

## DEVELOPMENT OF A THREE-BLADED HORIZONTAL AXIS WIND TURBINE WITH ACTIVE CONTROL USING PLC

### DESARROLLO DE UN AEROGENERADOR TRIPALA DE EJE HORIZONTAL CON CONTROL ACTIVO UTILIZANDO PLC

**Ing. Josue Humberto Barrera Morales, PhD. Cristhian Manuel Durán Acevedo**

**Universidad de Pamplona**

Grupo de Investigación GISM

Ciudadela Universitaria. Pamplona, Norte de Santander, Colombia.

Tel.: 57-7-5685303, Fax: 57-7-5685303, Ext. 144

E-mail: {josue.barrera}@unipamplona.edu.co, {cmduran}@unipamplona.edu.co

**Abstract:** To increase efficiency, useful life and avoid accidents in wind turbines, it is very useful to implement a pitch control in the blades that serve as an aerodynamic brake and orientation in the base to follow the wind direction. The main objective of this paper was to create a controller on the blades that allows to keep the constant angular velocity and follow the orientation of the wind. A design with the CAD software was developed which allowed the aerodynamic analysis by using SolidWorks® software based in a Flow Simulation tool. A model in MATLAB® was created by means of Simulink® tool and the Simscape toolbox with typical data from a 2MW wind turbine, where the electrical and mechanical dynamics, and control feedback were included, having as input parameters: wind direction and speed. Afterwards, it a prototype performed in SolidWorks® and printed in 3D was carried out. For lab experimentation, different Fuzzy control algorithms were created in SCL (structured control language) and then implemented using a S7-1200 PLC. The trials with PLC and fuzzy algorithm were satisfactory, which could be a basis for the optimization of the three-bladed horizontal axis wind turbine.

**Keywords:** Control, Wind turbine, Fuzzy, Mechanical design, PLC, structured control language

**Resumen:** Para aumentar la eficiencia, vida útil y evitar accidentes en las turbinas eólicas es muy útil implementar un control de pitch en las aspas que sirvan como freno aerodinámico y de orientación en la base para seguir la dirección del viento. El objetivo principal de este estudio fue crear un controlador sobre las aspas que permitió mantener constante la velocidad angular y seguir la orientación del viento. Se realizó un diseño en un software CAD al que se le hace un análisis aerodinámico con la herramienta Flow Simulation de SolidWorks®. También se utilizó un modelo en MATLAB® usando la herramienta de Simulink® y la caja de herramientas Simscape con datos típicos de un aerogenerador de 2MW que incluyó la dinámica eléctrica, mecánica, y las retroalimentaciones de control, teniendo como parámetros de entrada la dirección y velocidad del viento. Después de esto, se procedió a realizar un prototipo, el cual fue desarrollado en SolidWorks® e impreso en 3D. Para la experimentación en el laboratorio se crearon los algoritmos de control Fuzzy en SCL (lenguaje de control estructurado) y luego se implementaron en un PLC S7-1200. Las pruebas con el PLC y el controlador Fuzzy fueron satisfactorias, las cuales podrían ser una base para la optimización del comportamiento de los aerogeneradores de eje horizontal tripala.

**Palabras clave:** Control, Aerogenerador, Turbina eólica, Fuzzy, Diseño mecánico, PLC, Lenguaje de control estructurado

## 1. INTRODUCCION

Las energías renovables son de gran ayuda para satisfacer la creciente demanda de electricidad a nivel mundial, la energía eólica puede servir como fuente de energía en lugares remotos sin conexión a las redes domiciliarias nacionales, que de acuerdo a (Morales A. 2020) representan el 51% del territorio nacional. Según investigadores la energía eólica es una fuente renovable verde inagotable de energía (Saidur, 2011 y Tavner, 2008). Llama la atención de todo el mundo debido a ricas reservas, protección ambiental baja en carbono, amplia distribución y otras ventajas (Denny E. y O'Malley M., 2006 y Ling S., Yongjun G, y Zuwen W, 2011).

El sistema de control de tónido de las aspas es uno de los componentes indispensables del aerogenerador de eje horizontal, ya que permite servir como freno aerodinámico, siendo una opción barata, de fácil mantenimiento y buen desempeño (Ling S., Yongjun G, y Zuwen W. 2011). Juega un papel importante debido a que las velocidades del viento pueden tener cambios abruptos que pueden disminuir la vida útil, aumentar la frecuencia en que se deba realizar mantenimiento e inclusive crear accidentes, donde las aspas o la torre se fracturen instantáneamente, como ha ocurrido repetidas veces en parques eólicos. Por lo tanto, se hace necesario sintonizar correctamente los parámetros de ajuste con el fin de crear un controlador robusto que se adapte a los cambios estocásticos producidos por el viento. El controlador PID convencional no es adecuado para todos los puntos de operación porque los parámetros de ajuste no se cambian constantemente.



Figura 1. Destrucción de una turbina eólica por velocidades del rotor muy por encima del valor nominal.

En el artículo de (Guo F, Jiang W, Shao H, Du Y, She J. 2017) describen que el PLC es una herramienta industrial el cual también puede ser utilizado para desarrollar sistemas de control avanzados. Por medio de SCL (lenguaje de control estructurado) es posible programar en el entorno de Siemens® TIA Portal, un código con base en estructuras de control condicionales que permitan establecer reglas difusas para seguir las diferentes regiones de operaciones y cumplir el objetivo de mantener constante la velocidad angular en el rotor. (Guarnizo C, 2011)

## 2. MARCO TEÓRICO

En primer lugar, se describen los tipos de turbinas eólicas existentes y se hace una breve descripción de cómo extrae la potencia dependiendo de la velocidad del viento, el área de barrido y el coeficiente de potencia en los aerogeneradores tripalpas de eje horizontal.

### 2.1 Clasificación de los aerogeneradores

#### 2.1.1 Por el tipo de eje

**2.1.1.1 Eje vertical:** El eje de rotación de las palas es perpendicular al suelo donde se apoya. Su principal ventaja es que no requiere un sistema de orientación para optimizar la generación, ya que independientemente de la dirección del viento, siempre producirá la misma cantidad de energía. Entre sus desventajas está que tienen más posibilidades de pararse debido a la menor inercia de su rotor y de caerse de su punto de anclaje, por lo que no son idóneos para zonas con vientos fuertes. Debido a su menor eficiencia aerodinámica y menores tamaños producen considerablemente menos energía que uno de eje horizontal. (Onrubia A, 2017)

**2.1.1.2 Eje horizontal:** El eje de rotación es paralelo al suelo. Son los más utilizados y en los que este proyecto va a tratar debido a que son los que mayor eficiencia y carga aerodinámica uniforme presentan. (Onrubia A, 2017)

#### 2.1.2 Por la posición respecto al viento

**2.1.2.1 A sotavento:** el aire se encuentra antes con la torre que con el rotor. No es necesario un sistema de orientación, pero en cambio presentan una menor eficiencia que los aerogeneradores a barlovento.

**2.1.2.2 A barlovento:** el aire se encuentra antes con el rotor que, con la torre, esto hace que no halla interferencia aerodinámica con la torre y así tener mayor eficiencia.

### 2.2 Potencia

La potencia extraída puede ser expresada como:

$$P_S = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 C_P(\lambda, \beta) v^3 \quad (1)$$

Donde  $\rho$  denota la densidad del aire,  $R$  es el radio del rotor,  $v$  es la velocidad del viento antes de interactuar con la turbina,  $C_P(\lambda, \beta)$  es la eficiencia aerodinámica, que es una función no lineal de la relación velocidad-punta (TSR) y  $\beta$  que es el

ángulo de inclinación de la cuchilla (Burton T., Sharpe D, Jenkins, N and Bossanyi E. 2001). TSR se define como:

$$\lambda = \frac{\Omega R}{v} \quad (2)$$

Donde  $\Omega$  denota la velocidad angular del rotor,  $R$  es el radio del rotor y  $v$  representa la velocidad del viento entrante. (Burton T., Sharpe D, Jenkins, N and Bossanyi E. 2001)

La implementación de un control de paso en las aspas queda representada en la figura 2.

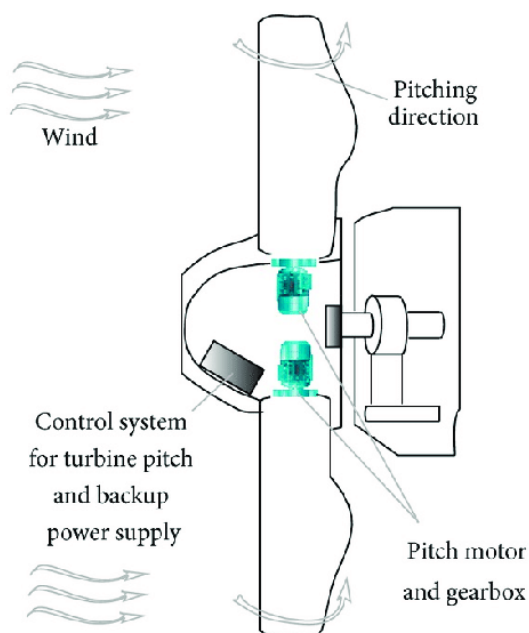


Figura 2. Control de cabeceo en las aspas. (Muhammad J. 2017)

### 3. DESARROLLO DEL AEROGENERADOR

#### 3.1 Diseño aerodinámico

Para determinar las características generales del modelo, se desarrolló un modelo simplificado en SolidWorks® que se puso a prueba con herramienta Flow Simulation para conocer el comportamiento del aerogenerador ante determinadas corrientes de viento y cargas mecánicas.

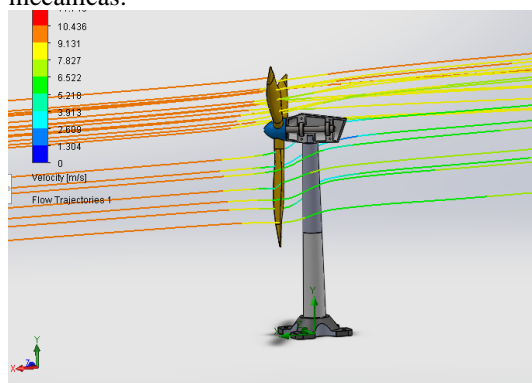


Figura 3. Modelo en SolidWorks del aerogenerador tripala

Se estudió con viento a barlovento por ser el que mayor eficiencia produce, con velocidades del viento entre 5m/s y 30m/s, demostrándose que la eficiencia alcanzada con este diseño es ligeramente superior al 50%, cercano al límite de Betz que es la máxima eficiencia posible de 59,3%. El par generado por una fuerza en un tramo de la pala es proporcional al radio de la sección al eje de giro. En la parte inicial de las aspas es donde se producen los mayores esfuerzos y existe mayor probabilidad de fractura, por lo que esta debe tener mayor área de construcción.

#### 3.2 Modelamiento y simulación

Para el modelamiento y simulación se utilizó la versión de MATLAB 2017b a través de Simulink y la caja de herramientas para análisis de elementos mecánicos Simscape.

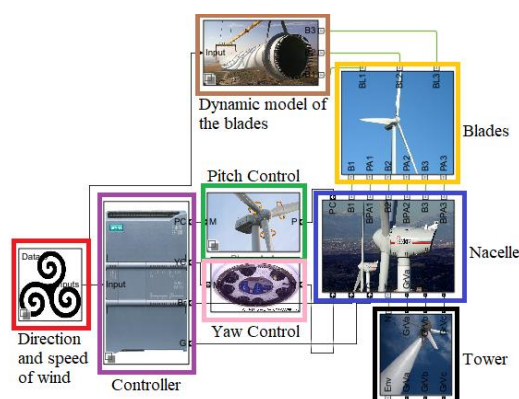


Figura 4. Modelo en Simulink

#### 3.3 Diseño e impresión de partes del prototipo

En la figura 5 se observa el diseño en SolidWorks de la góndola, que incluye el acople con el rotor, el espacio donde va soportado el rodamiento y el encoder. Mide 18cm de largo y 7cm de diámetro en la parte delantera. Se distribuyó el peso, de tal forma que el centro de masa coincida con el centro de la base.

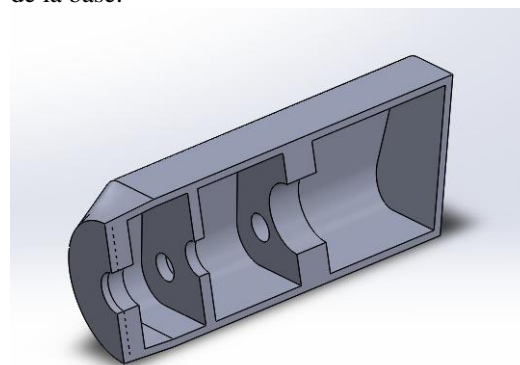


Figura 5. Modelo CAD de la góndola

En la figura 6 se ilustra el diseño del rotor, en el exterior están los espacios donde son soportados los servomotores para mover las aspas, la zona verde es una cámara interna donde van los cables que vienen de los servomotores que se conectan con los cables de la parte móvil del anillo deslizante, y por el que pasa el eje de rotación.

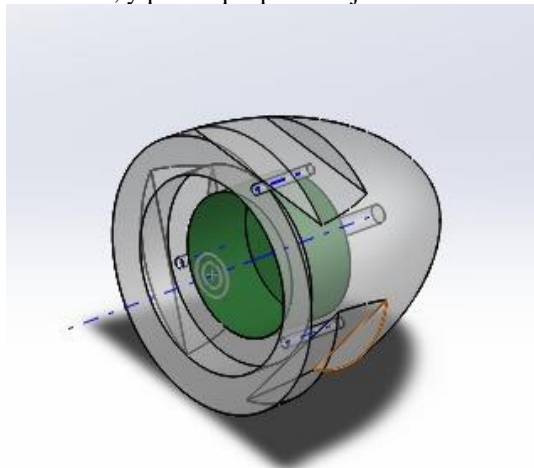


Figura 6. Modelo CAD del rotor

Un mecanismo de anillos deslizantes fue necesario para mover los cables rotacionalmente y hacer que no se muevan, obteniendo una permanente conexión eléctrica de buena calidad (ver figura 7), pudiéndose controlar los servomotores que permanentemente estarán girando con el rotor.

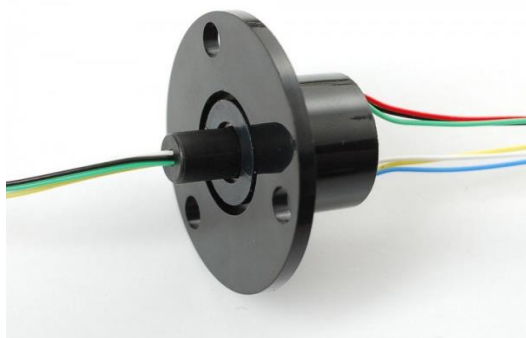


Figura 7. Anillos deslizantes

#### 4. SISTEMA DE CONTROL

El sistema de control de la turbina eólica consta de varios sensores, actuadores y un sistema que consiste en hardware y software donde este último procesa las señales de entrada de los sensores y genera señales de salida para los actuadores.

##### 4.1 Controlador

Para la realización de las diferentes pruebas se seleccionó el PLC S7-1200 de Siemens,

debido a es posible realizar la programación en SCL y lenguaje escalera, tiene gran variedad de bloques para operaciones matemáticas, la capacidad de procesamiento es de 64 bits, tiene entradas de alta velocidad para el encoder, lo cual fue útil para la lectura exacta de la velocidad, así mismo lo integran las salidas con PWM y entradas y salidas analógicas. La única limitante de utilizar este PLC, fue que la velocidad de procesamiento y capacidad de memoria no eran tan altas como para un control por SCL complejo, por lo que hay que tener en cuenta el costo computacional del autómatas.



Figura 8. PLC S7-1200 CPU 1214C DC/DC/DC de Siemens

##### 4.2 Sistema de control del pitch

El control de paso individual requiere actuadores separados en el cubo para cada pala. Por lo tanto, debe haber algún medio de transmisión de energía al centro giratorio para accionar los actuadores. Esto se puede lograr por medio de anillos deslizantes en el caso de actuadores eléctricos, o una junta hidráulica rotativa para actuadores hidráulicos.

Para el diseño del sistema de control, en primer lugar; es necesario obtener alguna relación matemática que permita conocer la planta con base en la entrada y salida del sistema, para esto se hace una caracterización, donde la velocidad del viento puede simularse (proveniente de ventilador), el cual genera cierto efecto sobre las aspas de la turbina, que producen una respuesta en el rotor, en el que se mide la velocidad angular por medio de un encoder incremental ubicado en el interior de la góndola (ver figura 12). Se va cambiando el ángulo de las aspas por medio del movimiento continuo de los servomotores. De



esta manera, se obtiene una gráfica de los ángulos de los servomotores vs RPM del rotor.

Posteriormente, es posible realizar las reglas difusas con base en las diferentes regiones de operaciones (ver figura 9) que se ajusten a las no linealidades del sistema, y que hagan que se mantenga la velocidad angular en 30rpm, ya sea que la velocidad del viento produzca que se sobrepase este valor o que disminuya. Ante vientos demasiado fuertes, la rotación debe anularse. (Bueno M, 2015)

En la figura 9 se observan cuatro regiones de operación dependientes de la velocidad del viento; la menor a la velocidad de corte (I), entre el corte y por debajo de la velocidad nominal (II), por encima de la velocidad nominal (III) y la última que supera la velocidad máxima permitida, donde no debe haber generación para evitar exceso de cargas mecánicas.

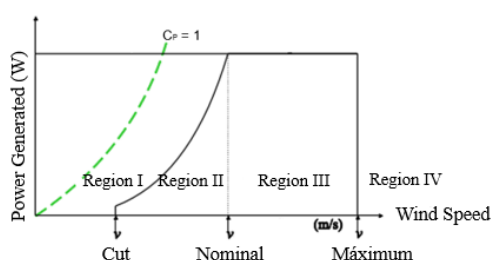


Figura 9. Curva de potencia de un aerogenerador de velocidad variable generalizada.

La fusificación de las entradas, la evaluación de las reglas y la defusificación de las salidas se realiza por medio de estructuras de control condicionales acorde a la metodología Takagi-Sugeno, por ser la de mayor eficiencia computacional. Para implementar esto en el PLC S7-1200 se hace uso un bloque de SCL (lenguaje de control estructurado) muy conveniente para esta situación.

A continuación, se describen las partes que componen la figura 10

1. Aspas: con una longitud de 23 cm, se encargan de transferir el empuje producido por el viento al rotor debido a la diferencia de velocidades entre cada uno de sus bordes.
2. Rotor: Este elemento es de primordial importancia, puesto que sobre este giran las aspas, y van soportados los anillos deslizantes.
3. Góndola: en su interior se encuentra el eje de rotación, el rodamiento y el encoder incremental tipo NPN (negativo positivo negativo, por lo que, al activarse el transistor, debe estar conectada la

entrada a un común de 24V para hacer la lectura de un 1 lógico).

4. Torre: es de geometría cilíndrica, como las utilizadas en la industria eólica.

5. Base.

6. Ventilador.

7. PLC S7-1200.

8. Panel de conexiones

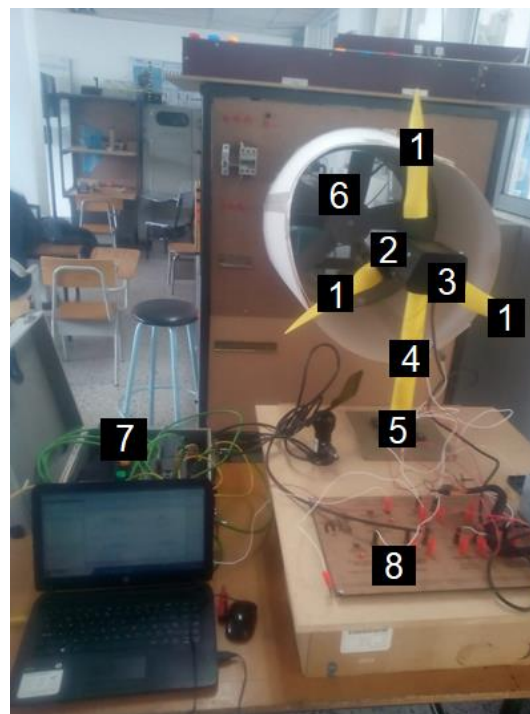


Figura 10. Implementación del prototipo aerogenerador eólico tripala en el laboratorio de control de la Universidad de Pamplona.

## 5. RESULTADOS

La figura 11 muestra los movimientos realizados por el servomotor para controlar la válvula electrohidráulica que controla el pitch en las aspas para cumplir con los objetivos del control ante variaciones en la velocidad del viento en la simulación. Además, se observa que se llega al set point en todas las regiones de operación y que las sobre elongaciones son pequeñas.

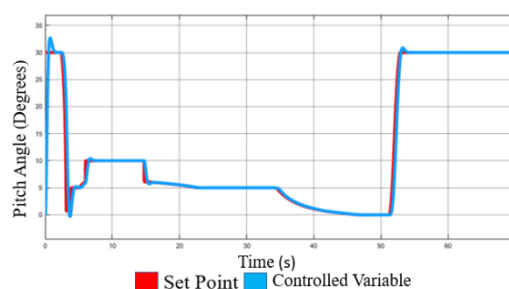


Figura 11. Respuesta del actuador ante el sistema de control

La potencia generada varía ya que, a pesar de que la velocidad angular se controla para que tenga valores constantes, el torque si varía dependiendo de la velocidad del viento, provocando que la energía capturada no sea siempre igual.

Los resultados de la caracterización del prototipo son las mostradas en la figura 12, demostrando que el sistema es altamente no lineal:

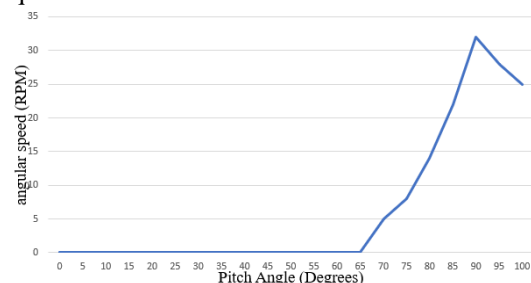


Figura 12. Caracterización de la planta.

A continuación, la figura 13 muestra la lectura del encoder de la velocidad angular del rotor ante un aumento de la velocidad nominal debido al incremento de la velocidad del viento, donde el objetivo es mantener las lecturas en 30rpm. El tiempo de reacción es menor a 1s.

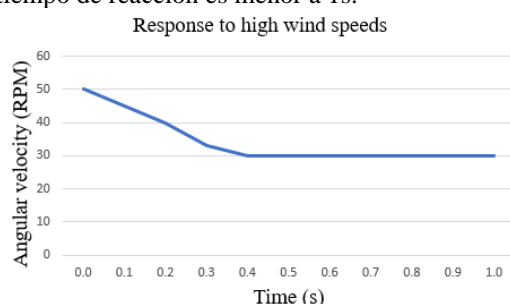


Figura 13. Respuesta ante un aumento en la velocidad angular

## 6. CONCLUSIONES

La caracterización del sistema propuesto permitió descubrir el ángulo de ataque de las aspas, el cual debe estar entre los 70 y 90 grados. Los ángulos menores a estos no producen la suficiente sustentación, por lo que las aspas no se mueven. Debido a la cara plana de la parte posterior y a un fenómeno de saturación, la velocidad angular empieza a disminuir luego de los 90 grados.

El SCL permitió implementar las reglas de control con un buen desempeño, aunque tuvieron que simplificarse porque el software no soportaba cadenas de matrices de dos filas y no hacía bien los cálculos. Por lo tanto, la programación debe ser lo más sencilla posible, puede que PLC's más avanzados como el S7-300 o el S7-1500 permitan trabajar mejor con matrices y vectores, y aplicar programaciones más extensas.

Mecánicamente, el prototipo cumplió con los objetivos de la investigación, se podrían hacer mejoras con mayor presupuesto y la experiencia obtenida en este proyecto.

Por medio del freno aerodinámico de control activo en las aspas se disminuyeron las cargas y se aumenta la vida útil.

Esta investigación puede expandirse al introducir métodos de control más avanzados con el control predictivo o el h infinito y tener en cuenta flujos de viento laminares y velocidades del viento estocásticas. Además, se puede crear un prototipo más elaborado, que involucre un generador eléctrico al que se le pueda medir el voltaje y corriente que va produciendo con el fin de establecer reglas de control más complejas.

## REFERENCIAS

Morales A. (2020). Estudio numérico del efecto de las variables de control en la autoignición del gas de síntesis en un motor HCCI estacionario para microgeneración. RCTA, Volumen 1.

Saidur, R. (2011) Environmental impact of wind energy, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol.15, No.5.

Tavner, P. (2008). *Wind power as a clean-energy contributor*, Energy Policy Vol.36, No.12, 4397-4400

Denny E. y O'Malley M., (2006) *Wind generation, power system operation, and emissions reduction*, IEEE Transactions on Power Systems, Vol.21, No.1, 341-347.

Ling S., Yongjun G, y Zuwen W. (2011). Design of large-scale wind power yawing bearing test-bed control system, IEEE International Conference on Fluid Power and Mechatronics (FPM), 319-323.

Guo F, Jiang W, Shao H, Du Y., She J. (2017) Research on the wind Turbine Yaw System Based on PLC. IEEE 29ª Conferencia de Control y Decisión de China (CCDC).

Shen X., Du W., (2015) Expectation and Review of Control Strategy of Large Wind Turbines Yaw System, Transactions of China Electrotechnical Society, Vol.30, No.10, 196-203.

Guarnizo C (2011), Metodología para la implementación de controlador difuso tipo Takagi-Sugeno en PLC s7-300.

Onrubia A, (2017). Análisis de cargas aerodinámicas e inerciales en el sistema de orientación de un aerogenerador marino. Universidad Pontificia Comillas.

Burton T., Sharpe D, Jenkins, N and Bossanyi E. (2001) Wind Energy Handbook. Wiley.

Muhammad J. (2017) Intermittent Smoothing Approaches for Wind Power Output: A Review. Universidad de Malaya.

MATLAB. (2017). Applications development.

Bueno M, (2015) Sistema de control para aerogeneradores empleando lógica difusa. Grupo de investigación AVARC Universidad de la Salle.