



Title: Simplified nonlinear rotational inertia model for the simulation and analysis of the characteristics of an unconventional vawt type wind turbine with variable pitch

Authors: FRANCO-MARTÍNEZ, David, GARCÍA-BARRERA, Jesús, DÍAZ-SALGADO, Jorge and HUERTA-CHÁVEZ, Oliver M.

Editorial label ECORFAN: 607-8695

BCIERMMI Control Number: 2021-01

BCIERMMI Classification (2021): 271021-0001

Pages: 14

RNA: 03-2010-032610115700-14

ECORFAN-México, S.C.

143 – 50 Itzopan Street
La Florida, Ecatepec Municipality
Mexico State, 55120 Zipcode
Phone: +52 1 55 6159 2296
Skype: ecorfan-mexico.s.c.
E-mail: contacto@ecorfan.org
Facebook: ECORFAN-México S. C.

Twitter: @EcorfanC

www.ecorfan.org

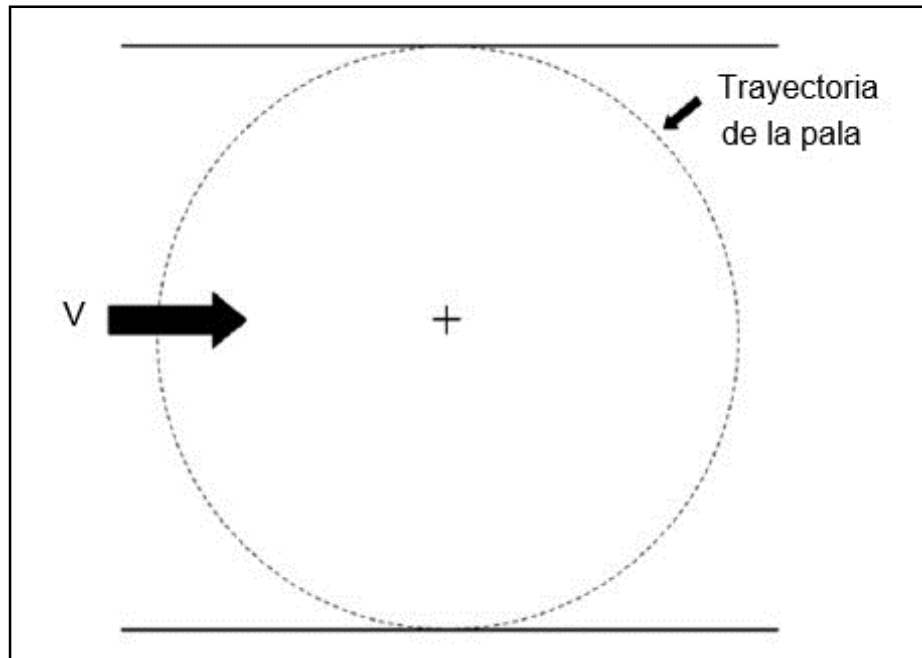
Holdings

Mexico	Colombia	Guatemala
Bolivia	Cameroon	Democratic
Spain	El Salvador	Republic
Ecuador	Taiwan	of Congo
Peru	Paraguay	Nicaragua

Introducción

Este trabajo se presenta una técnica numérica del método de múltiples tubos de corriente estacionario-acoplada a un modelo de inercia rotacional, para la simulación y análisis de las características de un aerogenerador tipo VAWT no Convencional con Paso Variable

Actualmente, existen distintos modelos aerodinámicos para la descripción del comportamiento estático de un aerogenerador de eje vertical de palas rectas tipo Darrieus.



Modelo estático

Modelo con un único tubo de corriente (Single Streamtube Model), considera fundamentalmente que la velocidad del viento (V) es constante a través de la turbina [1], esto debido a que existe un tubo único de corriente

Ángulo de ataque α

$$\alpha = \tan^{-1} \left(\frac{V_a \sin(\theta)}{R\omega + V_a \cos(\theta)} \right) \quad (1)$$

Mientras que la velocidad relativa W se obtiene mediante:

$$W = \sqrt{(V_a \sin(\theta))^2 + (R\omega + V_a \cos(\theta))^2} \quad (2)$$

Con base al modelo del disco actuador se puede definir la velocidad inducida V_a como:

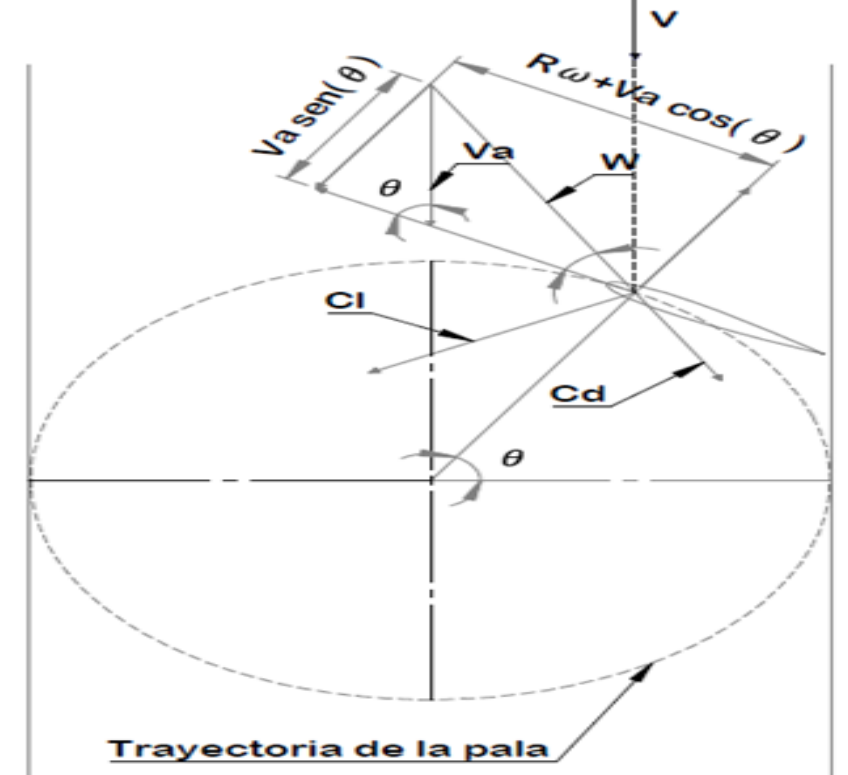
$$V_a = V_\infty(1 - a) \quad (3)$$

Donde ω es la velocidad angular, θ la posición angular y a es el factor de inducción.

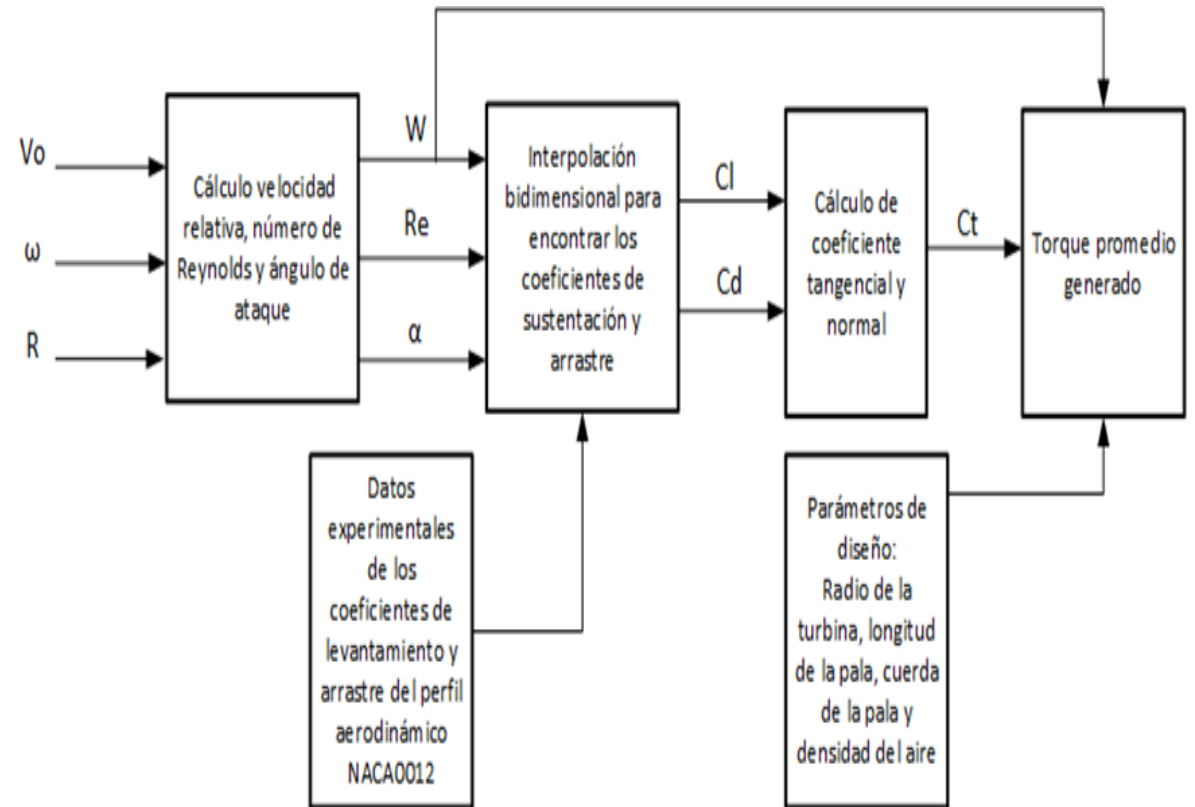
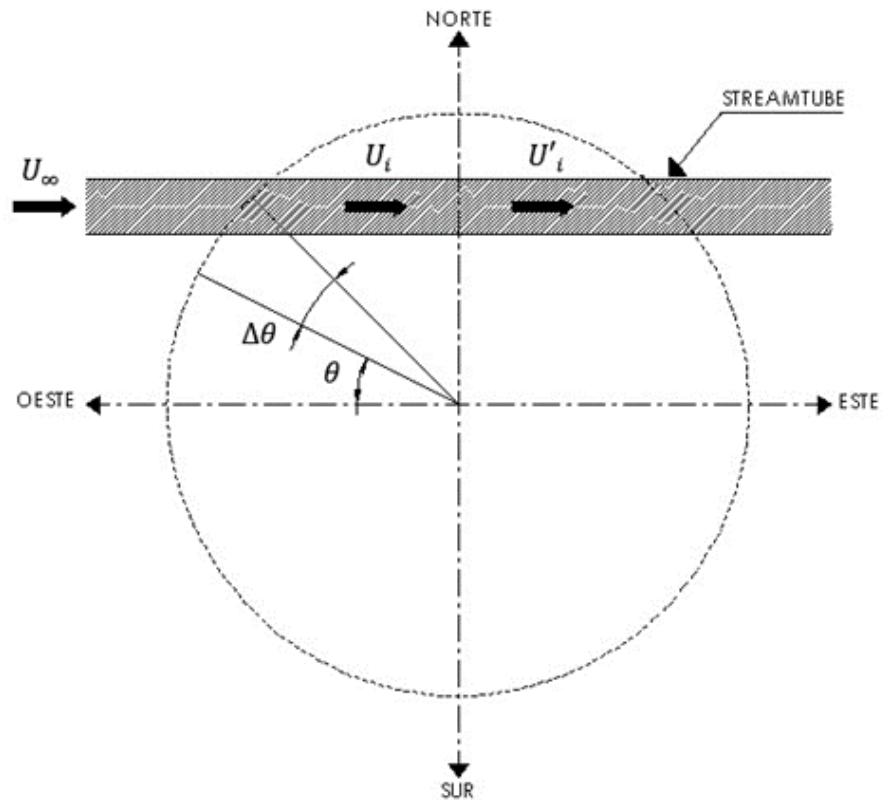
También se pueden calcular los coeficientes Normal C_n y Tangencial C_t a través de las componentes de arrastre C_d y sustentación C_l , que son propios de cada perfil aerodinámico (Figura 3), de tal forma que:

$$C_n = C_l \cos(\alpha) + C_d \sin(\alpha) \quad (4)$$

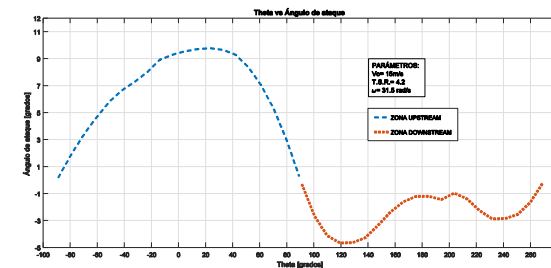
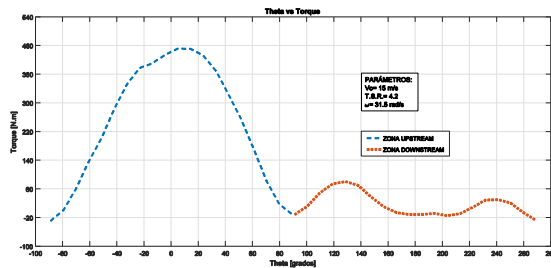
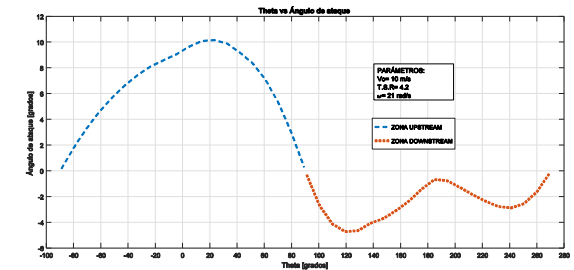
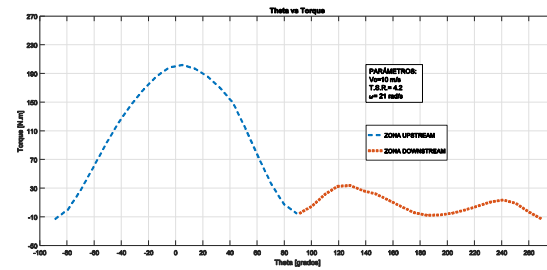
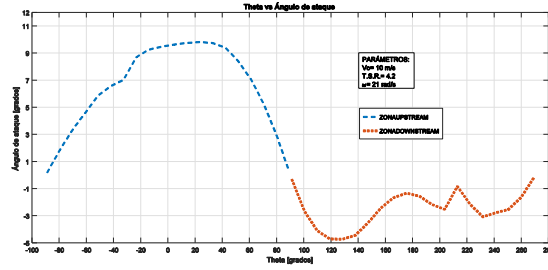
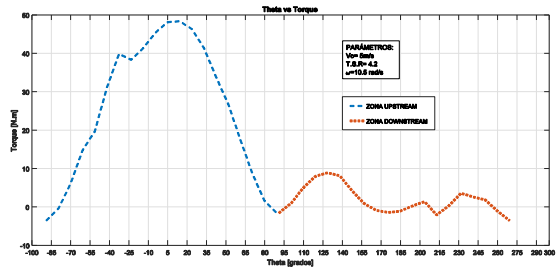
$$C_t = C_l \sin(\alpha) - C_d \cos(\alpha) \quad (5)$$



2. Modelo de múltiples tubos de corriente (Multiple stream tube) y algoritmo utilizado



Resultados del Algoritmo del modelo double multiple stream tube.



Como se puede observar en las curvas de Theta vs Torque de las Figuras de las curvas Theta vs Ángulo de ataque y de las) las formas de las curvas a diferentes velocidades son muy semejantes, dándose el máximo torque en una posición angular de entre 0° y 20° que corresponden a un ángulo de ataque entre los 9° y 10° , mientras que el torque mínimo ocurre en una posición angular alrededor de los 270° que corresponde a un ángulo de ataque de entre -2° y 0° .

3.- Implementación del Modelo de Inercia Rotacional no lineal simplificado

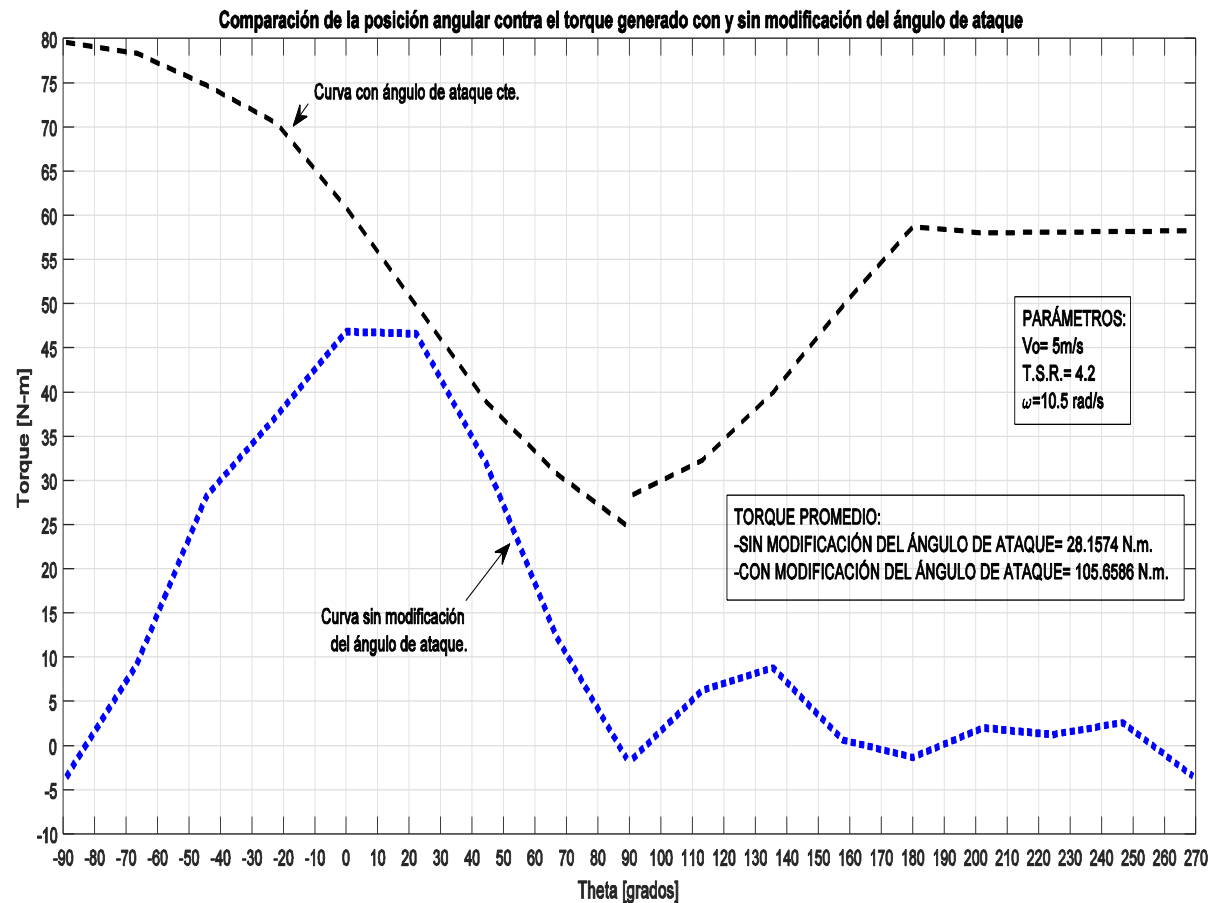
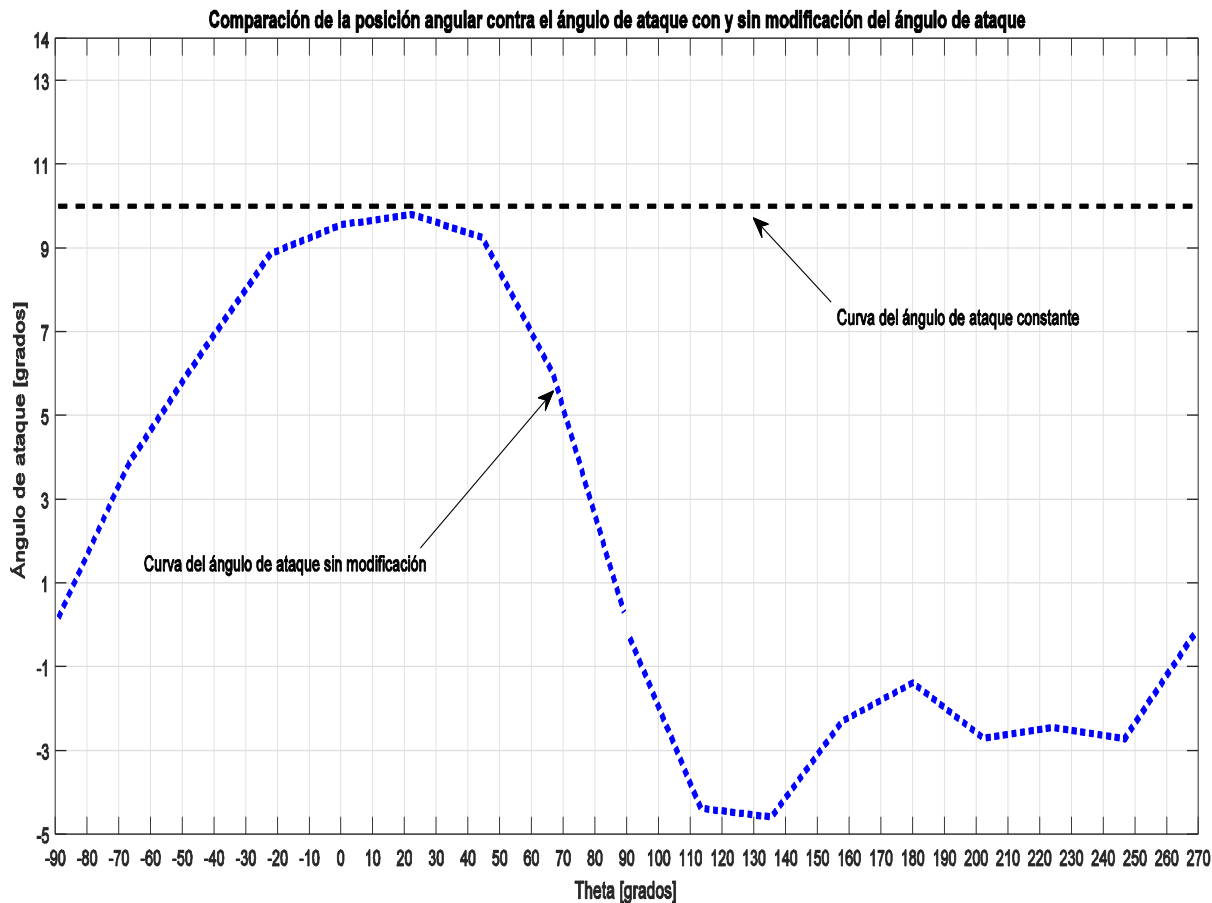
Para realizar las pruebas dinámicas se propuso un modelo dinámico de segundo orden de tipo inercia rotacional con fricción viscosa (ecuación 6), donde el torque de excitación se calcula con ayuda de una función en Simulink escrita en MATLAB. El modelo dinámico se utiliza tanto para la zona de alta y baja velocidad.

$$\ddot{\theta}(t) = \left(-\frac{B}{J}\right) (\dot{\theta}(t)) + \left(\frac{T}{J}\right)$$

El algoritmo requiere como entradas la posición y velocidad angulares generados por los bloques integradores de Simulink y la velocidad del viento.

Pruebas estáticas a lazo cerrado con una estrategia de control propuesta

Los resultados estacionarios obtenidos en las simulaciones anteriores muestran que el máximo torque se genera con un ángulo de ataque alrededor de los 10° y el menor alrededor de los 0° , al menos para un T.S.R. constante de 4.2.



Pruebas de la respuesta transitoria con dos señales de entrada.

Este grupo de pruebas buscan mostrar, por vez primera, las características de la respuesta transitoria del aerogenerador ante dos diferentes entradas de prueba, recordando que la entrada del aerogenerador es la velocidad del viento

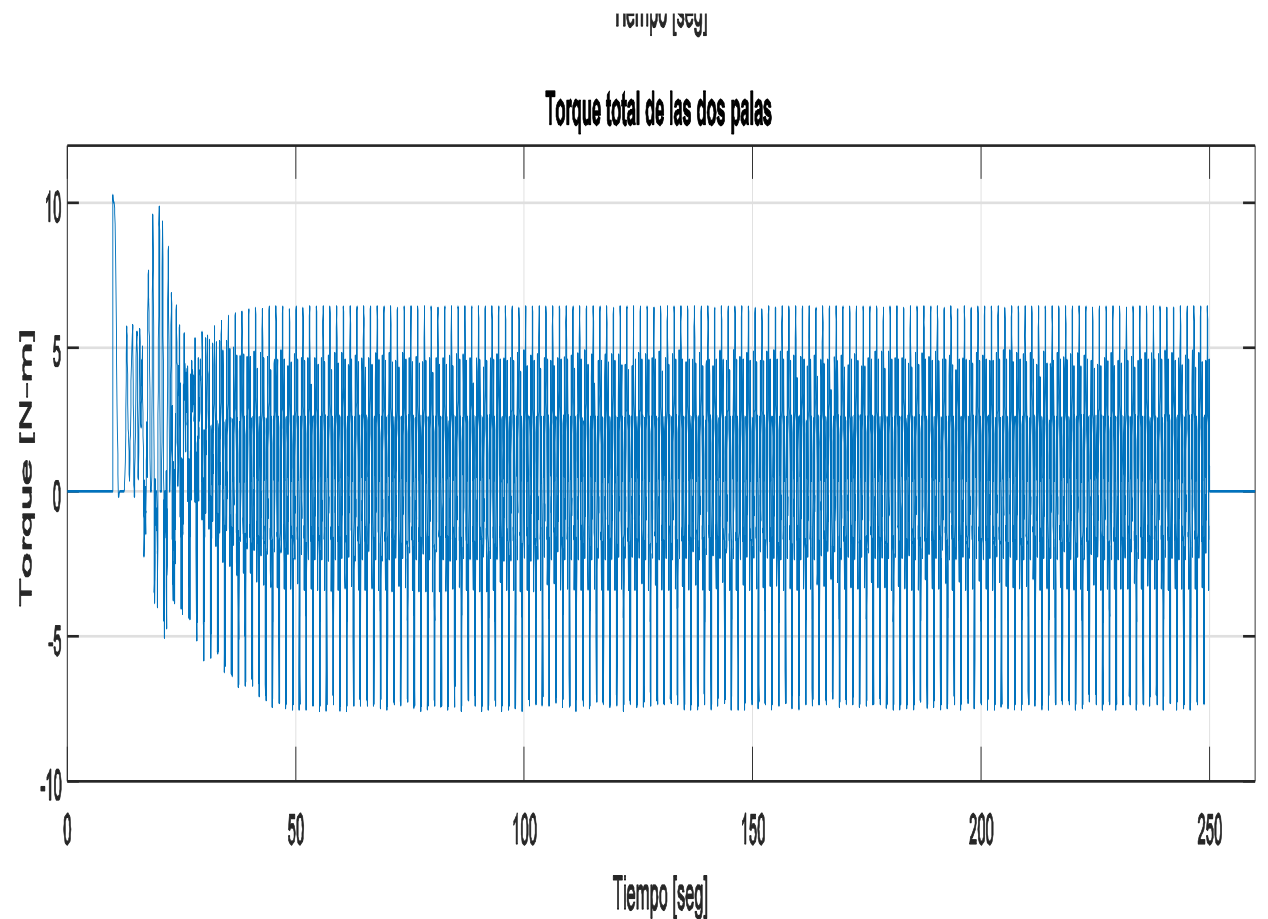
$$u_1(t) = \begin{cases} 0.01 & t < 10 \\ 10 & t \geq 10 \\ -10 & t \geq 250 \end{cases} \quad (7)$$

$$u_2(t) = A \sin(\omega t) + \varphi \quad (8)$$

Con $A=5$, $\omega=0.062831$ y $\varphi=6$. Para la obtención de estas respuestas dinámicas, se deben de establecer además las posiciones y velocidades angulares de cada uno de los álabes:

$$\theta_1 = \dot{\theta}_1 = \dot{\theta}_2 = 0 \quad (9)$$

$$\theta_2 = 180^\circ \quad (10)$$

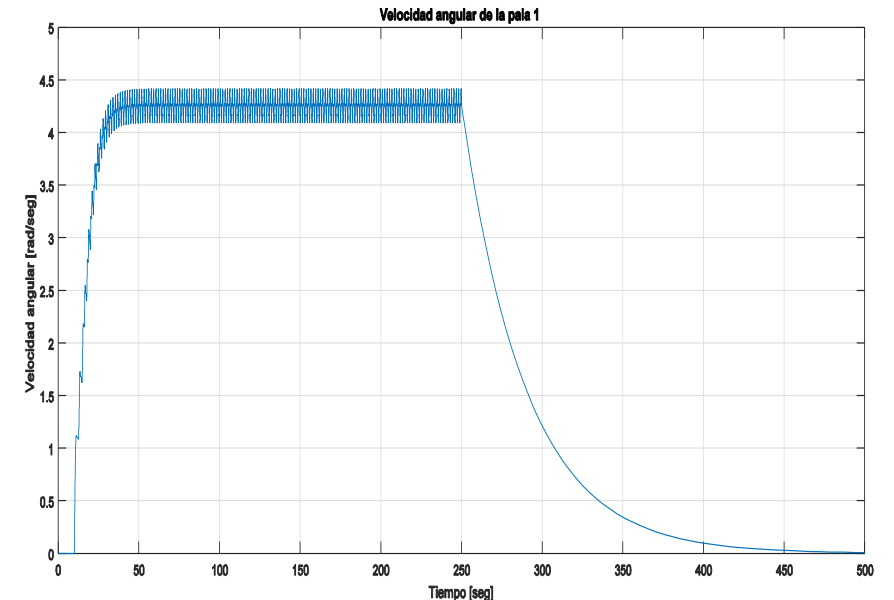
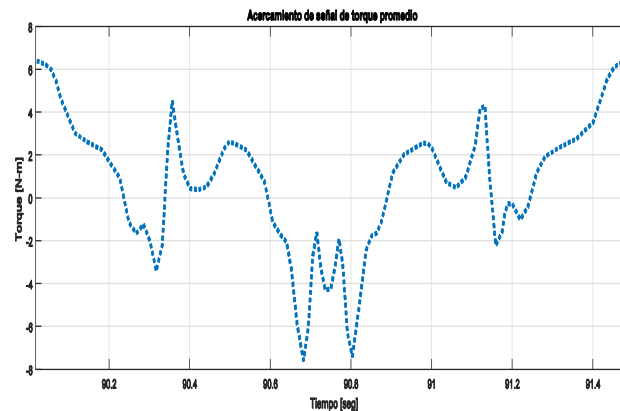
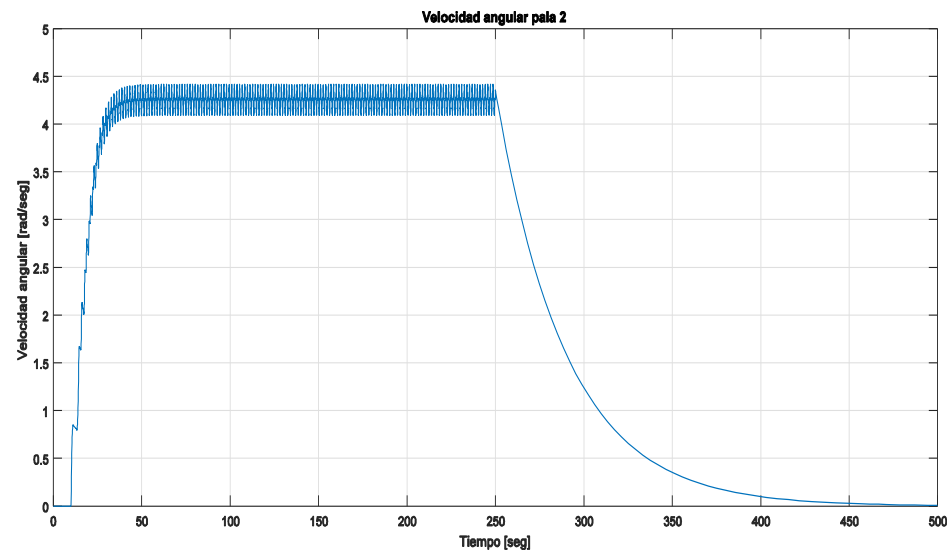


Pruebas de la respuesta transitoria con dos señales de entrada.

Las respuestas con la entrada u_1 muestran:

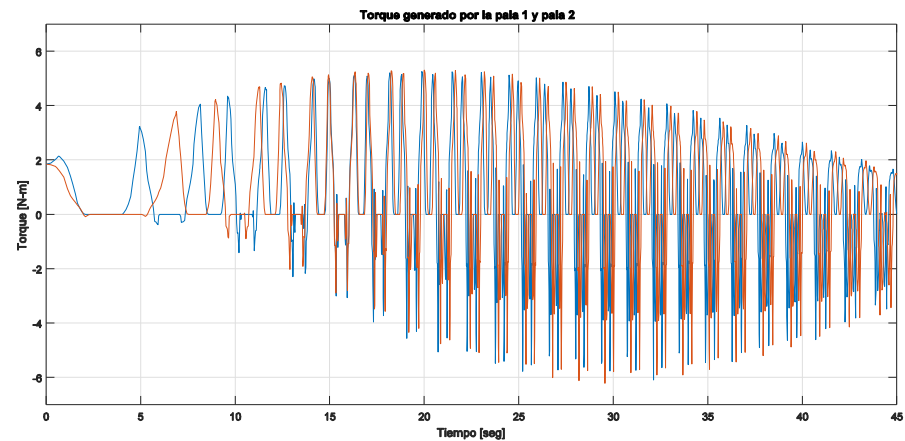
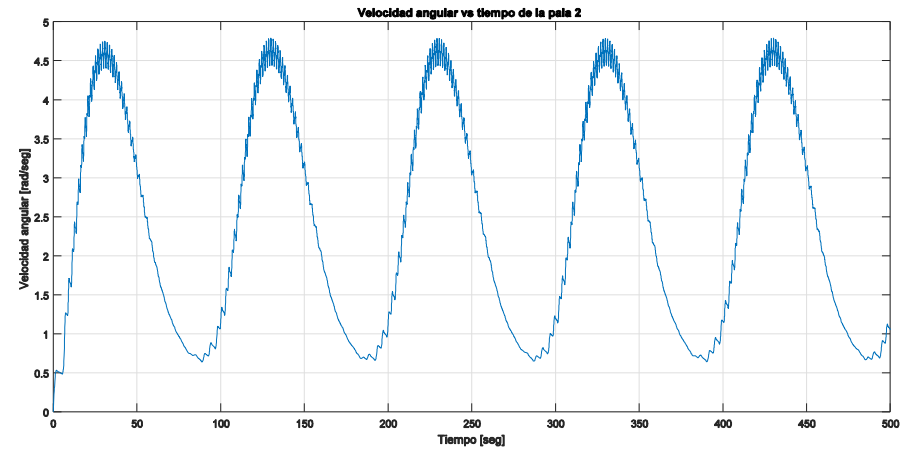
- (i) un torque variante con área bajo la curva positiva (Figs.
- (ii) una repuesta transitoria de subida con tiempo de asentamiento de aproximadamente 35 s.
- (iii) una respuesta estacionaria periódica (y
- (iv) un transitorio de bajada de aproximadamente 200 s.

Como puede observarse existe una diferencia de casi 6 veces el transitorio de bajada con respecto al de subida. Esto puede explicarse porque existe una singularidad cuando la velocidad de entrada se hace nula ya que el T.S.R se vuelve infinito. Para minimizar este efecto la entrada no se hace cero, sino igual a 0.01 m/s, sin embargo, aún con este pequeño valor es notoria la diferencia entre tiempo de asentamiento de subida y bajada.

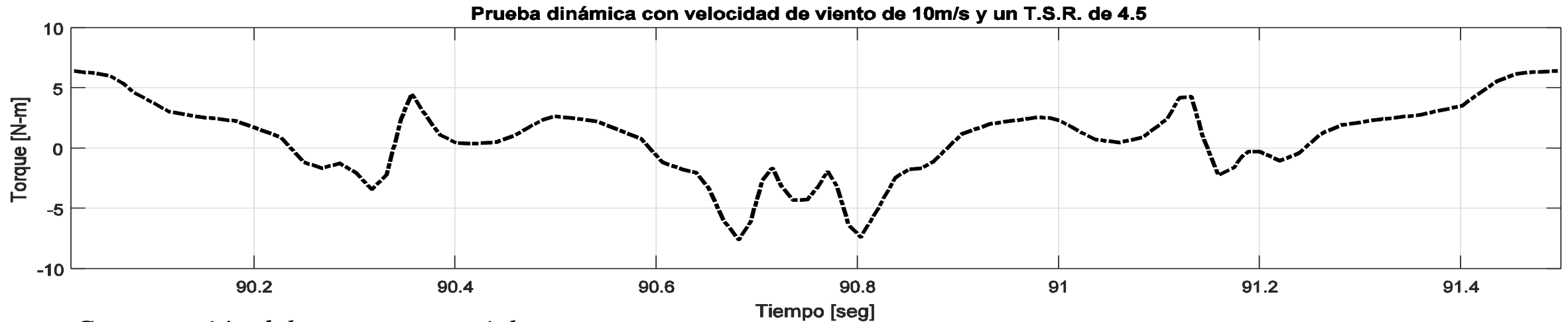
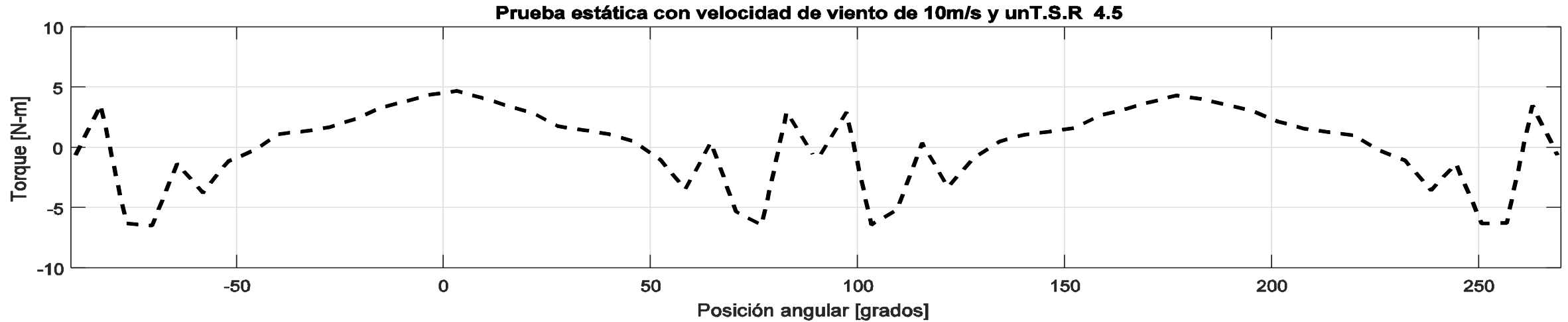


Análisis de las datos obtenidos con entrada senoidal.

Este análisis demuestra que al igual que con la entrada escalón el sistema tiende a entrar a su zona en estado estacionario en aproximadamente 35 segundos



Análisis de las datos obtenidos con entrada senoidal.



Comparación del torque en un ciclo en estado estacionario con los modelos estático y dinámico con una velocidad de viento de 10m/s.

Análisis de las datos obtenidos con entrada senoidal.

Modelo	Torque promedio	Torque máximo	Torque mínimo
Estático	1.0678 Nm	5.0 Nm	-7.0 Nm
Dinámico	1.2488 Nm	6.2 Nm	-7.5 Nm

Tabla 2. Comparación de los parámetros en estado estacionario de los modelos estático y dinámico.

Conclusiones

- (i) el torque generado es proporcional al cuadrado de la velocidad del viento,
 - (ii) existen ángulos de ataque donde se minimiza y maximiza el torque generado,
 - (iii) para un aerogenerador de eje vertical de dos palas rectas existen ciertos intervalos de tiempo donde se presenta una anulación de los torques generados,
 - (iv) la respuesta transitoria es inherente a los parámetros físicos del aerogenerador e independiente de la entrada y
 - (v) para señales periódicas, la salida del sistema conserva la frecuencia de oscilación dada por la entrada.
-
- (i) la inclusión del modelo con múltiples tubos de corriente en el modelo dinámico,
 - (ii) la inclusión del ángulo de pitch directamente en los cálculos numéricos de la simulación,
 - (iii) el análisis del número de tubos suficientes para una correcta disminución del error en la aproximación numérica y
 - (iv) la inclusión de un mayor número de puntos en la tabla de ángulo de ataque y número de Reynolds para el cálculo de los coeficientes de levantamiento y arrastre

Conclusiones

Aspectos a mejorar

- (i) la inclusión del modelo con múltiples tubos de corriente en el modelo dinámico,
- (ii) la inclusión del ángulo de pitch directamente en los cálculos numéricos de la simulación,
- (iii) el análisis del número de tubos suficientes para una correcta disminución del error en la aproximación numérica y
- (iv) la inclusión de un mayor número de puntos en la tabla de ángulo de ataque y número de Reynolds para el cálculo de los coeficientes de levantamiento y arrastre

Referencias

-] Villar J.A., Roberto M., Boscato, Da Silva G.C., Konzen G. (2008) Performance evaluation of the next generation of small vertical axis wind turbine, Pontifical Catholic University of Rio Grande do Sul, Brazil.
- [2] Sathyajith M., Geeta S. P. (2011)., *Advances in Wind Energy Conversion Technology*, Springer, Berlin.
- [3] Madsen H. A., Thomsen K. (2011) *Analysis of Wind Turbine Loads*, Technical University of Denmark, Denmark.
- [4] Aslam Bhutta M. M., Hayat N., Farooq A. U., Ali Z., Jamil Sh. R., Hussain Z. (2011) Vertical axis wind turbine: A review of various configurations and design techniques, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 1926-1939.
- [5] Nagare P., Shettigar R., Nair A., Kale P., Nambiar P. (2015), *Vertical Axis Wind Turbine*, 1-6
- [6] Chaichana T, Chaitep (2010) S. Wind power potential and characteristic analysis of Chiang Mai, Thailand. *Mechanical Science and Technology*; 24:1475–9.
- [7] Islam M, Ting D. S.-K., Fartaj Amir. (2006) Review of Aerodynamic models for Darrieus-type straight-bladed vertical axis wind turbines, Elsevier, University of Windsor, Windsor, Ont., Canada.
- [8] Tong, W. (2010). *Fundamentals of wind energy*. In W. Tong, *Wind power generation and wind turbine design* (p. 112). WIT Press.
- [9] Spera, D. (2009). *Wind Turbine Technology, fundamental concepts of wind turbine engineering*. ASME Press.
- [10] Paraschivoiu, I. (2002). *Wind Turbine Design With Emphasis on Darrieus Concept*. Presses Internationales Polytechnique.
- [11] Templin, R. (1974). *The Elements of Airfoil and Airscrew Theory*. Cambridge University Press, second edition.
- [12] Castillo J. (2011) *Small-Vertical Axis Wind Turbine Design*, Bachelor's Thesis, Tampereen ammattikorkeakoulu, Finlandia.
- [13] Sheldahl R.E., Klimas P C. (1981) *Aerodynamic Characteristics of Seven Symmetrical Airfoil Sections Through 180-dregree Angle of Attack for use in Aerodynamic Analysis of Vertical Axis Wind Turbines*, Sandia National Laboratories, Alburquerque, New Mexico.
- [14] Li-xun Z., Ying-bin L., (2014) *Effect of blade pitch angle on aerodynamic performance of straight-bladed vertical axis wind turbine*, College of Mechanical and Electrical Engineering, Harbin Engineering University, China , 2014.
- [15] Islam M., Ting D. S.-K., Fartaj Amir. (2006) *Aerodynamic models for Darrieus-type straight-blade vertical axis wind turbines*, University of Windsor, Windsor, Ont., Canada.
- [16] Li-xun Z, Pei Y. (2015) *Design and Implementation of Straight-blade Vertical Axis Wind Turbine with Collective Pitch Control*, College of Mechanical and Electrical Engineering, Harbin Engineering University, China.
- [17] Li-xun Z., Liang Y. (2012) *Vertical Axis Wind Turbine with Individual Active Blade Pitch Control*, College of Mechanical and Electrical Engineering, Harbin Engineering University, China.
- [18] Li-xun Z., Ying-bing L. (2012) *Effect of blade pitch angle on aerodynamic performance of straight-blade vertical axis wind turbine*.
- [19] Zhang Q., Chen H. (2010) *Modeling and Simulation of Two-Leaf Semi-rotary VAWT*, School of Electronic and Information Engineering Zhongyuan Institute of Technology, Zhongyuan Middle Road 41, Zhengzhou, China.
- [20] Pawsey N. C. K. (2002) *Development and evaluation of passive variable-pitch vertical axis wind turbines*, PhD Thesis, School of Mechanical and manufacturing Engineering, The University of New South wales, Australia, 2002.
- [21] Hantoro R., Utama I. K. A. P., Erwandi and Sulisetyono A. (2011) *An Experimental Investigation of Passive Variable-Pitch Vertical-Axis Ocean Current Turbine*, ITB J. Eng. Sci, vol. 43, pp. 27-40, 2011.
- [22] Hwang I. S., Min S. Y., Jeong I. O., Lee Y. H. and Kim S. J. (2006) *Efficiency improvement of a new vertical axis wind turbine by individual active control of blade motion*, *Smart Structures and Materials 2006 - Smart Structures and Integrated Systems*, vol. 6173.



ECORFAN®

© ECORFAN-Mexico, S.C.

No part of this document covered by the Federal Copyright Law may be reproduced, transmitted or used in any form or medium, whether graphic, electronic or mechanical, including but not limited to the following: Citations in articles and comments Bibliographical, compilation of radio or electronic journalistic data. For the effects of articles 13, 162,163 fraction I, 164 fraction I, 168, 169,209 fraction III and other relative of the Federal Law of Copyright. Violations: Be forced to prosecute under Mexican copyright law. The use of general descriptive names, registered names, trademarks, in this publication do not imply, uniformly in the absence of a specific statement, that such names are exempt from the relevant protector in laws and regulations of Mexico and therefore free for General use of the international scientific community. BCIERMMI is part of the media of ECORFAN-Mexico, S.C., E: 94-443.F: 008- (www.ecorfan.org/booklets)