

Sistema de Control para Aerogeneradores Empleando Lógica Difusa

Maximiliano Bueno López, Diego Felipe Barrero Leal, Sandra Yomary Garzón Lemos

Grupo de Investigación AVARC. Universidad de la Salle Bogotá, Programa de Ingeniería en Automatización.
Sede Centro, Cra 2 No 10-70 piso 7 bloque C., Bogotá D.C.-Colombia. Tel. (571) 353 5360 Ext. 2522
mbueno@lasalle.edu.co, dbarrero37@unisalle.edu.co, sygarzon@unisalle.edu.co

2015 Published by *DIFU*_{100ci}@ <http://nautilus.uaz.edu.mx/difu100cia>

Resumen

Los sistemas de conversión de energía eólica han evolucionado de forma considerable en su tamaño, capacidad y diseño, a pesar de esto no se ha logrado obtener el sistema ideal, debido al comportamiento del viento, el cual varía tanto geográficamente como temporalmente, convirtiéndose en una variable estocástica que dependiendo de su dirección afecta el rendimiento del sistema eólico. El principal reto en estos sistemas es posicionar el aerogenerador de manera que el viento haga contacto con sus aspas de manera perpendicular, para obtener así el mayor aprovechamiento eólico. En este trabajo se plantea como objetivo principal regular el nivel de potencia entregado por un aerogenerador de eje horizontal, considerando el problema de no linealidad del viento. Para tal fin, se diseña un controlador que permite a las palas del rotor girar alrededor de su eje longitudinal (variar el ángulo de paso) aprovechando al máximo la captación de energía proveniente del viento. La investigación propone el uso de lógica difusa, esto brinda la posibilidad (a diferencia del control convencional) de utilizar un sistema de control basado en un conjunto de reglas de actuación, especificadas mediante descriptores lingüísticos. Los resultados obtenidos permiten avanzar en el tema de energías renovables en Colombia y posicionar a la Universidad de La Salle como un referente en este tema.

Palabras clave: Aerogeneradores,, Control difuso,, Energías renovables.

1. Introducción

Los sistemas de generación eólica (SGE) aprovechan la energía proveniente del viento para producir energía eléctrica lo que implica que sea una energía renovable. De acuerdo con [9]; el consumo de energía en el mundo aumenta considerablemente, y la disponibilidad de los recursos naturales decrece con la

misma velocidad, hasta llegar al punto de que no se tengan los recursos suficientes para satisfacer toda la demanda que la sociedad impone; por ello, en el futuro será indispensable el desarrollo de nuevas formas de energía amigables con el medio ambiente. Acorde con el informe realizado a la Unidad de Planeación Minero Energética (UPME) por [5], la energía eólica tiene la ventaja de ser una fuente de energía que no genera

emisiones de dióxido de carbono u otro residuo contaminante ayudando a contrarrestar el efecto invernadero y el cambio climático. Tecnológicamente, los sistemas de conversión de energía eólica han evolucionado de forma considerable, aunque aún no se ha logrado obtener el sistema ideal debido a la no linealidad y cambios repentinos de la velocidad del viento, que varía tanto geográficamente como temporalmente. Sin embargo, se han desarrollado diferentes estrategias de control de la potencia, que tienen como objetivo aprovechar al máximo el potencial energético del viento para producir energía. Así, lo que se pretende es aumentar la capacidad de captar la energía eólica en los aerogeneradores por parte de la turbina, controlando la incidencia de la velocidad de entrada a la misma, esto se logra al variar la posición de la góndola del aerogenerador según la adquisición de las variables medidas. Estas variables serán la velocidad del viento y la dirección del mismo.

2. GENERALIDADES SOBRE SISTEMAS DE CONVERSIÓN DE ENERGÍA EÓLICA

Un Sistema de Conversión de Energía Eólica (SCEE) se define en [3] como el encargado de convertir la energía cinética del viento en energía eléctrica con las características necesarias para su utilización, ya sea en el almacenamiento de energía o en la inyección a la red eléctrica. Este proceso de conversión a energía eléctrica de los aerogeneradores se resume en la Figura 1.

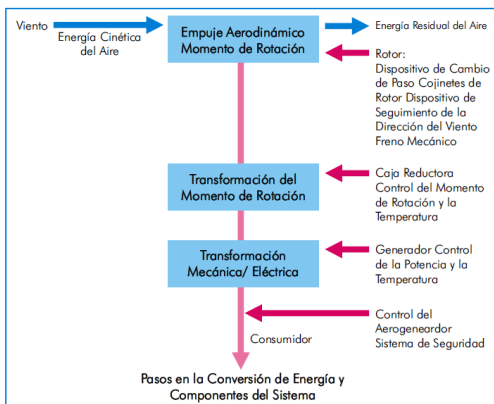


Figura 1. Esquema de conversión de energía eólica [11]

Los SCEE son clasificados de acuerdo a los diferentes tipos de turbinas en dos categorías: de eje horizontal y de eje vertical. [14]. Un aerogenerador está compuesto por la góndola, las palas del rotor, buje, multiplicador, generador eléctrico y el sistema de control. La Figura 2 muestra cada una de estas partes.

La aerodinámica de las palas en una turbina de viento aporta un conocimiento importante para entender el principio de funcionamiento de un aerogenerador, el cual está ligado a unos conceptos fundamentales como fuerza de sustentación, velocidad específica y ángulo de paso. De acuerdo con la guía de aplicaciones técnicas para plantas eólicas [1]; las aspas de los aerogeneradores son diseñadas con una geometría particular con el fin de producir, en presencia de viento circulante, una diferencia de presiones entre la parte superior e inferior del ala.

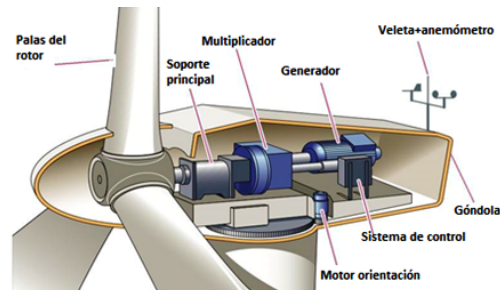


Figura 2. Principales partes de un aerogenerador.

La fuerza de sustentación en las palas de la turbina es la responsable de provocar la rotación característica en las turbinas de eje horizontal, incidiendo directamente sobre el par del rotor de la máquina y se calcula mediante la ecuación (1).

$$Fuerza\ Sustentación = 0.5\rho S C_L V^2 \quad (1)$$

donde ρ es la densidad del fluido, V es la velocidad del viento, S es el área de referencia del cuerpo (también llamado "superficie alar") y C_L es el coeficiente de sustentación, que depende directamente del ángulo de ataque del viento.

De acuerdo a la ecuación (1), si se incrementa el ángulo de incidencia sobre las aspas se obtendrá una mayor fuerza de sustentación y un mayor par, de aquí la importancia de manipular este ángulo de incidencia para las especificaciones de potencia que demanda el aerogenerador.

La velocidad específica (que se denota con la sigla λ), se define como la relación entre la velocidad tangencial en el extremo de la pala (u) y la velocidad del viento sobre las aspas (V), que se pueden observar en la expresión para la velocidad específica es la siguiente:

$$\lambda = \frac{u}{V} = \frac{\omega r}{V} \quad (2)$$

donde r es el radio del rotor y ω Velocidad angular de rotación (rad/seg).

3. TEORÍA DE CONTROL APLICADA EN AEROGENERADORES

El principal objetivo para el control de potencia en aerogeneradores es maximizar la captura de energía proveniente del viento considerando las restricciones de operación como potencia nominal, velocidad nominal y velocidad de desconexión (condicionar la potencia generada para cumplir los estándares de interconexión). Esto considera también las cargas mecánicas excesivas sobre el aerogenerador producto de fluctuaciones bruscas sobre el sistema.

El objetivo de control estará enfocado en la regulación de potencia, por ello es importante conocer que un generador eólico sigue la curva de potencia que se aprecia en la Figura 3, la cual es característica de cada máquina y es obtenida por los fabricantes en laboratorios con condiciones especiales para su elaboración y se encuentra normalizada según la IEC-61400 [2]. El primer objetivo se encuentra en la región 2, que corresponde a maximizar la extracción de energía eólica donde las velocidades del viento son bajas y las cargas estructurales también son relativamente pequeñas. El segundo objetivo, en la región 3, con velocidades de viento altas y con un crecimiento de las cargas estructurales, es limitar dichas cargas pero manteniendo la producción de potencia eléctrica, por lo que es necesario limitar la potencia a un valor nominal. Si se superan las velocidades de viento de la región 3, el sistema deberá hacer un paro forzado de la máquina, protegiéndola de cargas aerodinámicas excesivamente altas que puedan generar daño a los equipos y a las personas [10].

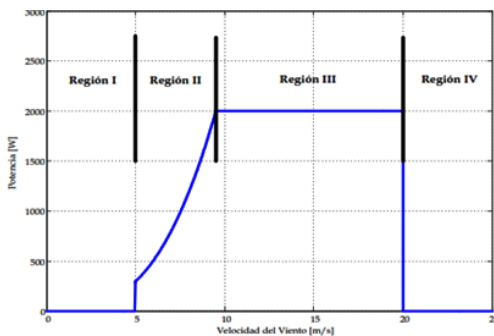


Figura 3. Potencia generada en un aerogenerador en función de la velocidad del viento [3].

3.1. Métodos de control implementados en generadores eólicos

Existen varias estrategias de control que han sido aplicadas en el campo de aerogeneradores. En el estudio desarrollado por [17] aplicaron una combinación entre el control adaptativo y el control no lineal para regular la velocidad del rotor, lo cual es necesario para aumentar la eficiencia de generación de potencia. En [15] presentaron el desarrollo del control del ángulo de paso a través de control adaptativo usando un regulador de auto sintonía que tiene un método de identificación de mínimos cuadrados. En [12] se propuso un método de control que trabaja en un amplio rango de velocidades conmutando entre 5 controladores H_∞ que fueron acondicionados apropiadamente por medio de la aproximación de observadores.

3.2. Control Difuso aplicado en aerogeneradores

El control por lógica difusa emula la forma en que un ser humano toma a través de una serie de reglas. En los Sistemas de Conversión de Energía Eólica debido a que no se tiene un sistema lineal, las estrategias convencionales de control no tendrán un funcionamiento ideal, así pues la técnica de control difusa es idónea para trabajar en estos tipos de sistemas. En [16] se presenta un controlador difuso para controlar el momento de rotación del rotor aerodinámico y el momento inverso del generador. Se realizaron simulaciones y fueron comparadas con las realizadas por un controlador PID obteniendo mejores resultados. En [4] se presenta un control basado en lógica difusa para un SCEE con un SCIG conectado a la red eléctrica y que tenía como objetivo mantener constante la velocidad del generador para diferentes velocidades del viento. En [8] diseñó un controlador difuso que controla la extracción de la energía eólica, aplicado al control del ángulo de paso. La velocidad está regulada por otro controlador difuso que actúa sobre el torque del generador de modo que siga el valor de referencia generado por un estimador óptimo de la velocidad angular.

4. MODELO DEL SISTEMA DE CONVERSIÓN DE ENERGÍA EÓLICA

La turbina del SCEE es el elemento clave para comprender el proceso de conversión de la energía proveniente del viento en potencia mecánica en el rotor del aerogenerador y a partir de allí finalmente obtener la potencia eléctrica generada inyectada a la red, debido a esto se debe tener claro el modelo dinámico de la

turbina en función de la velocidad del viento que llegan al sistema y a partir de este estudiar la estrategia de control adecuada para cumplir con un nivel de potencia eléctrica demandada.

4.1. Caracterización de la potencia disponible en el viento

Para generar potencia eléctrica en la turbina eólica debe existir primero una transformación de la energía cinética del viento en energía mecánica de rotación. En [6] se afirma que en una masa de flujo de aire constante de área circular, que pasa a través del área del disco de una turbina, el flujo de la masa de aire es función de la densidad del aire ρ y de su velocidad v . El modelo del rotor es definido por la potencia aerodinámica obtenida desde la energía cinética del viento, por lo que se parte de que la energía cinética en el aire de un objeto de masa (m), moviéndose con una velocidad (v) está dada por la ecuación (3).

$$E = \frac{1}{2}mv^2 \quad (3)$$

Por lo tanto, la potencia del aire en movimiento se obtiene derivando la ecuación (3), asumiendo que la velocidad del viento (v) se obtiene mediante la ecuación (4)

$$P_v = \frac{dE}{dX} = \frac{1}{2}\dot{m}v^2 \quad (4)$$

donde \dot{m} es el flujo de masa del aire por segundo. A su vez, el flujo de masa del aire por segundo se expresa por medio de la ecuación (5).

$$\dot{m} = \rho Av \quad (5)$$

donde ρ es la densidad del aire, A es el área que es atravesada por el aire y v es la velocidad del viento.

Sustituyendo la ecuación (5) en (4) se tiene

$$P_{viento} = \frac{1}{2}\rho Av^3 \quad (6)$$

Debido a que A es el área que barren las palas de la turbina, es posible expresarla como:

$$A = \pi r^2 \quad (7)$$

donde r corresponde al radio del rotor. De este modo, al reemplazar en la potencia del viento se tiene que, finalmente la potencia en la turbina está dada por ec. (8)

$$P_{viento} = \frac{1}{2}\rho\pi r^2 v^3 \quad (8)$$

4.2. Potencia útil para generación de energía eléctrica

La potencia útil para el aerogenerador será aquella potencia transferida por el viento a la turbina, sin embargo, la energía cinética del aire no puede ser convertida en energía mecánica en su totalidad debido a que en las etapas de conversión, el aire se frena. En una turbina eólica ideal, la velocidad del viento se reduce según la ley de Betz, la cual indica que solo es posible convertir el 59% de la energía cinética del viento en energía mecánica [3]. La potencia útil para la turbina se puede calcular considerando las pérdidas por unidad de tiempo, de energía cinética del viento al pasar por la hélice, esto se observa en la ecuación (9),

$$P_{util} = \frac{(-\Delta Ek)}{\Delta t} = \frac{(Ek_1 - Ek_2)}{\Delta t} = \frac{(\frac{1}{2}mv_1^2 - \frac{1}{2}mv_2^2)}{\Delta t} \quad (9)$$

donde ΔEk Corresponde a la diferencia entre la energía cinética antes y después de atravesar las aspas (Ek_1 y Ek_2) respectivamente, v_1 Es la velocidad que se dirige hacia las aspas (antes de la hélice), v_2 Es la velocidad del viento después de atravesar las aspas.

Reemplazando el flujo de masa de aire (m) en la ecuación (9) se tiene

$$P_{util} = \frac{1}{2}\rho Av(v_1^2 - v_2^2) \quad (10)$$

La potencia transferida al rotor de la turbina eólica se reduce a un producto entre la potencia obtenida del viento por un coeficiente; este valor es llamado coeficiente de potencia, C_p . El coeficiente de potencia se puede interpretar como el rendimiento que presenta el rotor eólico y depende fundamentalmente de la velocidad del viento, de la velocidad de giro de la turbina y del ángulo de paso de las palas [7].

El coeficiente de potencia depende del ángulo de paso de pala, β , y el coeficiente de velocidad específica de rotación, λ . El coeficiente C_p como función de λ y β , viene dado por la ecuación (11).

$$C_p(\lambda, \beta) = c_1 \left(\frac{c_2}{\lambda_i} - c_3\beta - c_4 \right) e^{\left(-\frac{c_5}{\lambda_i} \right)} + c_6 \quad (11)$$

con $c_1 = 0.5176$, $c_2 = 116$, $c_3 = 0.4$, $c_4 = 5$, $c_5 = 21$ y $c_6 = 0.0068$.

El máximo valor de C_p está limitado de igual manera por La ley de Betz. La Figura 4 muestra la relación entre

la velocidad específica y el ángulo de ataque con el coeficiente de potencia en una turbina de viento, que a su vez, representa el desempeño de la turbina eólica para la extracción de la máxima potencia.

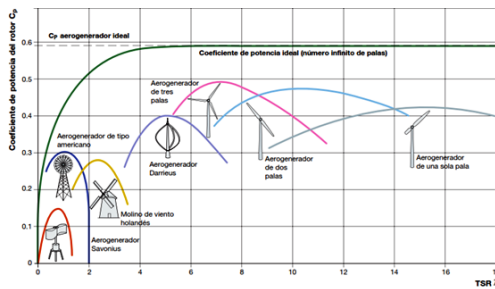


Figura 4. Coeficiente de potencia en función de la velocidad específica y el ángulo de paso de las páas. [13]

5. DISEÑO DEL CONTROLADOR DIFUSO

El creciente desarrollo tecnológico de las últimas décadas ha permitido la implementación de sistemas de control inteligente que emulan el comportamiento del ser humano para tomar decisiones complejas con una precisión mayor que los sistemas de control convencionales. El controlador debe ser capaz de responder frente a las variaciones que presenten las variables de entrada las cuales son velocidad del viento obtenida del modelo (V_{viento}), señal de error de potencia (ΔP) y variación de error de potencia ($\delta(\Delta P)$). De este modo con las variables de entrada ya establecidas se procedió a aplicar el conjunto de reglas IF-THEN utilizando el Toolbox de lógica difusa disponible en matlab siguiendo la estructura de control mostrada en la Figura 5.

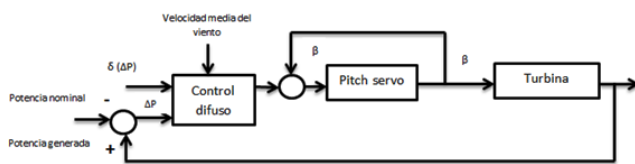


Figura 5. Estrategia de control difuso sobre el aerogenerador.

6. RESULTADOS DEL CONTROLADOR OBTENIDOS MEDIANTE SIMULACIÓN

En esta sección se exponen los resultados obtenidos para el sistema de generación eólica estudiado, los cuales se pueden sintetizar en tres partes principales.

6.1. Velocidad del Viento

Es conveniente mencionar que la función propuesta de velocidad del viento utilizada plantea un mayor reto para el controlador diseñado. En múltiples trabajos consultados se observa que la velocidad del viento es constante por intervalos de tiempo. La Figura 6 muestra el modelo del viento empleado como entrada en las pruebas realizadas al controlador.

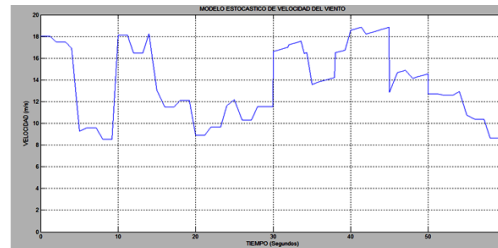


Figura 6. Velocidad estocástica del viento.

6.2. Modelo de la Turbina Eólica

La turbina debe lograr seguir la curva de potencia para diferentes velocidades del viento y en cada etapa tener ciertos comportamientos como se ve en la Figura 7. En la región I (desconexión) las velocidades de viento son tan bajas que el aerogenerador no es capaz de arrancar, por lo tanto no se considera. En la región II (bajas velocidades entre 5 – 10 m/s) la turbina eólica debe llegar a su valor de potencia nominal lo más rápido posible a medida que incrementa la velocidad del viento. El controlador tiene como variable de entrada la velocidad del viento en (m/s) y el error de potencia, como variable de salida se utiliza el ángulo de paso en grados.

Se optó por tomar funciones de pertenencia ya establecidas de un controlador Mandani propuesto por [18]. Para cada una de las variables se proponen nueve conjuntos difusos: negativo amplio (NL), negativo medio amplio (NML), negativo medio (NM), negativo pequeño (NS), cero (ZE), positivo pequeño (PS), positivo medio (PM), positivo medio amplio (PML), positivo amplio (PL). Para la velocidad del viento se tomaron tres conjuntos difusos que corresponden a positivo pequeño (PS), positivo medio (PM), positivo amplio (PL). Para la función de pertenencia de error de potencia (ΔP) se tomaron 5 conjuntos difusos (NL, NS, ZE, PS, PL) como se puede apreciar en la Figura 8.

En cuanto a la función de pertenencia de variación de error de potencia ($\delta(\Delta P)$), se pueden identificar 5 conjuntos difusos (NL, NS, ZE, PS, PL), los cuales son representados en la Figura 9.

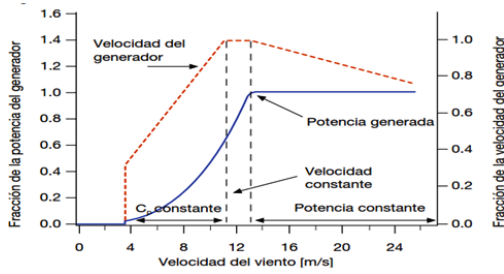


Figura 7. Comportamiento de la turbina para cada región.

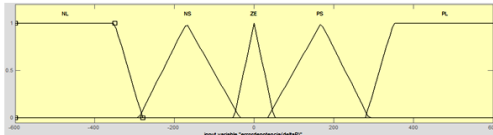


Figura 8. Función de pertenencia de error de potencia (ΔP).

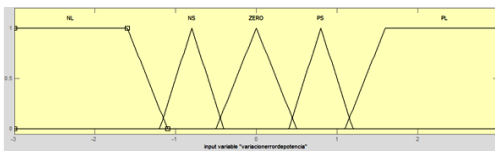


Figura 9. Función de pertenencia de variación de error de potencia ($\delta(\Delta P)$).

En lo que respecta al diseño del controlador, se seleccionó una variable de entrada que es la correspondiente a la velocidad del viento, ya que esta variable es función directa de la potencia de salida del aerogenerador. Así pues, logrando variar el ángulo de paso respecto a las velocidades que se tengan a la entrada, se estará manipulando directamente la potencia de salida.

De acuerdo a la curva de potencia del aerogenerador, hay dos regiones clave donde debe actuar el control y con base a ello se han creado los conjuntos difusos.

En la Tabla 1 se presentan el conjunto de reglas empleado.

La principal función del controlador es garantizar que la turbina eólica siga siempre la curva de potencia; en caso de presentarse bajas velocidades del viento se debe mantener un ángulo de paso fijo a cero grados con el fin de capturar toda la energía proveniente del viento hasta su valor nominal. En la segunda región el control del ángulo de paso debe tratar de mantener el nivel de potencia nominal para el cual fue diseñado y como se ve en la Figura 10, el control busca seguir la potencia de referencia de 1.5 MW.

En la Figura 11 puede verse que en la región que se desea maximizar la potencia de salida, el ángulo de paso es igual a cero y conforme la velocidad del viento va creciendo, el ángulo de paso también debe aumentar para disminuir el ángulo de ataque en las aspas del aerogenerador haciendo que éste entre en el estado de pérdida de la sustentación y logre reducir la potencia en la salida. Para velocidades muy elevadas, las palas giran tan rápido que se convierten en una pared frente al viento incidente de manera que este, en lugar de cruzarlas, las esquiva, con la consiguiente anulación de la potencia extraída.

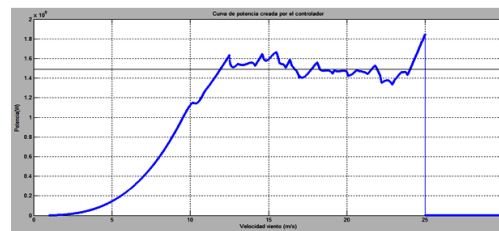


Figura 10. Curva de potencia seguida por el controlador.

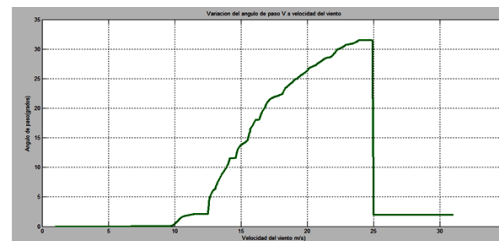


Figura 11. Variación del ángulo de paso para alcanzar la curva de potencia.

Es posible observar en la Figura 11 que el controlador diseñado es estable, esto basándose en la definición de estabilidad de un sistema no lineal, la cual establece que ante una entrada acotada, la salida también debe serlo.

7. CONCLUSIONES

El trabajo presentado permite demostrar que la potencia de salida de un aerogenerador puede ser llevada a un valor de salida constante a pesar de las variaciones en la velocidad del viento. El control difuso utilizado en sistemas de energía renovables es una buena opción para extraer máxima potencia de estos.

Tabla 1. Reglas difusas Mandani.

Vm	PS					PM					PL				
$\delta\Delta P/\Delta P$	NL	NS	ZE	PS	PL	NL	NS	ZE	PS	PL	NL	NS	ZE	PS	PL
NL	NL	NML	NM	NM	PS	NL	NM	NM	NS	PS	NML	NM	NS	NS	PS
NS	NL	NM	NS	PS	PM	NML	NM	NS	PS	PM	NML	NM	NS	ZE	PS
ZE	NML	NS	ZE	PS	PML	NM	NS	ZE	PS	PM	NM	NS	ZE	PS	PM
PS	NM	NS	PS	PM	PL	NM	NS	PS	PM	PML	NS	ZE	PS	PM	PML
PI	NS	PM	PM	PML	PL	NS	PS	PM	PM	PL	NS	PS	PS	PM	PML

Referencias

- [1] ABB Cuaderno de aplicaciones técnicas. Plantas Eólicas., 2012.
- [2] Borja, M.A. Instituto de Investigaciones Eléctricas. Recuperado el 2012. <http://genc. iie.org.mx/genc/eolica/libroo/1999>
- [3] Castillo, O. C. Estudio de técnicas de control de rectificadores Boost Trifásicos con filtro LCL para reducción de distorsión armónica en corriente, aplicadas al rocesado eficiente de energía en aerogeneradores síncronos de imanes permanentes a velocidad variable., 2012. Universidad Politecnica de Valencia.
- [4] C.H.S. Kumar, A. S. Fuzzy logic based control of wind turbine driven squirrel cage induction generator connected to grid. International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems, 2006
- [5] CORPOEMA, C. E. DIAGNÓSTICO DE LAS FUENTES NO CONVENCIONALES DE ENERGÍA (FNCE) EN COLOMBIA., 2010. Bogota, Colombia.
- [6] Fernández Diez, P. (s.f.). Energía Eólica. Cantabria, España: Escuela Politécnica Superior de Ingeniería.
- [7] Funes Ruiz, J. F. ANÁLISIS SIMPLIFICADO DE LA RESPUESTA ESTRUCTURAL DE UNA PALA DE AEROGENERADOR., 2009. Madrid, España.
- [8] Gonzaga., C. A. Fuzzy-logic control system of a variable-speed variable-pitch wind-turbine and a double-fed induction generator. Seventh International Conference on Intelligent Systems Design and Applications. pp. 252-257, 2007.
- [9] GWEC, G. W. GLOBAL WIND REPORT, ANUAL MARKET UPDATE, 2013.
- [10] Holley, W. Wind turbine dynamics and control- issues and challenges. Proceedings of the 2003 American Control Conference.
- [11] Jannini, R., *et al*, Energía Eólica. Teoría y características de instalaciones. pág. 28, 2013
- [12] Kraan, & Bongers. Control of a wind turbine using several linear robust controllers Proceedings of the 32nd IEEE Conference on Decision and Control. 1993
- [13] Lubosny, Z. Wind Turbine Operation in Electric Power Systems. Springer., 2003
- [14] Mathew, S. Wind energy: Fundamentals, Resources Analysis and Economics. Springer. 2006.
- [15] R.Sakamoto, T. T. Output power leveling of wind turbine generator by pitch angle control using adaptative control method. IEEE. International Conference on Power System Technology. 2004
- [16] X. Zhang, W. W. Fuzzy control of variable speed wind turbine. Proceedings of The Sixth World Congress on Intelligent Control and Automation. 2006
- [17] Y.D. Song, B. D. Control of wind turbines using nonlinear adaptative field excitation algorithms. Proceedings of the 2000 American Control Conference. 2000
- [18] Zhang J., *et al*, Pitch Angle Control for Variable speed Wind Turbine. DRPT2008 6-9 April 2008, Nanjing China.