

Mejoramiento de la calidad de la potencia activa de un parque eólico empleando sistemas almacenadores de energía

CARLOS DAVID ZULUAGA RÍOS¹

ANDRÉS DAVID PINTO RÍOS²

ALEJANDRO GARCÉS RUIZ³

RESUMEN

Dentro de las energías renovables, la eólica se ha convertido en la fuente de mayor participación en el ámbito mundial. Uno de los inconvenientes que presenta esta energía limpia son las fluctuaciones en los flujos de potencia en las salidas de los centros de generación eólica, debido a la naturaleza estocástica del viento, lo cual causa impactos negativos que afectan la confiabilidad de los sistemas de potencia. Una manera de mitigar estas fluctuaciones es usar sistemas almacenadores de energía (ESS) basados en *flywheel*. Dentro de los elementos de operación de los ESS existen módulos de control que se encargan de regular la potencia activa entregada por los parques eólicos: son los estabilizadores de potencia activa. Este estudio presenta tres tipos de estabilizadores: uno basado en la potencia promedio entregada por estos centros de generación y en la energía del ESS; otro que funciona mediante una potencia de referencia y la energía del ESS; por último, un enfoque que utiliza una potencia de referencia y un controlador proporcional-integral (PI) para calcular la energía del ESS. Una vez obtenida esta energía, se procede a determinar la velocidad de giro del ESS. Para analizar el desempeño de los estabilizadores de potencia, se calculó la potencia promedio y la desviación estándar de la potencia entregada al sistema de potencia.

Palabras clave: controladores PI, estabilizadores de potencia, parque eólico, sistemas almacenadores de energía, sistemas de potencia.

¹ Estudiante de Doctorado en Ingeniería, magíster en Ingeniería Eléctrica e ingeniero electricista por la Universidad Tecnológica de Pereira, Pereira, Colombia. Correo electrónico: cardazu@utp.edu.co

² Candidato a magíster en Ingeniería Eléctrica e ingeniero electricista por la Universidad Tecnológica de Pereira, Pereira, Colombia. Correo electrónico: adpinto@utp.edu.co

³ Doctor en Ingeniería por la Universidad Noruega de Ciencia y Tecnología, Trondheim, Noruega; magíster en Ingeniería Eléctrica e ingeniero electricista por la Universidad Tecnológica de Pereira, Pereira, Colombia. Profesor de Ingeniería Eléctrica Universidad Tecnológica de Pereira. Correo electrónico: alejandrogarcés@utp.edu.co

FECHA DE RECEPCIÓN: 29 JUNIO DEL 2014 • FECHA DE APROBACIÓN: 26 DE NOVIEMBRE DEL 2014

Cómo citar este artículo: Zuluaga Ríos, C. D., Pinto Ríos, A. D. y Garcés Ruiz, A. (2015). Mejoramiento de la calidad de la potencia activa de un parque eólico empleando sistemas almacenadores de energía. *Épsilon*, 24, 11-30.

Improving the Active Power Quality of a Wind Farm Using Energy Storage Systems

ABSTRACT

Among renewables, wind power has become the source of greater participation at global level. One of the disadvantages of this clean energy are the fluctuations in power flows at the wind generation center outputs, due to the stochastic nature of the wind, which causes negative impacts that affect the reliability of power systems. One way to mitigate these fluctuations is to use flywheel energy storage systems (ESS). In the operating elements of ESS there are control modules responsible for regulating the active power delivered by wind farms, that is, the active power stabilizers. This study presents three types of stabilizers: the first one is based on the average power delivered by these generation centers and on the ESS power; the second one works through a reference power and the ESS power, and the third one uses a reference power and a proportional-integral (PI) controller to calculate the ESS power. After this energy is obtained, the rotational speed of the ESS is determined. In order to analyze the performance of power stabilizers, the average power and the standard deviation of the power delivered to the power system is calculated.

Keywords: PI controllers, power stabilizers, wind farms, energy storage systems, power systems.

Melhoramento da qualidade da potência ativa de um parque eólico empregando sistemas armazenadores de energia

RESUMO

Dentro das energias renováveis, a energia eólica tem se tornado a fonte de maior participação no âmbito mundial. Um dos inconvenientes que esta energia limpa apresenta são as flutuações nos fluxos de potência nas saídas dos centros de geração eólica, devido à natureza estocástica do vento, o que causa impactos negativos que afetam a confiabilidade dos sistemas de potência. Uma maneira de mitigar estas flutuações é usar sistemas armazenadores de energia (ESS) baseados em *flywheel*. Dentro dos elementos de operação dos ESS existem módulos de controle que se encarregam de regular a potência ativa entregue pelos parques eólicos; são os estabilizadores de potência ativa. Este estudo apresenta três tipos de estabilizadores: um baseado na potência média entregue por estes centros de geração e na energia do ESS; outro que funciona mediante uma potência de referência e a energia do ESS, e um enfoque que utiliza uma potência de referência e um controlador proporcional-integral (PI) para calcular a energia do ESS. Depois de que se obtenha esta energia, se procede a determinar a velocidade de giro do ESS. Para analisar o desempenho dos estabilizadores de potência, se calculou a potência média e o desvio padrão da potência entregue ao sistema de potência.

Palavras chave: controladores PI, estabilizadores de potência, parque eólico, sistemas armazenadores de energia, sistemas de potência.

Introducción

La energía eléctrica es una componente clave para el desarrollo de cualquier país. Esta energía comprende muchos otros elementos importantes para transportarla desde los centros de generación hasta los de consumo. Los centros de generación existentes transforman una energía primaria en energía eléctrica. En la actualidad, en las fuentes de energía primarias convencionales hay recursos que aún dependen de combustibles fósiles, los cuales hacen mucho daño al medioambiente. Este es el caso, por ejemplo, de la energía térmica, que emite gases tóxicos que contaminan en grandes cantidades la capa de ozono. Otros tipos de fuentes de energías primarias son las energías renovables, las cuales se han incorporado a los sistemas de potencia de manera considerable.

En este contexto, una de las energías limpias con alta penetración es la eólica. Su introducción en los sistemas de potencia ha implicado analizar y estudiar con mayor intensidad las etapas de control y operación de estos sistemas (Georgilakis, 2008), ya que esta energía es de naturaleza estocástica, debido a la variabilidad del viento. Este comportamiento estocástico del viento hace que se presenten fluctuaciones en los flujos de potencia, lo cual causa diferentes impactos que pueden afectar la operación y el análisis de los sistemas de potencia (Suvire *et al.*, 2012).

Con el fin de compensar estas fluctuaciones de potencia, una posible solución es el uso de sistemas almacenadores de energía (ESS, por sus siglas en inglés). En la actualidad existen muchos trabajos que aplican este tipo de sistemas a los sistemas de potencia. Por ejemplo, Suvire *et al.* (2012) han usado una *flywheel* como sistema de almacenamiento de energía, para mitigar los problemas introducidos por la generación eólica en las microrredes. Qu y Qiao (2011) plantean un supercondensador que ha sido usado con un generador doblemente alimentado, para suavizar las variaciones de la potencia generada a través del viento.

Por su parte, Cimuca *et al.* (2010) usan un superconductor magnético para la estabilización y el control del flujo de potencia en microrredes, en el cual se incorpora la generación eólica. Zeng *et al.* (2006) presentan el uso de baterías como ESS para mitigar el efecto de las variaciones de potencia en sistemas con generación eólica. En el mismo año, Cimuca *et al.* (2006) usaron una *flywheel* conectada a un generador eólico a través de un convertidor, con el fin de evaluar la capacidad para participar en servicios secundarios.

Todos estos trabajos muestran la importancia de los ESS para mitigar problemas introducidos por los centros de generación eólica; sin embargo, muy pocos estudios proponen metodologías para la estabilización del flujo de potencia activa. Suvire *et al.* (2012) proponen un estabilizador basado en lógica difusa, específicamente un sistema de inferencia difusa, con el objetivo de controlar la potencia activa de la *flywheel* para seguir las fluctuaciones de la potencia entregada por los generadores eólicos. Estos sistemas difusos son una herramienta adecuada para realizar el control de sistemas, pero tal enfoque se basa en principios o reglas para realizar el control, lo que conlleva una etapa de entrenamiento que incorpora más tiempo de procesamiento a la etapa de control.

Por otro lado, Greigarn y García-Sanz (2011) proponen un sistema de control para regular la potencia de salida del parque eólico en presencia de generadores eólicos de velocidad variable. Para ello usan una *flywheel*, en tanto como estabilizador de potencia emplean un controlador proporcional-integral (PI) y un filtro de primer orden con el fin de reducir las fluctuaciones de potencia.

En este trabajo se muestra el uso de estabilizadores de potencia activa, con el fin de atenuar o mitigar las fluctuaciones debido al comportamiento de las potencias generadas en los parques o las turbinas eólicas. Así, se analizan tres enfoques de estabilizadores: el primero de ellos se basa en la potencia promedio del parque eólico y la energía del ESS; el otro usa una potencia de referencia y la energía del ESS; el último de ellos constituye un enfoque en el que se utiliza una potencia de referencia y un controlador PI para calcular la energía del ESS. Luego, con la ayuda de esta energía, se obtiene la velocidad de referencia a la cual girará el ESS. Por medio de la desviación estándar se muestra el desempeño de los enfoques propuestos.

Este artículo está organizado así: en la sección primera se exponen diferentes sistemas almacenadores de energía que existen en la literatura especializada; se habla de manera básica de los elementos que lo componen cuando se tiene una aplicación en los sistemas de potencia, e igualmente se mencionan los estabilizadores de potencia activa y el sistema de control de la velocidad de giro. Seguidamente, se muestra el sistema de estudio, se mencionan las características del ESS y del parque eólico y se describen un poco los datos de la velocidad del viento que fueron utilizados. Posteriormente, se muestran los resultados y se realiza una discusión de estos frente a la mitigación de las fluctuaciones de potencia activa a causa de la naturaleza estocástica del viento. Finalmente, se exponen las conclusiones del estudio propuesto.

Sistema de almacenamiento de energía basado en *flywheel*

Dentro de los ESS más empleados se tienen, hasta el momento, las baterías, los supercapacitores, los superconductores, los almacenadores a base de bombas hidráulicas y las *flywheel*. Las baterías han sido la forma más reconocida y popular de almacenamiento de energía. Su uso tradicional se debe al bajo costo y a su alta eficiencia relativa; sin embargo, su vida útil es baja y el rendimiento en altas temperaturas es pobre (Chen *et al.*, 2009). Otra forma de almacenar energía es por medio de los supercapacitores, que pueden ofrecer un tiempo de carga mucho menor comparados con las baterías, aunque presentan una alta eficiencia. El mayor problema de estos elementos es la corta duración y la alta energía disipada (Chen *et al.*, 2009).

Otros sistemas de almacenamiento de energía son los basados en bombas hidráulicas, las cuales son una tecnología de diseño simple, bajo costo y de operación similar a las centrales hidroeléctricas; sin embargo, estas tecnologías requieren de ubicaciones específicas para su funcionamiento (Chen *et al.*, 2009). Por último, las *flywheels* se basan en la energía cinética para almacenar energía; su objetivo es hacer girar inercias de gran tamaño a altas velocidades. En la actualidad existen mecanismos de control para obtener *flywheels* con eficiencias altas para un tiempo de almacenamiento corto, pero una de las desventajas de estas tecnologías es su alto costo inicial y las pérdidas rotacionales (Chen *et al.*, 2009).

Los anteriores ESS poseen grandes cualidades en el momento de conservar energía y no poseen una operacional ideal. Todos presentan desventajas ya sea en su diseño constructivo, en su rendimiento o inclusive en su operación. Para este trabajo se empleó como elemento almacenador de energía la *flywheel*, ya que en la actualidad su utilización se ha incrementado, puede ser más eficiente, no tiene impactos ambientales y el tiempo de carga en el almacenamiento de energía puede ser mayor en comparación con las otras tecnologías. Además, se han empleado en sistemas espaciales, medios de transporte, sistemas industriales y sistemas de potencia (Alzola *et al.*, 2011; Sebastián y Alzola, 2012).

Modelado del sistema de almacenamiento de energía

Como se mencionó, las *flywheels* se basan en el movimiento de una inercia de gran tamaño [1] y a gran velocidad, que por medio de la energía cinética almacenan energía [2]:

$$J \frac{\partial w}{\partial t} = T_E \quad [1]$$

$$E = \frac{1}{2} J w^2 \quad [2]$$

Donde E es la energía cinética almacenada en la *flywheel*, J es el momento de inercia, w es la velocidad angular de la *flywheel* y T_E es el torque eléctrico de la máquina. Esta masa rotacional (J) depende de la forma y composición estructural del almacenador de energía (Boulund *et al.*, 2007; Sebastián y Alzola, 2012).

La representación de un sistema de almacenamiento de energía de este tipo puede consistir en una *flywheel*, una máquina síncrona y un convertidor que tiene como finalidad realizar el acoplamiento entre el sistema de máquinas y la red eléctrica (figura 1). Esta máquina debe trabajar como motor cuando la potencia de la *flywheel* (P_{fly}) sea menor que 0 ($P_{fly} < 0$); o como generador cuando P_{fly} sea mayor a cero ($P_{fly} > 0$) (Veszpremi y Schmidt, 2007). A partir de esto puede afirmarse que una desaceleración de la *flywheel* corresponde a tener un estado de descarga de energía; en caso contrario, a medida que la *flywheel* incrementa su velocidad, puede presentarse un estado de carga de energía (Veszpremi y Schmidt, 2007). Una de las máquinas más comunes en las aplicaciones de los ESS son las síncronas de imanes permanentes (PMSM) (Díaz-González *et al.*, 2012).

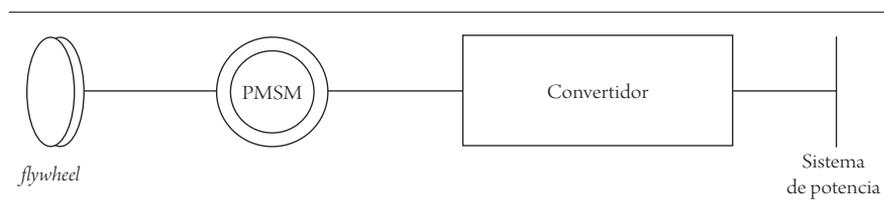


Figura 1. Sistema de funcionamiento de la *flywheel*

Nota: una PMSM es una máquina síncrona de imanes permanentes. El sistema de potencia representa un equivalente de toda la red en el punto de conexión a la *flywheel*.

Fuente: elaboración propia.

Con el fin de obtener un diseño experimental de una *flywheel*, se puede empezar asumiendo el comportamiento del ESS por un periodo, es decir, se puede suponer que una *flywheel* trabaje, como se observa en la figura 2.

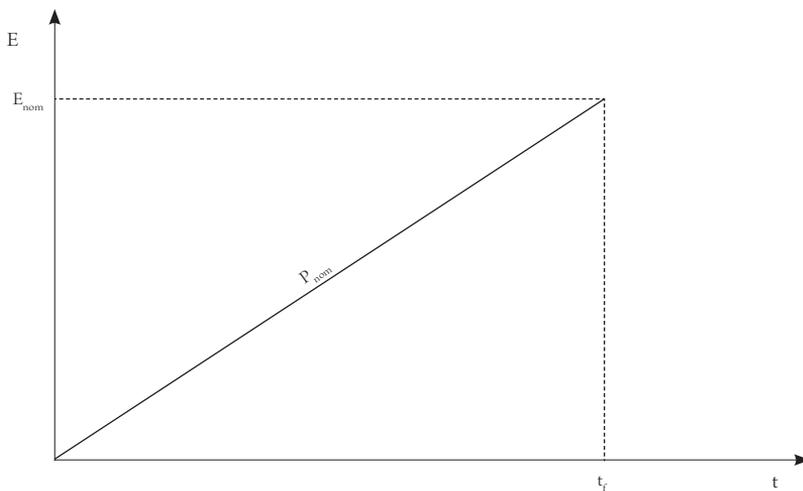


Figura 2. Comportamiento inicial de la *flywheel*

Fuente: elaboración propia.

De la figura 2 y de la ecuación [2] se puede definir [3]:

$$E_{nom} = P_{nom} t_f = \frac{1}{2} J w_{nom}^2 \quad [3]$$

Si se conoce la velocidad nominal de la *flywheel* (w_{nom}) y la potencia de esta, se puede llegar a conocer de manera experimental el momento de inercia necesario para esta operación; sin embargo, cabe resaltar que el diseño de estos almacenadores de energía contemplan muchas variables que no se pueden obviar.⁴

Sistemas de control de potencia activa

El ESS, como se mostró en la figura 1, debe incorporar convertidores bidireccionales para conectar el sistema de almacenamiento a la red de potencia. El esquema mostrado en esta figura de conexión debe contener tres tipos de controles: a) el control del convertidor del lado de la red o el sistema de potencia, b) el control del lado de la máquina y c) un control de nivel externo. El primer control se encarga de

4 Para tener en detalle el diseño de una *flywheel*, confróntese el trabajo de Bolund *et al.* (2007).

regular la potencia activa suministrada hacia o desde la red; por lo general se lleva a cabo utilizando controladores PI (Suvire y Mercado, 2009; Suvire *et al.*, 2012).

El segundo sistema de control tiene como finalidad regular el voltaje DC del convertidor y gobernar la potencia reactiva inyectada hacia o desde la red (Díaz-González *et al.*, 2007; Suvire *et al.*, 2012). Finalmente, se tiene un control de nivel externo, el cual contiene un control de tensión, un control de frecuencia y un estabilizador de potencia activa (Suvire *et al.*, 2012). Este último elemento es el que se encarga de calcular la velocidad de referencia de la *flywheel*, con el fin de mejorar el perfil de potencia activa; por lo tanto, se asumirá que los otros elementos distintos al estabilizador de potencia activa trabajan de manera adecuada.

Estabilizador 1

Uno de los objetivos del estabilizador de potencia es calcular la velocidad angular de referencia (w_{ref}) a la cual girará la *flywheel*. Teniendo w_{ref} , y por medio del control de nivel externo del sistema de almacenamiento, la *flywheel* girará a la velocidad de referencia (Suvire y Mercado, 2009). Una manera de calcular w_{ref} es considerando la potencia promedio de la potencia suministrada por el parque eólico (Díaz-González *et al.*, 2007). Un diagrama de bloques para determinar la velocidad de referencia es mostrada en la figura 3.

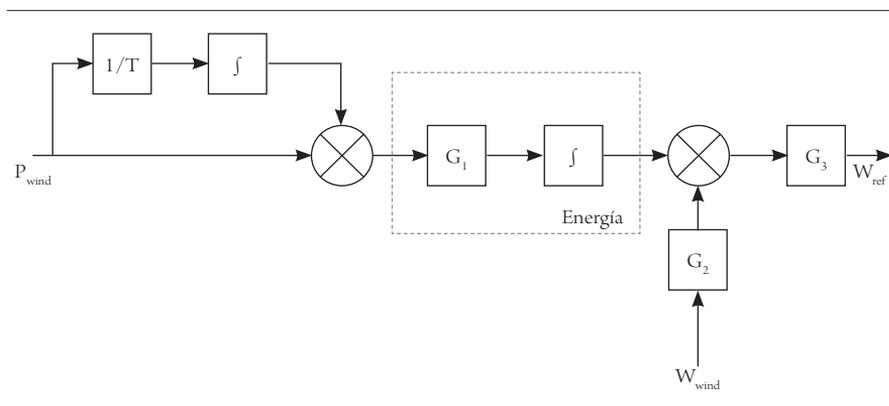


Figura 3. Diagrama de bloques para el estabilizador 1

Nota: G_1 , G_2 y G_3 son constantes de proporcionalidad, con el fin de pasar las variables de energía a velocidad.

Fuente: elaboración propia.

Estabilizador 2

Una propuesta para calcular la velocidad de giro de la *flywheel* consiste en determinar experimentalmente la diferencia de una potencia de referencia y la potencia del parque eólico; luego se obtiene la energía a partir de esta diferencia y finalmente, la velocidad de referencia, como se muestra en la figura 4.

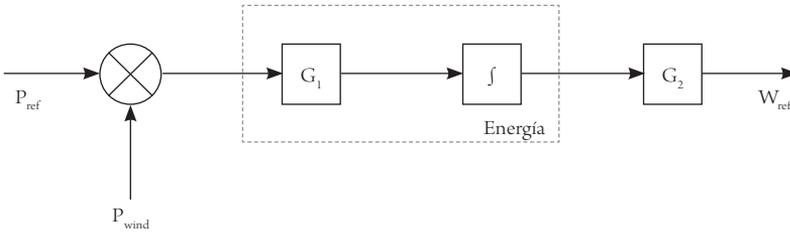


Figura 4. Diagrama de bloques para el estabilizador 2

Nota: G_1 y G_2 son constantes que ayudan a obtener la velocidad de referencia de la *flywheel*.

Fuente: elaboración propia.

Estabilizador 3

Otro método propuesto para calcular la velocidad de referencias es por medio de un controlador PI como elemento de cálculo de la energía, como se muestra en la figura 5.

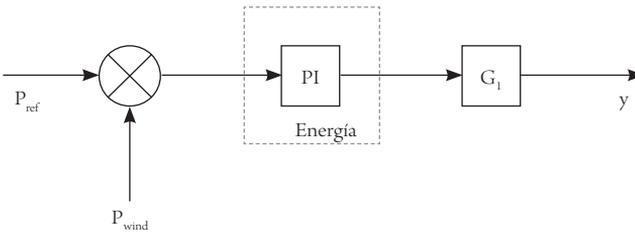


Figura 5. Diagrama de bloques para el estabilizador 3

Nota: $G1$ es una constante de proporcionalidad para calcular esta velocidad de giro. Las constantes del controlador PI fueron asumidas con valores de $k_p = 0,3$ y $k_i = 0,8$.

Fuente: elaboración propia.

Control de velocidad de giro

Luego de obtener la velocidad de referencia de giro de la *flywheel*, es necesario tener un mecanismo de control con el objetivo de que la velocidad real de rotación del elemento almacenador de energía sea similar a la velocidad de referencia. Para este caso se utilizó un controlador PI, como se muestra en la figura 6.

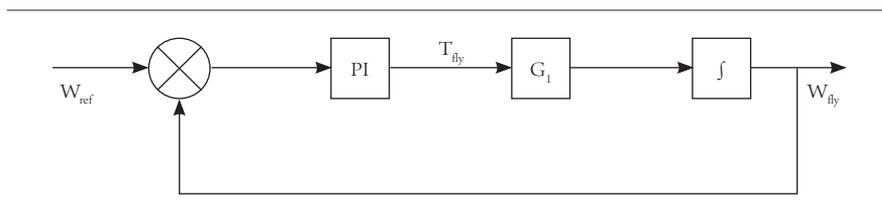


Figura 6. Diagrama de bloques del controlador para la velocidad de la *flywheel*

Nota: las constantes del controlador PI fueron $k_p = 10000$ y $k_i = 1$. T_{fly} es el torque de la *flywheel*.

Fuente: elaboración propia.

La potencia de la *flywheel* P_{fly} puede calcularse en función del torque y de la velocidad de la máquina (w_{fly}); por lo tanto, la potencia resultante de la red al considerar este dispositivo almacenador de energía se representa en la ecuación [4]:

$$P_{red} = P_{wind} + P_{fly} \quad [4]$$

Donde G_1 es una constante de proporcionalidad que ayuda a obtener la velocidad de la *flywheel*. Es posible ver esta constante y el integrador como una planta representada por la ecuación [1].

Sistema en estudio

En este estudio se analizó el perfil de potencia activa suministrada por un parque eólico de 5 MW, como se muestra en la figura 7. El sistema comprende un parque eólico, representado por una turbina eólica que es conectada a través de una PMSM, y un convertidor bidireccional que se une al sistema de potencia o red. Además, contiene una *flywheel* de 500 kW conectada igualmente por una PMSM y un convertidor bidireccional a la red. La velocidad del viento fue simulada por medio de un modelo desarrollado por el Laboratorio Nacional de Energía Sostenible de la Universidad Técnica de Dinamarca (RISO-DTU) (Sørensen *et al.*, 2002).

El modelo calcula la velocidad del viento como un valor promedio ponderado de los valores de esta variable en diferentes puntos, en los alabes de varias turbinas eólicas. Este modelo tiene en cuenta la turbulencia del medio y la altura de las turbinas.

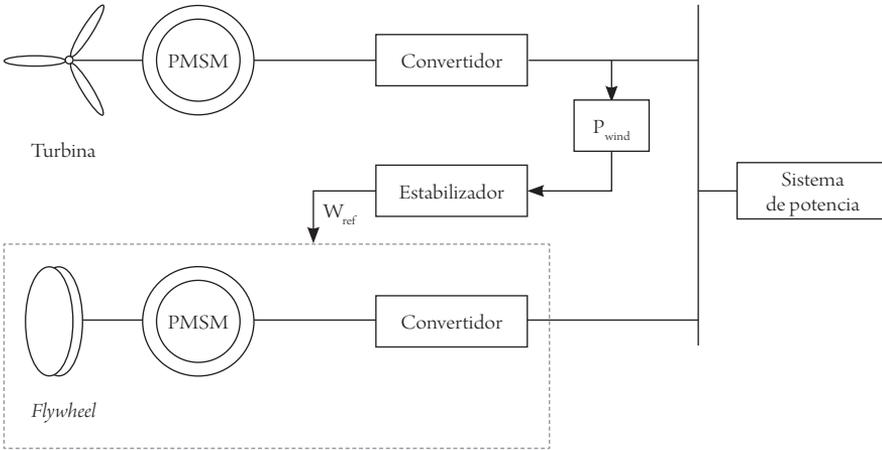


Figura 7. Sistema de prueba

Nota: PMSM es una máquina síncrona de imanes permanentes. El sistema de potencia representa un equivalente de toda la red en el punto de conexión a la *flywheel*.

Fuente: elaboración propia.

Para este estudio se simuló tener turbinas con un diámetro del rotor de 15 m, una velocidad promedio de 12 m/s, un nivel de turbulencia del 4 % y un tiempo de muestreo de 0,1 s (Sørensen *et al.*, 2002). Este modelo entrega la velocidad del viento en el parque, lo que lleva a obtener la potencia activa suministrada por el parque eólico a la red. En la figura 8 se observa que la potencia producida por el sistema eólico varía con el tiempo.

Con el fin de medir el mejoramiento de la calidad de la potencia activa entregada a la red, se calculó la desviación estándar de la potencia activa al considerar el ESS. Esta desviación proporciona una medida de cuánta variabilidad o dispersión hay en un conjunto de datos alrededor de su media. La media y la desviación estándar se pueden calcular así:

$$\mu = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N x_n \quad [5]$$

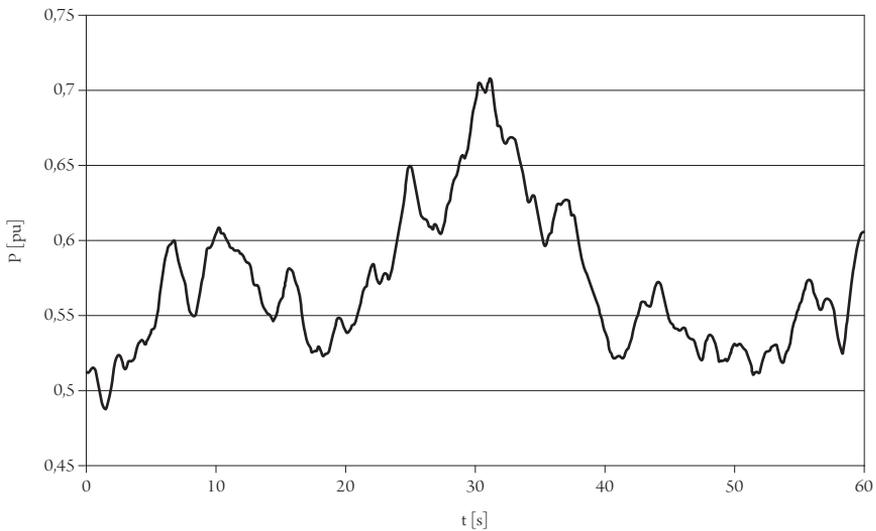


Figura 8. Potencia activa entregada por el parque eólico a la red

Nota: la potencia de referencia para los estabilizadores 2 y 3 fue establecida en 0,599 pu.

Fuente: elaboración propia.

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (x_n - \mu)^2} \quad [6]$$

Donde μ es la media del conjunto de datos, σ es la desviación estándar de los datos y N es el número total de datos.

Resultados y discusión

A partir de los estabilizadores mostrados en las figuras 3, 4 y 5, la idea es entregar un perfil de potencia lo más plano posible, ya que si se observa la potencia entregada por el parque eólico (figura 8), esta presenta oscilaciones. Para este estudio se consideró una *flywheel* de 500 kW que presenta un momento de inercia de valor $J = 2465 \text{ kgm}^2$. Para el mejoramiento del perfil de potencia activa solo se analizó un periodo de 60 s. En la figura 9 se muestra el perfil de potencia activa para el sistema de la figura 7, considerando el estabilizador 1. De esta figura puede observarse que existen valores de potencia entre 5 y 7 pu, son cantidades altas para tener valores en por unidad. Esto se debe a que el parque eólico tiene una potencia base

diferente al ESS; sin embargo, el fenómeno físico se puede analizar teniendo en cuenta esta diferencia.

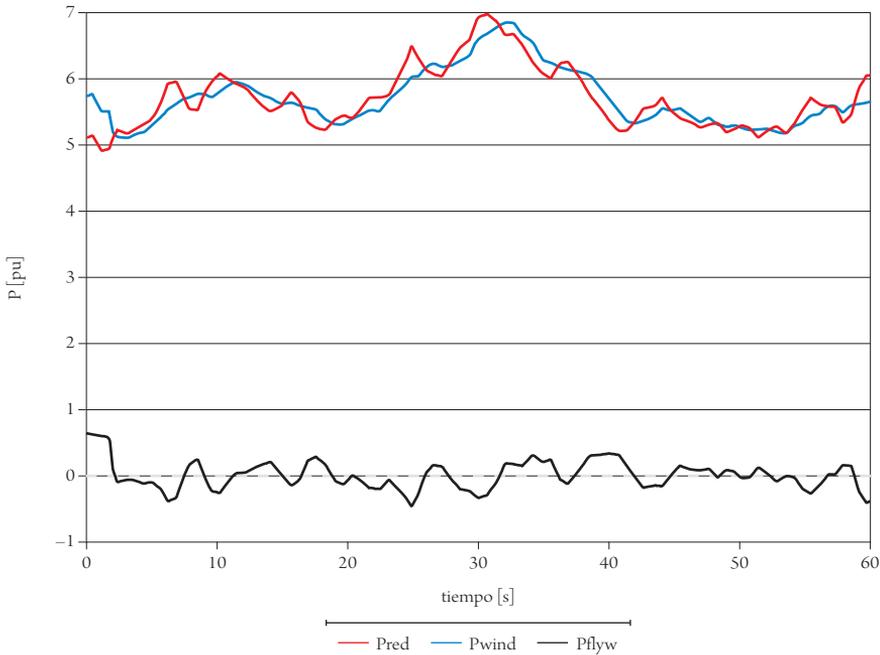


Figura 9. Perfil de potencia cuando se tiene el parque eólico, la *flywheel* y el estabilizador 1 como elemento regulador de la potencia activa

Nota: la línea roja representa la potencia entregada a la red, la línea azul es la potencia del parque eólico y la línea negra es la potencia de la *flywheel*.

Fuente: elaboración propia.

De la figura 9 se puede observar que el estabilizador basado en la potencia promedio del parque eólico hace que la potencia entregada a la red (línea roja) tenga menos oscilaciones que la suministrada por el parque sin la presencia del elemento almacenador de energía (línea azul). La línea negra expresa el comportamiento de la potencia de la *flywheel* (P_{fly}) ante las variaciones de la potencia del parque eólico. Se puede analizar de P_{fly} cuando se hace menor que 0 ($P_{fly} < 0$), que la *flywheel* se carga y actúa como motor. Ahora bien, cuando P_{fly} se hace mayor a 0 ($P_{fly} > 0$), la *flywheel* entrega la energía almacenada y se considera como un generador (Veszpremi y Schmidt, 2007). El estabilizador de la figura 3 logra obtener una potencia promedio entregada a la red de $\mu_{e1} = 5,7540 pu$ y un valor de dispersión de $\sigma_{e1} = 0,4467 pu$.

Por otro lado, la figura 10 muestra las potencias de la red, del parque eólico y de la *flywheel* utilizando el estabilizador 2. Esta figura también muestra un perfil de potencia entregada a la red considerando la *flywheel* (línea roja), que es más plana o más constante que la presentada en la figura 9 usando el estabilizador 1. Esto se debe a la potencia de referencia del estabilizador, que es constante y de valor adecuado, lo cual hace que la *flywheel* almacene más energía (línea negra) en comparación con el perfil de la *flywheel* al utilizar el estabilizador 1.

A partir de la figura 10 también se puede ver más claramente el comportamiento de P_{fy} , ya que existen periodos más prolongados de carga y de descarga, lo cual deriva en que el perfil entregado a la red sea mucho más plano. Al utilizar el estabilizador 2, se puede obtener una potencia promedio de $\mu_{e_2} = 5,9814 pu$ y un valor de dispersión de $\sigma_{e_2} = 0,1277 pu$.

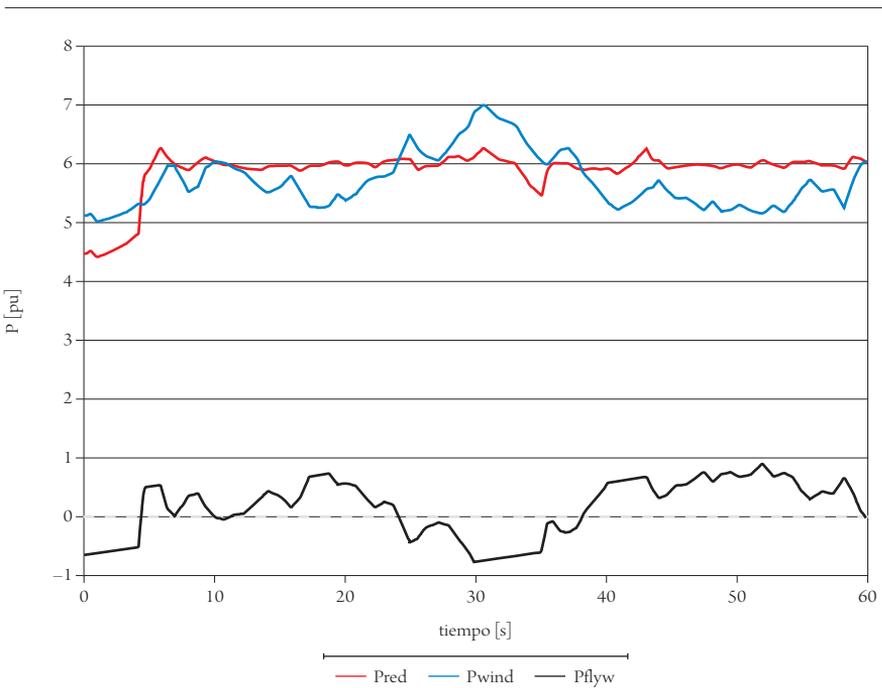


Figura 10. Perfil de potencias a partir del estabilizador de la figura 4

Nota: la línea roja ilustra el comportamiento de la potencia entregada a la red, la línea azul es la potencia del parque eólico sin considerar la *flywheel* y la línea negra es la potencia de la máquina.

Fuente: elaboración propia.

Por último, en la figura 11 se observan las potencias de la red, del parque eólico y la de la *flywheel* al utilizar el estabilizador 3 basado en un controlador PI.

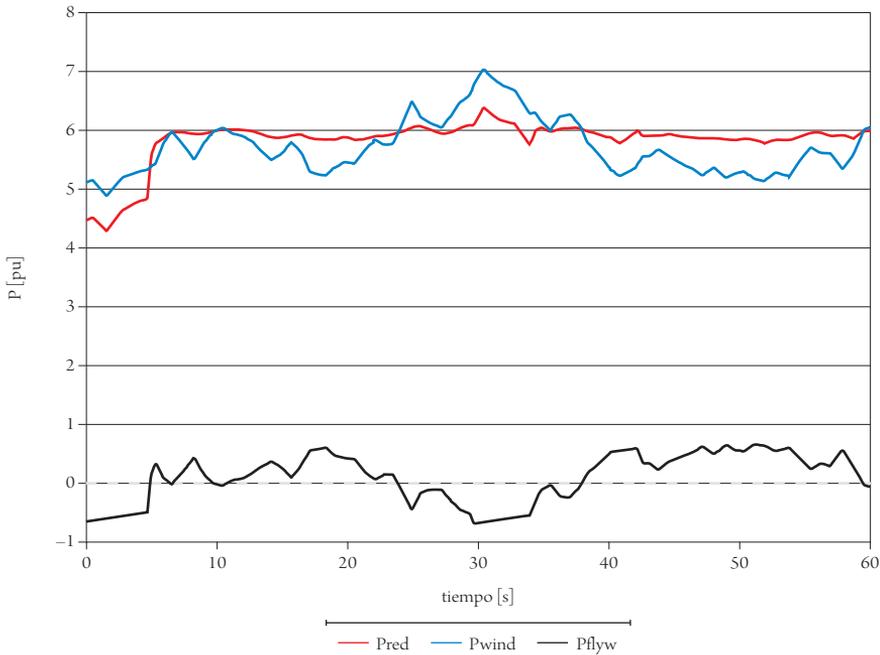


Figura 11. Potencias de la red, el parque eólico y la *flywheel* utilizando el estabilizador basado en un controlador PI.

Nota: la línea roja representa la potencia de la red, la línea azul muestra la potencia del parque eólico y la línea negra indica la potencia del estabilizador basado en un controlador PI.

Fuente: elaboración propia.

Esta red, que es muy similar a la presentada en la figura 10, usa el estabilizador 2. Sin embargo, lo que difiere entre estos dos esquemas es la utilización de un controlador PI para obtener la energía de la *flywheel*, que puede ser visto además como un filtro (Ogata, 2010). Esto ayuda a la estabilización de la señal de potencia; en cambio, el estabilizador 2 posee solo una constante y el integrador para obtener la energía. La potencia promedio y la dispersión de la potencia entregada a la red usando el estabilizador 3 es $\mu_{e3} = 5,9475 pu$ y $\sigma_{e3} = 0,1095 pu$. Estos valores de potencia promedio y dispersión se pueden ver, para los tres casos, en la tabla 1, donde el estabilizador 3, basado en un controlador PI, obtiene la menor variabilidad de los tres diferentes estabilizadores presentados.

Tabla 1. Potencia promedio y desviación estándar (dispersión) de la potencia entregada a la red

MÉTODO	$\mu \pm \sigma$ [pu]
Estabilizador 1	5,7540 \pm 0,4467
Estabilizador 2	5,9814 \pm 0,1277
Estabilizador 3	5,9475 \pm 0,1095

Nota: μ es el valor medio de la señal de potencia en pu, y σ es el valor de la dispersión alrededor de μ .

Fuente: elaboración propia.

En las figuras 12, 13 y 14 se muestra la velocidad de giro de la *flywheel* durante el proceso del mejoramiento del perfil de potencia activa, al usar los estabilizadores 1, 2 y 3, respectivamente. El control de esta velocidad se realizó por medio de un controlador PI (figura 6). Estas figuras muestran que la velocidad de giro (línea roja) sigue muy de manera muy fiel la velocidad de referencia (línea azul).

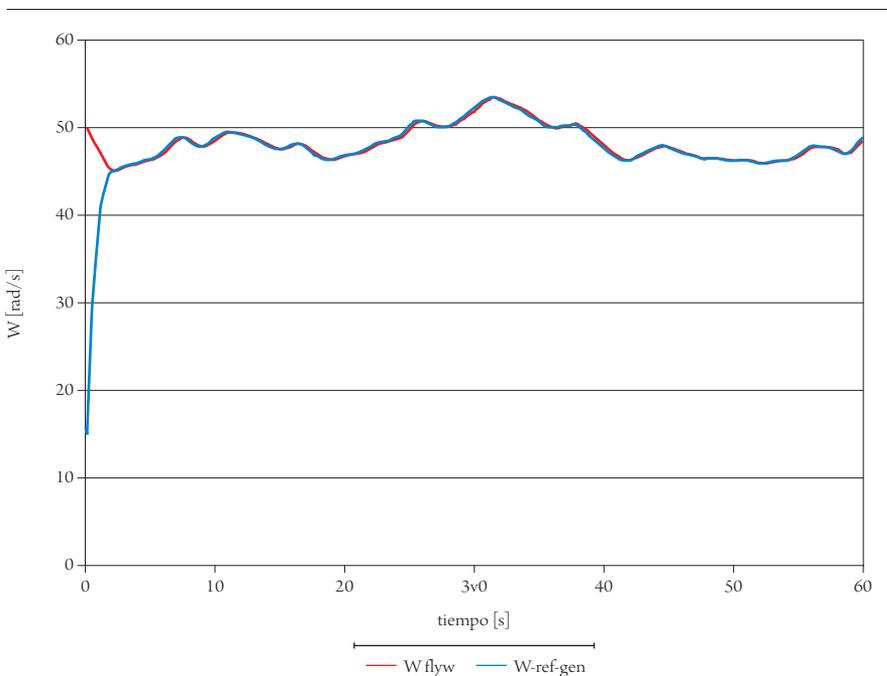


Figura 12. Velocidad de giro de la *flywheel* utilizando el estabilizador 1

Nota: la línea roja representa la velocidad a la que está girando el elemento almacenador de energía; la línea azul es la velocidad de referencia obtenida a través del estabilizador 1.

Fuente: elaboración propia.

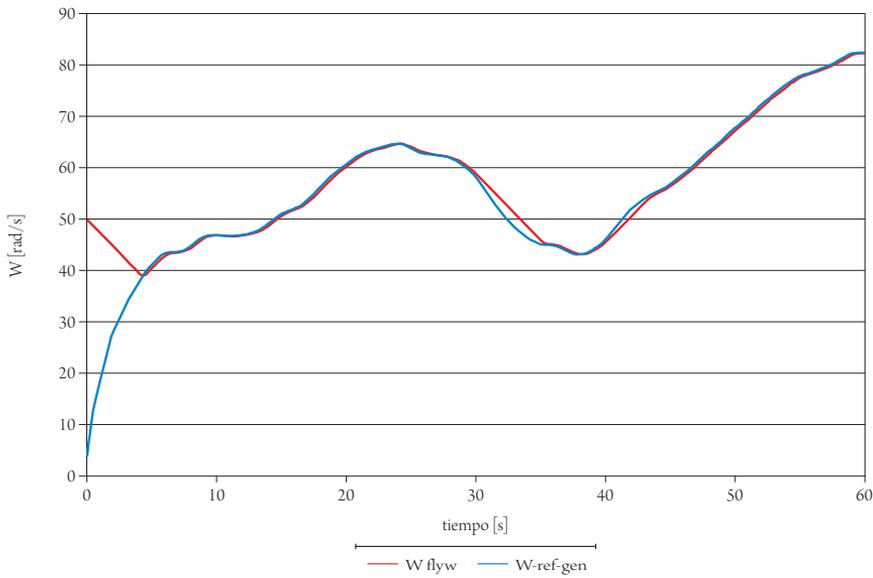


Figura 13. Velocidad de giro de la *flywheel* utilizando el estabilizador 2

Nota: la línea roja es la velocidad de giro del elemento almacenador de energía; la línea azul es la velocidad de referencia calculada por medio del estabilizador 2.

Fuente: elaboración propia.

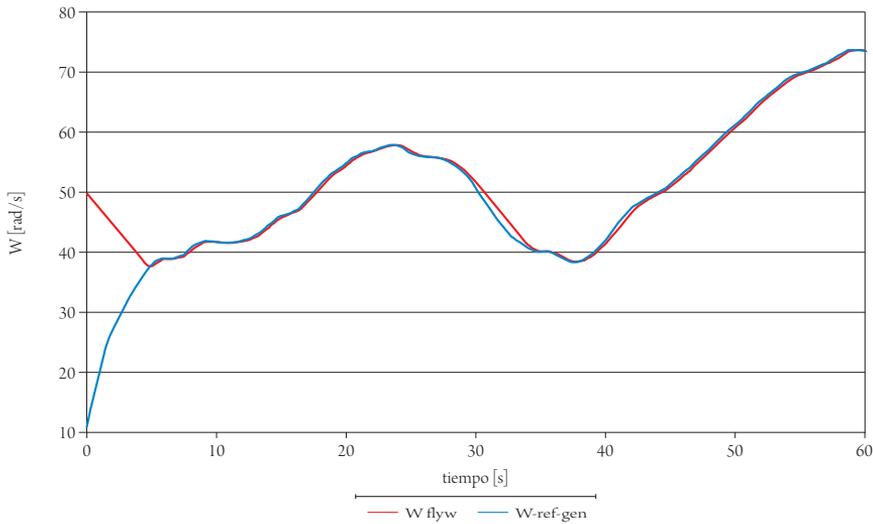


Figura 14. Velocidad de giro de la *flywheel* utilizando el estabilizador 3

Nota: la línea roja representa la velocidad de la *flywheel*; la línea azul es la velocidad de referencia hallada a través del estabilizador 3.

Fuente: elaboración propia.

Conclusiones

En este trabajo se presentaron varios esquemas para realizar el mejoramiento del perfil de potencia activa entregado por un parque eólico que usa sistemas almacenadores de energía, específicamente la *flywheel*. Este sistema llegó a proporcionar perfiles de potencia suaves y constantes con respecto a la potencia entregada por las turbinas eólicas. Particularmente se presentaron tres estabilizadores de potencia activa. Entre ellos, el mejor enfoque es el basado en controladores PI para obtener la energía de la *flywheel*, con lo cual se contribuye con niveles bajos de dispersión de la potencia entregada a la red.

Además se mostró la velocidad de giro controlada por medio de controladores PI, para seguir la velocidad de referencia obtenida por dichos estabilizadores. Debe resaltarse que la potencia de referencia para los estabilizadores 2 y 3 es una componente clave para el estudio propuesto; por lo tanto, como trabajo futuro, se puede plantear un estabilizador de potencia que sea autónomo, que no requiera de sintonización experimental, en función de determinar estas constantes mediante un enfoque matemático.

Referencias

- Alzola, R., Sebastián, R., Quesada, J. y Colmenar, A. (2011). Review of flywheel based energy storage systems. En: *Power Engineering, Energy and Electrical Drives (POWERENG), 2011 International Conference on*, 16.
- Boulund, B., Bernhoff, H. y Leijon, M. (2007). Flywheel energy and power storage systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 11(2), 235-258.
- Chen, H., Cong, T. N., Yang, W., Tan, C., Li, Y. y Ding, Y. (2009). Progress in electrical energy storage system: A critical review. *Progress in Natural Science*, 19(3), 291-312.
- Cimuca, G., Saudemont, C., Robyns, B. y Radulescu, M. (2006). Control and performance evaluation of a flywheel energy-storage system associated to a variable-speed wind generator. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 53(4), 1074-1085. Doi: 10.1109/TIE.2006.878326.
- Cimuca, G., Breban, S., Radulescu, M., Saudemont, C. y Robyns, B. (2010). Design and control strategies of an induction-machine-based flywheel energy storage system associated to a variable-speed wind generator. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 25(2), 526-534. Doi: 10.1109/TEC.2010.2045925.

- Díaz-González, F., Sumper, A., Gomis-Bellmunt, O. y Martínez-Rojas, M. (2007). Power smoothing of DFIG wind turbines with flywheel. *Electrical Engineering*, 58(2), 79-84.
- Díaz-González, F., Sumper, A., Gomis-Bellmunt, O. y Villafafila-Robles, R. (2012). A review of energy storage technologies for wind power applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(4), 2154-2171.
- Georgilakis, P.S. (2008). Technical challenges associated with the integration of wind power into power systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 12(3), 852- 863.
- Greigarn, T. y Garcia-Sanz, M. (2011). Control of flywheel energy storage systems for wind farm power fluctuation mitigation. *IEEE Energytech*, 2011, 1-6. Doi: 10.1109/EnergyTech.2011.5948509.
- Ogata, K. (2010). *Modern control engineering*. Nueva York: Prentice Hall.
- Qu, L. y Qiao, W. (2011). Constant power control of DFIG wind turbines with supercapacitor energy storage. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 47(1), 359-367. Doi: 10.1109/TIA.2010.2090932.
- Sebastián, R. y Alzola, R. (2012). Flywheel energy storage systems: Review and simulation for an isolated wind power system. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(9), 6803-6813.
- Sorensen, P., Hansen, A. y Rosas, P. (2002). Wind models for simulation of power fluctuations from wind farms. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 90(12-15), 1381-1402.
- Suvire, G. y Mercado, P. (2009). Improvement of power quality in wind energy applications using a dstatcom coupled with a flywheel energy storage system. *Power Electronics Conference, 2009*, 58-64. Doi: 10.1109/COBEP.2009.5347602.
- Suvire, G., Molina, M. y Mercado, P. (2012). Improving the integration of wind power generation into ac microgrids using flywheel energy storage. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 3(4), 1945-1954. Doi: 10.1109/TSG.2012. 2208769.
- Veszpremi, K. y Schmidt, I. (2007). Flywheel energy storage drive for wind turbines. *Power Electronics and Drive Systems, 2007*, 916-923. Doi: 10.1109/PEDS.2007.4487814.
- Zeng, J., Zhang, B., Mao, C. y Wang, Y. (2006). Use of battery energy storage system to improve the power quality and stability of wind farms. *Power System Technology*, 2006, 1-6. Doi: 10.1109/ICPST.2006.321662.

