

Simulación de Hélices de aerogenerador eólico para su optimización con software CAD

Roxana-García Andrade¹, Armando-Martínez Reyes¹, Arnoldo-Fernández Ramírez¹, Carlos-Hernández Santos¹, Carlos Daniel-Márquez García

¹Tecnológico Nacional de México, Campus Nuevo León; Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Av. Eloy Cavazos 2001, Toluca, Guadalupe, N.L. 67170, México. Email principal: roxana.ga@nuevoleon.tecnm.mx

Resumen

Hoy en día surge la energía eólica como una nueva generación de energía alterna, siendo un nicho no optimizado. En este proyecto se realizara una simulación de, los flujos de viento que inciden en un aerogenerador vertical. Con esta simulación se analizara el comportamiento de las hélices y el rotor. Para lograr la máxima rotación con el menor flujo de aire. Utilizando el software CAD, se definen los parámetros de la simulación bajo condiciones, se realiza el diseño de las hélices y posteriormente se coloca una cabina tipo túnel de tal manera que el flujo del aire simule ser el viento. Analizando la información de esta simulación se determinó que los parámetros que influyen para optimizar el diseño de las hélices son, Curvatura de la hélice, Altura, Cuerda (Ancho), material, número de hélices. Los resultados obtenidos son: Ancho de la hélice 15", altura de la hélice 60", número de hélices 2, material aluminio 6061-T6SS, velocidad de viento exterior 4 m/s, potencia (ley de Betz) 21.19 W. y 100.25 RPM

Palabras clave— Aerogenerador, Diseño asistido por computadora, Eólico, Energías limpias, Simulación..

Abstract

Nowadays, wind energy emerges as a new generation of alternative energy, being an unoptimized niche. In this project, a simulation of the wind flows that affect a vertical wind turbine will be carried out. With this simulation the behavior of the propellers and the rotor will be analyzed. To achieve maximum rotation with the least air flow. Using the CAD software, the simulation parameters are defined under conditions, the design of the propellers is carried out and subsequently a tunnel-type cabin is placed in such a way that the air flow simulates the wind. Analyzing the information from this simulation, it was determined that the parameters that influence optimizing the design of the propellers are: Curvature of the propeller, Height, Chord (Width), material, number of propellers. The results obtained are: Propeller width 15", propeller height 60", number of propellers 2, material aluminum 6061-T6SS, external wind speed 4 m/s, power (Betz's law) 21.19 W. and 100.25 RPM

Keywords— Wind turbine, Computer-aided design, Wind power, Clean energy, Simulation.

1. INTRODUCCIÓN

El desarrollo de los aerogeneradores eólicos, de uso doméstico o para casa habitación ha sido lento con respecto a la energía eléctrica generada por el suministro de celdas solares. Ha sido

lento debido a que la eficiencia en la generación de celdas fotovoltaicas es mayor, por lo cual, examinando esta situación, se observa la necesidad, de analizar diseños de paletas o hélices, sistemas de transmisión, generadores y otros accesorios que permitan aumentar la eficiencia en aplicaciones domesticas de bajo flujo de viento. La limitante más importante por resolver es el movimiento del rotor con una velocidad de viento baja de apenas 3 m/s Para el desarrollo de este trabajo se inició, con el estudio de los tipos de aerogeneradores que existen en el mercado. Los aerogeneradores de viento se pueden separar en dos tipos básicos determinados por el eje en el que giran. Los que giran alrededor de un eje horizontal son las más comunes, mientras que los generadores eólicos de eje vertical se utilizan con menos frecuencia como lo menciona U.K, Saha [1]. Los aerogeneradores eólicos de eje horizontal, también conocidas como TEEH son el estilo común en el que la mayoría de nosotros pensamos, teniendo un diseño similar a un molino de viento. Tiene unas cuchillas que asemejan a una hélice que gira sobre un eje horizontal. Estas a su vez se dividen en las que el rotor gira frente a la torre y las que rotan detrás de la torre.

Sin embargo para la implementación de estas se requiere de una gran infraestructura, son proyectos complejos que no compiten con el mercado de pequeños generadores como son los aerogeneradores de uso residencial. Los aerogeneradores de tipo vertical tienen la gran ventaja de no contener un sistema de orientación. Esto ayuda en la instalación que puede colocarse a nivel de piso. Existen dos tipos de diseños básicos el Savonius y Darrieus de acuerdo con AF Galindo [2]. En los últimos tiempos, aunque algunos investigadores en todo el mundo han informado de mejoras en el rendimiento del rotor Savonius, el diseño técnico disponible todavía no es capaz de satisfacer la demanda de un convertidor de energía eólica eficiente a pequeña escala con bajas velocidades de viento. Se han propuesto modificaciones en el diseño de las hélices, y de algunos materiales para su fabricación. De igual manera han intentado el mejoramiento del coeficiente de potencia, así lo menciona S. Roy en [3]. De acuerdo con E.M. Alave [4] donde hace un comparativo de diversos aerogeneradores verticales y sus últimos aportes obteniendo como conclusión la siguiente información.

Tabla 1 Resumen de aportes recientes de aerogeneradores verticales.

Aerogenerador	Investigación	Aportes	
Savonius [5]	Estudio de factibilidad de instalación de aerogenerador	Con el uso de deflectores y parámetros de distancia adecuados, el Cp muestra un incremento	Desarrollaron un estudio sobre la construcción de turbinas Savonius para casas subsidiadas en México.
Darrieus [6]	Aplicabilidad Hidrocinética	Potencial en turbinas de tipo H y uso de Gurney Flaps para localizar el flujo en estudios posteriores	Estudian la turbina Darrieus de tipo H y L con dos palas y un perfil aerodinámico favorable para aplicaciones

Banki [7]	Generación eléctrica sobre autopista de mediana velocidad	Energía aprovechable de 107.1 J; de la cual se cosecha suficiente para un sistema de 18 lámparas	Realizan una investigación completa considerando la generación eléctrica sobre una autopista de mediana velocidad,
-----------	---	--	--

Teniendo esta información, se observa que los aerogeneradores verticales son la mejor opción para la generación de energía de potencia baja, el nicho de generación de tipo residencial. Donde la generación tiene un rango de 3 kW a 10kW. “Los aerogeneradores de eje vertical no son explorados actualmente como solución a una colección de energía masiva, sino como una solución a sistemas eléctricos aislados, donde nuevas configuraciones, arreglos y la mejora de eficiencia de las mismas pueden competir económicamente con otras soluciones de generación”, así lo menciona, E.M. Alave [4]. Sin embargo se exploró el modelo Winside siendo este un modelo considerado vertical, de la familia de Savonius, ya que el eje de rotación se encuentra perpendicular al piso. Este modelo de aerogenerador está basado en ingeniería de vela. Partiendo de este modelo, se procedió a realizar el diseño en el software CAD-CAM, así como, la simulación, de los flujos de viento. Con la finalidad de conocer el comportamiento del rotor y la generación de energía, simulando los flujos de viento a la velocidad real de la zona. Con la información que se obtuvo de la simulación se realizara el prototipo físico de las hélices. Como primer paso, se realizó un estudio del viento, del viento que se genera en los alrededores donde se instalara el prototipo. Esto con la finalidad de recrear en la simulación, vientos similares. El viento es el recurso natural empleado para la transformación de energía mecánica que posteriormente será energía eléctrica, juega un papel bastante importante de tal manera que se analizaron las estadísticas, de viento en la zona donde se pretende instalar el aerogenerador. Específicamente en los alrededores del Instituto Tecnológico de Nuevo León. Teniendo como conclusión, según R. García en [8], que en promedio al año, la velocidad de viento es entre 3.09 m/s a 4.12m/s. A pesar de muchas ventajas o conveniencias que tiene la energía eólica, se tiene la gran desventaja que el viento es disperso y aleatorio, como afirma L. Córdoba en [9]. El viento se puede representar como una magnitud vectorial, y esta varía tanto en dirección, sentido y magnitud. De tal manera que, este tipo de generación de energía, no ha sido muy considerada, como altamente eficiente para la generación de energía eléctrica, por medio de un aerogenerador para uso residencial.

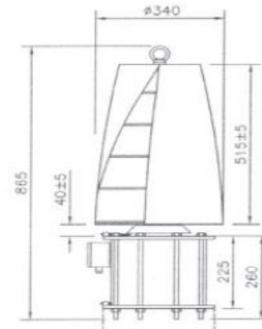
2. DESARROLLO

2.1 Prototipo Winside

Este prototipo de hélices, depende directamente del área, de barrido del rotor, este barrido es la zona perpendicular al rotor, como señalan L. Córdoba y W. Tian en [9,13]. Cuando esta zona es incrementada, automáticamente se incrementa la captura de la fuerza del viento. Este tipo de aerogeneradores también se dividen en 2 modelos, que dependen directamente de la clase de resistencia del viento. Este tipo de modelos son diseñados para velocidades de viento de 40 m/s a 60 m/s. A

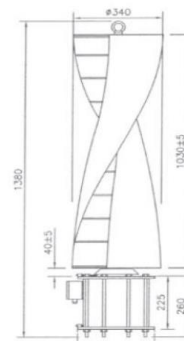
continuación en figura 1 y 2 se muestra los planos de las hélices de estos modelos.

Figura 1 Aerogenerador Winside modelo WS-0.15



Fuente: <https://www.mesemar.com/>

Figura 2 Aerogenerador Winside modelo WS-0.30B



Fuente: <https://www.mesemar.com/>

Este aerogenerador es más eficiente que las normales, pueden operar con vientos bajos desde 1 m/s. Es importante mencionar que para este tipo de aerogenerador no es relevante la dirección del viento, por su diseño no requiere girarlo a su dirección, para mover el rotor. Esto es por su forma tipo espiral, de las hélices

2.2 Cálculos

Como ya lo comentamos la energía que genere el aerogenerador eólico se almacenara en un banco de baterías. Sabiendo que se requiere una cantidad de energía de 5 kW Como sabemos este tipo de aerogenerador depende de la altura del piso donde se instale.

Teniendo una potencia del viento de

$$P = \frac{1}{2} \rho v^2 * vA \quad (1)$$

Considerando la densidad de aire, y la velocidad de 4.12 m/s se tendrá una potencia de viento por unidad de área, siendo esta de 42.834 W/m². Con esta información aseguramos que el aerogenerador se mueva con esta velocidad de viento. Para conocer la potencia nominal de diseño de rotor, se consideró un rendimiento aerodinámico

$$nt = nm * np * Cp \quad (2)$$

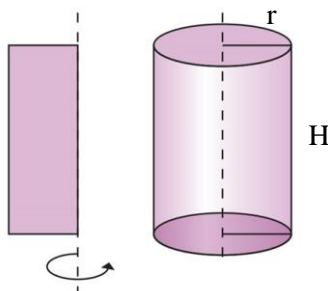
Teniendo una eficiencia mecánica en 1, eficiencia en sistema eléctrico de 0.85 y el coeficiente de potencia en 0.30, se obtiene un rendimiento global (nt) de 0.255
 Con este dato podemos obtener la potencia nominal del aerogenerador, siendo esta:

$$P_{ns} = \frac{P}{nt} \quad (3)$$

Teniendo una potencia nominal de 167.976 W.
 El área de barrido del aerogenerador vertical es el área que cubren las hélices figura 3[4].

$$A = DH \quad (4)$$

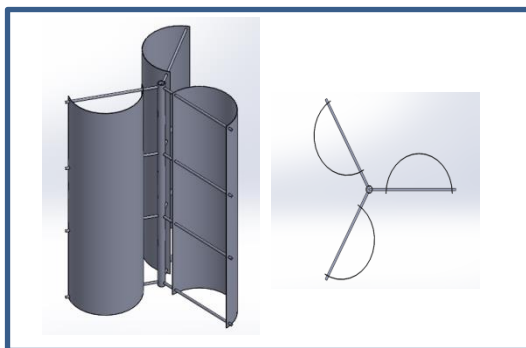
Figura 3 Área de barrido



2.3 Diseño de prototipo

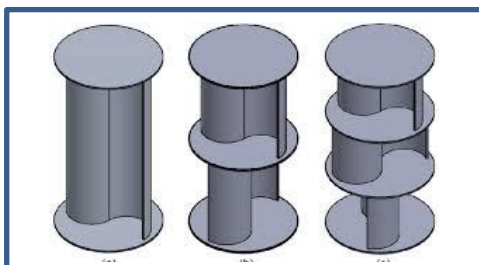
El primer diseño experimental que se realizó fue con ayuda del software CAD figura 4. Se eligió el modelo Windside, ya que es de los pocos aerogeneradores verticales que pueden tener movimiento sus hélices o palas con velocidades de viento mínimas desde 2 m/s Así lo menciona R. García en [11], donde se analizaron las características generales de diseño.

Figura 4 Primer Diseño de Hélices



Como se observa en nuestro primer diseño fue muy similar a las hélices Savonius

Figura 5 Diferentes tipos de turbinas Savonius



En la siguiente figura se muestra el plano de las hélices, estas medidas se utilizaron para realizar los modelos en el software CAD.

Figura 6 Plano de las hélices

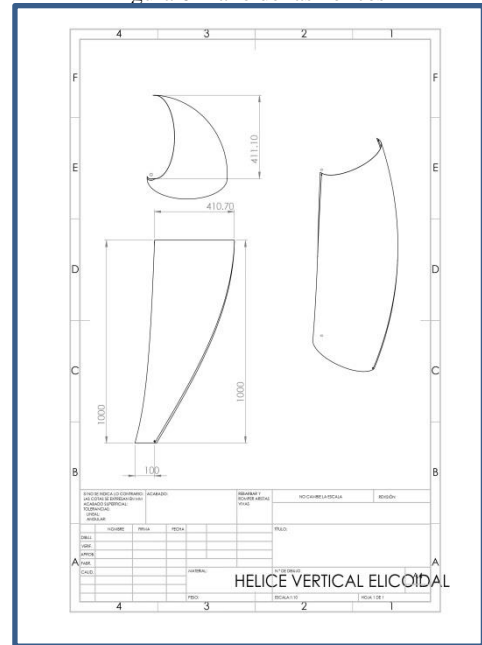
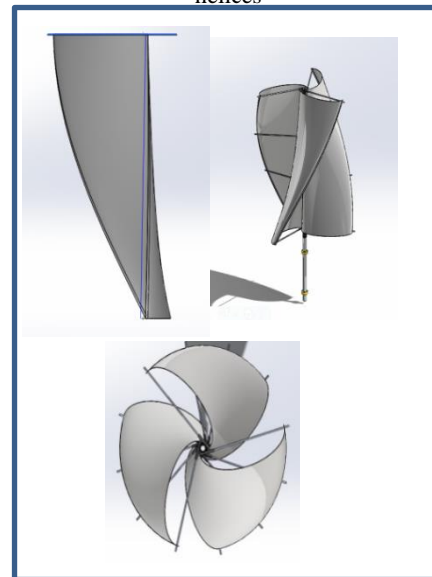


Figura 7. Curvatura de hélice, 3 hélices con rotor y vista superior de las hélices

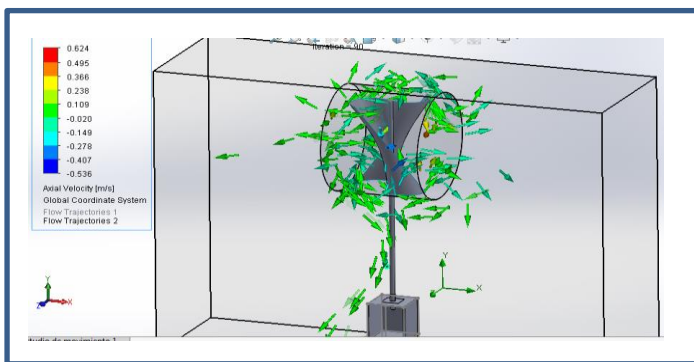


2.4 Simulación

En el Instituto Tecnológico de Nuevo León, lugar donde se está desarrollando este prototipo, no se cuenta con un laboratorio equipado para realizar experimentación física, por lo cual se decidió, recurrir a la simulación con apoyo de software CAD, el cual cuenta con herramientas necesarias para evaluar la eficiencia y comportamiento en condiciones similares a las naturales de flujo del viento. Una simulación del comportamiento de las hélices podría darnos datos que ayuden en la evaluación de rendimiento de las mismas, y a

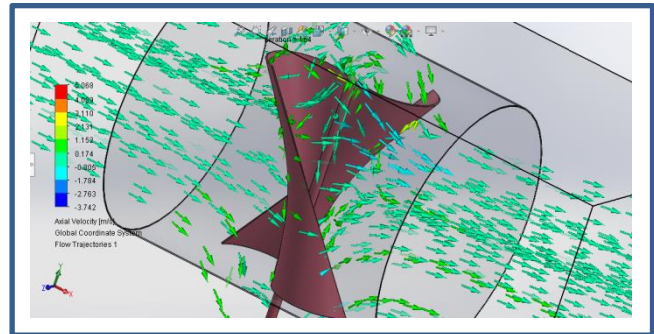
su vez ayudar a optimizar su diseño. De igual manera antes de construir un prototipo de las hélices, una simulación en CAD, te permite probar varios diseños y escenarios para obtener un mejor entendimiento de como funcionarían en la práctica. Esto puede ayudar a ahorrar tiempo y dinero al evitar la fabricación de prototipos costosos que podrían no funcionar como se esperan. Las siguientes pruebas muestran el posible comportamiento de las hélices contra el flujo de aire externo. Es decir, de acuerdo a la velocidad de viento registrada en la zona, conoceremos si se tiene algún movimiento en el eje central del generador, rotor. Lo primero que se consideró para esto, fue el modelo detallado de las hélices, el cual se realizó con anterioridad de acuerdo con R. García en [11]. Otro parámetro analizado con anterioridad son las condiciones del viento en la región teniendo como resultado los rangos de velocidad de viento de 3.09m/s a 4.12m/s. en la zona donde trabajará el aerogenerador. M. Fábregas en [12] Sugiere una cabina para la evaluación del flujo, con el fin de simular la entrada y salida del aire aplicado al aerogenerador. En base a esta investigación se procedió a realizar condiciones similares, que consisten en una cabina en forma de túnel. Las características del perfil aerodinámico de las hélices según lo plantean D.E. Moyado en [10] son: El borde de perfil, es el primero que entra en contacto con el flujo, el borde de salida, es donde se concentran los flujos de alta y baja presión. Cuerda, es la línea recta entre el borde de perfil y el borde de salida. Este perfil dinámico coincide con L.Bertolin en [14] en su trabajo. Esta información permite validar el perfil dinámico, que se utilizó para la simulación. Siendo estas características de mayor relevancia en turbinas eólicas verticales. En la simulación se agregaron algunos parámetros, como son: Número de hélices, material de las hélices, espesor de las hélices.

Figura 8. Prueba 5 El flujo de aire crea remolinos en la zona.



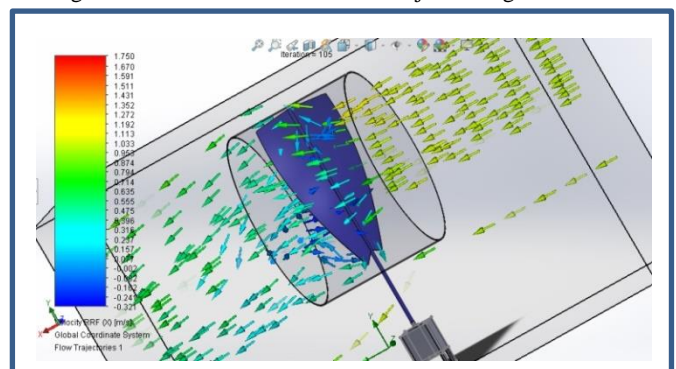
En la parte de “Flow trajectories” – “Starting point” se deberá seleccionar todas las caras de las aspas. En la prueba número 6, se le agrego material para identificar qué valores nuevos de velocidad arrojaría el software. A partir de la prueba número 7 los parámetros se corrigieron por lo que el sentido del flujo de aire era correcto y las líneas tocaban la superficie de las aspas con la finalidad de que estas se desplazaran a lo largo de la superficie con gran facilidad. Generando una velocidad axial a lo largo del eje X = 0.852 – 1.806 m/s.

Figura 9. Prueba 9 Las líneas de flujo entran y salen por la cabina tipo túnel.



Las líneas de flujo de aire muestran que se desplazan de manera “moderada” a lo largo de la superficie de las hélices. Generando una velocidad axial a lo largo del eje X = 1.152 – 1.784 m/s. En la prueba 10, se aumentaron el núm. de aspas a 4, por lo que las líneas de flujo seguían varias direcciones a lo largo de la superficie, esto físicamente lo podemos considerar como un auto frenado de las hélices, ya que la gran variedad de direcciones que atacan a las aspas generan que no gire de manera constante. Generando una velocidad axial a lo largo del eje X = 0.089 – 1.153 m/s. Al editar la configuración de las aspas y disminuir la cantidad a 2, las líneas de flujo de aire se comportaron de manera distinta. Es decir, siguieron el “canto” en la mayoría de la superficie sin tantos cambios de sentido. Generando una velocidad axial a lo largo del eje X = 4.680 – 4.898 m/s, a partir de aquí podemos concluir que a menor número de hélices, los remolinos de viento serán menores, y las líneas de flujo de aire se desplazaran por la superficie de las aspas sin problema. A partir de la prueba núm. 13 figura 10, hubo cambios radicales, se aumentó el número de parámetros a estudiar, se comparó la velocidad de entrada (aire externo) contra la velocidad de salida (velocidad del giro del eje), se aplicó la ley de Betz para calcular la generación de potencia, y se especificó de manera clara cuanto velocidad nos va a entregar el eje de las hélices. Esto lo podemos observar en la tabla 2 donde se muestran los resultados de las pruebas número 34 a la 47.

Figura 10. Prueba 13 Las líneas de flujo hacen girar el rotor.



Las dimensiones de las aspas en las simulaciones 13 a la 32 se consideraron como grandes, es decir, Altura = 80” y Ancho = 20”, en todo momento, incluyendo el mismo tipo de material PVC rígido. Los cambios en estas pruebas fueron, la velocidad de entrada proveniente del medio ambiente de 1 m/s, 2 m/s, 3 m/s, 4

m/s y 5 m/s, el ángulo de las aspas 0.25rev y 0.5rev, además de la cantidad de las aspas 2 y 3 aspas. En las siguientes pruebas núm. 33 a la 42 se modificaron las dimensiones de las aspas, considerando, un tamaño mediano, es decir, 15” de ancho y 60” de altura así mismo el material de las aspas, considerando el material aluminio 6061 T6. De igual manera en las pruebas de la 42 a 47 se consideró un tamaño de las aspas como chicas 10” de ancho y 40” de altura, así como el material de las aspas, siendo este el Poliestireno HIPS.

Tabla 2 Perfil Aerodinámico, de la cabina tipo túnel de la simulación y Resultados

Perfiles aerodinámicos	Num. prueba	Num. prueba	Num. prueba	Num. prueba	Num. prueba	Num. prueba	Num. prueba
Numero de prueba	34	37	39	43	45	46	47
Curva de la hélice interna	0.25 rev.	0.25 rev.	0.25 rev.	0.25 rev.	0.25 rev.	0.25 rev.	0.25 rev.
Curva de la hélice externa	0.25 rev.	0.25 rev.	0.25 rev.	0.25 rev.	0.25 rev.	0.25 rev.	0.25 rev.
Ancho de la hélice	15"	15"	15"	10"	10"	10"	10"
Altura de la hélice	60"	60"	60"	40"	40"	40"	40"
Numero de hélices	2	2	3	2	2	2	2
Tipo de material	Aluminio 6061-T6 (SS)	Aluminio 6061-T6 (SS)	Aluminio 6061-T6 (SS)	Poliestireno (HIPS)	Poliestireno (HIPS)	Poliestireno (HIPS)	Poliestireno (HIPS)
Espesor de las hélices	0.125"	0.125"	0.125"	0.125"	0.125"	0.125"	0.125"
Velocidad ambiente externo	2 m/s	5m/s	2 m/s	1 m/s	3 m/s	4 m/s	5 m/s
Velocidad tangencial en el eje	1.7 m/s	4 m/s	0.75 m/s	0.5 m/s	1.6 m/s	2.5 m/s	2.5 m/s
Potencia entregada (Ley de Betz)	1.35 Watts	21.19 Watts	1.35 Watts	0.075 Watts	2.03 Watts	4.82 Watts	9.42 Watts
RPM entregados por el eje de las hélices	42.6 RPM	100.25 RPM	18.79 RPM	18.79 RPM	60.15 RPM	93.98 RPM	93.98 RPM

3. RESULTADOS

Los datos que surgieron de las pruebas fueron archivados en una hoja de Excel para estudiar a detalle los resultados y evaluar cual seria las mejores opciones para nuestro prototipo. A continuación, se muestran la tabla y gráficas, e las pruebas 43 a la 47. En las tablas que se realizaron, se observan las características de las hélices, que son tamaño, curvatura, espesor de material, material para simulación y numero de hélices, tabla 3, y figuras 11 y 12 El siguiente parámetro se trata de la velocidad simulada en la cabina tipo túnel de viento, por la región donde se instalara el prototipo estas velocidades varían de 1 m/s a 5 m/s, por último el parámetro de giro del eje o rotor en RPM.

Tabla 3. Pruebas con variaciones en núm. de hélices y material

Núm. prueba	Características de Hélices	Velocidad en el túnel (externo) m/s.	Potencia del eje Watts.	RPM del rotor.
43	Chica/10"x40"/0.25rev/0.125espesor/Poliestireno (HIPS)/2 hélices	1	0.075	18.72
44	Chica/10"x40"/0.25rev/0.125espesor/Poliestireno (HIPS)/2 hélices	2	0.6	26.31
45	Chica/10"x40"/0.25rev/0.125espesor/Poliestireno (HIPS)/2 hélices	3	2.03	60.15
46	Chica/10"x40"/0.25rev/0.125espesor/Poliestireno (HIPS)/2 hélices	4	4.82	93.98
47	Chica/10"x40"/0.25rev/0.125espesor/Poliestireno (HIPS)/2 hélices	5	9.42	93.98

Figura 11. Grafica Velocidad vs Potencia del rotor

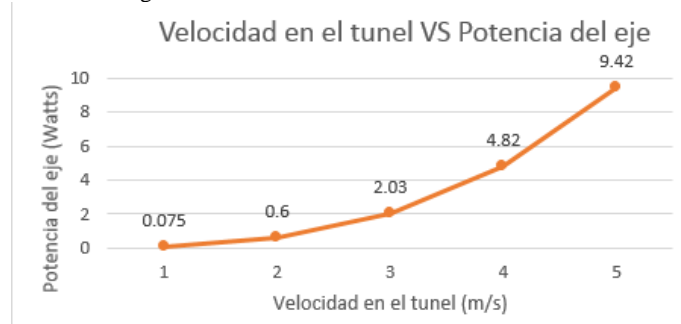
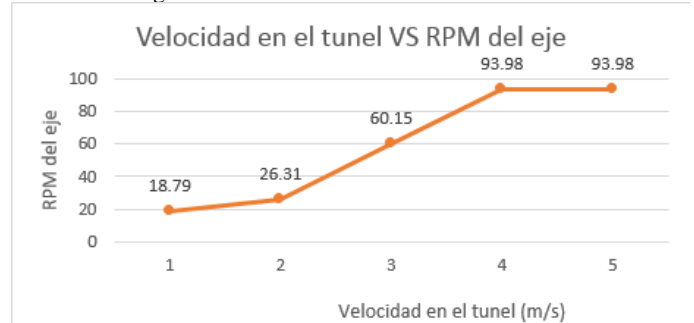


Figura 12. Grafica Velocidad vs RPM del rotor.



Las pruebas de numero 43 a 47, tabla 3, figuras 12 y 13 se modificaron las hélices a tamaño pequeño siendo este de un ancho de 10” y 40” alto, el material de las hélices es poliestireno, se observó que a una velocidad de viento de 4 m/s y de 5 m/s la velocidad del rotor es de 93.98RPM. En las pruebas 33 a la 37 con un tamaño de hélices medianas, el material aluminio, 2 hélices y viento de 4 m/s se obtiene una velocidad de rotor de 61.4 RPM y vientos de 5 m/s su velocidad incrementa a 100.25 RPM. Siendo esta prueba de mayor velocidad obtenida.

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

Como resultado de este trabajo de simulación, se realizó la implementación del prototipo de hélices para el aerogenerador eólico. Se consideró el diseño aerodinámico propuesto, así como las medidas aportadas en la simulación. Siendo las más optimas, el número 46 con un material de poliestireno, tamaño mediano, número de hélices 2, como se muestra en la figura 18. Cabe mencionar el resultado de la simulación más óptimo fue en la prueba número 37 con hélices de aluminio, tamaño mediano, pero considerando el costo y la rigidez de este, se optó por la construcción en poliestireno.



Figura 18 Hélices de Poliestireno

4.1 Recomendaciones.

La siguiente fase de este prototipo es, el diseño del acoplamiento mecánico de las hélices y el generador. Así como la selección e investigación de diferentes tipos de generadores, más adecuados para esta implementación.

5. REFERENCIAS

- [1] U.K. Saha, & M. J. Rajkumar, (2006). On the performance analysis of Savonius rotor with twisted blades. *Renewable Energy*, 31(11), 1776–1788. <http://doi.org/10.1016/j.renene.2005.08.030>
- [2] AF Galindo, JA Rosero y CV Labriola, "Estudio de potencial de generación eólica y diseño de perfil asimétrico para un aerogenerador Darrieus tipo H", *2022 Congreso Bienal del IEEE de Argentina (ARGENCON)*, San Juan, Argentina, 2022, pp. 1- 8, doi: 10.1109/ARGENCON55245.2022.9939833.
- [3] S. Roy, Saha UK. Review of experimental investigations into the design, performance and optimization of the Savonius rotor. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy*. 2013;227(4):528-542. doi:[10.1177/0957650913480992](https://doi.org/10.1177/0957650913480992)
- [4] E.M. Alavés, R. L., Orellana, & D. F. Sempértegui ,. (2022). Estado del arte sobre aerogeneradores de eje vertical. *Investigación & Desarrollo*, 22(1), 161-172. Epub 30 de julio de 2022. <https://doi.org/10.23881/idupbo.022.1-13i>
- [5] R. D. Maldonado et al., "Design, simulation and construction of a Savonius wind rotor for subsidized houses in Mexico," *Energy Procedia*, vol. 57, pp. 691-697, 2014, doi: 10.1016/j.egypro.2014.10.224.
- [6] F. Balduzzi, P. F. Melani, G. Soraperra, A. Brighenti, L. Battisti, and A. Bianchini, "Some design guidelines to adapt a Darrieus vertical axis turbine for use in hydrokinetic applications," *E3S Web Conf.*, vol. 312, p. 08017, 2021, doi: 10.1051/e3sconf/202131208017.
- [7] T. A. Ismaeel, S. Aljabair, O. A. Abdulrazzaq, and Y. A. Abood, "Energy recovery of moving vehicles' wakes in highways by vertical axis wind turbines," *FME Trans.*, vol. 48, no. 3, pp. 557-565, 2020, doi: 10.5937/fme20035571.
- [8] R. García, A. Fernández, A. Martínez y A. Echeverría, "Alternativa de Energía Renovable", *Numero Espec. Rev. Aristas*, vol. 7, n.º 14, pp. 265–272, 2019.
- [9] L. Córdoba, "Estudio del sistema Aerogenerador Windside para mantener el suministro de energía de los faros en zonas remotas y aisladas del litoral peruano", *Especialidad, Marina De Guerra Del Perú Escuela Superior De Guerra Nav.*, Perú, 2015.
- [10] D.E. Moyano, "Diseño de un prototipo de turbina eólica de eje vertical para pruebas de laboratorio", *Grado, Fund. Univ. Am.*, Bogotá, 2018.
- [11] R. García, A. Fernández, A. Martínez y M. Tamez, "Diseño de hélices de aerogenerador de bajas velocidades de viento.", en *Miscelánea Científica en México*, C. e. I. en Óptica, Ed. León: Centro investigación en óptica A.C., 2020, p. 625.
- [12] M. Fábregas, "Simulación de un Aerogenerador para Uso Doméstico en el Departamento del Cesa", *Grado, Univ. Santander, Valledupar*, 2022.
- [13] W. Tian, B. Song y Z. Mao, "Numerical investigation of wind turbines and turbine arrays on highways", *Renew. Energy*, vol. 147, pp. 384–398, marzo de 2020. Disponible: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.08.123>
- [14] L. S. Bertolin, & S. Velarde "Desarrollo y aplicación de una metodología innovador para el ensayo de prototipo a escala de turbinas eólicas de eje vertical en túneles de viento." *Grado, Univ. De Oviedo*, 2020.