

# Modeling and Simulation of Wind Energy Systems with Matrix and Multilevel Power Converters

R. Melício, V. M. F. Mendes, J. P. S. Catalão

**Abstract**— This paper is concerned with modeling and simulation in Matlab/Simulink of wind energy systems with different topologies for the power converters: matrix converter and multilevel converter. We use pulse modulation by space vector modulation associated with sliding mode for controlling the converters, and we introduce power factor control at the output of the converters. Finally, we present the electric behavior for the power and the current at the input and at the output of the converters.

**Keywords**— modeling and simulation, power converters, wind energy.

## I. NOMENCLATURA

Lista de símbolos:

$P_m$	Potencia mecánica que el viento transmite al eje de la turbina.
$\rho$	Densidad del aire.
$A$	Sección barrida por el rotor de la turbina.
$u$	Velocidad del viento.
$c_p$	Coefficiente de potencia.
$\theta$	Ángulo de paso de pala.
$\lambda$	Coefficiente de velocidad específica.
$\omega_m$	Velocidad de giro de la turbina.
$J_m$	Momento de inercia de la turbina.
$T_m$	Par mecánico.
$T_{dm}$	Par resistente en el cojinete de la turbina.
$T_{am}$	Par resistente en el buje y palas debido a la viscosidad del aire.
$T_{elas}$	Par debido al acoplamiento entre las masas rotativas correspondientes a la turbina y a la máquina eléctrica.
$\omega_e$	Velocidad de giro de la máquina eléctrica.
$J_e$	Momento de inercia de la máquina eléctrica.
$T_{de}$	Par resistente en el cojinete de la máquina eléctrica.
$T_{ae}$	Par resistente en la máquina eléctrica debido a la viscosidad del aire.
$T_e$	Par electromagnético.
$i_f$	Corriente equivalente de rotor.
$M$	Inductancia mutua.

$i_d, i_q$	Corrientes del estator.
$L_d, L_q$	Inductancias del estator.
$R_d, R_q$	Resistencias del estator.
$u_d, u_q$	Tensiones del estator.
$i_\alpha, i_\beta$	Corrientes de fase.
$u_\alpha, u_\beta$	Tensiones por fase.

## II. INTRODUCCIÓN

La reestructuración del sector eléctrico ha ofrecido mayor flexibilidad en los niveles de generación y consumo de energía eléctrica. Además, ha tenido un fuerte impacto en el sector de la producción y transporte de energía. Con la evolución de las tecnologías de generación distribuida se han abierto nuevas perspectivas para estas empresas [1], ya que pueden predecir su cartera de suministros de energía con cierta adecuación y ventaja. La adecuación y ventaja en el suministro de energía es debida a una mejor mezcla en la generación eléctrica (tradicional y distribuida), considerando no sólo desde una perspectiva económica tradicional, sino también debido a la evolución política con fuerte impacto social, lo que impone la internalización de costes anteriormente externalizados.

La generación distribuida ofrece una energía limpia y sin emisiones contaminantes, y en los últimos años ha tomado una importancia creciente, con incidencia cada vez mayor en los sistemas eléctricos. La generación distribuida incluye las matrices de paneles solares fotovoltaicos, los parques eólicos, las centrales hidroeléctricas, las plantas de biomasa y las plantas de energía mareomotriz. De entre la generación distribuida, la eólica es la más visible en la producción de energía eléctrica, incluso se prevé que en un futuro próximo compita con la generación térmica tradicional.

La Comisión Europea preocupada con el cambio climático, debido a la emisión de gases de efecto invernadero, ha presentado una serie de propuestas para crear una nueva política energética para Europa, la reducción de sus emisiones de CO<sub>2</sub> en un 20% en 2020 y un 50% hasta 2050, basada en el aumento de la proporción de fuentes de energía renovable en la producción total de energía eléctrica.

Por lo tanto, se espera que la energía eólica sea una parte importante de la futura política energética para Europa. En Portugal, la capacidad instalada de potencia eólica para la producción de energía eléctrica llegó a 2170 MW en Febrero de 2008, y sigue creciendo.

El crecimiento de la incidencia de generación eólica va a

R. Melício y J. P. S. Catalão son de la Universidad de Beira Interior, Covilhã, Portugal (correos e.: ruimelicio@gmail.com; catalao@ubi.pt).

V. M. F. Mendes es del Instituto Superior de Ingeniería de Lisboa, Lisboa, Portugal (correo e.: vfmendes@isiel.pt).

cambiar considerablemente el comportamiento dinámico del sistema eléctrico [2], y puede dar lugar a una nueva estrategia de regulación de la frecuencia del sistema [3]. Además, los operadores de la red deben asegurar a los consumidores que la calidad de la energía suministrada no se vea comprometida [4]. Por lo tanto, con el aumento de la penetración de energía eólica surgen nuevos problemas técnicos, como la estabilidad dinámica y la calidad de energía. Lo que implica investigación de modelos matemáticos de sistemas eólicos más realistas, a objeto de que la generación con la eólica adopte un comportamiento lo más parecido posible a la generación tradicional, con una adecuada respuesta que no ponga en riesgo la estabilidad del sistema y la calidad de la energía.

Los convertidores electrónicos de potencia han sido desarrollados para permitir la integración de los sistemas eólicos de velocidad variable en la red eléctrica, con el consecuente aumento en la extracción de energía del viento [5]. En la operación con turbinas de velocidad variable, el método de control está diseñado para extraer la máxima potencia del sistema y proporcionar en la red tensión y frecuencia constantes [6]-[7].

Este artículo aborda la modelación y simulación en Matlab/Simulink de sistemas de energía eólica con diferentes topologías para los convertidores de potencia: matricial y multinivel. Se emplean técnicas de modulación vectorial mediante vectores espaciales asociado con el modo de deslizamiento para controlar los convertidores. En la salida de los convertidores la energía que se entrega a la red eléctrica es con factor de potencia controlable. Finalmente, se presenta el comportamiento eléctrico de la potencia y de la corriente en la salida de los convertidores.

### III. MODELACIÓN

#### A. Turbina y Máquina Eléctrica

La potencia mecánica de la turbina es dada por:

$$P_m = \frac{1}{2} \rho A u^3 c_p \quad (1)$$

El coeficiente de potencia es función del ángulo de paso de pala y del coeficiente de velocidad específica. El coeficiente de velocidad específica representa la interacción entre el rotor y la velocidad del viento, es decir, se define como el cociente entre la velocidad de la punta de la pala y la velocidad del viento. El coeficiente de potencia define el comportamiento de la turbina, requiere el uso de la teoría del elemento de pala y el conocimiento de la geometría de los perfiles aerodinámicos de la pala. Consideramos la geometría de la pala usando la aproximación numérica propuesta en [8].

Así, el coeficiente de potencia es dado por:

$$c_p = 0.73 \lambda_i e^{-\frac{18.4}{\lambda_{ii}}} \quad (2)$$

donde  $\lambda_i$  y  $\lambda_{ii}$  son dados respectivamente por:

$$\lambda_i = \frac{151}{\lambda_{ii}} - 0.58 \theta - 0.002 \theta^{2.14} - 13.2 \quad (3)$$

$$\lambda_{ii} = \frac{1}{\frac{1}{\lambda - 0.02 \theta} - \frac{0.003}{(\theta^3 + 1)}} \quad (4)$$

El coeficiente de potencia en función del coeficiente de velocidad específica se ilustra en la Fig. 1.

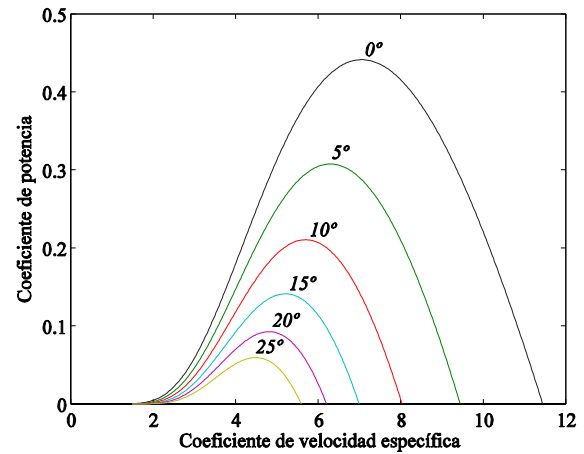


Fig. 1. Familia de curvas del coeficiente de potencia.

El valor máximo del coeficiente de potencia se verifica para un ángulo nulo de paso de la pala:

$$c_{p \max} = 0.4412 \quad (5)$$

El coeficiente óptimo de velocidad específica es el valor del coeficiente de velocidad específica para el máximo del coeficiente de potencia:

$$\lambda_{opt} = 7.057 \quad (6)$$

La potencia mecánica que el viento transmite al eje de la turbina es modelada por las expresiones (1) a (4).

El sistema de transmisión considerado es el modelo de dos masas, que consiste en acoplar mediante una rigidez torsional las masas rotativas correspondientes a la turbina y a la máquina eléctrica, es dado por:

$$\frac{d\omega_m}{dt} = \frac{1}{J_m} (T_m - T_{dm} - T_{am} - T_{elas}) \quad (7)$$

$$\frac{d\omega_e}{dt} = \frac{1}{J_e} (T_{elas} - T_{de} - T_{ae} - T_e) \quad (8)$$

La máquina síncrona de imanes permanentes, o "Permanent Magnet Synchronous Machine" PMSM, constituye una de las alternativas más interesantes en los sistemas eólicos de velocidad variable. Las ecuaciones dinámicas que modelan esta máquina están disponibles en la literatura; usando la convención motor, se consideran las siguientes ecuaciones [9]:

$$\frac{di_d}{dt} = \frac{1}{L_d} (u_d + p\omega_e L_q i_q - R_d i_d) \quad (9)$$

$$\frac{di_q}{dt} = \frac{1}{L_q} [u_q - p\omega_e (L_d i_d + M i_f) - R_q i_q] \quad (10)$$

En la máquina eléctrica se impone un factor de potencia unitario, lo que implica una potencia reactiva nula  $Q_e$ . Así, la potencia electromagnética es dada por:

$$P_e = [u_d \ u_q \ u_f][i_d \ i_q \ i_f]^T \quad (11)$$

La potencia entregada a la red eléctrica de tensión y frecuencia constantes, caracterizada por  $P$  y  $Q$  en el modelo  $\alpha\beta$  [10] son dadas por:

$$\begin{bmatrix} P \\ Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_\alpha & u_\beta \\ -u_\beta & u_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (12)$$

La potencia aparente entregada a la red eléctrica [10] es dada por:

$$S = (P^2 + Q^2 + H^2)^{1/2} \quad (13)$$

donde  $H$  es la potencia armónica.

### B. Convertidor Matricial

La configuración del sistema eólico con convertidor matricial que será simulada se presenta en la Fig. 2.

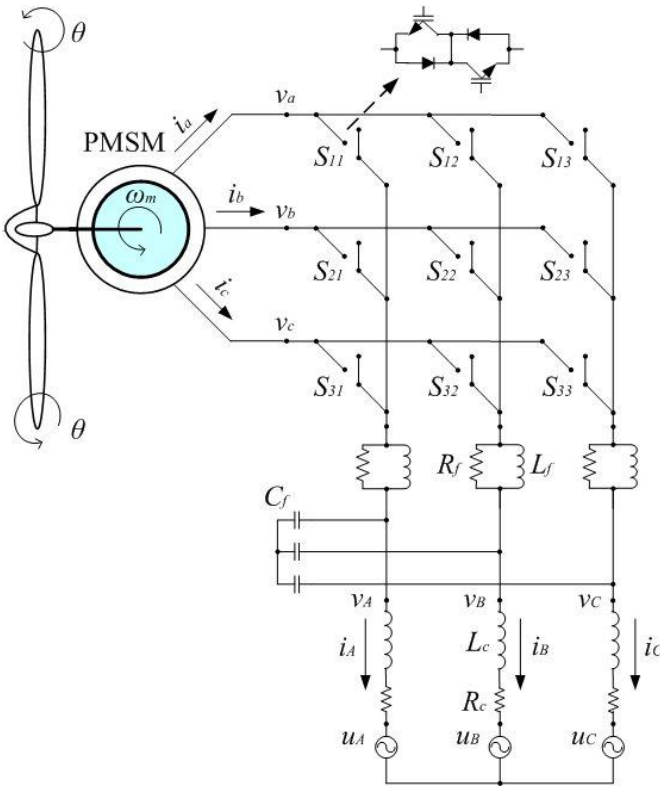


Fig. 2. Sistema eólico con convertidor matricial.

El convertidor matricial es del tipo AC/AC, es definido como una asociación de nueve IGBT's bidireccionales, comandados  $S_{ij}$ . El convertidor está conectado entre la máquina eléctrica y el filtro de segundo orden. Por su parte, el filtro de segundo orden está conectado a la red eléctrica. El filtro de segundo orden es equivalente a una carga inductiva, para evitar la interrupción de las corrientes de salida del convertidor. La red eléctrica es simétrica y equilibrada, siendo modelada como una impedancia en serie con una fuente de tensión constante.

Para modular el convertidor matricial se considera que: 1) los diodos son ideales: en conducción es nula la caída de tensión en sus terminales y en bloqueo es nula la corriente que pasa; 2) los elementos de la matriz de comando del convertidor son interruptores bidireccionales en tensión y corriente; 3) las variables de comando  $S_{ij}$  para cada  $i$  tienen para un  $j$  el valor uno, es decir, corresponde a un interruptor en conducción, para mantener la continuidad de la corriente en cada fase; 4) las variables de comando  $S_{ij}$  para cada  $j$  tienen para un  $i$  el valor uno, es decir, corresponde a un interruptor en conducción, para mantener la continuidad en la tensión entre fases [11]. Las variables de comando de los IGBT's  $S_{ij}$  son dadas en función de los estados de conducción y bloqueo, así:

$$S_{ij} = \begin{cases} 1, & (\text{conducción}) \\ 0, & (\text{bloqueo}) \end{cases}; \quad i, j \in \{1, 2, 3\} \quad (14)$$

Las consideraciones 3) y 4) se expresan por las restricciones (15) de las variables de comando  $S_{ij}$ .

$$\begin{aligned} \sum_{j=1}^3 S_{ij} &= 1 & \text{con } i \in \{1, 2, 3\} \\ \sum_{i=1}^3 S_{ij} &= 1 & \text{con } j \in \{1, 2, 3\} \end{aligned} \quad (15)$$

El vector de las tensiones de fase de salida está relacionado con el vector de las tensiones de fase de entrada del convertidor a través de la matriz de comando, dado por:

$$\begin{bmatrix} v_A \\ v_B \\ v_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = [S] \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} \quad (16)$$

El vector de las corrientes de salida está relacionado con el vector de las corrientes de entrada del convertidor a través de la matriz de comando, dado por:

$$[i_a \ i_b \ i_c]^T = [S]^T [i_A \ i_B \ i_C]^T \quad (17)$$

donde (14) a (17) modelan el convertidor matricial.

### C. Convertidor Multinivel

La configuración del sistema eólico con convertidor multinivel que será simulada se presenta en la Fig. 3.

El convertidor multinivel es del tipo AC/DC/AC, el rectificador es una asociación de doce IGBT's unidireccionales, comandados  $S_{ik}$ . En el inversor la constitución es la misma. Esta configuración del convertidor multinivel también es conocida con el nombre de "Neutral Point Clamped". El rectificador está conectado entre la máquina eléctrica y los bancos de condensadores. El rectificador está conectado entre la máquina eléctrica y los bancos de condensadores. El inversor está conectado entre los bancos de condensadores y un filtro de segundo orden. Por su parte, el filtro de segundo orden está conectado a la red eléctrica.

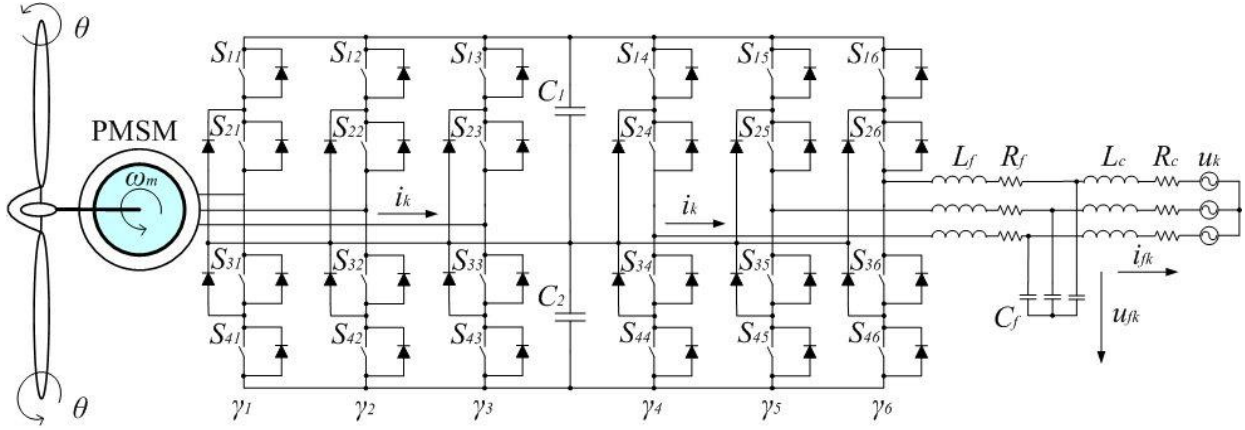


Fig. 3. Sistema eólico con convertidor multinivel.

La red eléctrica es simétrica y equilibrada, siendo modelada como una impedancia en serie con una fuente de tensión constante. Los grupos de cuatro IGBT's conectados a la misma fase constituyen el brazo  $k$  del convertidor. Para modular el convertidor multinivel se considera que: 1) los IGBT's son ideales y unidireccionales, nunca estarán sujetos a tensiones inversas, siendo esta situación garantizada por la topología de conexión de los diodos en antiparalelo; 2) los diodos son ideales: en conducción es nula la caída de tensión en sus terminales y en bloqueo es nula la corriente que pasa; 3) la tensión continua en la salida del rectificador debe ser siempre  $v_{dc} > 0$ ; 4) cada brazo  $k$  del convertidor debe tener siempre funcionando dos IGBT's. Para la función de conmutación de cada IGBT, se utiliza la variable de conmutación  $\gamma_k$  para identificar el estado de conducción o bloqueo del IGBT  $i$  en el brazo  $k$  del convertidor. El índice  $i$  con  $i \in \{1,2,3,4\}$  identifica el IGBT. El índice  $k$  con  $k \in \{1,2,3\}$  identifica los brazos del rectificador y  $k \in \{4,5,6\}$  identifica los brazos del inversor. Las tres condiciones válidas para la variable de conmutación de cada brazo  $k$  son dadas por:

$$\gamma_k = \begin{cases} 1, & (S_{1k} \text{ y } S_{2k}) = 1 \\ 0, & (S_{2k} \text{ y } S_{3k}) = 1 \\ -1, & (S_{3k} \text{ y } S_{4k}) = 1 \end{cases} \quad k \in \{1, \dots, 6\} \quad (18)$$

La restricción topológica para el brazo  $k$  es dada por:

$$(S_{1k} S_{2k}) + (S_{2k} S_{3k}) + (S_{3k} S_{4k}) = 1 \quad k \in \{1, \dots, 6\} \quad (19)$$

Los dos IGBT's superiores de cada brazo  $k$  ( $S_{1k}$  y  $S_{2k}$ ) del convertidor están asociados a una variable de conmutación  $\Gamma_{1k}$ , y los dos IGBT's inferiores ( $S_{3k}$  y  $S_{4k}$ ) están asociados a una variable de conmutación  $\Gamma_{2k}$ , respectivamente, dadas por:

$$\Gamma_{1k} = \frac{\gamma_k(1 + \gamma_k)}{2} ; \quad \Gamma_{2k} = \frac{\gamma_k(1 - \gamma_k)}{2} \quad k \in \{1, \dots, 6\} \quad (20)$$

Así, las variables de conmutación dependen de los estados de conducción o bloqueo de los IGBT's. Las corrientes inyectadas a la red eléctrica son modeladas por la ecuación de estado:

$$\frac{di_{fk}}{dt} = \frac{1}{L_c} (u_{fk} - R_c i_{fk} - u_k) \quad k = \{4,5,6\} \quad (21)$$

La tensión continua en la salida del rectificador, es la suma de las tensiones en los bancos de condensadores  $C_1$  y  $C_2$ , es modelada por la ecuación de estado:

$$\frac{dv_{dc}}{dt} = \frac{1}{C_1} \left( \sum_{k=1}^3 \Gamma_{1k} i_k - \sum_{k=4}^6 \Gamma_{1k} i_k \right) + \frac{1}{C_2} \left( \sum_{k=1}^3 \Gamma_{2k} i_k - \sum_{k=4}^6 \Gamma_{2k} i_k \right) \quad (22)$$

(18) a (22) son las ecuaciones para el modelo de convertidor multinivel o "Neutral Point Clamped Converter" para aplicaciones en alta tensión y grandes potencias [12].

#### IV. MÉTODO DE CONTROL

Los controladores empleados son del tipo PI. Los convertidores se consideran estructuras variables resultado de la conmutación conducción/bloqueo de los IGBT's. Para controlar los convertidores se emplean técnicas de modulación vectorial mediante vectores espaciales SVM asociado con el modo de deslizamiento. El modo de deslizamiento es importante, porque garantiza la elección de los vectores espaciales de la forma más adecuada.

Los vectores espaciales de tensión para el convertidor matricial en el plano  $\alpha\beta$  se ilustran en la Fig. 4.

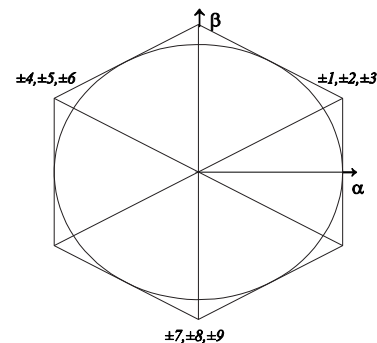


Fig. 4. Vectores espaciales de tensión, convertidor matricial.

Los vectores espaciales de corriente de entrada para el convertidor matricial en el plano  $\alpha\beta$  se ilustran en la Fig. 5.

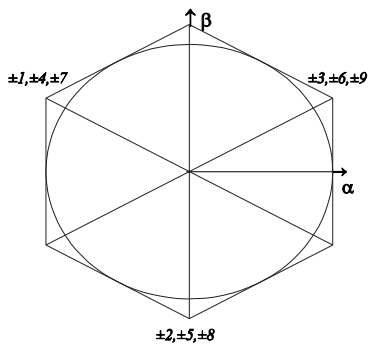


Fig. 5. Vectores espaciales de corriente de entrada, convertidor matricial.

Los vectores espaciales de tensión para el convertidor multinivel en el plano  $\alpha\beta$  se ilustran en la Fig. 6.

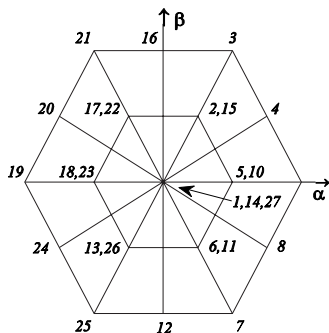


Fig. 6. Vectores espaciales de tensión, convertidor multinivel.

Los semiconductores de potencia presentan limitaciones físicas, debido a que no pueden conmutar a frecuencias infinitas. Es el caso que, para un determinado valor de frecuencia de conmutación, va a existir un error  $e_{\alpha\beta}$  entre el valor de la grandeza de referencia y el valor de la grandeza que se pretende controlar. Así, se garantiza que el sistema desliza sobre una superficie de deslizamiento  $S(e_{\alpha\beta}, t)$  cerca de la trayectoria de estado descrita por la superficie que verifica la condición de estabilidad del modo de deslizamiento [11] dada por:

$$S(e_{\alpha\beta}, t) \frac{dS(e_{\alpha\beta}, t)}{dt} < 0 \quad (23)$$

Como los semiconductores solo pueden conmutar a frecuencias finitas, en la práctica se considera un cambio en la estrategia de conmutación, es decir, se permite un pequeño error  $\varepsilon > 0$  para la  $S(e_{\alpha\beta}, t)$  dado por:

$$-\varepsilon < S(e_{\alpha\beta}, t) < +\varepsilon \quad (24)$$

La implementación práctica de la estrategia de conmutación considerada en (24) se logra utilizando comparadores de histéresis.

En el caso del convertidor matricial las tensiones de salida del convertidor no son variables de estado. Así, siendo la

frecuencia de conmutación de los IGBT's muy superior a la frecuencia fundamental de la red eléctrica, se considera que durante un periodo de conmutación  $T_s$  el valor medio de las tensiones de salida del convertidor son aproximadamente iguales al valor medio de las tensiones de referencia, dadas por:

$$\frac{1}{T_s} \int_{nT_s}^{(n+1)T_s} (v_{\alpha\beta}^* - v_{\alpha\beta}) dt = 0 \quad (25)$$

donde (23) a (25) modelan el método de control de los convertidores.

## V. SIMULACIÓN

Los modelos matemáticos de los convertidores matricial y multinivel fueron implementados en un sistema eólico de 900 kW, considerando un viento en rampa con velocidades comprendidas entre 4.5 m/s y 25 m/s en un tiempo de 3.5 s. En la Fig. 7 se presenta la variación del ángulo de paso de pala en función de la velocidad del viento.

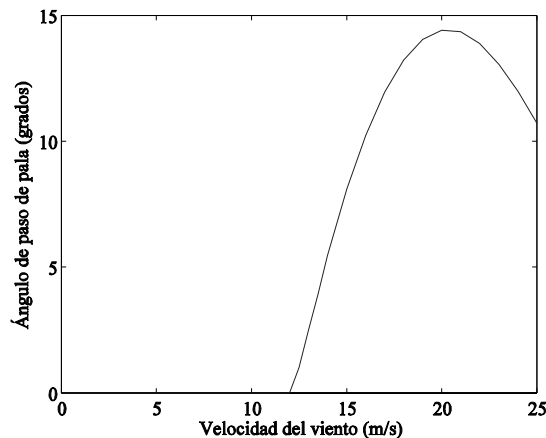


Fig. 7. Ángulo de paso de pala en función de la velocidad del viento.

En la Fig. 8 se presenta la potencia mecánica desarrollada por la turbina y la potencia electromagnética entregada por la máquina síncrona de imanes permanentes en la entrada del convertidor.

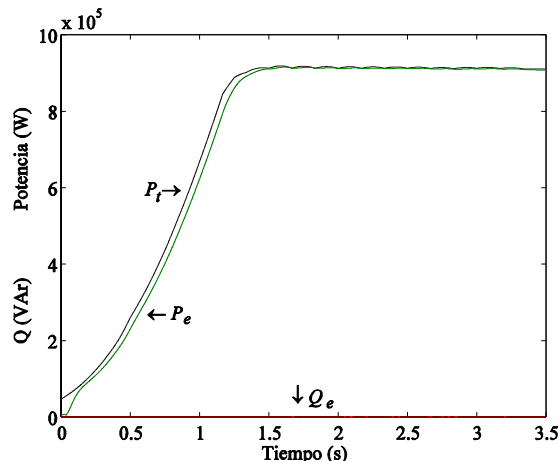


Fig. 8. Potencia mecánica y potencia electromagnética.



La potencia en la salida del convertidor matricial se presenta en la Fig. 9, mientras que en la Fig. 10 se presenta la corriente que se inyecta en la red eléctrica.

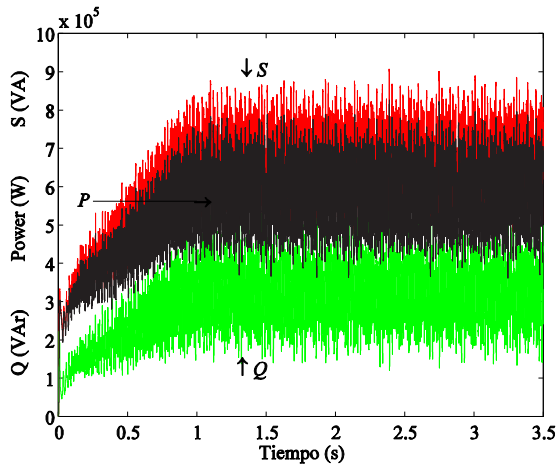


Fig. 9. Potencia en la salida del convertidor matricial.

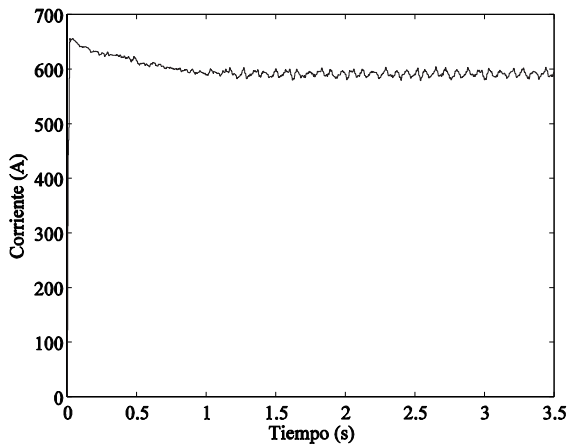


Fig. 10. Corriente en la salida del convertidor matricial.

La potencia en la salida del convertidor multinivel se presenta en la Fig. 11, mientras que en la Fig. 12 se presenta la corriente que se inyecta en la red eléctrica.

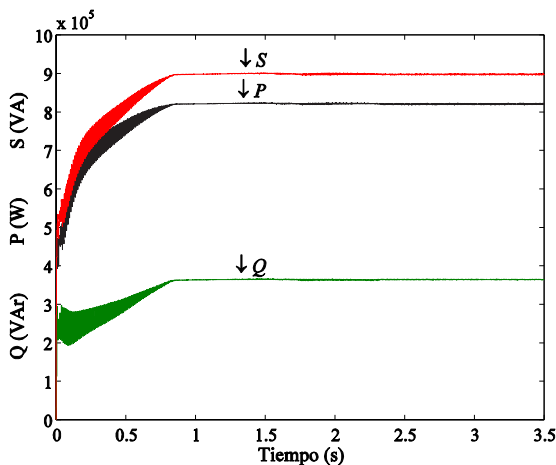


Fig. 11. Potencia en la salida del convertidor multinivel.

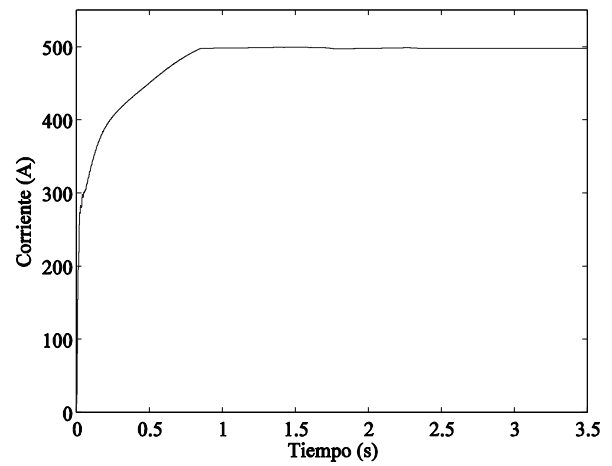


Fig. 12. Corriente en la salida del convertidor multinivel.

Se puede concluir que el convertidor multinivel presenta ondas eléctricas para la potencia y la corriente con un mejor comportamiento relativamente al convertidor matricial.

## VI. CONCLUSIONES

El incremento progresivo de la energía eólica da lugar a nuevos problemas técnicos, lo que implica la investigación de modelos físicos más realistas para los sistemas de energía eólica. En este artículo se presenta una modelación más realista del sistema de energía eólica, que tiene en cuenta la dinámica de la turbina eólica, el sistema de transmisión, la máquina eléctrica, el convertidor y un filtro que conecta el sistema a la red eléctrica. En este artículo se presenta la modelación y simulación en Matlab/Simulink para dos topologías de convertidores de potencia integrando sistemas de energía eólica conectados a la red eléctrica: los convertidores matricial y multinivel. Se emplean técnicas de modulación vectorial mediante vectores espaciales SVM asociado con el modo de deslizamiento, para controlar los convertidores. En la salida de los convertidores se controla el factor de potencia. Los resultados muestran que el convertidor multinivel tiene un mejor comportamiento comparativamente con el convertidor matricial. Aunque más compleja, esta estrategia de modulación se justifica para obtener resultados más precisos.

## REFERENCIAS

- [1] J. A. Peças Lopes, N. Hatzigiorgiou, J. Mutale, P. Djapic, and N. Jenkins, "Integrating distributed generation into electric power systems: A review of drivers, challenges and opportunities," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 77, no. 9, pp. 1189-1203, Jul. 2007.
- [2] I. Erlich, J. Kretschmann, J. Fortmann, S. Mueller-Engelhardt, and H. Wrede, "Modeling of wind turbines based on doubly-fed induction generators for power system stability studies," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 3, no. 3, pp. 909-919, Aug. 2007.
- [3] R. G. de Almeida and J. A. Peças Lopes, "Participation of doubly fed induction wind generators in system frequency regulation," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 22, no. 3, pp. 944-950, Aug. 2007.
- [4] J. M. Carrasco, L. G. Franquelo, J. T. Bialasiewicz, E. Galvan, R. C. P. Guisado, A. M. Prats, J. I. Leon, and N. Moreno-Alfonso, "Power-electronic systems for the grid integration of renewable energy sources: A survey," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 53, no. 4, pp. 1002-1016, Aug. 2006.

- [5] J. A. Baroudi, V. Dinavahi, and A. M. Knight, "A review of power converter topologies for wind generators," *Renewable Energy*, vol. 32, no. 14, pp. 2369-2385, Nov. 2007.
- [6] J. P. A. Vieira, M. V. A. Nunes, U. H. Bezerra, and W. Barra, Jr., "Novas estratégias de controle fuzzy aplicadas ao conversor do DFIG para melhoria da estabilidade transitória em sistemas eólicos," *IEEE Latin America Trans.*, vol. 5, no. 3, pp. 143-150, Jun. 2007.
- [7] R. G. Valle, M. C. Pfeifer, and D. B. Solé, "Dos familias de controladores en modo de deslizamiento para un generador de inducción doblemente alimentado en un sistema aislado," *IEEE Latin America Trans.*, vol. 5, no. 2, pp. 116-122, May 2007.
- [8] J. G. Slootweg, H. Polinder, and W. L. Kling, "Representing wind turbine electrical generating systems in fundamental frequency simulations," *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 18, no. 4, pp. 516-524, Dec. 2003.
- [9] C. -M. Ong, *Dynamic Simulation of Electric Machinery*. New Jersey: Prentice Hall, 1998.
- [10] E. H. Watanabe, R. M. Stephan, and M. Aredes, "New concepts of instantaneous active and reactive powers in electrical systems with generic loads," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 8, no. 2, pp. 697-703, Apr. 1993.
- [11] S. Pinto and J. Silva, "Sliding mode direct control of matrix converters," *IET Electr. Power Appl.*, vol. 1, no. 3, pp. 439-448, May 2007.
- [12] J. Eloy-Garcia, S. Arnaltes, and J. L. Rodriguez-Amenedo, "Extended direct power control for multilevel inverters including DC link middle point voltage control," *IET Electr. Power Appl.*, vol. 1, no. 4, pp. 571-580, Jul. 2007.

**R. Melício** recibió el grado de M.Sc. por el Instituto Superior Técnico, Lisboa, Portugal, en 2004.

Actualmente es estudiante de Doctorado en la Universidad de Beira Interior, Covilhã, Portugal, en colaboración con el Instituto Superior de Ingeniería de Lisboa, Lisboa, Portugal. Sus áreas de interés incluyen la electrónica de potencia, la calidad de energía y los sistemas de energía eólica.

**V. M. F. Mendes** recibió los grados de M.Sc. y Ph.D. por el Instituto Superior Técnico, Lisboa, Portugal, en 1987 y 1994, respectivamente.

Actualmente es Coordinator Professor with Aggregation en el Instituto Superior de Ingeniería de Lisboa, Lisboa, Portugal. Sus áreas de interés incluyen la coordinación hidrotérmica, la teoría de la optimización y sus aplicaciones, y las energías renovables.

**J. P. S. Catalão** (M'04) recibió el grado de M.Sc. por el Instituto Superior Técnico, Lisboa, Portugal, en 2003 y el grado de Ph.D. por la Universidad de Beira Interior, Covilhã, Portugal, en 2007.

Actualmente es Assistant Professor en la Universidad de Beira Interior. Sus áreas de interés incluyen la programación hídrica, la programación térmica, el pronóstico de precios, los sistemas de energía eólica, y los mercados eléctricos.

Dr. Catalão es Editor Asociado del *International Journal of Power and Energy Systems*, y Miembro del Consejo Editorial de *Electric Power Components & Systems*. Es también revisor regular en IEEE TRANSACTIONS ON POWER SYSTEMS, en *IET Generation, Transmission & Distribution*, y en *Electric Power Systems Research*.