

## Modelling and control of a 600 W aerogenerator

R. Galindo<sup>\*\*\*,\*</sup>, A. I. Gómez<sup>\*\*\*,\*\*</sup>

\* e-mail: [rgalindoro@gmail.com](mailto:rgalindoro@gmail.com), [rene.galindoorz@uanl.edu.mx](mailto:rene.galindoorz@uanl.edu.mx).

\*\* e-mail: [adrian.gomezocn@uanl.edu.mx](mailto:adrian.gomezocn@uanl.edu.mx).

\*\*\* Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, Universidad Autónoma de Nuevo León, 66455 Av. Universidad s/n, San Nicolás de los Garza, Nuevo León, México

---

**Abstract:** A small 600 W aerogenerator operating in isolated mode is considered, under bounded wind and load changes. A model of its wind turbine is proposed, and a control system is designed that operates under low and medium winds. The control system consists of a proportional derivative controller with current compensation, designed for the non-linear averaging model of the boost converter of the aerogenerator, that guarantees stability in the Lyapunov sense and ensures that the current supplied to the load follows a specified current reference. The current reference is generated by a gradient descent maximum power point tracking algorithm.

*Keywords:* Modelling, Control System, Small aerogenerators, Stability, Current regulation, Maximum Power Point Tracking.

---

En la actualidad, el cambio climático como el incremento de la temperatura o en la intensidad y frecuencia de tormentas en el mundo ha provocado recortes de energía eléctrica por parte de los reguladores de energía (ver Ahmad (2021)). Además del incremento en la demanda de energía eléctrica, el decremento en los combustibles fósiles y el daño al medio ambiente (ver Idárraga (2023)). Una manera de mitigar estos recortes es incrementar la generación de energía preferentemente de energías renovables como la eólica y fotovoltaica. Se ha ido incrementado el uso de energías renovables, donde la generación eólica se considera una de las alternativas económicamente más viables. En particular la generación distribuida a través de pequeños aerogeneradores debido a (ver Idárraga (2023)): 1) Capacidad para trabajar en sistemas aislados como regiones inaccesibles o alejadas, áreas rurales, iluminación de carreteras, bombas, etc., 2) Tarifas más convenientes, 3) Menor impacto visual, 4) Menor nivel de ruido y 5) Conexión más simple a la red. Acorde al estándar de seguridad IEC 61400-2, una pequeña turbina eólica es aquella que tienen un área de barrido del rotor de 200 m<sup>2</sup>, que equivale aproximadamente a turbinas con potencias menores de 50 kW. Lo anterior, genera la necesidad de sistemas más eficientes y modelos matemáticos que aprovechen mejor la energía cinética del viento. Acorde a la ley de Betz-Joukowski la energía máxima que puede captarse del viento es el 59.3% de la energía cinética del viento (ver Okulov (2009)).

La potencia generada por los aerogeneradores se ve afectada por una gran variedad de factores ambientales siendo de los más importantes las variaciones en la velocidad y dirección del viento, esto sumado a que se requiere ajustar el par electromagnético según la velocidad del viento. La extracción de la máxima potencia se basa típicamente en

tablas de búsqueda para regular el par electromagnético, sin embargo, los resultados no son siempre satisfactorios ante vientos variables, comunes a baja altitud (ver cap. 4 de Idárraga (2023)). Lo anterior genera la necesidad de algoritmos de Seguimiento del Punto Máximo de Potencia (SPMP) como los de Ajesam (2022); Galindo (2019).

En las secciones II y III se revisan los resultados del cap. 4 de Idárraga (2023), y en la sección IV se presenta un algoritmo de SPMP de Descenso de Gradiente (SPMP-DG), que se aplica a un aerogenerador de 600 W. En la sección II se considera el modelado de un pequeño aerogenerador de 600 W operando en modo aislado, ante vientos y cambios de carga acotados. El aerogenerador está conectado a una carga trifásica resistiva, su rotor está conectado a un Generador Síncrono de Imanes Permanentes (GSIP) cuya salida es rectificadora y filtrada, y el voltaje generado es regulado mediante un convertidor elevador. Se propone un modelo de los movimientos alrededor de los ejes horizontal y vertical de la turbina eólica y se diseña un sistema de control del lado del GSIP que opera ante vientos bajos y medios. Ante vientos fuertes el aerogenerador debe protegerse mediante sistemas de frenado mecánicos y electrónicos. En la sección III se aborda el diseño del sistema de control que consiste de un controlador Proporcional Derivativo (PD) con compensación de corriente, diseñado para el modelo no lineal de promedios del convertidor elevador que garantiza estabilidad en el sentido de Lyapunov y asegura que la corriente suministrada a la carga siga a una referencia de corriente especificada. En la sección IV, la referencia de corriente del sistema de control del convertidor elevador es generada por el algoritmo de SPMP-DG.

## 1. MODELADO DEL AEROGENERADOR

En general, los modelos son útiles en el diseño, construcción y aplicación para investigar propiedades, reducir tiempo y costo de desarrollo, y realizar pruebas sin exponer físicamente al aerogenerador (ver cap. 4 de Idárraga (2023)). La confiabilidad, exactitud y precisión depende de la calidad de los modelos integrados y de los datos o parámetros.

### 1.1 Modelo del rotor

La potencia mecánica  $P_{te} = T_{te}\omega_r$  extraída del viento está relacionada con el cubo de la velocidad del viento  $v_w$  (ver Ackermann (2005)),

$$P_{te} = 0.5\rho A_{te} C_p(\lambda, \beta) v_w^3 \iff T_{te} = \frac{\rho\pi D_r^2 C_p(\lambda, \beta) v_w^3}{8\omega_r} \quad (1)$$

donde  $\rho$  es la densidad del aire,  $\lambda = r\omega/v_w$  es la relación entre la velocidad de punta de la pala  $r\omega$  y  $v_w$ ,  $\beta$  es el ángulo de paso,  $A_{te} = \pi D_r^2/4$  es el área cubierta por el rotor,  $D_r$  es el diámetro del rotor,  $T_{te}$  es el par mecánico,  $\omega_r$  es la velocidad angular en el eje horizontal, y  $C_p(\lambda, \beta)$  es el coeficiente de rendimiento o de potencia. Ver un modelo de  $C_p(\lambda, \beta)$  en Zutter (2017). Si  $v_w$  y  $C_p(\lambda, \beta)$  son constantes respecto del tiempo, entonces  $P_{te}$  es constante, se conserva la energía y  $T_{te}$  es inversamente proporcional a  $\omega_r$ .

Las palas de aerogeneradores grandes se pueden girar para controlar la incidencia del viento, sin embargo aerogeneradores pequeños no tienen ese movimiento de las palas. Retirando la velata, se puede controlar el ángulo de desviación alrededor del eje vertical  $\gamma$ , y entonces  $P_{te}$  es (ver Zutter (2017)),  $P_{te} = \frac{1}{2}\rho A_{te} C_p(\lambda, \beta) v_w^3 \cos^3(\gamma)$ . En Zutter (2017); Orozco (2020) se propone una ley de control algebraica,  $\gamma = \cos^{-1}\left[\frac{v_n}{v} \sqrt{\frac{C_{pmax}}{C_{pn}}}\right]$ ,  $v_w \geq v_{wn}$ , para mantener la potencia  $0.5\rho A_{te} C_{pmax} v_{wn}^3$  a la potencia nominal, protegiendo al equipo ante fuertes vientos, donde  $v_{wn}$  y  $C_{pn}$  son  $v_w$  y  $C_p(\lambda, \beta)$  nominales, respectivamente, y  $C_{pmax}$  es  $C_p(\lambda, \beta)$  máximo.

Un modelo de Newton unidimensional de un aerogenerador puede verse en Bakka (2011), y un modelo en gráficas de ligadura en Gonzalez (2017), sin embargo, a fin de obtener un modelo que incluya  $\gamma$ , se propone un modelo de Euler-Lagrange (E.-L.) en Galindo (2021). En Galindo (2021) este modelo es verificado con modelos de Simscape-Simmechanics (biblioteca de MatLab-Simulink) y de gráficas de ligadura, y considera dimensiones y materiales del sistema físico, lo que permite obtener de él las masas, inercias y la ubicación de los 5 Centros de Masas (C.M.) mostrados en la Fig. 1. El modelo es obtenido en base a la tabla de Parámetros de Denavit-Hartenberg mostrada en la Tabla 1, donde  $\Omega_1 = \Omega$ ,  $\Omega_2 = \Omega - 120^\circ$ ,  $\Omega_3 = \Omega + 120^\circ$  y  $\dot{\Omega} = \omega_r$ . El modelo de E.-L. propuesto por Galindo (2021) es,

$$\begin{aligned} J_{eq1}\ddot{\gamma} &= \tau_1 - f_1(\dot{\gamma}, \omega_r) \\ J_{eq2}\dot{\omega}_r &= T_{te} - f_2(\dot{\gamma}, \omega_r) \end{aligned} \quad (2)$$

donde  $J_{eq1} = J_{1z} + J_{2z} + 1.5(J_{3y} + J_{3z}) + m_1 D_2^2 + m_2 D_7 + 3m_3 D_8$ ,  $J_{eq2} = 3(m_3 D_6^2 + J_{3x})$ , y  $f_1(\dot{\gamma}, \omega_r)$  y  $f_2(\dot{\gamma}, \omega_r)$  modelan la fricción en los ejes vertical y horizontal,

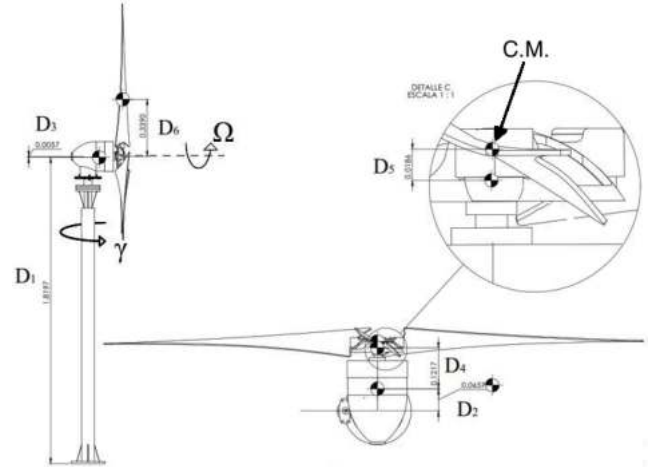


Fig. 1. Modelo de Simscape-Simmechanics

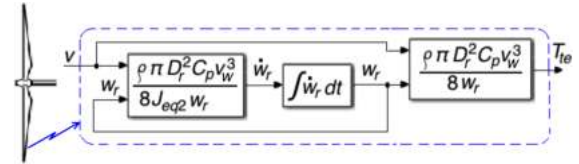


Fig. 2. Modelo propuesto del rotor

respectivamente, siendo  $D_7 = D_2^2 + D_4^2 + 2D_2D_4$  y  $D_8 = D_7 + D_5^2 + 0.5D_6^2 + 2(D_2 + D_4)D_5$ . Utilizando los datos del aerogenerador,  $J_{eq1} = 0.3177 \text{ Kg}\cdot\text{m}^2$  y  $J_{eq2} = 0.3772 \text{ Kg}\cdot\text{m}^2$ . En el modelo de la Ec. (2), los efectos de Coriolis y de gravedad son nulos, debido a la distribución balanceada de  $120^\circ$  entre cada aspa, a la estructura de soporte y a los ejes de giro perpendiculares. Además, cuando no hay fricción y  $\tau_1$  y  $T_{te}$  son constantes respecto del tiempo, de la Ec. (2)  $\omega_r$  y  $\dot{\gamma}$  son rampas que crecen con el tiempo, lo cual no es una situación real debido a que de la Ec. (1) conforme  $\omega_r$  se incrementa,  $T_{te}$  decrece. Entonces, se propone completar el modelo de la Ec. (2) en,

**Propuesta 1.** (ver cap. 4 de Idárraga (2023)) *El modelo propuesto del rotor se muestra en la Fig. 2, donde  $\omega_r$  se obtiene del modelo de E.-L. tridimensional de la parte mecánica, y de las ecuaciones (1) y (2),*

$$\begin{cases} \dot{\omega}_r = \frac{1}{J_{eq2}} \left( \frac{\rho\pi D_r^2 C_p(\lambda, \beta) v_w^3}{8\omega_r} - f_2(\dot{\gamma}, \omega_r) \right) \\ T_{te} = \frac{\rho\pi D_r^2 C_p(\lambda, \beta) v_w^3}{8\omega_r} \end{cases} \quad (3)$$

### 1.2 Modelo del GSIP

Se ha incrementado el uso de GSIP debido a (ver cap. 4 de Idárraga (2023)): 1) Menor tamaño, 2) Menor mantenimiento, 3) Sin cajas de velocidades, 4) La velocidad del

Tabla 1. Parámetros de Denavit-Hartenberg,  $h = 1, 2, 3$

$T_h^j$	$\theta_{ij}$	$D_{ij}$	$\alpha_{ij}$	$d_{ij}$
$T_0^1$	$\gamma$	$D_1$	0	$D_2$
$T_1^2$	0	$D_3$	0	$D_4$
$T_2^3$	0	0	0	$D_5$
$T_3^4$	0	0	$\Omega_h$	0
$T_4^5$	0	$D_6$	0	0

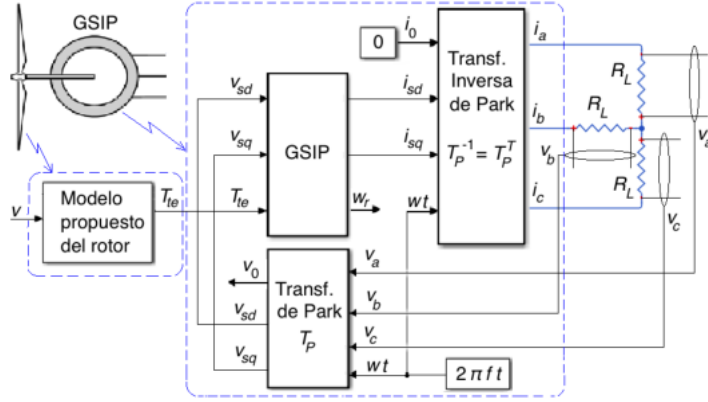


Fig. 3. GSIP conectado a una carga trifásica balanceada resistiva

rotor es independiente de la frecuencia de la red, 5) Los sistemas electrónicos reducen el costo y la complejidad del algoritmo de control, y 6) Menores pérdidas que los generadores de inducción a bajas potencias. Un modelo de corrientes del GSIP está dado en Gieras (2002),

$$\begin{cases} \frac{di_{sd}}{dt} = \frac{-1}{L_s} (v_{sd} + R_s i_{sd}) + \omega_r i_{sq} \\ \frac{di_{sq}}{dt} = \frac{-1}{L_s} (v_{sq} + R_s i_{sq} + \omega_r \varphi_{PM}) - \omega_r i_{sd} \\ \frac{dw_r}{dt} = \frac{1}{J} (T_{te} - C_{fm} \omega_r + n_p \varphi_{PM} i_{sq}) \end{cases} \quad (4)$$

donde  $\varphi_{PM}$  es el flujo magnético constante respecto del tiempo,  $n_p$  es el número de pares de polos,  $R_s$  y  $L_s$ , resistencia e inductancia propia del estator, respectivamente,  $i_{sd}$  y  $i_{sq}$  son las corrientes del estator en el marco de referencia directo y en cuadratura ( $dq$ ),  $J$  y  $C_{fm}$  son la inercia y coeficiente de fricción del conjunto GSIP-turbina, respectivamente, y  $T_e := n_p \varphi_{PM} i_{sq}$  es el par electromagnético. Se prefiere el modelo de corrientes, debido a que el modelo de flujos presenta mayores errores numéricos.

Alternativamente a la ley de control algebraica de  $\gamma$ , como se puede observar en el modelo de la Ec. (4), se puede controlar  $\omega_r$  mediante  $T_{te}$  que es función de  $\gamma$ , a  $v_w$  altas o en situaciones de emergencia, manteniendo  $P_{te}$  a la potencia nominal, mientras que en situaciones de vientos bajos y medios se pueden controlar  $\omega_r$  mediante  $T_e$  que depende de  $i_{sq}$ . Para controlar  $\gamma$  se puede utilizar un motor de CD, cuyos parámetros se pueden identificar por respuesta al escalón como en Muñoz (2022), obteniendo  $\frac{\hat{\theta}}{V_A} = \frac{K}{\tau s + 1} = \frac{9.29}{1.51s + 1}$ , donde  $V_A$  es el voltaje de armadura y  $\theta$  es  $\omega_r$  del motor. En Muñoz (2022) también se propone un modelo del aerogenerador y del motor de CD alrededor del eje vertical. La implementación de los modelos del rotor y del GSIP conectado a una carga trifásica resistiva  $R_L$  se muestra en la Fig. 3, donde la Transformación de Park está dada por,

$$T_P = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\omega t) & \cos(\omega t - 120^\circ) & \cos(\omega t + 120^\circ) \\ \sin(\omega t) & \sin(\omega t - 120^\circ) & \sin(\omega t + 120^\circ) \end{bmatrix} \quad (5)$$

$\omega_r$ ,  $T_{te}$  y la potencia filtrada RMS generada  $P_{3\varphi} = \frac{1}{0.01s+1} \sqrt{3} (v_a - v_b)_{RMS} (i_c)_{RMS}$  se muestran en la Fig.

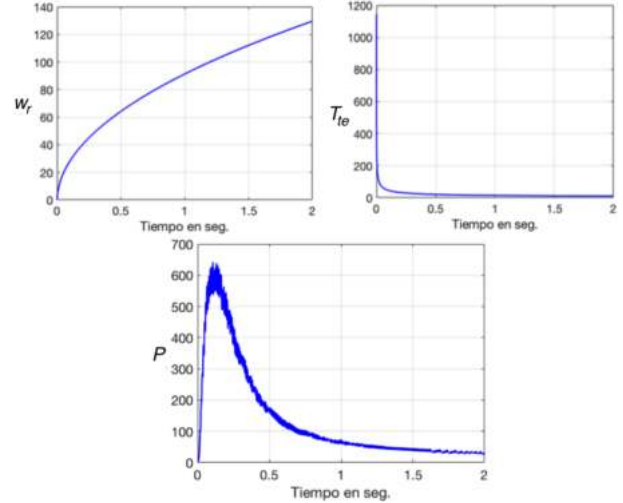


Fig. 4.  $\omega_r$ ,  $T_{te}$  y  $P_{3\varphi}$

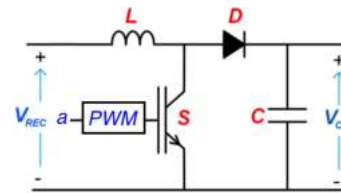


Fig. 5. Esquema de un convertidor elevador

4, y los parámetros utilizados para el rotor son,  $R_L = 1.4 \Omega$ ,  $C_p = 0.3 \in [0.2, 0.4]$ ,  $v_w = 13 \text{ m/s}$ ,  $D_r = 1.9 \text{ m}$ ,  $\rho = 1.225 \text{ Kg/m}^3$ ,  $w_r(0) = 0$  y  $f_i(\dot{\gamma}, \omega_r) = 0$ ,  $i = 1, 2$ , y los para el GSIP son,  $L_s = 0.007 \text{ H}$ ,  $R_s = 3 \Omega$ ,  $J = 0.05 \text{ Kg}\cdot\text{m}^2$ ,  $C_{fm} = 0$ ,  $n_p = 3$ , y  $\varphi_{PM} = 0.63$ . Para comparar con la curva característica del fabricante se seleccionan los valores anteriores de  $C_p$  y  $v_w$ . Utilizando los modelos propuestos, la gráfica de  $P_{3\varphi}$  mostrada en la Fig. 4 es acorde a la curva característica del fabricante, y la gráfica de  $T_{te}$  muestra un pulso típico de corta duración.

### 1.3 Modelo del convertidor elevador

Un modelo de promedios del convertidor elevador mostrado en la Fig. 5, donde PWM denota modulador por ancho de pulso, es (ver Sira (2006)),

$$\begin{cases} L \frac{di}{dt} = (a - 1)v + V_{REC}, a \in [0, 1] \\ C \frac{dv}{dt} = (1 - a)i - \frac{v}{R} \end{cases} \quad (6)$$

donde  $V_{REC}$  es el voltaje trifásico rectificado,  $i$  es la corriente de la inductancia  $L$ ,  $v$  es el voltaje del capacitor  $C$  y  $a$  es el ciclo de trabajo o fracción de tiempo en que el transistor  $S$  permanece cerrado. En el modelo discontinuo,  $a$  toma valores discretos 0 o 1 y en el modelo de promedios  $a \in [0, 1]$  es una función del tiempo suave. Si  $a \rightarrow 1$  o  $a \rightarrow 0$  entonces se transfiere mucha energía a  $L$  o  $C$ , respectivamente, obteniéndose una eficiencia adecuada para  $a = 2/3$  (ver cap. 4 de Idárraga (2023)).

Los valores en estado estacionario de la Ec. (6) son,

$$\begin{cases} v_{ss} = \frac{V_{REC}}{1 - a} \\ i_{ss} = \frac{v_{ss}}{(1 - a)R} = \frac{V_{REC}}{(1 - a)^2 R} \end{cases} \quad (7)$$

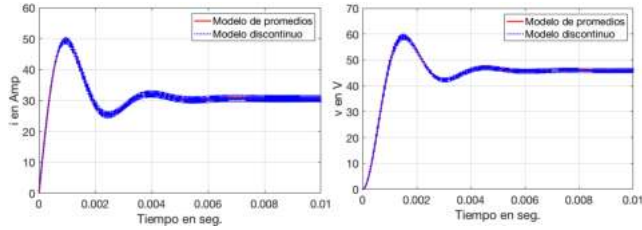


Fig. 6.  $i$  y  $v$  de los modelos de promedios y discontinuo del convertidor elevador

Por lo que se propone el punto de operación,

$$\left. \begin{array}{l} V_{REC} = E \\ a = D \end{array} \right\} \Rightarrow x_0 := \frac{E}{1-D} \begin{bmatrix} \frac{1}{(1-D)R} \\ 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

La Fig. 6 muestra la comparación en lazo abierto de los modelos de promedios y discontinuo obtenido de la biblioteca powerlib de MatLab-Simulink, considerando  $L = 250 \times 10^{-6}$  H,  $C = 200 \times 10^{-6}$  F,  $R = 3 \Omega$ , condiciones iniciales cero, esto es,  $i(0) = 0$  y  $v(0) = 0$ , entradas constantes respecto del tiempo, i.e.,  $V_{REC} = 23$  V y  $a = 0.5$  y punto de operación,  $D = 0.5$  y  $E = 24$  V. La Fig. 6 muestra que el modelo de promedios captura la dinámica lenta del modelo discontinuo, y el modelo discontinuo presenta oscilaciones de alta frecuencia de baja amplitud. El comportamiento transitorio de los modelos se separa si sus condiciones iniciales son diferentes. Acorde a la Ec. (7), en la Fig. 6,  $v_{ss} = 46$  V e  $i_{ss} = 30.6$  A. En lazo abierto  $i_{ss}$  de  $L$  es diferente a la corriente de la carga  $v_{ss}/R$ .

## 2. CONTROL DEL CONVERTIDOR ELEVADOR

Para una pequeña turbina eólica de 600 W operando en modo aislado, se considera el modelo de promedios del convertidor elevador y,

**Suposición 1.** Se consideran perturbaciones e incertidumbres de norma dos e infinito acotadas, respectivamente.

Las perturbaciones son los cambios en las condiciones ambientales, principalmente en el viento, y cambios en la carga conectada, y las incertidumbres se deben a las diferencias entre los modelos y parámetros considerados respecto al sistema físico.

La Fig. 7 muestra el sistema de control del lado del generador. Un aerogenerador tiene curvas características de la potencia eléctrica generada  $P = vi$  respecto a  $w_r$  a diferentes  $v_w$ . El objetivo del algoritmo de SPMP mostrado en la Fig. 7 es determinar la corriente de referencia  $I_{CCref}$ , en base a mediciones de  $V_{REC}$  y de la corriente directa  $I_{CC}$ , cambiando así el  $T_e$  de referencia, tal que  $P$  sea máxima acorde a su curva característica. En seguida se muestra el sistema de control de corriente propuesto en el cap. 4 de Idárraga (2023) y después el algoritmo de SPMP-DG.

### 2.1 Regulación de corriente de un convertidor elevador

Se agrega el análisis en estado estacionario al resultado del cap. 4 de Idárraga (2023) en,

**Lema 1.** Considere el modelo no lineal de promedios del convertidor elevador dado en la Ec. (6) y que se satisface <https://doi.org/10.58571/CNCA.AMCA.2024.047>

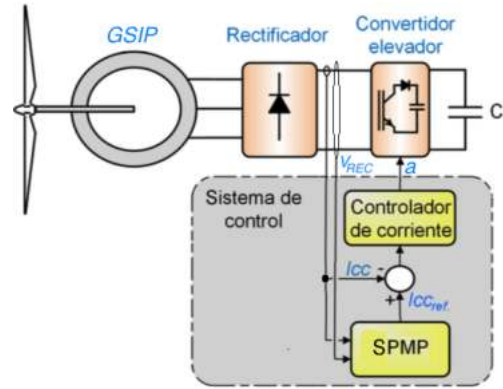


Fig. 7. Control del lado del GSIP

la *Suposición 1*. Sean  $\alpha, \beta > 0$  y  $K$  parámetros de control y  $\bar{V}_{REC}$  una nueva entrada de voltaje. Si,

$$i\bar{V}_{REC} < \alpha i^2 + \frac{v^2}{R} \quad (9)$$

Entonces, la compensación de corriente y la ley de control,

$$\begin{aligned} V_{REC} &= \bar{V}_{REC} - \alpha i - \beta \frac{di}{dt} \\ a &= K(i_r - i) \end{aligned} \quad (10)$$

garantiza estabilidad asintótica en el sentido de Lyapunov para el sistema en lazo cerrado, esto es,  $i \rightarrow i_r$ , donde  $i_r$  es la corriente de referencia. Además, el estado estacionario es,

$$\begin{aligned} v_{ss} &= \bar{V}_{REC} - \alpha i_{ss} \\ i_{ss} &= \frac{v_{ss}}{R} \end{aligned} \quad (11)$$

**Prueba.** Ver prueba de estabilidad en el cap. 4 de Idárraga (2023). Además, dado que el sistema compensado en lazo cerrado es,

$$\begin{aligned} (L + \beta) \frac{di}{dt} &= [K(i_r - i) - 1]v + \bar{V}_{REC} - \alpha i \\ C \frac{dv}{dt} &= [1 - K(i_r - i)]i - \frac{v}{R} \end{aligned} \quad (12)$$

cuando  $i \rightarrow i_r$ , el estado estacionario del sistema compensado en lazo cerrado es la Ec. (11).  $\square$

A diferencia del sistema en lazo abierto, en el sistema compensado en lazo cerrado, del Lema 1,  $i_{ss} = v_{ss}/R = i_r$ , por lo que  $i_r$  especifica la corriente de la carga. Además, en la ley de control del Lema 1,  $\beta \frac{di}{dt}$  compensa los cambios de  $V_{REC}$ , atenuado los cambios escalonados de  $V_{REC}$ . Más aún, en el sistema en lazo cerrado no cambia la sensibilidad ante variaciones de  $C$  o  $R$  respecto al sistema en lazo abierto, mientras que si se logra atenuar las variaciones de  $L$  debido a que,

$$\left. \frac{\partial di}{\partial L} \right|_{L=L_0} = \frac{[1 - K(i_r - i)]v - V_{REC} + \alpha i}{(L_0 + \beta)^2} \quad (13)$$

disminuye conforme  $\alpha$  decrece o  $\beta$  se incrementa, donde  $L_0$  es un valor nominal de  $L$ . Alternativamente, se pueden utilizar control basado en modos deslizantes o control robusto.

La Fig. 8 muestra la implementación de la ley de control del Lema 1 y la Fig. 9 muestra la corriente y el voltaje de los modelos discontinuo obtenido de la biblioteca powerlib de MatLab-Simulink, y de promedios dada por la Ec. (6)

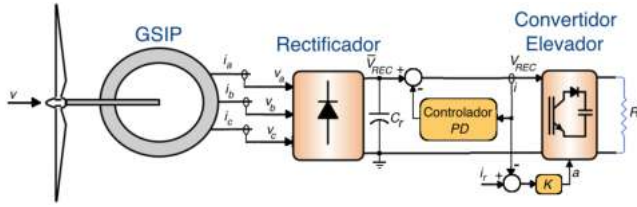


Fig. 8. Esquema de Control de Corriente

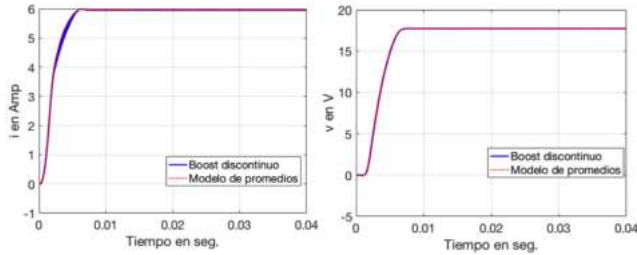


Fig. 9.  $i$  y  $v$  de los modelos discontinuo y de promedios del convertidor elevador con compensación y control de corriente

del convertidor elevador con compensación y control de corriente, donde  $i(0) = 0$ ,  $v(0) = 0$ ,  $K = 0.2$ ,  $\alpha = 1$ ,  $\beta = 0$ ,  $i_r = 6$  A,  $L = 250 \times 10^{-6}$  H,  $C = 200 \times 10^{-6}$  F,  $R = 3 \Omega$  y  $V_{REC} = 23.55$  V. La Fig. 9 muestra que el sistema compensado en lazo cerrado es estable, las curvas de voltaje y corriente son suaves y sin sobre impulsos, y  $i_{ss} = v_{ss}/R = i_r = 6$  A, por lo que  $v_{ss} = 18$  V.

La Fig. 10 muestra  $V_{REC}$ , y  $v$  y  $i$  del aerogenerador conectado al convertidor elevador con la compensación y control de corriente del Lema 1, donde  $v_w = 13$  m/s,  $i(0) = 0$ ,  $v(0) = 0$ ,  $K = 0.01$ ,  $\alpha = 0.15$ ,  $\beta = 0.1$ ,  $i_r = 6$  A,  $C_r = 200 \times 10^{-6}$  F,  $R = 3 \Omega$  y la frecuencia de conmutación del PWM es  $20 \times 10^3$ . En la Fig. 10, las curvas de voltaje y corriente son suaves y sin sobre impulsos,  $i_{ss} = i_r = 6$  A y  $v_{ss} = 18$  V, a pesar de las variaciones escalonadas de  $V_{REC}$ . Además,  $a$  no se satura por lo que a la salida del PWM los anchos de los pulsos van disminuyendo suavemente. Además, en la Fig. 11 se muestra la comparación de  $i$  y  $P$  con tres  $v_w$ , cuando el viento es débil  $P$  es pobre y el sistema de control no logra que  $i$  siga a  $i_r$  para una carga dada.

## 2.2 Seguimiento del Punto Máximo de Potencia

El algoritmo de SPMP mostrado en la Fig. 7 determina la corriente de referencia  $I_{CC_{ref}}$ , en base a mediciones de  $V_{REC}$  y de la corriente directa  $I_{CC}$ , tal que  $P$  sea máxima acorde a su curva característica. El algoritmo de SPMP-DG se basa en el algoritmo de Perturbar y Observar con la diferencia de que el paso  $s$  es variable, por lo que reduce las oscilaciones y el tiempo de respuesta en comparación de algoritmos con un valor de  $s$  fijo como lo es el Perturbar y Observar (ver Bhatnagar (2013)). El algoritmo de SPMP-DG calcula de forma iterativa la siguiente posición más cercana al Punto de Potencia Máxima (PPM) utilizando el gradiente del punto actual y  $s = K_1 \Delta P / \Delta V$ , con este paso entre mayor sea el gradiente como lo es en los puntos más alejados al PPM más grande es  $s$  y conforme se aproxime más al PPM el gradiente es menor y por lo tanto  $s$  es más pequeño esto reduce las oscilaciones y el tiempo

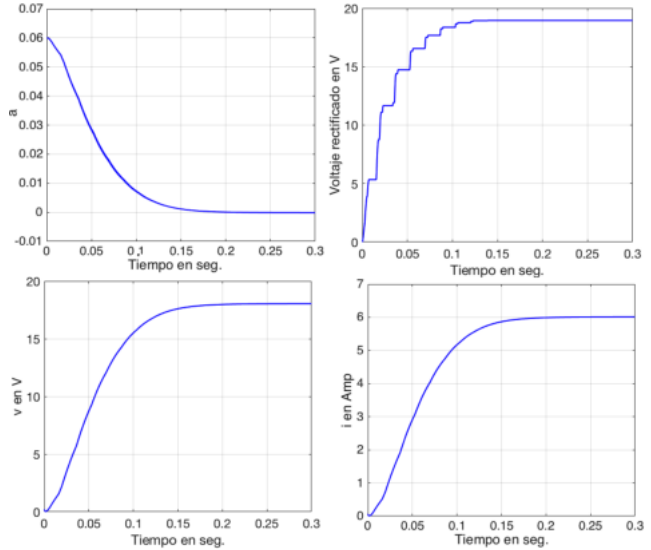


Fig. 10.  $a$ ,  $V_{REC}$ , y  $v$  e  $i$  del aerogenerador conectado al convertidor elevador con compensación y control de corriente

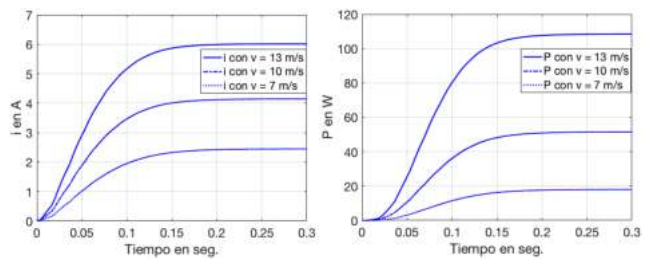


Fig. 11.  $i$  y  $P$  del aerogenerador conectado al convertidor elevador con compensación y control de corriente

de respuesta en comparación de algoritmos con un valor de  $s$  fijo. Debido a que al comienzo del algoritmo los  $s$  son muy grandes, se puede generar muchas oscilaciones, y además al mantener un valor de  $K_1$  constante durante todo el proceso puede hacer que el algoritmo sea más lento y menos eficiente. Así,  $K_1$  variable se propone en Bhatnagar (2013), donde  $s$  es,

$$s = K_2 \left( e^{|\frac{\Delta P}{\Delta V}|} - 1 \right)^n, \quad 0 < n < 1 \quad (14)$$

siendo  $K_2$  un valor constante que funciona como un valor para escalar  $s$ . El algoritmo termina cuando  $|\frac{\Delta P}{\Delta V}| \leq \epsilon$ , donde  $0 < \epsilon \ll 1$ . Alternativamente, un algoritmo difuso adaptable se propone en Sabzevari (2017).

El diagrama de flujo para el algoritmo SPMP-DG, se muestra en la Fig. 12, donde  $P_k$  es  $P$  actual medida, cuando  $\frac{\Delta P}{\Delta V} < 0$  o  $\frac{\Delta P}{\Delta V} > 0$  la corriente de referencia  $i_r$  se disminuye o incrementa, respectivamente, acorde a  $s$ , y si  $\frac{\Delta P}{\Delta V} = 0$  entonces  $i_r$  no cambia. Se aplica la compensación corriente y ley de control del Lema 1 y se utiliza el algoritmo de SPMP-DG con  $s$  dado por la Ec. (14) de la Fig. 12 para proporcionar la referencia de corriente en el esquema de la Fig. 7, con  $n = 0.3$ ,  $K_2 = 0.00001$  y  $\epsilon = 0.02$ .  $V_{REC}$  es igual al mostrado en la Fig. 10. La Fig. 13 muestra impulsos de  $a$  con  $v_w = 13$  m/s, que se salen del rango  $[0, 1]$  en multiples ocasiones, por lo que los anchos de pulso a la salida del PWM cambian entre valores 1 y 0 acordes a estos impulsos. La comparación de  $i$ ,  $v$  y  $P$

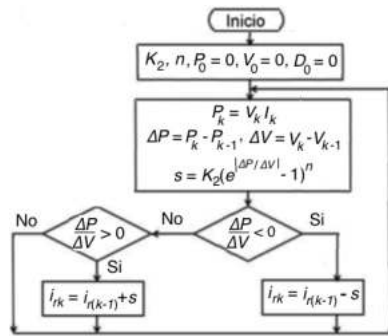


Fig. 12. Diagrama de flujo del algoritmo SPMP-DG

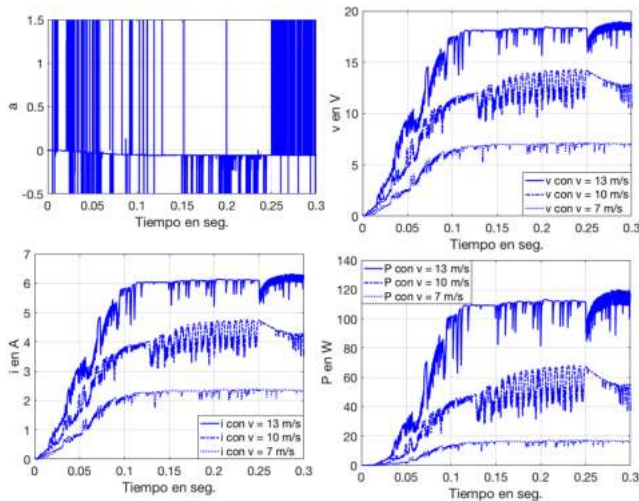


Fig. 13.  $a$ ,  $v$ ,  $i$  y  $P$  del aerogenerador conectado al convertidor elevador con compensación de corriente y algoritmo SPMP-DG

generada con 3  $v_w$  se muestra en la Fig. 13. Se observa un incremento en el valor promedio de las magnitudes de  $i$  y de  $P$  cuando  $0.15 < t < 0.25$ , comparado con las de la Fig. 11, sobretodo con  $v_w = 10$  m/s. El precio a pagar son las oscilaciones de alta frecuencia, aunque el comportamiento promedio de  $i$ ,  $v$  y  $P$  es semejante a los de la Fig. 11, ante los cambios escalonados de  $V_{REC}$ .

### 3. CONCLUSIONES

Los modelos que se presentaron del rotor y del aerogenerador son útiles para el diseño de aerogeneradores, permitiendo simular su comportamiento para diferentes velocidades del viento o parámetros del rotor o del GSIP. El sistema de control del convertidor elevador, de corriente con compensación y con algoritmo de Seguimiento del Punto Máximo de Potencia de descenso de gradiente, garantizan estabilidad del sistema en lazo cerrado, aseguran que la corriente suministrada a la carga siga a una referencia de corriente especificada y tienen buen desempeño. Las curvas de corriente y voltaje generadas son suaves ante cambios escalonados del voltaje rectificado. El desempeño se preserva en un rango de velocidades del viento, sin embargo si el viento es débil la potencia generada es pobre y el sistema de control no logra que la corriente siga a la referencia para una carga dada. Algunos trabajos posteriores son por ejemplo, considerar modelos del viento basados en datos reales, el sistema de control del ángulo

de desviación e implementar y validar los algoritmos de control en el sistema físico.

### REFERENCES

A. Ahmad. (2021). Increase in frequency of nuclear power outages due to changing climate. *Nature Energy*, 6, 755–762.

T. Ackermann. (2005). *Wind Power in Power Systems*, John Wiley Sons, London, UK.

G. Idárraga y A. Romero. (2023). *Integración y Análisis de pequeñas turbinas eólicas en entornos urbanos*, Red CYTED. Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo, <http://eprints.uanl.mx/id/eprint/26726>

V.L. Okulov y G.A.M. van Kuik. (2009). The Betz-Joukowski limit for the maximum power coefficient of wind turbines. *Int. Scientific J. for Alternative Energy and Ecology*, (9), 106–111. <http://isjaee.hydrogen.ru/?pid=1845>.

S. De Zutter, et al. (2017). Modeling of active yaw systems for small and medium wind turbines. *Int. Universities Power Engineering Conference*.

A.E. Orozco. (2020). Control basado en pasividad de un aerogenerador de velocidad variable modelado en gráficas de ligadura. *tesis de maestría, FIME, UANL*.

T. Bakka y H. Reza. (2011). Wind turbine modeling using the bond graph. *IEEE Int. Symposium on Computer-Aided Control System Design*, 1208–1213.

G. Gonzalez y V. Lopez. (2017). Modelling and Simulation of a Skystream Wind Turbine in a Bond Graph Approach. *IASTED Int. Conf. Modelling, Identification and Control*, 55–62.

R. Galindo, Y. Martínez y N. Villa. (2021). Bond Graph Methodology Based on the Position of the Centers of Mass Applied to Small Wind Turbines. *Congreso Nacional de Control Automático*.

J.F. Gieras y M. Wing. (2002). *Permanent magnet motor technology*, Dekker, New York.

I.A. Muñoz. (2022). Modelado y validación de las dinámicas del movimiento alrededor del eje vertical de un aerogenerador. *tesis de licenciatura, FIME, UANL*.

H. Sira y R. Silva. (2006). Modelling of DC-to-DC Power Converters, capítulo en *Power Systems*, 11–58, Springer, London.

D. Ajesam, B. Damien y E. Nyuysever. (2022). Maximum Power Point Tracking Using the Incremental Conductance Algorithm for PV Systems Operating in Rapidly Changing Environmental Conditions. *Smart grid and renewable energy*, 13(05), 89–108, doi: 10.4236/sgre.2022.135006

R. Galindo y N. Villa. (2019). GMPP Tracking based on Model Reference LPV Control for a PV System with Buck Converter Modelled on BG. *Asian J. of Control*, Wiley, 21, 1918–1926, doi: 10.1002/asjc.2132

P. Bhatnagar y R.K. Nema. (2013). Maximum power point tracking control techniques: State-of-the-art in photovoltaic applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 23, 224–241, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.02.011>

S. Sabzevari, et al. (2017). MPPT control of wind turbines by direct adaptive fuzzy-PI controller and using ANN-PSO wind speed estimator. *J. of Renewable and Sustainable Energy*, 9.