



Conference: Congreso Interdisciplinario de Energías Renovables -
Mantenimiento Industrial - Mecatrónica e Informática

Booklets



RENIECYT

Registro Nacional de Instituciones
y Empresas Científicas y Tecnológicas

2015-20795

CONACYT

LATINDEX - Research Gate - DULCINEA - CLASE - Sudoc - HISPANA - SHERPA UNIVERSIA - E-Revistas - Google Scholar
DOI - REBID - Mendeley - DIALNET - ROAD - ORCID

Title: Análisis del arranque de las turbinas eólicas de eje horizontal de baja capacidad

Author: Christian CASILLAS FARFÁN, Víctor LÓPEZ, Gildardo SOLORIO, Daniel MOLINERO

Editorial label ECORFAN: 607-8324
BCIERMIMI Control Number: 2017-02
BCIERMIMI Classification (2017): 270917-0201

Pages: 28
Mail: *christian.casillas.farfan@gmail.com*
RNA: 03-2010-032610115700-14

ECORFAN-México, S.C.
244 – 2 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

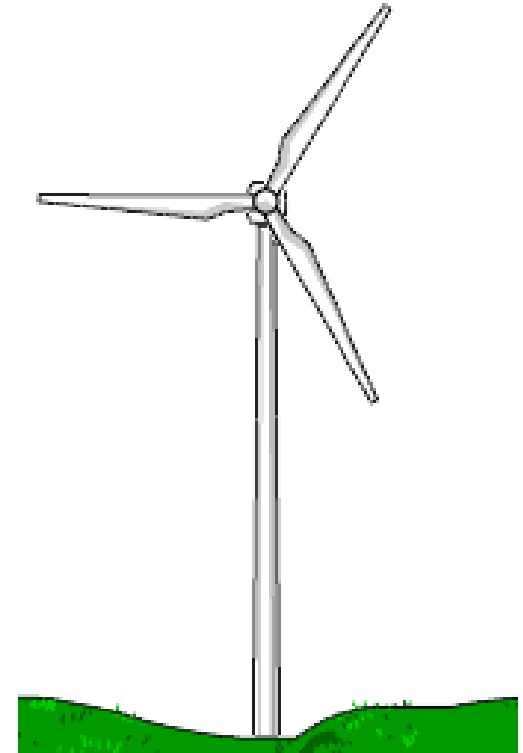
www.ecorfan.org

Holdings

Bolivia	Honduras	China	Nicaragua
Cameroon	Guatemala	France	Republic of the Congo
El Salvador	Colombia	Ecuador	Dominica
Peru	Spain	Cuba	Haití
Argentina	Paraguay	Costa Rica	Venezuela
Czech Republic			

Contenido:

1. Introducción
2. Perfiles aerodinámicos
3. Diseño aerodinámico. Teoría BEM
4. Modelado
5. Fabricación y pruebas
6. Simulación DFC
7. Análisis de resultados
8. Agradecimientos
9. Conclusiones
10. Referencias



1. Introducción

1.1 Definición:

- Las turbinas eólicas son dispositivos que utilizan la energía cinética del viento y la transforma en energía eléctrica útil.
- Se clasifican en base a criterios de operación.



Figura 1: Campo de turbinas eólicas de eje horizontal generadoras de electricidad. Fuente: Small wind turbines

1. Introducción

1.2 Problemática

- Las turbinas eólicas de eje horizontal de baja capacidad son de autoarranque.

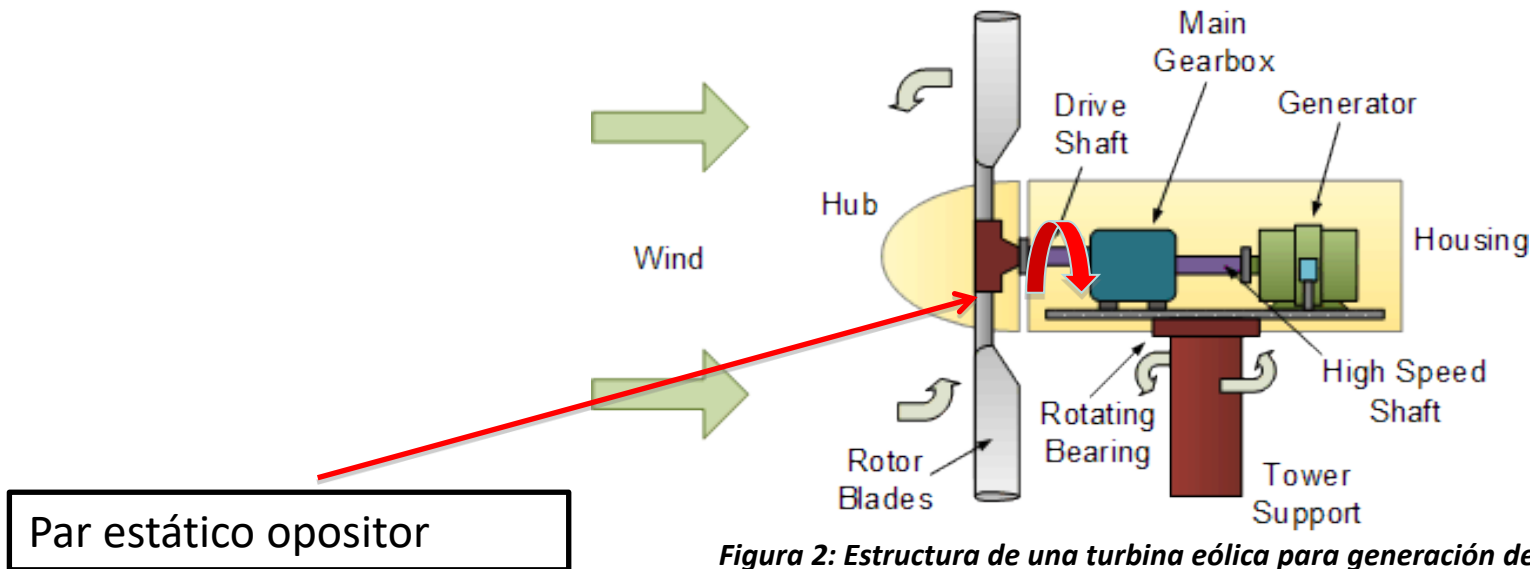


Figura 2: Estructura de una turbina eólica para generación de electricidad. Fuente: Página Web



1. Introducción

1.3 Desarrollo actual

Capacidad y adiciones anuales mundiales de energía eólica, 2005-2015

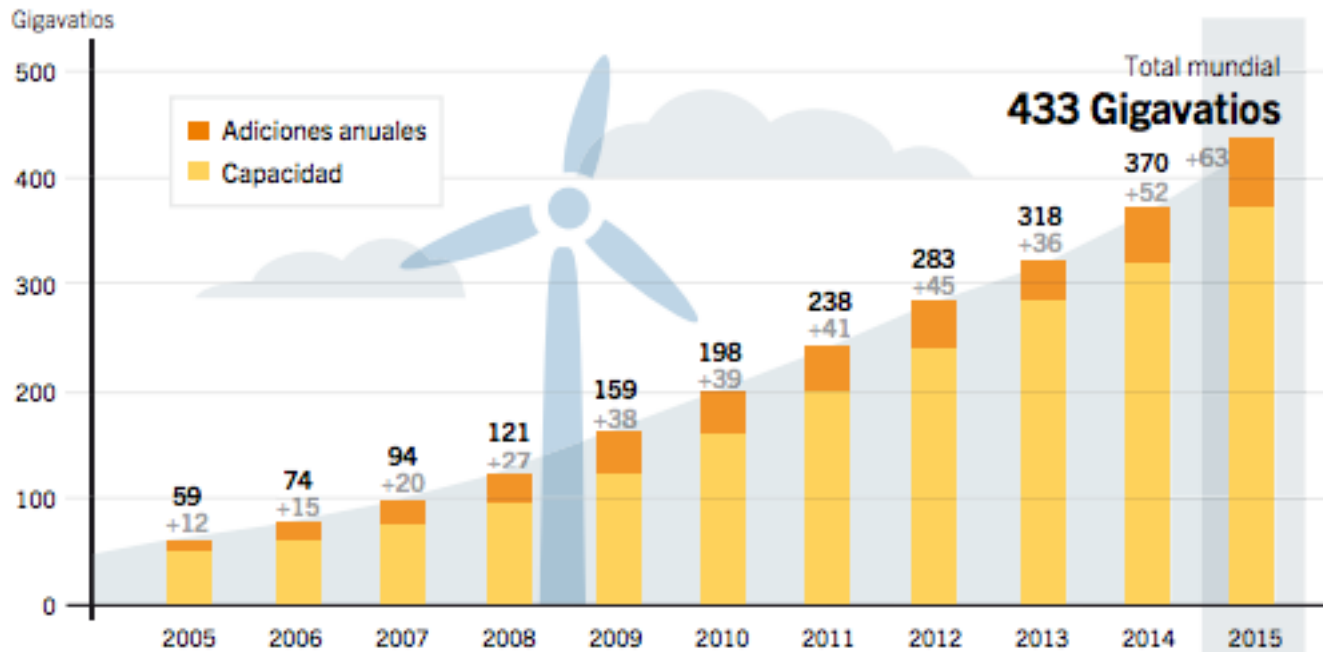


Figura 3: Capacidad y adiciones mundiales de energía eólica 2005-2015. Fuente: Energías renovables 2016. RSM

2. Perfiles aerodinámicos

2.1 Definición:

- Secciones geométricas, que al tener contacto con fluidos en movimiento, crea distribución de presiones adecuadas para crear fuerzas de sustentación y arrastre.

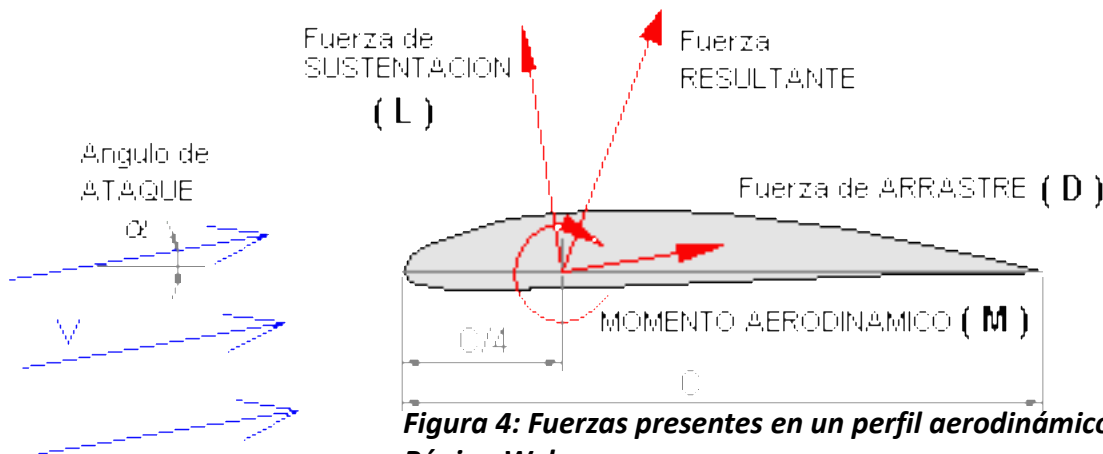
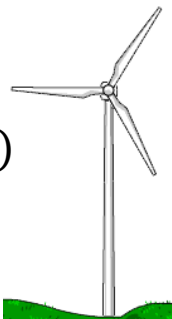


Figura 4: Fuerzas presentes en un perfil aerodinámico. Fuente: Página Web

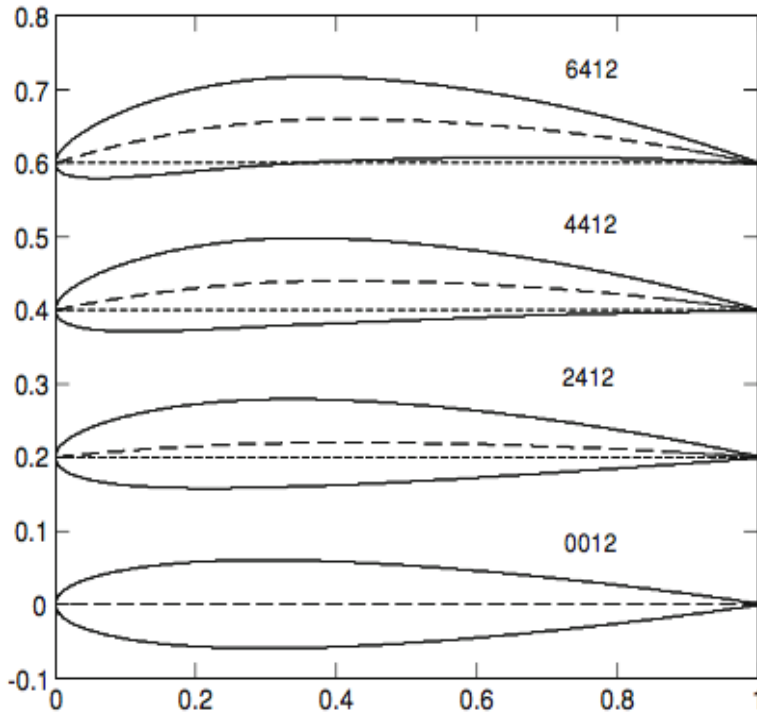
$$C_L = \frac{L}{\frac{1}{2} \rho U_\infty A_p} \quad (1)$$

$$C_d = \frac{D}{\frac{1}{2} \rho U_\infty A_p} \quad (2)$$



2. Perfiles aerodinámicos

2.2 Familias:



Cl/Cd v Alpha

Plot	Airfoil	Reynolds #	Ncrit	Max Cl/Cd
<input checked="" type="checkbox"/>	naca4412-il	50,000	9	33.4 at $\alpha=9.75^\circ$
<input type="checkbox"/>	naca4412-il	50,000	5	36.1 at $\alpha=8.5^\circ$
<input checked="" type="checkbox"/>	naca4412-il	100,000	9	56.1 at $\alpha=8.5^\circ$
<input type="checkbox"/>	naca4412-il	100,000	5	57.4 at $\alpha=6.75^\circ$
<input checked="" type="checkbox"/>	naca4412-il	200,000	9	78.1 at $\alpha=7^\circ$
<input type="checkbox"/>	naca4412-il	200,000	5	76.6 at $\alpha=6^\circ$
<input checked="" type="checkbox"/>	naca4412-il	500,000	9	107.5 at $\alpha=6^\circ$
<input type="checkbox"/>	naca4412-il	500,000	5	101.1 at $\alpha=5^\circ$
<input checked="" type="checkbox"/>	naca4412-il	1,000,000	9	129.4 at $\alpha=5.25^\circ$
<input type="checkbox"/>	naca4412-il	1,000,000	5	119.2 at $\alpha=4.25^\circ$

Figura 5: Familias de perfiles NACA de 4 dígitos. Fuente: Small wind turbine

3. Diseño aerodinámico

- El diseño está basado en la teoría BEM (Teoría elemento pala) introducida por (Glauert H. , 1953).

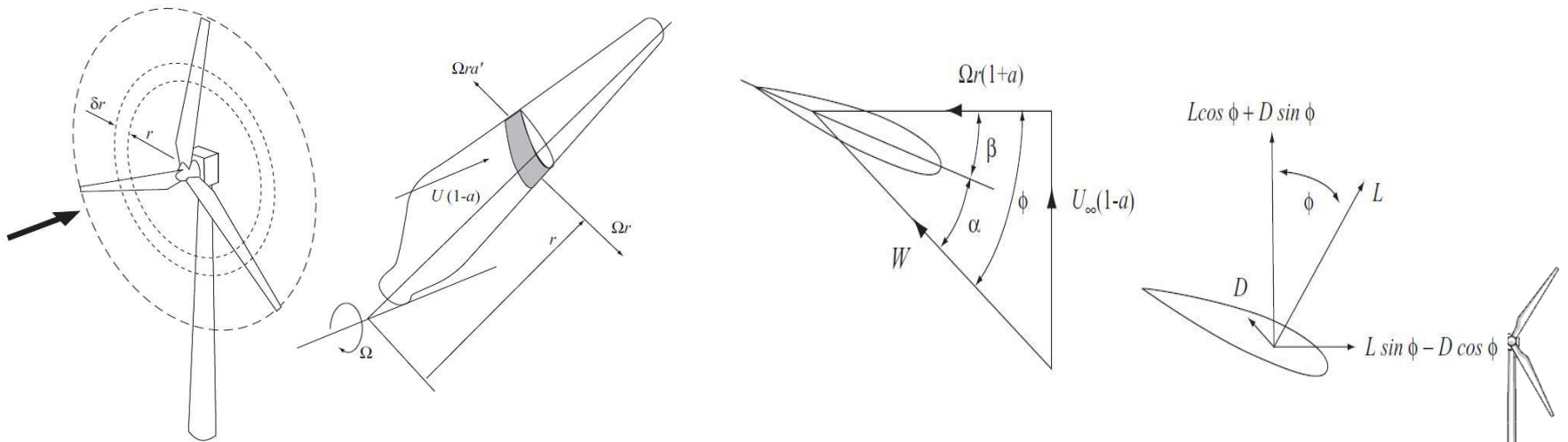


Figura 6: Izquierda, Discretización de elementos en un asa para realizar análisis aerodinámico. Derecha, triángulos de velocidades formados para calcular ángulos de flujo Fuente: Wind Energy Handbook

3. Diseño aerodinámico

1. Coeficiente de potencia. $C_p=0.593, a=1/3$

$$C_P = \frac{P}{\frac{1}{2}U_\infty^3 \rho A_d} \quad (3)$$

$$C_p = 4a(1 - a)^2 \quad (4)$$

2. Relación de velocidades en la punta

$$\lambda = \frac{\Omega R}{U_\infty} \quad (5)$$

Fuente: *Wind Energy Handbook*



3. Diseño aerodinámico

3. Relación de radios

$$\mu = \frac{r}{R} \quad (6)$$

4. Velocidades relativas

$$W = \sqrt{U_{\infty}^2 (1 - a)^2 + \Omega^2 r^2 (1 - a')^2} \quad (7)$$

Fuente: *Wind Energy Handbook*



3. Diseño aerodinámico

5. Ángulos de flujo

$$\sin \phi = \frac{U_{\infty}(1-a)}{W} \quad (8)$$

$$\cos \phi = \frac{\Omega r(1+a')}{W} \quad (9)$$

6. Cálculo de cuerdas del aspa

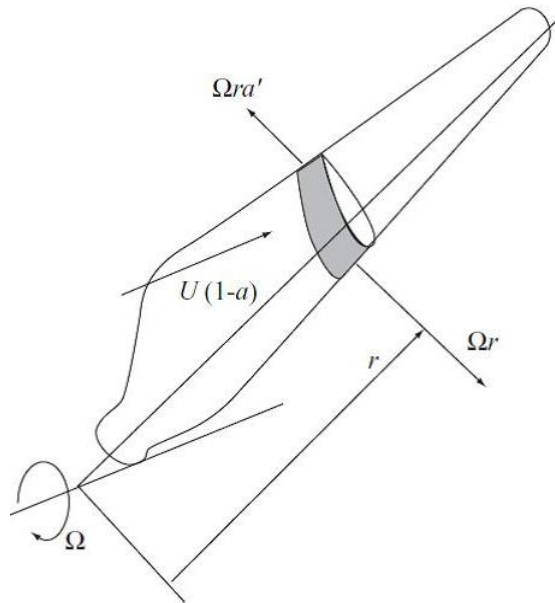
$$\frac{Nc}{2\pi R} = \frac{4\lambda\mu^2 a'}{\frac{W}{U_{\infty}} C_l} \quad (10)$$

Fuente: Wind Energy Handbook



3. Diseño aerodinámico

- Discretización de secciones



Dimensiones para su modelación:

- Ángulos
- Longitudes de cuerda

Fuente: *Wind Energy Handbook*



3. Diseño aerodinámico

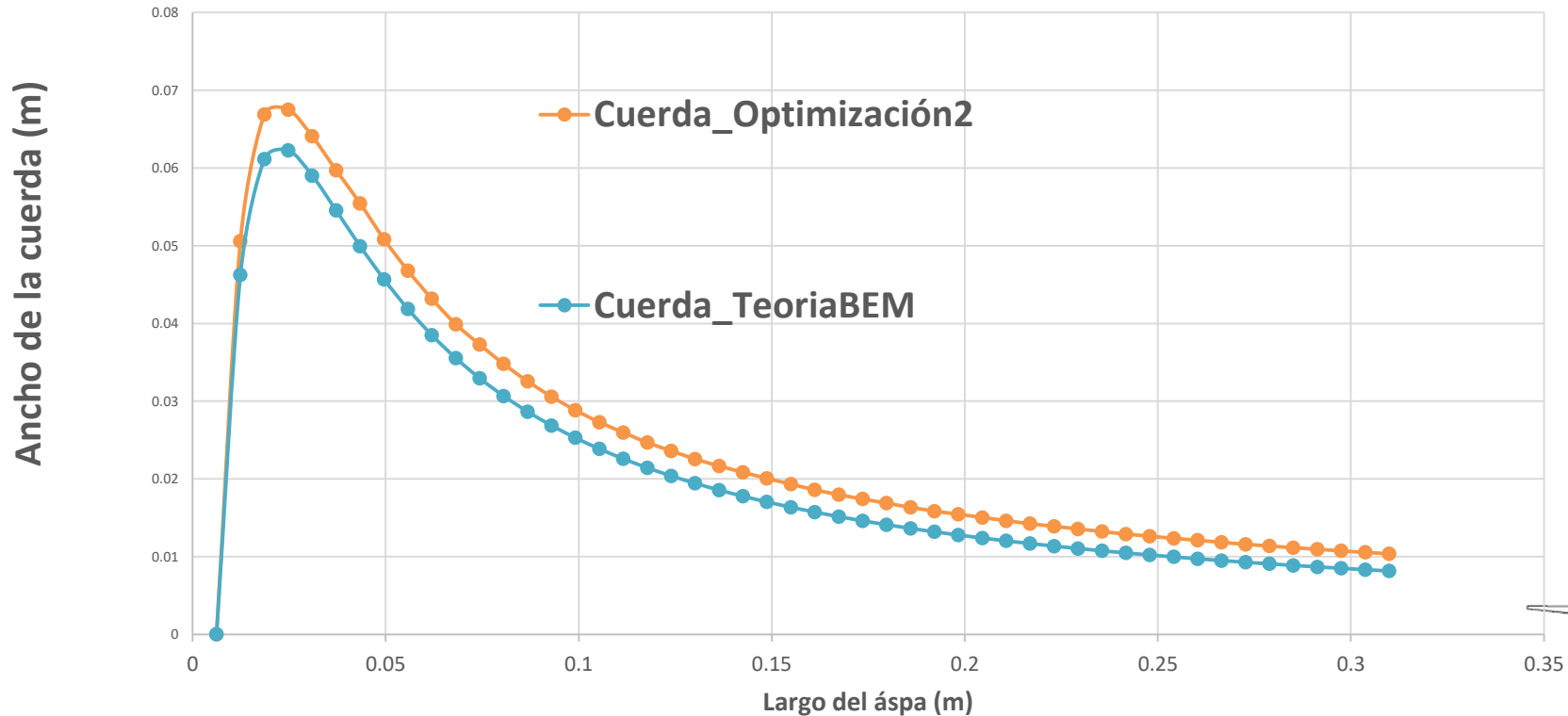
Parámetro	Magnitud
Teoría de diseño	BEM
Perfil usado	Naca 4412
Velocidad nominal de Viento[14]	8 m/s
Potencia requerida[14]	50 W
Numero de álabes [7]	3
Velocidad relativa punta [7]	9
Numero de partes de análisis [3]	50
Radio de la turbina	0.309924451 m
Velocidad de rotación	2218.45 rpm

Tabla1: Parámetros operacionales de la turbina diseñada

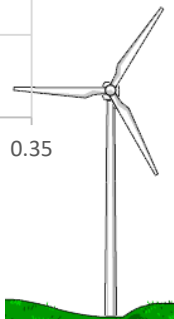


3. Diseño aerodinámico

Distribución de cuerda vs largo del áspá



Gráfica 1: Cuerda final de diseño obtenida mediante la optimización de la función de torque generado



4. Modelado

- Se utilizó el diseño de (Jiménez, Alan, Garza, Víctor, Molinero Daniel y Casillas, 2016) para diseñar el hub aerodinámico.

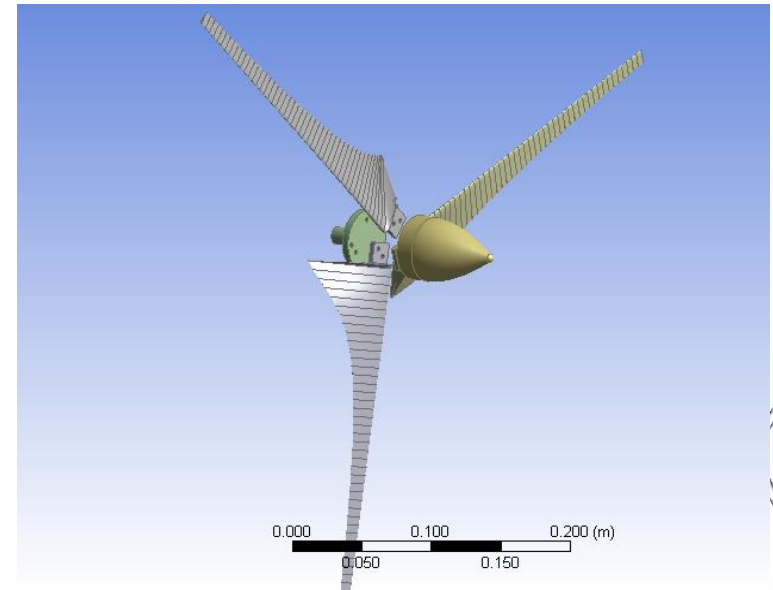
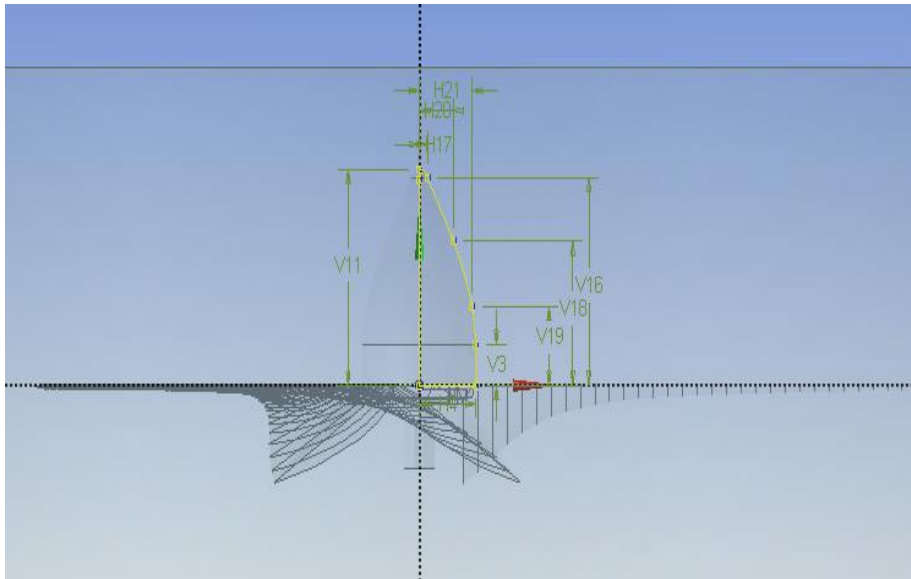


Figura 7: Izquierda, construcción del hub aerodinámico. Derecha, rotor de turbina eólica de 50 W.

5. Fabricación y pruebas



- Fabricación de los componentes de la turbina de 50 W mediante impresión 3D.



Figura 8: Fabricación de los componentes de la turbina eólica de 50 W mediante la técnica de impresión 3D, en material PLA

5. Fabricación y pruebas

Caracterización
y estudio del
túnel de viento
para verificación
del perfil de
velocidad.



Figura 9: Caracterización de perfil de velocidad en el túnel de viento utilizado para las pruebas de medición.



5. Fabricación y pruebas



Figura 10: Equipos auxiliares usados en la medición de parámetros. Tacómetro en la parte posterior del rotor, voltímetro en la parte inferior del trípode y anemómetro en la salida del túnel de viento.

Se usaron equipos auxiliares de medición para las revoluciones del rotor, velocidad de viento, voltaje generado y torque de arranque.



6. Simulación DFC

- Se utilizó la metodología usada por (Molinero, Daniel, López, Víctor, Cervantes, 2016), para hacer la estructura y mallado del rotor)

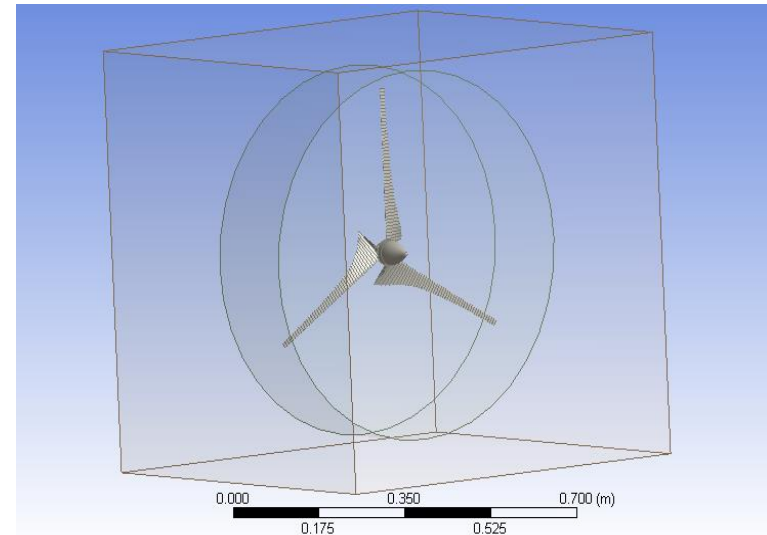
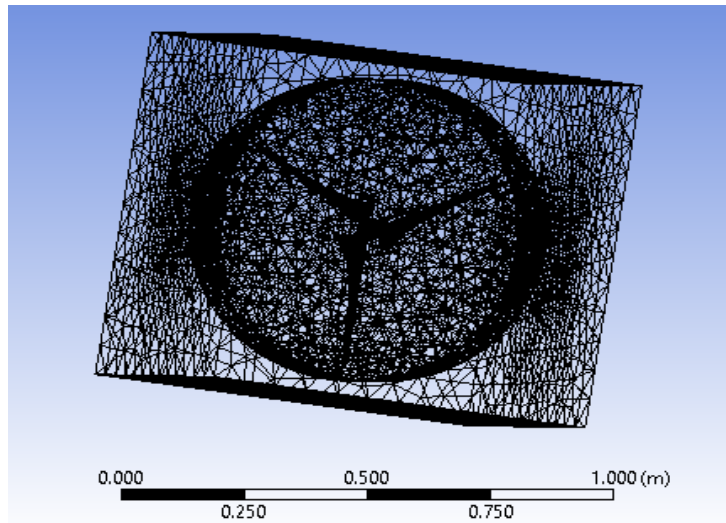
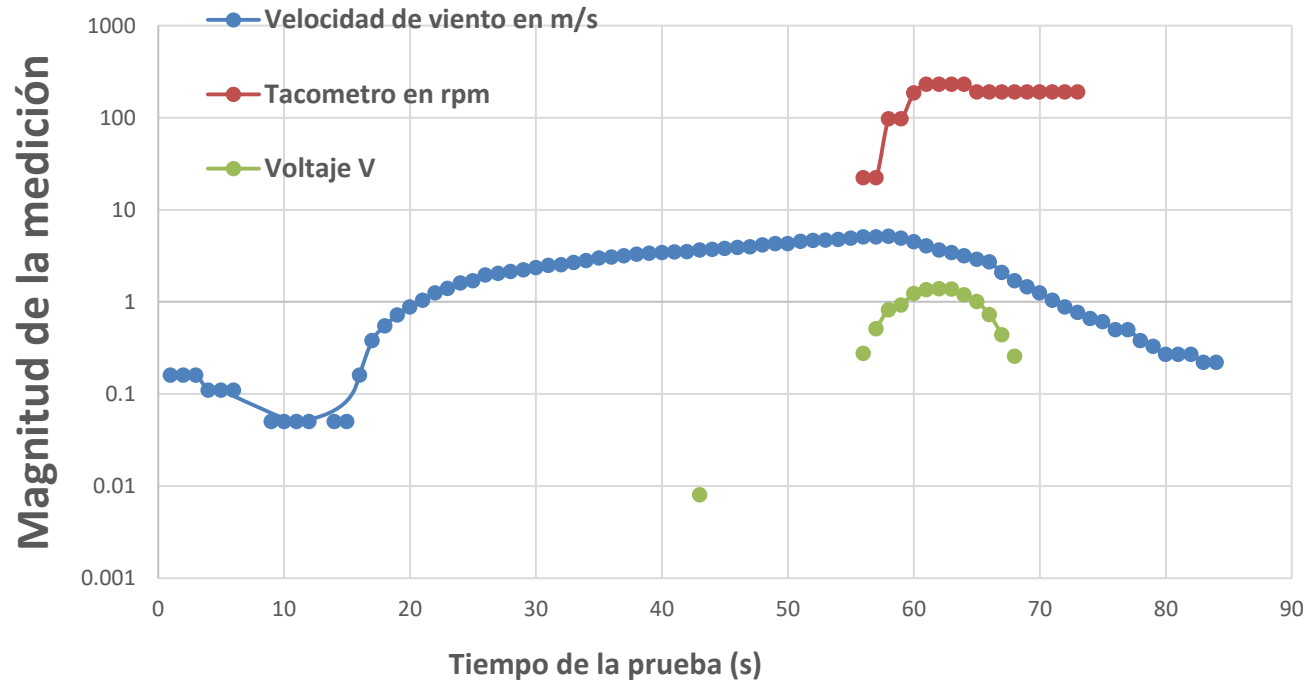


Figura 11: Topología y mallado usado para determinar el torque generado por el rotor a varias velocidades de viento.

7. Analisis de resultados

Comportamiento de secuencia de arranque # 15

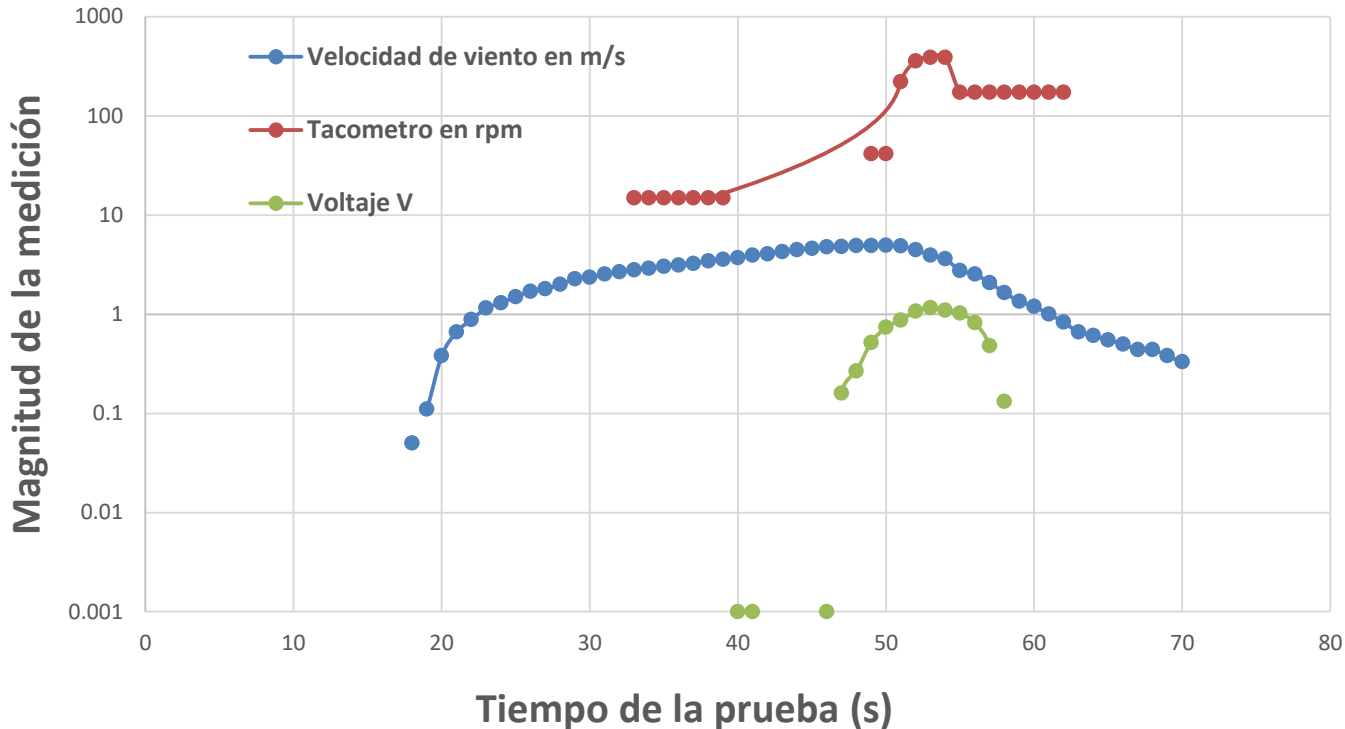


Gráfica 2: Comportamiento de la secuencia de arranque de la turbina de 50 W. Prueba 15 de 40.



7. Analisis de resultados

Comportamiento de secuencia de arranque # 30

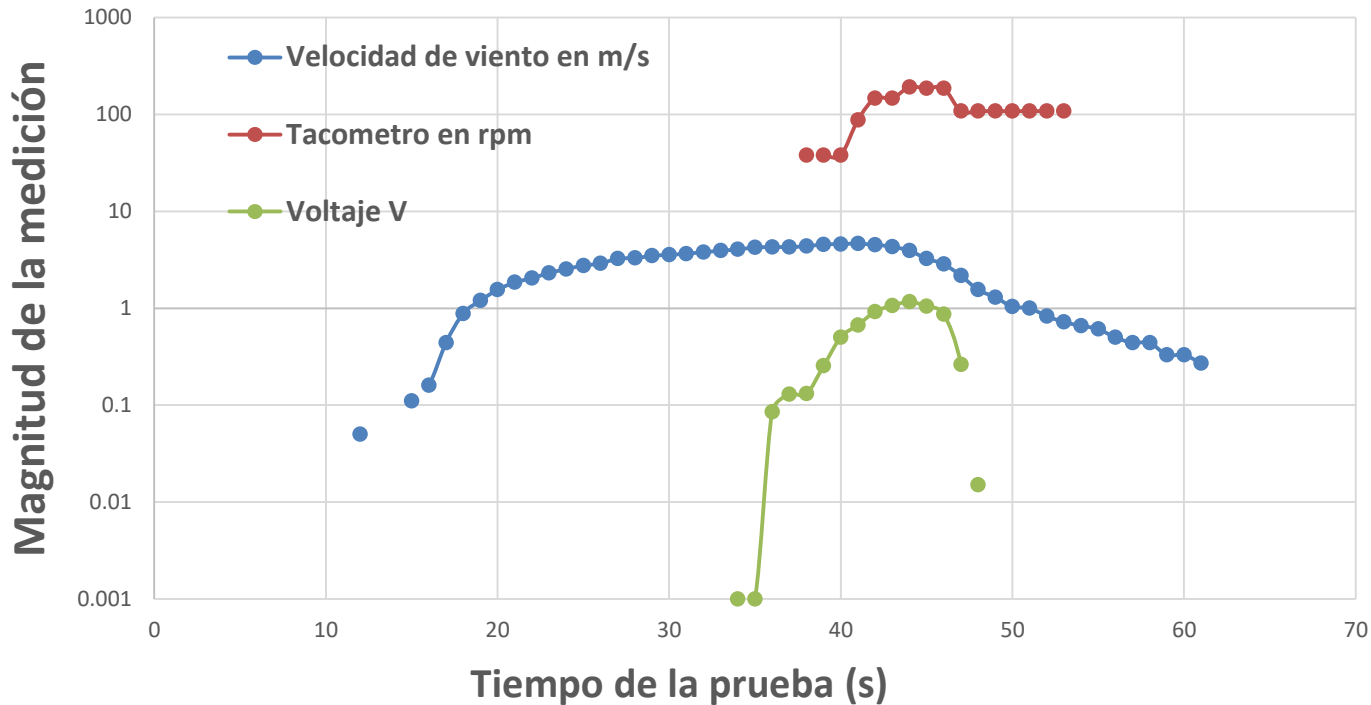


Gráfica 3: Comportamiento de la secuencia de arranque de la turbina de 50 W. Prueba 30 de 40.



7. Analisis de resultados

Comportamiento de secuencia de arranque # 40



Gráfica 4 : Comportamiento de la secuencia de arranque de la turbina de 50 W. Prueba 40 de 40.



7. Analisis de resultados

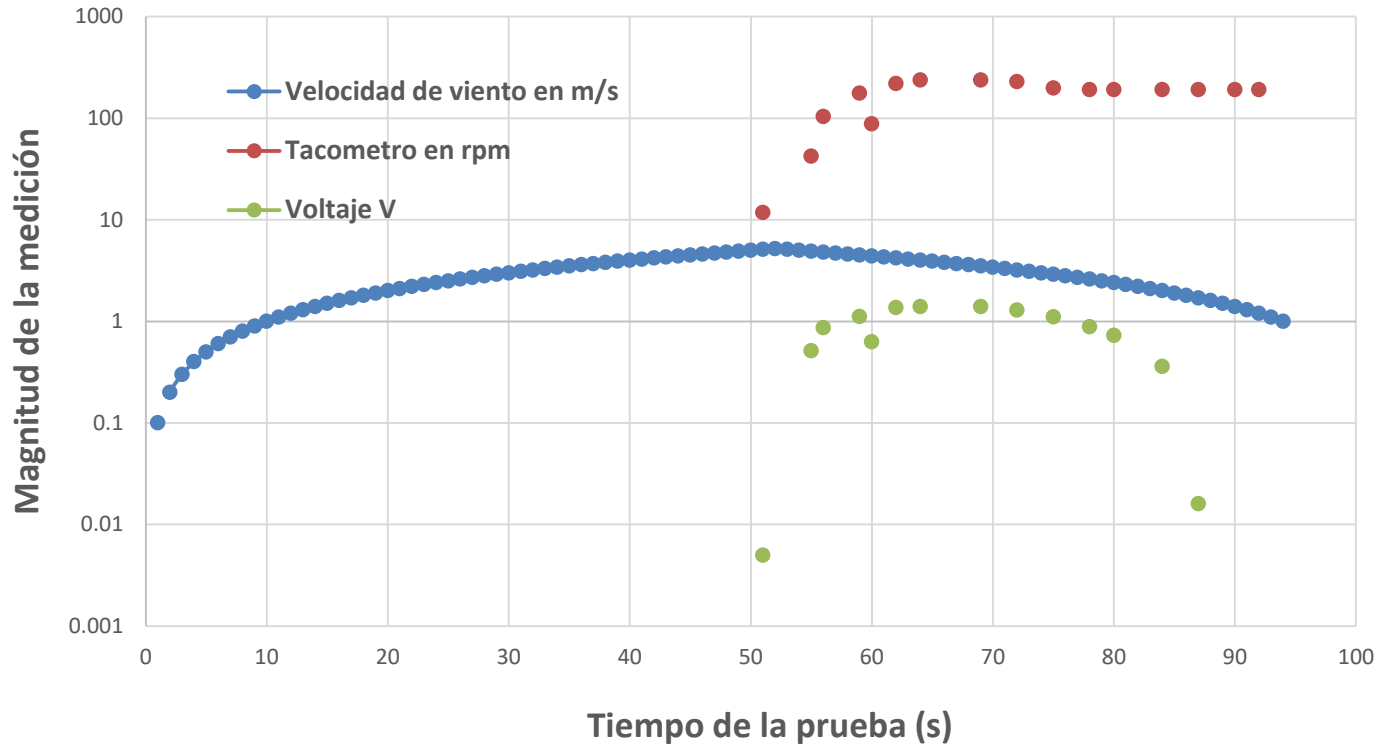
Secuencia Arranque	Vel. Viento Arranque (m/s)	Rpm (rev/min)	V (Voltaje)
5	4.84	223.45	1.4
10	4.71	283.23	1.6
15	5.09	230.45	1.38
20	4.73	231.86	1.3845
25	4.91	235.81	1.337
30	4.77	387.56	1.161
35	3.83	270.07	1.643
40	4.37	190.4	1.161

Tabla 2: Valores obtenidos en las pruebas realizadas al rotor de 50 W



7. Analisis de resultados

Comportamiento de secuencia de arranque 40 pruebas promediadas

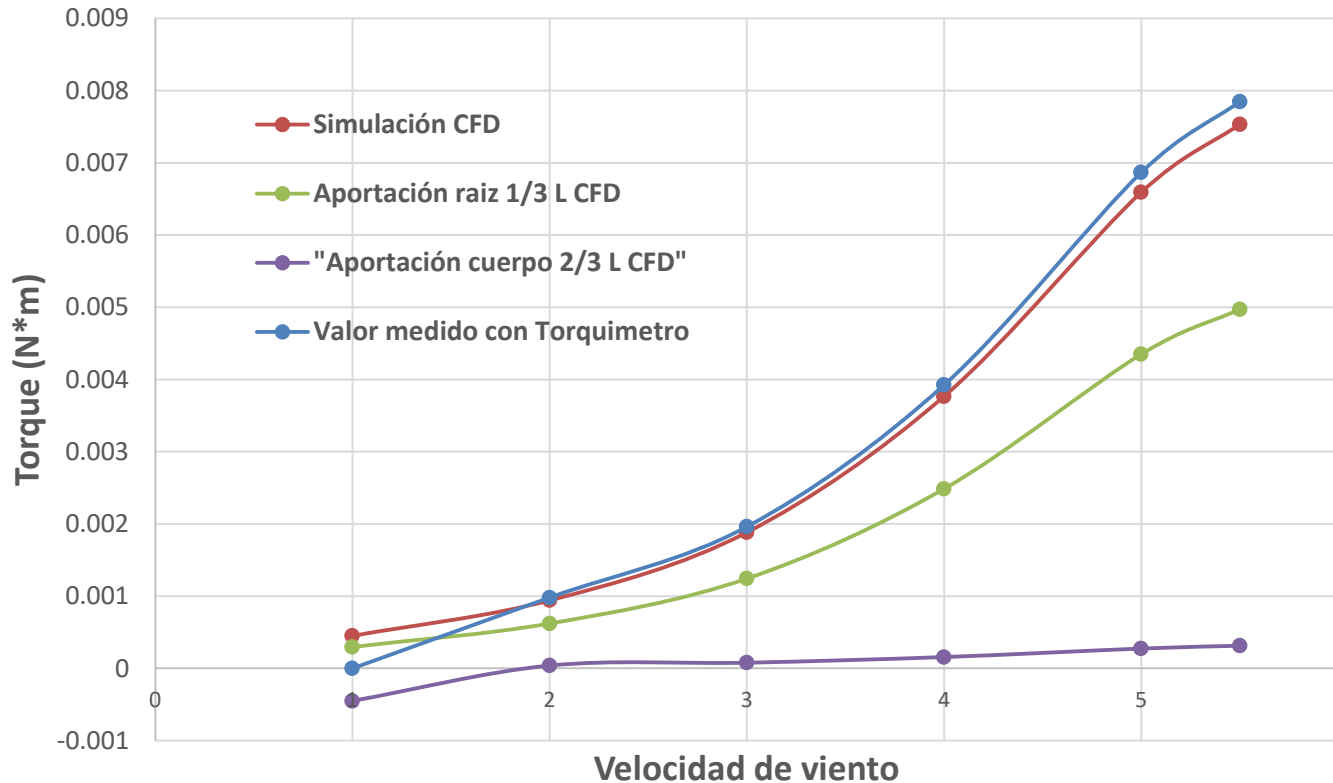


Gráfica 5: Comportamiento promediado de las 40 secuencia de arranque de la turbina de 50 W.



7. Analisis de resultados

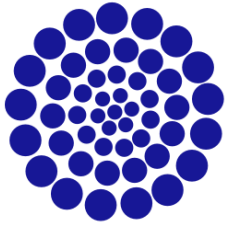
Calculo del torque de la turbina de 50 W



Gráfica 5: Aporte de cada sección de un aspa al torque de arranque de la turbina eólica de 50 W.



8. Agradecimientos



CONACYT

Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología



UNIVERSIDAD MICHOACANA
DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO
Cuna de héroes, crisol de pensadores



**Congreso Interdisciplinario de Energías Renovables,
Mantenimiento Industrial, Mecatrónica e Informática**

2017

9. Conclusiones

- El arranque de la turbina eólica de baja capacidad está altamente influenciado por la forma del perfil aerodinámico.
- Un buen diseño aerodinámico es crucial para la fase de arranque, pues se observa claramente en los resultados obtenidos que mientras la velocidad de viento disminuye, el rotor continúa acelerándose.
- Arranque de una turbina eólica de baja capacidad a más baja velocidad de viento, se verá reflejado en el aprovechamiento mayor del recurso eólico.
- La medición de parámetros en las secuencias de arranque ayudo a visualizar de mejor manera el comportamiento de la turbina cuando las condiciones de viento se encuentran cambiantes.



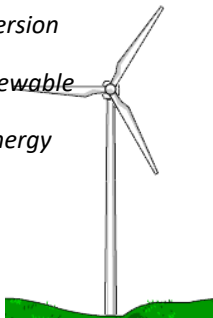
9. Conclusiones

- La validación del modelo de turbulencia con los datos de las pruebas de ensayo ayudo en gran medida para calcular los aportes inerciales de cada zona de las aspas en el rotor, se encontró que la zona de la raíz aporta el 60%-68% del torque inicial de arranque.
- El presente trabajo servirá de base para modificar aerodinámicamente los alabes de esta turbina de 50 W y mediante la propuesta de analizar el torque aportado por la raíz mediante la técnica de CFD.
- Un análisis completantario este trabajo de mejor manera sería diseñar nuevamente el rotor de 50 W, pero con otra familia de perfiles aerodinámicos.



10. Referencias

- Burton, Tony, Sharpe, David, Jenkins, Nick, B. E. (2001). *Wind Energy Handbook*.
- Ebert, P. R., & Wood, D. H. (1997). Observations of the Starting Behaviour of a Small Horizontal- Axis Wind Turbine. *Renewable Energy*, 12(3), 1–13. [http://doi.org/10.1016/S0960-1481\(97\)00035-9](http://doi.org/10.1016/S0960-1481(97)00035-9)
- Jimenez, Alan, Garza, Víctor, Molinero Daniel y Casillas, C. (2016). Metodología de Diseño del Perfil Aerodinámico de Hub para Turbinas de Viento de Eje Horizontal de Baja Capacidad, 3(9), 9–25.
- Karthikeyan, N., Kalidasa Murugavel, K., Arun Kumar, S., & Rajakumar, S. (2015). Review of aerodynamic developments on small horizontal axis wind turbine blade. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 42, 801–822. <http://doi.org/10.1016/j.rser.2014.10.086>
- Lanzafame, R., Mauro, S., & Messina, M. (2015). HAWT Design and Performance Evaluation : Improving the BEM theory Mathematical Models, 82, 172–179. <http://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.12.015>
- Lee, M., Shiah, Y. C., & Bai, C. (2016). Journal of Wind Engineering Experiments and numerical simulations of the rotor-blade performance for a small-scale horizontal axis wind turbine. *Jnl. of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 149, 17–29. <http://doi.org/10.1016/j.jweia.2015.12.002>
- Luiz, R., Freitas, U. De, Patrícia, B., & Gonçalves, F. (2017). A revised theoretical analysis of aerodynamic optimization of horizontal-axis wind turbines based on BEM theory. *Renewable Energy*, 105, 625–636. <http://doi.org/10.1016/j.renene.2016.12.076>
- Mahmuddin, F. (2017). Rotor Blade Performance Analysis with Blade Element Momentum Theory. *Energy Procedia*, 105, 1123–1129. <http://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.477>
- Mayer C. Wood D. (2004). Observations of the Starting Behaviour of a Small Horizontal- Axis Wind Turbine. *Renewable Energy*, 12(3), 1–13. [http://doi.org/10.1016/S0960-1481\(97\)00035-9](http://doi.org/10.1016/S0960-1481(97)00035-9)
- Molinero, Daniel, López, Victor, Cervantes, Al. (2016). Propuesta de Diseño Aerodinámico para Reducción de Turbulencia en la Estela de Rotación en Turbinas Eólicas de Baja Capacidad HAWT, 1(1), 1–11.
- Rocha, P. A. C., Rocha, H. H. B., Carneiro, F. O. M., Vieira, M. E., & Andrade, C. F. De. (2016). A case study on the calibration of the k e u SST (shear stress transport) turbulence model for small scale wind turbines designed with cambered and symmetrical airfoils. *Energy*, 97, 144–150. <http://doi.org/10.1016/j.energy.2015.12.081>
- Shen, X., Yang, H., Chen, J., Zhu, X., & Du, Z. (2016). Aerodynamic shape optimization of non-straight small wind turbine blades. *Energy Conversion and Management*, 119, 266–278. <http://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.04.008>
- Sun, Z., Chen, J., Zhong, W., & Jun, W. (2016). Improved blade element momentum theory for wind turbine aerodynamic computations. *Renewable Energy*, 96, 824–831. <http://doi.org/10.1016/j.renene.2016.05.035>
- Tummala, A., Kishore, R., Kumar, D., Indrajai, V., & Krishna, V. H. (2016). A review on small scale wind turbines. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 56, 1351–1371. <http://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.027>
- Wata, J., Faizal, M., Talu, B., Vanawalu, L., Sotia, P., & Ahmed, M. R. (2011). Studies on a low Reynolds number airfoil for small wind turbine applications, 54(7), 1684–1688. <http://doi.org/10.1007/s11431-011-4411-3>
- Wright, A. K. A., & Wood, D. H. (2004). The starting and low wind speed behaviour of a small horizontal axis wind turbine, 92, 1265–1279. <http://doi.org/10.1016/j.jweia.2004.08.003>





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. BCIERMIMI is part of the media of ECORFAN-Mexico, S.C., E: 94-443.F: 008- (www.ecorfan.org/ booklets)