). Obtenido de <http://www.obeki.com/productos/Generadores%20de%20Imanes%20Permanentes.pdf>
- Ogatha , K., & Kuo, B. (2015). Analisis de la respuesta Transitoria. Obtenido de [http://ciecfie.epn.edu.ec/wss/VirtualDirectories/80/CControlC/materias/automatico/Descargas/An%C3%A1lisis/Lecturas/Lecturas\\_PDF/LECTURA\\_ANALISIS.pdf](http://ciecfie.epn.edu.ec/wss/VirtualDirectories/80/CControlC/materias/automatico/Descargas/An%C3%A1lisis/Lecturas/Lecturas_PDF/LECTURA_ANALISIS.pdf)
- Restrepo Chaustre, Y., Becerra Vargas, J. A., & Pardo Garcia, A. (2015). Methodology for Fault Detection of a Synchronous Motor. *Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada*. ISSN 1692.7257, v2, n 26.
- Tapia O. , R., Aguilar M. , O., & Ramírez , J. (2004). Control de un Motor Síncrono de Imanes Permanentes Mediante Modos Deslizantes y un Observador Neuronal . Obtenido de <http://amca.mx/memorias/amca2004/versiones%20finales/amcafinal118.pdf>.
- Manwell, J. F. McGowan J. Rogers G. A. L. (2002). *Wind Energy Theory Design and Application* New York:Wiley.
- Chen, Y. Pillay P. Khan A. (2004). PM wind generator comparison of different topologies, *Proc. 39th IAS Annu. Meeting Conf.* vol. 3 no. 37 pp. 1405-1412. DOI: 10.1109/IAS.2004.1348606
- Khan, A. Pillay P. Malengret P. (2003). Impact of direct-drive WEC systems on the design of a small PM wind generator. *Proc. IEEE Power Tech. Conf.* vol. 2 pp. 23-26. DOI: 10.1109/PTC.2003.1304591
- Fengxiang, W. Qingming, H. Jianlong, B. Jian, P. (2005). Study on control system of low speed PM generator direct driven by wind turbine. *Proc. ICEMS.* vol. 2 no. 2729 pp. 1009-1012. DOI: 10.1109/ICEMS.2005.202697



