

PRODUCCIÓN DE H₂ BASADA EN GDR Y ASISTIDA POR RED DÉBIL. TOPOLOGÍA, OPERACIÓN Y CONTROL DEL SISTEMA

Camocardi, Pablo A. Toccaceli, Graciela M. Battaiotto, Pedro E. Cendoya, Marcelo G.^(*)

(*) **Lugar de trabajo:** Laboratorio de Electrónica Industrial, Control e Instrumentación (LEICI), Departamento de Electrotecnia, Facultad de Ingeniería, UNLP, Casilla de Correo N° 91, 1900, La Plata, Argentina. E-mail: cendoya@ing.unlp.edu.ar

RESUMEN

La Generación Distribuida Renovable (GDR), como producción de energía eléctrica en proximidades de la carga, resulta particularmente beneficiosa cuando la red de distribución es “débil” frente a demandas puntuales, como sucede en los sistemas de producción de hidrógeno conectados a redes de electrificación rural. En este ámbito, el recurso eólico puede ser adecuado para este tipo de generación. En el trabajo se propone la topología y la estrategia de operación y control para una estación de producción de hidrógeno, “asistida” por una red débil de CA y “alimentada” por un aerogenerador de velocidad variable, basado en una máquina de inducción trifásica de doble estator. La conversión eólica es optimizada mediante un adecuado control del generador; la corriente del electrolizador es regulada para el máximo aprovechamiento de la potencia generada; las fluctuaciones rápidas de potencia, por turbulencias, son compensadas mediante un sistema controlado de almacenamiento de energía con volante de inercia. Se presenta la configuración del sistema, su modo de operación y control, y la validación por simulación.

Palabras Claves: Generación Distribuida Renovable, Generación Eólica, BDFIG, Flywheel, Electrolizador.

1. INTRODUCCIÓN

Una de las características distintivas de la Generación Distribuida en CA, es la producción y provisión de energía eléctrica en las proximidades del consumo. Esto resulta particularmente beneficioso cuando la red de distribución es “débil” frente a la demanda de cargas puntuales, como sucede comúnmente con los sistemas de producción de hidrógeno conectados a redes de electrificación en zonas rurales. Siendo que en muchas de estas regiones el recurso eólico suele constituir una importante y competitiva fuente de energía, su aprovechamiento resulta una alternativa para la implementación de **Generación Distribuida Renovable** en estos ámbitos [1][2].

A tal efecto, en este trabajo se propone la topología y la estrategia de operación y control para una estación de producción de hidrógeno “asistida” por una red débil de CA, y “alimentada” por un **Aerogenerador** de velocidad variable basado en una máquina de inducción trifásica de doble estator, BDFIG [3][4]. El bobinado estático principal es conectado a la red en forma directa, mientras el estator de control lo hace a través de un enlace de CC que permite mantener la generación eólica en condiciones de máxima transferencia de potencia, ante variaciones lentas en la velocidad de viento. Este tipo de máquina es una interesante alternativa a la de inducción con rotor bobinado, por no requerir anillos rozantes y presentar mayor cantidad de polos, lo cual permite reducir significativamente la caja multiplicadora [5]. También resulta una opción a la máquina sincrónica con imanes permanentes, por ser más económica y requerir convertidores de potencia reducida para su control.

Un equipamiento adicional de **Almacenamiento** con Volante de Inercia (**Flywheel**), es operado y controlado con el fin de suavizar las fluctuaciones rápidas de potencia provenientes del aerogenerador, permitiendo una mejor operación y rendimiento del electrolizador y un menor nivel de perturbaciones en el punto de conexión a red. Este sistema de almacenamiento dinámico, es impulsado por una máquina de inducción con accionamiento electrónico conectado al enlace de CA del Aerogenerador. El sistema Flywheel resulta altamente competitivo por su durabilidad, bajo mantenimiento, densidad de potencia y costo [6][7][8][9].

Un **Electrolizador** alcalino es alimentado por un rectificador controlado que regula la potencia tomada desde el bus CA y la red. Su estrategia de operación conduce al completo aprovechamiento de la potencia eólica.

El sistema en su conjunto requiere de la red solamente una función de “asistencia”, consistente en:

- i) Provisión de parámetros eléctricos (V, f) para convertidores y BDFIG.
- ii) Suministro de potencia reactiva para el BDFIG.
- iii) Suministro de una “reducida” potencia activa que asegura mínima producción de H₂, cuando el recurso eólico es insuficiente.

En el trabajo se presentan la configuración del sistema y la estrategia de conversión y control de energía. Finalmente se muestran los resultados de simulación y las conclusiones.

2. CONFIGURACIÓN DEL SISTEMA

La configuración del sistema de conversión propuesto se presenta en la Fig. 1. El mismo está constituido por tres módulos funcionales vinculados entre sí mediante un bus de CA, conectado a su vez a una red trifásica débil de 380V/50Hz a través de un *link*. Los módulos son los siguientes: **Aerogenerador**, **Sistema de Almacenamiento**, **Sistema de Producción de Hidrógeno**.

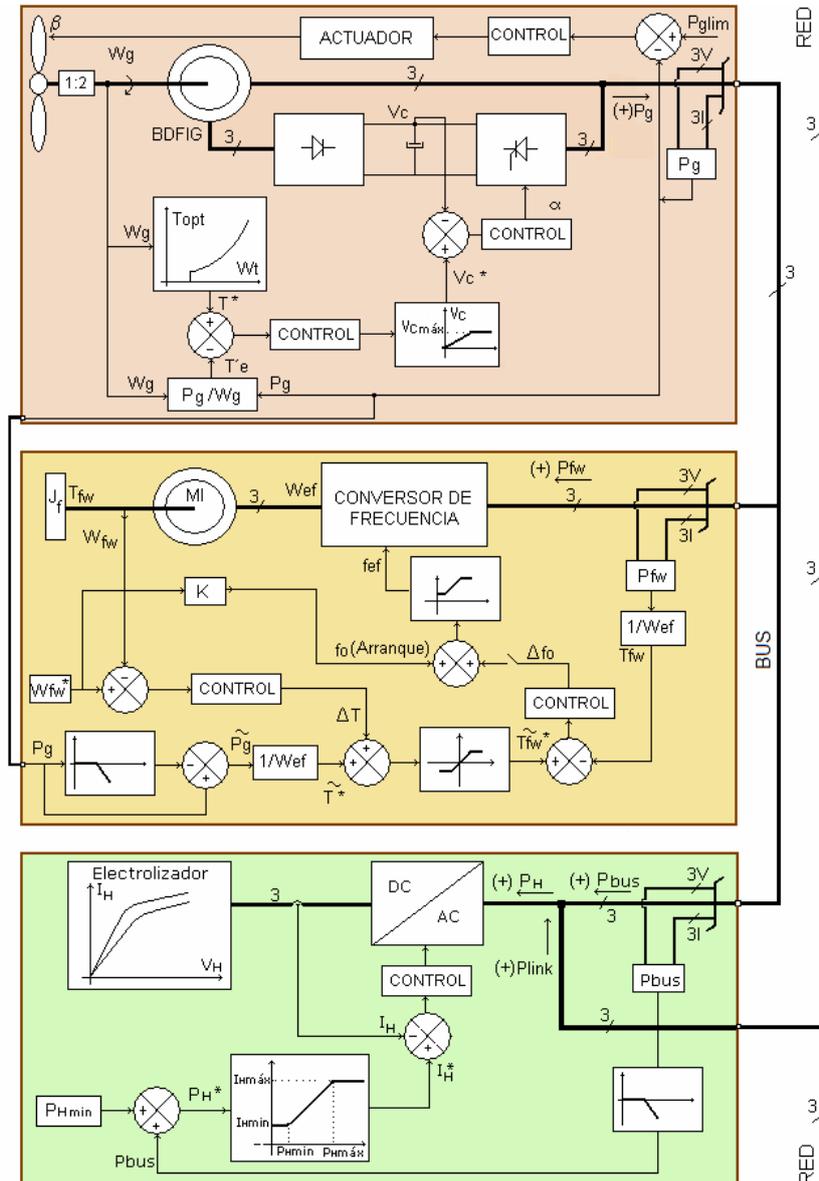


Fig. 1: Estructura Modular del Sistema.

El **Aerogenerador** posee una turbina de eje horizontal tripala y paso ajustable, que opera a velocidad variable. La misma impulsa, mediante una caja multiplicadora, a un generador de inducción trifásico de doble estator (BDFIG), cuyo arrollamiento estatórico principal se encuentra conectado directamente al bus CA. Un lazo cerrado controla la cupla electromagnética del BDFIG, siguiendo una referencia T^* , que determina el punto de operación de la turbina en estado estacionario. Este lazo de control actúa sobre la tensión de alimentación del arrollamiento estatórico auxiliar del BDFIG, mediante un enlace de CC con rectificación controlada tipo Kramer Estático [11]. Un lazo de control

de potencia, actuando sobre el paso de las palas de la turbina (β), limita la máxima potencia generada, $P_{glimitada}$.

Datos de la Turbina: Pot.=75KW; Viento=14m/s; Radio=6mts; $C_{pmax}=0.4$; $\lambda_{opt}=6.7$.

Datos del BDFIG: Pot 75KW; Estator Principal: 440V /50Hz /12 polos; Estator de Control: 700V /8 polos.

El **Sistema de Almacenamiento** se basa en un volante de inercia, impulsado por un motor de inducción trifásico en jaula (MI). Un lazo cerrado controla la cupla motriz siguiendo una referencia T_{fw}^* , que permite variar la velocidad del volante y así la energía almacenada. El mismo actúa variando la frecuencia de alimentación del MI por encima de su valor nominal mediante un convertidor de frecuencia. La tensión de alimentación se mantiene en su valor nominal, operando al MI en la región de debilitamiento de campo. De esta forma, se obtiene una mayor capacidad de almacenamiento al trabajar con velocidades más elevadas. El valor de T_{fw}^* resulta de la estrategia de compensación de fluctuaciones, que se presenta en el punto 3.

Datos del MI: Potencia 15KW; Estator: 380V /50Hz / 4 polos.

El **Sistema de Producción de H₂** está formado por un electrolizador alcalino alimentado por un rectificador controlado. Un lazo cerrado impone la corriente del electrolizador actuando sobre el ángulo de disparo del rectificador. Un lazo de control determina la potencia que el electrolizador toma del bus CA y la red.

Datos del Electrolizador: Potencia 60KW. Capacidad: 12m³N/h. Presión: 30bar.

3. OPERACIÓN Y CONTROL DEL SISTEMA

Se propone una estrategia de operación y control para cada módulo del sistema.

3.1 Aerogenerador

La cupla T_t producida por la turbina es:

$$T_t = 0.5 \rho A v^3 C_p(\lambda, \beta) / \lambda \quad (1)$$

ρ : densidad del aire; $A = \pi r^2$: área de captura; r : radio de pala; v : velocidad del viento; $C_p(\lambda, \beta)$: coeficiente de potencia, $\lambda = r\omega_t/v$: velocidad típica, ω_t : velocidad de rotación, β : paso de pala.

Los puntos de operación de la turbina a máxima potencia, describen una parábola en el plano (T_t, ω_t) [2]:

$$T_{top}(\omega_t) = K_t \omega_t^2 \quad (2)$$

T_{top} : T_t para máxima potencia, K_t : constante constructiva.

El punto de operación del aerogenerador en estado estacionario ($\omega = \text{cte.}$), corresponde a:

$$T_t' = T_g \quad (3)$$

T_t' : T_t referida al eje del generador; T_g : cupla del generador.

El BDFIG con el estator principal conectado directamente a red y con el estator auxiliar alimentado mediante un sistema Kramer-estático, presenta una característica cupla-velocidad equivalente a la de la máquina DFIG con Kramer-estático en rotor [11]. Dicha característica, puede ser aproximada mediante una recta (Fig.2), del tipo:

$$T_g = K_g [\omega_g - \omega_o(V_C)] \quad (4)$$

$\omega_o(V_C)$: ω para $T_g=0$; V_C : tensión del bus CC; K_g : constante constructiva.

ω_o coincide con la velocidad de sincronismo cuando V_C es nula; si V_C aumenta, ω_o aumenta proporcionalmente. Según la Ec. (3), para que la turbina trabaje en los puntos de cupla óptima, se debe imponer a T_g el valor T_t' para cada valor de ω_g . Ello se logra mediante la estructura de control presentada en la Fig.1, la cual actúa sobre la amplitud de la tensión del estator auxiliar, a través del Kramer-estático. T_g se mide en forma indirecta, como el cociente entre la potencia CA total generada y la velocidad del eje del generador.

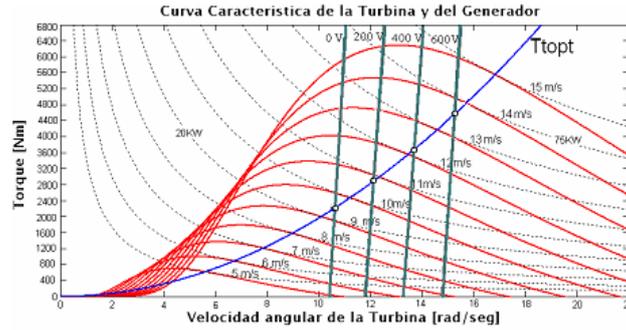


Fig. 2: Puntos de trabajo del aerogenerador.

En la Fig. 2 se representan las curvas características de la turbina, Ec. (1) con $\beta=0$, y las características del BDFIG, Ec. (4) referida al eje turbina, para tensiones del enlace de CC (V_C) que hacen operar al conjunto en los puntos de cupla óptima para diferentes vientos, Ec (2). Cuando el viento es muy intenso la potencia generada puede exceder el valor nominal del generador. Para evitar esto, se fijan límites a la velocidad de rotación y a la potencia generada. La velocidad máxima se determina mediante el valor V_{Cmax} en el lazo de control de cupla. La potencia máxima se regula mediante un lazo de control que actúa sobre el paso de las palas (β) [12]. Para potencias inferiores a la nominal se mantiene la condición de $\beta=0$, y la potencia será la máxima obtenible siguiendo la parábola descrita por la Ec. (1). En la Figura 3-(a) se grafica la acción del lazo de control del paso y en la Figura. 3-(b) las regiones de operación resultantes de la acción de los dos lazos de control del aerogenerador.

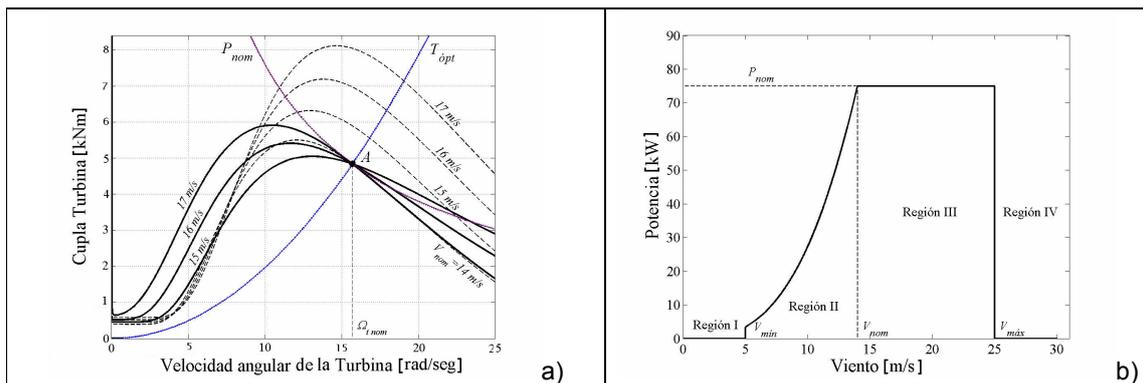


Fig.3: (a) Control de paso, (b) Regiones de operación del aerogenerador.

3.2 Sistema de almacenamiento

Se propone una estrategia de control que permite almacenar energía durante variaciones de potencia crecientes, y suministrar energía durante variaciones decrecientes. La potencia instantánea que deberá fluir por el módulo volante de inercia, P_{fw} , es:

$$P_{fw} = \tilde{P}_g = P_g - \bar{P}_g \tag{5}$$

P_g : potencia eléctrica total del aerogenerador. \tilde{P}_g : variación rápida; \bar{P}_g : valor medio.

Para su correcta operación, la velocidad del volante ω_{fw} debe estar comprendida en un determinado rango. Se establece una velocidad mínima, debajo de la cual la energía almacenada es pequeña, y de poca utilidad práctica. Limitaciones mecánicas determinan la velocidad máxima. La relación entre ω_{fwmax} y ω_{fwmin} se suele fijar en 2:1 ó 3:1, obteniéndose una variación útil de la energía cinética ΔE del 75% ó 89% de E_{max} , ya que:

$$\Delta E = E_{max} - E_{min} = J_{fw} (\omega_{fwmax}^2 - \omega_{fwmin}^2) / 2 \tag{6}$$

J_{fw} : momento de inercia; E_{min} , E_{max} : energía para ω_{fwmin} y ω_{fwmax} .

Con el fin de suavizar P_g , el volante debe ser capaz de almacenar o entregar energía en cualquier momento. Es necesario entonces, que en reposo opere a una velocidad intermedia dada por:

$$\bar{E} = (E_{\min} + E_{\max})/2 \rightarrow \omega_{fw}^* = \sqrt{(\omega_{fw\min}^2 + \omega_{fw\max}^2)}/2 \quad (7)$$

Para cumplir con los objetivos definidos por las Ec. (5) y la Ec. (7) se utiliza un lazo de control de cupla del volante cuya referencia T_{fw}^* , está formada por dos componentes:

$$T_{fw}^* = \tilde{T}_{fw} + \Delta T = \tilde{P}_g / \omega_{efw} + \Delta T \quad (8)$$

La primera, \tilde{T}_{fw} , corresponde al suavizado de P_g , y se obtiene a partir de \tilde{P}_g , calculada mediante la Ec. (5). Esto requiere conocer \bar{P}_g , la que es obtenida mediante un filtro pasa-bajos ya que su variación es *lenta*. La segunda componente, ΔT , obtenida a partir de la referencia ω_{fw}^* , corresponde a la corrección introducida por un lazo *lento* de regulación de la velocidad de reposo del volante. Debido a su tiempo de respuesta, este lazo no interfiere con el lazo de suavizado de las fluctuaciones de potencia.

3.3 Sistema de Producción de H₂

Se desea que la potencia de alimentación del electrolizador P_H provenga, predominantemente, del conjunto aerogenerador-volante, P_{bus} . Para ello un lazo de control determina P_H regulando la corriente del electrolizador I_H , mediante un lazo de control de corriente que actúa sobre el ángulo de disparo del rectificador. La referencia del lazo de corriente I_H^* se obtiene a partir del valor de potencia deseado P_H^* , calculado como:

$$P_H^* = P_{H\min} + P_{bus} \quad (9)$$

$P_{H\min}$: P_H para producción mínima de H₂.

El controlador del lazo de potencia posee saturaciones que definen un rango de operación segura para el electrolizador, $I_{H\min}$, $I_{H\max}$. De esta forma la potencia de la red, P_{link} , resulta:

$$P_{link} = \begin{cases} P_{H\min} & P_H^* < P_{H\max} \\ P_{H\min} - (P_H^* - P_{H\max}) & P_H^* \geq P_{H\max} \end{cases} \quad (10)$$

Para evitar cambios rápidos en I_H , que pueden desmejorar el funcionamiento del electrolizador [10] se utiliza un filtro pasa-bajos en la medición de P_{bus} .

4. RESULTADOS DE SIMULACIÓN

El sistema fue simulado en ambiente MATLAB®/Simulink. Se desarrolló un modelo utilizando elementos de la librería *SimpowerSystems* y el modelo del BDFIG presentado en [13] y [14].

La Fig. 4 (a) muestra la evolución temporal de la potencia del aerogenerador (P_g), mientras que (b) muestra el flujo de potencia en el Flywheel (P_{fw}). En (c) puede observarse la potencia consumida por el electrolizador (P_H), y finalmente en (d) la potencia tomada desde la red (P_{link}). El perfil de viento empleado consiste en un viento constante (11m/s) al que se superpone una variación sinusoidal de amplitud 1m/s y frecuencia 0.5Hz a partir de $t=20s$. El Flywheel esta inicialmente activado, y luego ($t>70s$) desactivado.

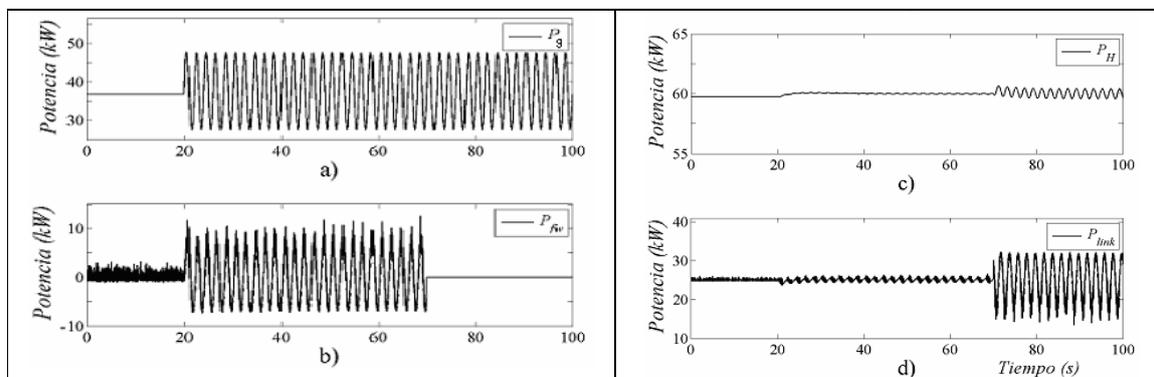


Fig. 4: Potencias: a) aerogenerador, b) flywheel, c) electrolizador, d) red.

La Fig. 5 muestra las trayectorias de las variables de la turbina y el BDFIG en el plano cupla-velocidad; el punto A corresponde a la operación de estado estacionario alcanzada durante los primeros 20s de simulación. La diferencia entre las trayectorias roja y azul, se debe a la inercia mecánica del aerogenerador.

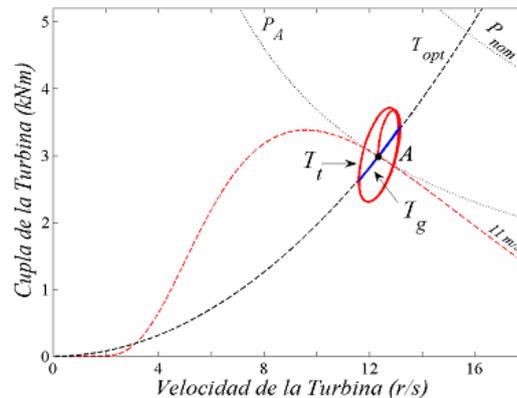


Fig. 5: Trayectorias en el plano T- ω : T_t (rojo continuo) y T_g (azul).

5. CONCLUSIONES

- La modularidad del sistema propuesto lo hace altamente flexible y reconfigurable, tanto en su topología como en su control.
- Las partes constitutivas presentan un bajo costo de inversión y mantenimiento.
- Los resultados de simulación han validado la estrategia de operación y control para un aprovechamiento eficiente del recurso eólico y un buen funcionamiento del electrolizador.
- La utilización de BDFIG en generación eólica y Flywheel para compensar fluctuaciones, constituyen una alternativa muy promisoriosa para GDR con buena calidad de potencia.

6. REFERENCIAS

- [1] Tony Burton, David Sharpe, Nick Jenkins, Ervin Bossanyi, *Wind Energy Handbook*, Wiley and Sons, 642 pages, Dec 2001.
- [2] F. Bianchi, H. De Battista, R. Mantz, *Wind Turbine Control Systems*. Springer, 228 págs, London, Jun. 2006.
- [3] S. Williamson, A. C. Ferreira, and A. K. Wallace, "Generalised theory of the brushless doubly-fed machine. Part 1: Analysis," IEE Proceedings - EPA, vol. 144, no. 2, 111–122, 1997.
- [4] S. Williamson and A. C. Ferreira, "Generalised theory of the brushless doubly-fed machine. Part 2: model verification and performance," IEE Proceedings - EPA, vol. 144, no. 2, 123–129, 1997.
- [5] R. Carlson, H. Voltolini, F. Runcos, P. Kuo-Peng, "A performance comparison between brush and brushless doubly fed asynchronous generators for wind power systems", ICREPQ'06, Palma de Mallorca, 5, 6, 7 April, 2006. Paper 405.
- [6] Cárdenas, R., R. Peña, G. M. Asher, J. Clare and R. Blasco-Giménez. "Control Strategies for Power Smoothing Using a Flywheel Driven by a Sensorless Vector-Controlled Induction Machine Operating in a Wide Speed Range", IEEE TIE, Vol. 51, No. 3, 603-614. 2004.
- [7] Ghedamsi, K., D. Aouzellag, E.M. Berkouk. "Control of wind generator associated to a flywheel energy storage system, RE 33, 2145–2156. 2008.
- [8] Hardan, F., J.A.M. Bleijs, R. Jones, P. Bromley, A.J. Ruddell, "Application of a Power-Controlled Flywheel Drive for Wind Power Conditioning in a Wind/Diesel Power System", EMD'99, Canterbury, UK. pp. 65-70. 1999.
- [9] Takahashi I. et al, "Development of long life three phase uninterruptible power supply using flywheel energy storage unit", PEDES'96, New Delhi, Vol. 1, 559–564. 1996.
- [10] Bergen A. et al, "Transient electrolyser response in a renewable-regenerative energy system". IJHE 34, 1, 64-70. 2009.
- [11] B. K. Bose, *Power Electronics and AC drives*, Prentice-Hall, 1986.
- [12] Camocardi, P. Battaiotto, R. Mantz, "Autonomous BDFIG-wind generator with torque and pitch control for maximum efficiency in a water pumping system", IJHE 35, 5778–5785. 2010.
- [13] Roberts, P. "A Study of Brushless Doubly-Fed (Induction) Machines: Contributions in Machine Analysis, Design and Control". University of Cambridge, 2004.
- [14] Runcos, F. "Modelagem, projeto e análise de máquinas assíncronas trifásicas duplamente alimentadas sem escovas". UFSC, Brasil, 2006.