

REVISIÓN DE LITERATURA SOBRE ESTRATEGIAS PARA LA EXTRACCIÓN DE MÁXIMA POTENCIA EN SISTEMAS DE CONVERSIÓN DE ENERGÍA EÓLICA.

REVIEW OF LITERATURE ON STRATEGIES FOR THE EXTRACTION OF MAXIMUM POWER IN WIND ENERGY CONVERSION SYSTEMS.

R. Muñoz¹, J. Solano², M. Torres³

¹ AEyCC., MIRP., Instituto Tecnológico Metropolitano, Colombia. Email: ricardo.munoz@yahoo.com

² Esc. de Ing. Eléctrica, Electro. y Telecomunicaciones, UIS, Colombia. Email: javieresolanom@gmail.com

³ AEyCC., MIRP., Instituto Tecnológico Metropolitano, Colombia. Email: mariatorres@itm.edu.co

RECIBIDO: abril 21, 2017. ACEPTADO: junio 02, 2017. VERSIÓN FINAL: noviembre 01, 2017

RESUMEN

Las fuentes de energía alternativa se han convertido en una buena opción de generación amigable con la naturaleza. Ejemplo de ello es la energía eólica que aprovecha el flujo de masa de aire; este movimiento se debe a que la radiación solar es absorbida por la atmósfera y transformada en energía cinética. Este tipo de energía se cataloga como energías limpias. Con la invención del dinamo aparece formalmente el aerogenerador y, para finales del siglo XIX, con la invención del motor de inducción comienza la disponibilidad comercial de la energía eléctrica. Para el año 2014, la energía eólica en la Unión Europea alcanzó la tasa más alta de crecimiento de todas las nuevas instalaciones eléctricas, alcanzando un 43.7% y además el 55.3% de todas las nuevas instalaciones de energía renovable. Para el año 2020, la energía eólica podrá suministrar cerca del 12% de la energía total demandada a nivel mundial. Las prestaciones que ofrecen los sistemas de conversión de energía eólica se evalúan de acuerdo con la capacidad que tienen para convertir la energía cinética del viento en energía eléctrica. Para tal fin, es necesario extraer la máxima energía a cualquier velocidad. Este reto exige mantener la velocidad del generador a una velocidad de rotación tal que esta corresponda al punto óptimo de operación del sistema. A través de los años, se han desarrollado estrategias de control mecánicas, electromecánicas, y en los últimos años se han introducido soluciones basadas en la inteligencia computacional, redes neuronales y lógica difusa. En este artículo se expone la revisión del estado del arte sobre las estrategias para la extracción de la máxima potencia en aerogeneradores, destacando ventajas y desventajas que presentan los diferentes métodos. En la primera parte se hace una clasificación de los aerogeneradores de acuerdo con volumen y peso, área de barrido y potencia generada. En la segunda parte se realiza la revisión del estado del arte de los algoritmos de seguimiento del punto de máxima potencia, los tipos disponibles y sus implementaciones. En la tercera parte se hace una revisión de la aplicación de estrategias de inteligencia computacional en la extracción de potencia en los sistemas de conversión de energía del viento. Por último, se muestra una revisión de las herramientas utilizadas en la simulación y evaluación de desempeño de estos sistemas de conversión de energía eólica.

PALABRAS CLAVE: Energía del viento, aerogenerador, seguimiento del punto de máxima potencia, convertidor de potencia, coeficiente de potencia, relación de velocidad de punta, representación energética macroscópica.

ABSTRACT

Alternative energy sources have become a good choice of generation friendly to nature. An example of this is the wind power that takes advantage of the mass flow of air; This movement is due to the solar radiation being absorbed by the atmosphere and transformed into kinetic energy. This type of energy is classified as clean energies. With the invention of the dynamo formally appears the wind turbine and, by the end of the nineteenth century, with the invention of the induction motor. By 2014, wind energy in the European Union achieved the highest growth rate of all new electrical installations, reaching 43.7% and 55.3% of all new renewable energy installations. By 2020, wind power can supply about 12% of the total energy demanded worldwide. The benefits offered by wind energy conversion systems are evaluated according to their ability to convert wind kinetic energy into electrical energy. For this purpose, it is necessary to extract the maximum energy at any speed. This challenge requires maintaining the speed of the generator a rotation speed such that it corresponds to the optimum point of the operation of the system. Through the years, mechanical and electromechanical control strategies have been developed, and solutions have been introduced in recent years based on computational intelligence, neural networks and diffuse logic. This article discusses the state of the art review of strategies for the extraction of maximum power in wind turbines, highlighting the advantages and disadvantages presented by the different methods. In the first part, a classification of the aerogenerators is made according to the volume and the weight, swept area and power generated. In the second part, the state of the art is reviewed for the maximum power point tracking algorithms, the available types and their implementations. In the third part, it reviews the application of computational intelligence strategies in the extraction of power in wind energy conversion systems. Finally, a review of the tools used in the simulation and performance evaluation of these wind energy conversion systems is shown.

KEYWORDS: Wind power, wind turbine, maximum power point tracking, power converter, power coefficient, tip speed ratio, energetic macroscopic representation.

1. INTRODUCCIÓN

Debido al auge del petróleo en el siglo XX como una posibilidad energética abundante y barata, la extracción de energía del viento sufrió un rezago en su desarrollo. Sin embargo, en la década de los 80's, nuevamente empieza a considerarse la energía eólica como una alternativa energética, dada la volatilidad de los precios del petróleo y, por otro lado, por los avances alcanzados en el desarrollo de tecnología en el área de la electrónica y la computación, permitiendo producir energía eléctrica de manera eficiente y confiable [1] [2]. En los últimos años, la generación hidroeléctrica se ha visto gravemente afectada también por el cambio climático, lo cual ha hecho que lugares con ventajas geográficas donde se han construido grandes centrales, terminen siendo susceptibles a condiciones climáticas muy variables [1].

Es así como se presenta un resurgimiento del desarrollo tecnológico en la industria eólica, sumado esto a la gran preocupación mundial por el cuidado del medio ambiente y a la búsqueda de fuentes energéticas auto sostenibles [3]. A mediados del año 2013, la generación de electricidad a partir del viento en todo el mundo alcanzó 296 GW, que es aproximadamente el 3.5% de la demanda de energía eléctrica mundial [4]. Para el año 2014, la energía eólica en la Unión Europea alcanzó la tasa más alta de crecimiento de todas las nuevas instalaciones eléctricas, alcanzando un 43.7% y además el 55.3% de todas las nuevas instalaciones de energía renovable [5]. Para el año 2020, la energía eólica podrá suministrar cerca del 12% de la energía total demandada a nivel mundial [6]. Se da entonces la necesidad de innovación

permanente en los sistemas de control, en el diseño e implementación de proyectos en la industria eólica.

En este artículo se hace una revisión de la literatura sobre las estrategias para la máxima extracción de potencia en los sistemas eólicos. A continuación, se hace una revisión de la clasificación de los aerogeneradores de acuerdo con su volumen y peso, área de barrido y potencia generada.

2. CLASIFICACIÓN DE LOS SISTEMAS DE CONVERSIÓN DE ENERGÍA EÓLICA

Para [7], la potencia que se extrae del viento a través de un aerogenerador puede definirse como la diferencia entre la potencia presente en la corriente de aire que fluye antes de pasar a través del rotor del aerogenerador, y la potencia presente después del rotor. En [8] se clasifican los aerogeneradores de acuerdo con su escala de potencia como: pequeños aerogeneradores en el rango de 0.025kW hasta 10 kW, aerogeneradores de escala media entre 10kW y 100kW y los grandes aerogeneradores con potencias superiores a 100kW. En [2] se hace una clasificación de los aerogeneradores de acuerdo con el área de barrido de sus aspas y se especifica que los de pequeña escala, que están definidos por la Comisión Electrotécnica Internacional IEC, son aquellos que tienen un área máxima de barrido de 200 m^2 . En [9] se presentan distintos criterios para la clasificación de los aerogeneradores: según la disposición del eje de giro, número de palas, velocidad del rotor de la turbina, control y regulación, tipo de generador que utiliza, emplazamiento, tipo de viento, interconexión a la red y

según su potencia nominal. De acuerdo con esta última clasificación, los aerogeneradores de pequeña escala están catalogados en dos clases: microturbinas y mini turbinas con potencias nominales menores a 5 kW y entre 5-100 kW respectivamente.

Una comparación entre los diversos tipos de aerogeneradores de acuerdo con criterios como volumen y peso, costo y eficiencia, confiabilidad del sistema y presentación de fallas de acuerdo con la capacidad, se presenta en [10]. La gran mayoría de investigaciones sobre extracción de energía eléctrica del viento se han dedicado a los aerogeneradores de mediana y gran escala, donde se busca la conexión directa a la red eléctrica [10] [11] y para ello deben cumplir con los estándares de calidad de energía compatibles con la red a la que están conectados [12] [13].

Los aerogeneradores de pequeña escala, que normalmente son utilizados en lugares aislados de la red eléctrica [14], se vienen utilizando cada vez más en las áreas metropolitanas y en diferentes aplicaciones, tales como telecomunicaciones, sistemas de protección catódica, electro-bombeo de agua, bases militares remotas, donde la demanda de energía no es alta o donde pueden combinarse con dispositivos fotovoltaicos para suplir necesidades energéticas específicas [15]. Estas nuevas aplicaciones han despertado el interés de los investigadores en buscar maneras de ofrecer una mayor eficiencia en la generación de potencia eléctrica en este tipo de aerogeneradores, ya que la información sobre características técnicas y datos de desempeño son muy limitadas para los de pequeña escala [16], pues los fabricantes de estos sólo suministran parámetros básicos, dando lugar a incertidumbres sobre la evaluación del desempeño de este tipo de aerogeneradores [15].

Debido al auge de nuevas tecnologías para la construcción de aerogeneradores, en la literatura se hace énfasis en los generadores síncronos de imanes permanentes PMSG (en inglés, Permanent Magnet Synchronous Generator), [17] [18] [19] [20] para la extracción de energía eléctrica desde el viento, ya que ofrecen mayor confiabilidad, eficiencia, versatilidad, bajo peso, y requieren de menor mantenimiento y no necesitan caja en engranajes. Sin embargo, para [21], los generadores más populares en los sistemas de conversión de energía son los de inducción doblemente alimentados DFIG (en inglés, Doubly Fed Induction Generator).

La mayor dificultad para la extracción de la máxima potencia de cualquier sistema de conversión de energía del viento radica en la aleatoriedad de la fuente [22], es decir, la variación de la velocidad del viento que imprime un carácter no lineal al sistema [23]. Por tanto, se requiere de una estrategia de control adecuada para

obligar al sistema a trabajar en un punto de operación óptimo.

En la literatura se encuentran diferentes estrategias para conseguir la máxima extracción de potencia, desde sistemas mecánicos hasta el uso de inteligencia computacional para implementar algoritmos de seguimiento del punto de operación donde el sistema entrega la máxima potencia. En [24] se analiza un sistema de conversión de energía híbrido, cuyo objetivo es extraer la máxima potencia de la turbina mediante la aplicación de aspas extensibles, a través de un sistema electromecánico. Allí se concluye que la producción de energía anual podría duplicarse a través de esta técnica en comparación con un aerogenerador convencional con palas de longitud fija. Pero, la factibilidad de la estrategia se ve limitada por aspectos económicos, pues el costo del rotor de este nuevo sistema debería ser 4.3 veces inferior al costo del rotor de un aerogenerador convencional.

En [10] se hace una revisión exhaustiva del estado del arte de los sistemas de conversión de energía del viento, haciendo énfasis en los tipos de generadores y el control de los mismos. Se clasifican los aerogeneradores de acuerdo con: su rango de velocidad, caja de velocidades, convertidor que usa, tipo generador que utiliza, capacidad de generación y fabricante. Igualmente se hace comparación entre los diferentes sistemas de conversión de energía más populares, de acuerdo con el peso y al volumen que ocupa, costos, eficiencia y confiabilidad. Se hace también una confrontación entre las diferentes estrategias de control para el seguimiento del punto de máxima potencia (por sus siglas en inglés, MPPT) para el caso de aerogeneradores de velocidad variable: control de relación de velocidad de punta óptimo (en inglés, Tip Speed Ratio, TSR), control por realimentación de potencia (en inglés PSF) y búsqueda del punto máximo (en inglés, HCS) y control con lógica difusa y redes neuronales artificiales.

A continuación, se realiza la revisión del estado del arte de los algoritmos de seguimiento del punto de máxima potencia, los tipos disponibles y sus implementaciones.

3. ALGORITMOS DE SEGUIMIENTO DEL PUNTO DE MÁXIMA POTENCIA(MPPT)

Para conseguir la máxima extracción de potencia en un aerogenerador, es necesario mantener la velocidad angular del rotor en el punto óptimo de operación para cada velocidad del viento. Es decir, los cambios en la velocidad del viento requieren cambiar la velocidad del rotor para mantener el punto de operación óptimo, que corresponde a la máxima extracción de potencia [25], [26]. En [15] se hace una descripción general de las

estrategias para conseguir el punto óptimo de operación en la extracción de máxima potencia en aerogeneradores a velocidad variable, lo que se denomina en la literatura como algoritmo MPPT (por sus siglas en inglés *Maximum Power Point Tracking*). La clasificación que se hace es la siguiente:

- Estrategia basada en el perfil de potencia de la turbina.
- Estrategia basada en la relación de control de la velocidad óptima.
- Estrategia basada en el control de torque óptimo.

En [27] se afirma que los métodos existentes para extraer la máxima potencia de los aerogeneradores buscan en esencia, la manera de cambiar la velocidad de rotación del sistema en función de la velocidad del viento y bajo diferentes estrategias variar el punto de operación en la curva del coeficiente de potencia.

Para [28] hay dos métodos principales para el seguimiento del punto de máxima potencia MPPT en los aerogeneradores de pequeña escala: el control a través de perturbación y observación P&O (en inglés, *Perturbed & Observed*), el cual presenta una lenta respuesta e ineficiencia ante las rápidas fluctuaciones en la velocidad del viento; y el método denominado ORB (en inglés, *Optimum Relationship Based*), que consiste en la búsqueda por tabla del punto de máxima potencia basándose en control por realimentación de señal de control. Este método es más eficiente que el P&O en cuanto a velocidad de respuesta y eficiencia, pero requiere el conocimiento previo de las características del sistema, las cuales varían de un sistema a otro.

En [29] se clasifican los métodos para la obtención de la máxima potencia en métodos de lazo abierto y métodos de lazo cerrado, pero, basados en esta clasificación describen de manera detallada los algoritmos derivados como: perturbar y observar, búsqueda de la máxima pendiente (*Hill-climb*), búsqueda por tabla, control de ángulo de cabeceo, control por lógica difusa, utilización de redes neuronales y sistemas de control adaptativo.

En [14] se presenta también una clasificación detallada de las técnicas para la implementación de algoritmos MPPT: control TSR (por sus siglas en inglés, *tip speed ratio*), control PSF (en inglés, *power signal feedback*), método OTC (control de torque óptimo), algoritmo INC (incremental conductance) y método de búsqueda del punto máximo HCS (perturbar & observar), estos dos últimos propuestos originalmente para paneles fotovoltaicos. Además, se propone una estrategia que consiste en un solo sensor de velocidad del viento y se compara su eficiencia con las otras estrategias para MPPT.

En [10] se presenta un método mejorado de la estrategia Hill-Climb utilizando una estrategia para MPPT por optimización basado en enjambre de partículas de caos embebido (CESPO) y se demuestran la validez del algoritmo comparándolo con los resultados obtenidos por el método *Hill-climbing Search* (HCS) convencional. En [30] se muestra un nuevo algoritmo MPPT para aerogeneradores de pequeña escala que consiste en una estrategia de perturbación y observación (P&O) mejorada, pues se combina la estrategia P&O convencional, que no requiere conocimiento a priori de las características de aerogenerador, con un control predictivo que corrige los problemas que presenta el método P&O con los cambios rápidos en la velocidad del viento.

En la siguiente sección se hace una revisión de las estrategias de inteligencia computacional en la extracción de potencia en los sistemas de conversión de energía del viento.

4. INTELIGENCIA COMPUTACIONAL EN LA EXTRACCIÓN DE MÁXIMA POTENCIA DE AEROGENERADORES

Las técnicas de inteligencia computacional ampliamente usadas en el control de los aerogeneradores son las redes neuronales artificiales y la lógica difusa. La aplicación de estas técnicas según [31] buscan reducir las incertidumbres a las que se enfrentan los métodos de control clásicos, que están basados en modelos lineales. En [32] se presenta una revisión de las aplicaciones de las redes neuronales artificiales en los sistemas de conversión de energía del viento, clasificándolas en tres categorías principales: pronóstico y predicción, predicción y control, e identificación y evaluación. Igualmente se hace una comparación y análisis entre las diferentes arquitecturas de redes neuronales artificiales cuando se aplican en el control de aerogeneradores. Para [33] las redes neuronales artificiales implementadas como estrategia de control adaptativo permite la supresión de ruido y de las perturbaciones producidas por las turbulencias que causa el flujo de viento, permitiendo que el sistema de control sea estable en comparación con un control PID convencional.

En [34] se muestra una estrategia de control de velocidad para máquinas eléctricas de imán permanente con una red neuronal artificial, aprovechando su capacidad de aprendizaje para la dinámica no lineal del sistema y se obvia el conocimiento de los parámetros de la máquina. Se hace también una comparación de los resultados obtenidos mediante esta estrategia de control y la técnica de vector de control y el análisis de la estabilidad del sistema en lazo cerrado se realiza mediante la teoría de Lyapunov.

El diseño de un compensador con una red neuronal artificial para corregir los efectos de los parámetros desconocidos en la dinámica del sistema se presenta en [35], donde el ciclo de trabajo del convertidor DC/DC es dado por un controlador PI y sus parámetros son determinados por el algoritmo genético con la ayuda de Matlab. En [21] se propone un de control directo del torque DTC implementado con una red neuronal para una turbina equipada con un generador de inducción doblemente alimentado, donde un selector de voltaje de la red es usado en lugar de la tabla convencional de conmutación, reduciendo el rizado del par y del flujo.

En [36] se destaca el enfoque mediante redes neuronales artificiales para abordar el problema del control del sistema no lineal. Pero, se menciona también el alto costo computacional que se tiene bajo este enfoque, debido al entrenamiento de la red bajo gran cantidad de datos de entrada, con la necesidad de usar redes con varias capas ocultas. Proponen entonces, la combinación de una red neuronal simple sin capas ocultas, red neuronal de base radial (RBFNN), para la implementación del algoritmo MPPT y el uso de la estrategia por enjambre de partículas PSO (*Particle Swarm Optimization*) para estimar la velocidad apropiada de la turbina, para una velocidad del viento y carga variables. [37] ilustra una aplicación mediante lógica Fuzzy para un aerogenerador de pequeña escala con control del ángulo de incidencia (en inglés *pitch*) ante diferentes intensidades de turbulencias y compara los resultados con los obtenidos mediante un control PID convencional, en términos de la generación de potencia y los rpm (revoluciones por minuto) de la turbina. Por otra parte, en [38] se presenta el diseño de un controlador que puede ser implementado sin la necesidad de conocer las características de la turbina. A través de este controlador se diseña un algoritmo MPPT que puede ser implementado también con lógica difusa, pero aplicado a una turbina de viento de pequeña escala con ángulo de incidencia del viento ajustable. Se dice aquí que este tipo de generadores han tomado fuerza para aplicaciones de pequeña escala.

Además de las redes neuronales en la implementación de estrategias de control en los aerogeneradores, se utilizan otros métodos como en [39], donde se propone un MPPT basado en optimización por enjambre de partículas (PSO) con lógica difusa, para una turbina con generador síncrono de imanes permanentes. En [40], se ilustra la aplicación de lógica difusa en un sistema híbrido compuesto por aerogenerador y panel fotovoltaico, de tal forma que se reducen las oscilaciones de alta frecuencia en la energía extraída del viento. De otro lado, en [41] se presenta el diseño de un sistema de control para maximizar la extracción de energía de un aerogenerador de velocidad variable, a través de una estrategia en

tiempo discreto y modo deslizante que busca la estabilización del sistema.

A continuación, se presenta una revisión de las herramientas utilizadas en la simulación y evaluación de desempeño de los sistemas de conversión de energía del viento.

5. HERRAMIENTAS DE SIMULACIÓN PARA LOS SISTEMAS DE CONVERSIÓN DE ENERGÍA

Con respecto al modelamiento y simulación de los aerogeneradores se utilizan diferentes metodologías y herramientas para evaluar el funcionamiento y eficiencia de los aerogeneradores en las diferentes condiciones de operación. Para [20], es más práctico evaluar la eficiencia de un nuevo sistema de control a través de un software de simulación, que realizar la evaluación en el campo donde se desea instalar la turbina de viento. Precisamente este trabajo destaca el gran interés que se tiene en la actualidad en el diseño y evaluación de nuevos esquemas de control para la extracción de potencia bajo las diferentes condiciones de operación del sistema. Para [42] existen básicamente dos enfoques en simulación: el primero, a través de un software estructural que permita la construcción de cualquier topología, mediante la conexión de componentes desde las librerías, lo que hace que las funciones y las restricciones del sistema sean transparentes. El segundo enfoque, consiste en identificar previamente las funciones y restricciones de los componentes del sistema de potencia, antes de desarrollar la simulación del modelo. De esta manera, la construcción de una topología se hace a través de conexiones desde librerías de funciones, facilitando el diseño y la evaluación del sistema de control.

En la literatura se encuentran varias herramientas de simulación como Matlab/Simulink®, dSpace®, S4WT® [43], siendo las más comunes el PSIM de SimPower Systems® y el Matlab&Simulink®. En [7] se desarrolla un modelo en Matlab/Simulink para evaluar parámetros de diseño de una turbina tales como radio de las aspas, ángulo de incidencia del viento en las aspas y peso, entre otras. Todas estas simulaciones se realizan bajo los diferentes modos de operación del sistema. El software de simulación Matlab/Simulink, se utiliza también en [44] para la evaluación del modelo de un controlador adaptativo. En [15], se realiza una modelación completa de un aerogenerador de pequeña escala con generador síncrono de imanes permanentes con puente rectificador, mediante el software de simulación PSIM demostrando que el sistema es capaz de mantener un funcionamiento estable en condiciones dinámicas y estacionarias de la red al que está conectado. En [18] se describe la simulación y se analiza la respuesta del generador bajo diferentes modos de operación a través de Matlab/Simulink, en

turbinas de viento de eje vertical las cuales tienen la capacidad de capturar energía sin importar la dirección del viento. En [43] se utiliza el ambiente SimulationX® para evaluar el desempeño de un regulador de potencia PID controlando el ángulo de incidencia (en inglés, Pitch) en un aerogenerador de eje horizontal.

Un formalismo para el análisis del funcionamiento y el diseño en electrónica de potencia, máquinas eléctricas, control automático y mecánica viene siendo utilizado desde el año 2000 en centros de investigación y universidades de Francia, Canadá, Suiza, España, Finlandia, Austria y China [42], [45]. Este formalismo se conoce como Representación Energética Macroscópica EMR (en inglés, Energetic Macroscopic Representation). Se basa en el principio de acción y reacción que permite organizar el sistema de acuerdo con la causalidad integral. Para [46] la EMR es una poderosa herramienta gráfica para modelado y control de sistemas multifísicos tales como pilas de combustible, sistemas de conversión de energía del viento y vehículos eléctricos. Para [47] la EMR resalta las propiedades físicas de sistemas complejos basándose en la interacción física entre cada uno de los componentes.

6. RESULTADOS

Los mapas conceptuales que se presentan en las figuras 1, 2 y 3, corresponden a cada una de las partes de la revisión de la literatura sobre estrategias para extracción de máxima potencia en sistemas de conversión de energía eólica: clasificación de aerogeneradores, algoritmos para el seguimiento del punto de máxima potencia y herramientas de simulación disponibles.

7. CONCLUSIONES

En este artículo se hace una revisión de la literatura de los sistemas de conversión de energía eólica donde el objetivo primordial de todas las estrategias y métodos encontrados es extraer la mayor energía bajo diferentes condiciones de operación del sistema. Se resaltan las estrategias computacionales como tendencia general en la literatura consultada para lograr este objetivo, sin dejar de lado aspectos constructivos desde el punto de vista electromecánico. Respecto a las herramientas de software para simulación, son más populares aquellas que permiten construcciones topológicas del sistema mediante conexiones de componentes desde librerías, haciendo transparentes restricciones del sistema. Sin embargo, esto podría dificultar el diseño y la evaluación del control que quiera implementarse, puesto que no se estarían teniendo en cuenta todas las variables involucradas en el sistema.

8. RECOMENDACIONES

En la literatura revisada se destaca un gran número de trabajos investigativos aplicados a sistemas de conversión eólicos de mediana y gran escala de generación, la mayoría de los cuales son conectados a la red, pero, se nota un número de investigaciones mucho menor aplicadas a sistemas de pequeña escala de generación. Por tanto, es necesario extender las investigaciones a estos últimos, de tal forma que pueden convertirse en una buena opción de generación.

9. REFERENCIAS

- [1] B. K. Bose, «Global Energy Scenario and Impact of power Electronics in 21st Century,» *IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS*, pp. 2638 - 2651, 2013.
- [2] A. Schaffstvyk, *Introduction to Wind Turbine Aerodynamics*, Kiel, Alemania: Springer, 2014.
- [3] O. A.-R. H. F. Ellaban, «Renewable energy resources: Current status, future prospects and their enabling technology,» *Renewable and Sustainable Energy Review*, pp. 748-764, 2014.
- [4] C. Z. Z. Q. W. L. Q. Wei, «Intelligent, Maximum Power Extraction Control for Wind,» *IEEE*, pp. 4911- 4916, 2014.
- [5] R. Gao y Z. Gao, «Pitch control for wind turbine systems using optimization, estimation,» *Renewable Energy Elsevier*, pp. 501-515, 2016.
- [6] M. Hasan, *Wind energy systems solutions for power quality and stabilization*, New York: CRC Press, 2012.
- [7] N. C. S. Singh, «Behaviour of Wind Turbine under Different Operating Modes,» *IEEE*, 2014.
- [8] M. H. Ali, «Wind Energy Conversion Systems,» de *Wind Energy Systems Solutions for Power Quality and Stabilization*, Boca Raton, CRC Press Taylor & Francis Group, 2012, pp. 17-35.
- [9] M. Villarrubia, «Evolución de la Energía Eólica en el pasado y situación actual,» de *Ingeniería de la Energía Eólica Nuevas Energías*, Barcelona, Marcombo, 2012, p. 282.
- [10] M. Z. Y. Cheng, «The state of the art of wind energy conversion systems and technologies: A review,» *Energy Conversion and Management Elsevier*, pp. 332-347, 2014.
- [11] Y. O. M. M. Errami, «Control of Grid Connected PMSG Based Variable Speed Wind Energy Conversion System,» *International Review on Modelling and Simulations Vol. 5 N. 2*, pp. 655 - 664, 2012.
- [12] F. D. B. H. M. R. Inthamoussou, «LPV-based active power control of wind turbines covering the

- complete wind speed range,» *Renewable Energy Elsevier*, pp. 996 -1007, 2016.
- [13] M. N. A. B. M. Balavar, «Uninterrupted Operation of Grid Connected to Wind Turbine Using Energy Capacitor System Based DFIG,» *International Review on Modelling and Simulations*, pp. 761 - 770, 2012.
- [14] H. Fathabadi, «Maximum mechanical power extraction from wind turbines using novel proposed high accuracy single-sensor-based maximum power point tracking technique,» *Elsevier*, pp. 1219-1230, 2016.
- [15] Y. L. Y. H. Y. S. Wu, «Modelling and control of a small wind turbine by using PSIM,» *IEEE*, pp. 91-96, 2014.
- [16] D. D. G. C. B. A. Drumheller, «Design of a Micro-Wind Turbine for Implementation in Low Wind Speed Environments,» *IEEE*, pp. 125-130, 2015.
- [17] M. S. S. Alizadeh, «Augmenting effectiveness of control loops of a PMSG (permanent magnet synchronous generator) based wind energy conversion system by a virtually adaptive PI (proportional integral) controller,» *Elsevier*, pp. 610 - 629, 2015.
- [18] S. R. R. R. A. Adnan, «Performance analysis of 20 Pole 1.5 KW Three Phase Permanent Magnet Synchronous Generator for low Speed Vertical Axis Wind Turbine,» *Energy and Power Engineering*, pp. 423- 428, 2013.
- [19] A. H. M. Dahbi, «Control Wind Turbine Based on PMSG and Connected to the Grid,» *International Review of Automatic Control*, pp. 553-559, 2012.
- [20] J. M. M. K. Hussain, «Design and Development of Real-Time Small-Scale Wind Turbine Simulator,» *IEEE*, 2014.
- [21] A. M. H. A. A. M. M. Bakouri, «Optimizing the Wind Power Capture by Using DTC Technique Based on Artificial Neural Network for a DFIG Variable Speed Wind Turbine,» *IEEE*, 2015.
- [22] S. P. B. S. H. A. N. f. I. I. D. A. S. C. Z. N. V. M. M. G. A. Shamshirband, «Wind turbine power coefficient estimation by soft computing methodologies: Comparative study,» *Energy Conversion and Management Elsevier*, pp. 520-526, 2014.
- [23] R. R. T. B. R. Tiwari, «FUZZY LOGIC BASED MPPT FOR PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS GENERATOR IN WIND ENERGY CONVERSION SYSTEM,» de *International Federation of Automatic Control (IFAC)*, Vellore, India, 2016.
- [24] R. M. U. Sharma, «The concept of a smart wind turbine system,» *Renewable Energy Elsevier*, pp. 1- 8, 2012.
- [25] H. Chaoui, S. Miah, A. Oukaour y H. Gualous, «Maximum Power Point Tracking of Wind Turbines with Neural Networks and Genetic Algorithms,» *IEEE*, pp. 197- 201, 2014.
- [26] H. Fathabadi, «Maximum mechanical power extraction from wind turbines using novel proposed high accuracy single-sensor-based maximum power point tracking technique,» *Elsevier*, pp. 1219-1230, 2016.
- [27] M. G. T. G. G. E. P. P. Mirzaei, «Turbine Control Strategies for Wind Farm Power Optimization,» de *American Control Conference*, Chicago, USA, 2015.
- [28] Y. A. K. W. B. Xia, «Wind Turbine Power Coefficient Analysis of a New Maximum Power Tracking Technique,» *IEEE*, p. 1122, 2013.
- [29] J. C. S. C. O. O. R. Frutos, «Estudio Comparativo de algoritmos de búsqueda del punto de máxima potencia en sistemas de generación eólica,» Escuela Superior de Cómputo, Instituto Politécnico Nacional(ESCOM), Colima, Colima, México, 2012.
- [30] Y. G. J. R. L. Daili, «Implementation of a new maximum power point tracking control strategy for small wind energy conversion systems without mechanical sensors,» *Energy Conversion Manager Elsevier*, pp. 298-306, 2015.
- [31] Z. C. C. J. K. Wang, «Neural Network Adaptive Control for Constant Output Power of Variable Pitch Wind Turbine,» *IEEE*, pp. 165-170, 2013.
- [32] R. Ata, «Artificial neural networks applications in wind energy systems:areview,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, pp. 534-562, 2015.
- [33] H. P. J. E. J. Jafarnejadsani, «Adaptive Control of a Variable-Speed Variable-Pitch Wind Turbine Using RBF Neural Network,» *IEEE*, pp. 216-222, 2012.
- [34] H. S. P. Chaoui, «Sensorless ANN-Based Control for Permanent Magnet Synchronous Machine Drives,» *IEEE*, pp. 3114-3119, 2013.
- [35] M. T. C. H. Y. Tsai, «A Novel MPPT Control Design for Wind-Turbine Generation Systems Using Neural Network Compensator,» *IEEE*, pp. 3521-3526, 2012.
- [36] C. C. P. L. P.-H. C. S. Y. Lee, «Maximum power point tracking (MPPT) system of small wind power generator using RBFNN approach,» *Expert Systems with Applications*, pp. 12058-12065, 2011.

- [37] F. I. L. C. D. L. D. Scherillo, «Fuzzy Logic Control for a Small Pitch Controlled Wind Turbine,» *IEEE*, pp. 588-593, 2012.
- [38] M. P. G. J. M. L. P. M. S. Narayana, «Generic maximum power point tracking controller for small-scale wind turbines,» *Renewable Energy Elsevier*, pp. 72-79, 2012.
- [39] M. A. S. A. S. Sarvi, «A New Method for Rapid Maximum Power Point,» *Technical Journal of Engineering and Applied Sciences Tracking of PMSG Wind Generator using PSO_Fuzzy Logic*, pp. 1984-1995, 2013.
- [40] C. K. R. B. Bhattacharjee, «Advanced fuzzy power extraction control of wind energy conversion system for power quality improvement in a grid tied hybrid generation system,» *IET*, pp. 1179-1189, 2015.
- [41] B. S. A. G. G. Torchani, «Variable speed wind turbine control by discrete-time sliding mode approach,» *ISA transactions Elsevier*, pp. 81 - 86, 2016.
- [42] P. D. X. G. W. L. B. Bouscayrol, «Simulation of a Wind Energy Conversion System Using Energetic Macroscopic Representation,» de *15th International Power Electronics and Motion Control Conference*, Novi Sad, Serbia, 2012.
- [43] K. K. M. Konara, «Pitch Controller Modeling for Wind Turbine Power Regulation using Feed Forward Control Strategies,» *IEEE*, 2015.
- [44] E. H. K. P. O. Baygildina, «Wind Turbine Adaptive Controller Modeling,» *IEEE*, 2012.
- [45] K. H. D. P. M. D. I. Agbli, «Energetic Macroscopic Representation (EMR): New approach for multiphysics energetic flows modelling,» de *8th Power Plant and Power System Control Symposium*, Belfort, Francia, 2012.
- [46] N. N. D. V.-D. T. C. T. M. Bao-Huy, «An EMR of Tire-Road Interaction based-on “Magic Formula” for Modeling of Electric Vehicles,» *IEEE*, 2015.
- [47] C. D. P. B. A. C. E. V. N. Mayet, «Comparison of Different EMR-Based Models of Traction Power Substations for Energetic Studies of Subway Lines,» *IEEE*, pp. 1021-1029, 2016.

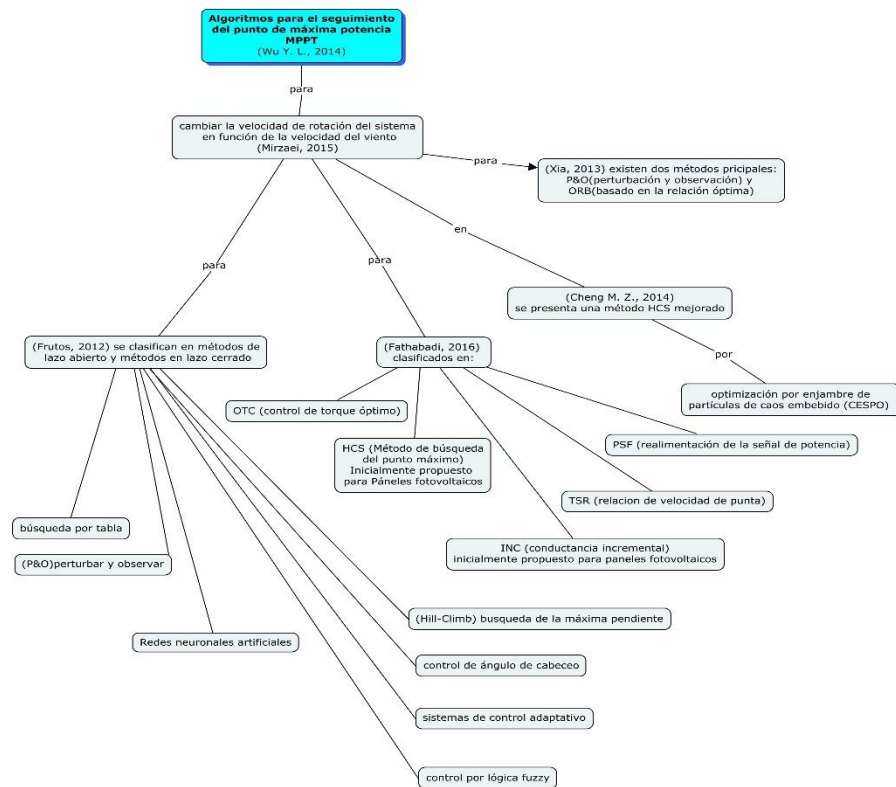


Figura 2. Algoritmos para seguimiento del punto de máxima potencia. Fuente. Elaboración propia

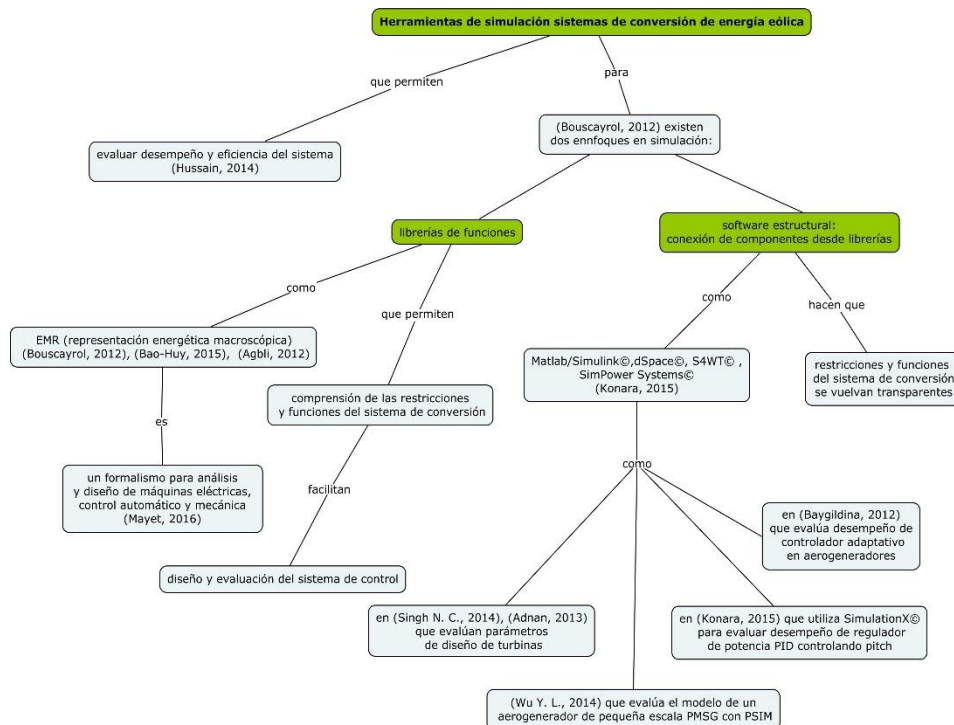


Figura 3. Herramientas de simulación. Fuente. Elaboración propia