

Análisis de diferentes álabes de un aerogenerador de eje vertical para oxigenar estanques de peces

Mauricio Pablo Baldomero^{1§}

¹Posgrado en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua. Universidad Autónoma Chapingo Carretera México- Texcoco, km 38.5, C. P. 56230, Texcoco, Estado de México.
§Autor para correspondencia: mpbaldomero@hotmail.com.

Resumen

El alimento y la oxigenación son vitales para la acuacultura pero también representan más de 60% del costo total de producción. Si una energía alterna pudiera utilizarse, la producción sería más rentable. Dos diferentes tipos de álabes fueron comparados para evaluar su desempeño en un aerogenerador de eje vertical. Se fabricaron seis álabes de cada tipo y se montaron en una pequeña turbina en la que se colocaron a distintos ángulos y cantidad de estos dentro de un túnel de viento. La turbina fue probada usando dos, tres, cuatro y seis álabes variando la velocidad del viento. La velocidad angular de la turbina y la velocidad del viento fueron las variables monitoreadas. Esta última se midió directamente con un sensor ubicado dentro del túnel de viento, mientras que para la velocidad de la turbina se utilizó un optoacoplador.

Palabras clave: cantidad de álabes, desempeño, distintos ángulos, túnel de viento.

Introducción

La piscicultura es una de las mejores técnicas ideadas por el hombre para incrementar la disponibilidad de alimento y se presenta como una nueva alternativa para la administración de los recursos acuáticos. Tiene una gran cantidad de ventajas respecto a la pesca tradicional; sin embargo, a pesar de todas estas ventajas, es importante subrayar que siempre el cultivo tiene que ser rentable, es decir, que

se debe recuperar lo invertido, y obtener una ganancia razonable. La electricidad representa el principal problema de esta técnica, más de 60% del costo total de producción es debido a la utilización de esta (Cifuentes, 1997). De aquí podemos observar la importancia que tiene el reducir o eliminar este costo. Una alternativa para resolver este problema son las energías renovables y dentro de estas podemos destacar la utilización de aerogeneradores para generar la energía requerida.

Los aerogeneradores producen más 1% de la electricidad en todo el mundo, pero existe una tendencia de crecimiento exponencial cada año (Hogg, 2007). Los aerogeneradores de eje horizontal (Figura 1) son máquinas con un rotor giratorio, cuyo movimiento es producido por la energía cinética del viento al incidir este sobre las palas del rotor, las cuales aprovechan al máximo la velocidad del viento debido al avanzado diseño de los perfiles aerodinámicos de las palas. El movimiento de rotación es transmitido e incrementado a través de un multiplicador de velocidad para posteriormente conectarse a un generador eléctrico (Morales, 2009). En la actualidad la gran mayoría de los aerogeneradores que se construyen conectados a red son tripalas de eje horizontal.

Apesar de ser una buena opción para resolver este problema y de contar con suficiente información para construir un aerogenerador de este tipo, se tienen algunos inconvenientes entre los que destacan el elevado costo para construirlo e instalarlo, las velocidades de viento requeridas para que

pueda funcionar y la altura del mecanismo, entre otros. Una alternativa para los aerogeneradores de eje horizontal son los de eje vertical, los cuales son, básicamente, maquinas en las que el rotor se mueve debido a los esfuerzos de arrastre que el viento origina en dirección perpendicular al eje de giro (Morales, 2009).



Figura 1. Aerogenerador de eje horizontal.

Los aerogeneradores de eje vertical tienen la ventaja de adaptarse a cualquier dirección del viento y por ello se les llama panémonos (todos los vientos). No precisan dispositivos de orientación (www.angelongo.en). A excepción del rotor Darrieus, los aerogeneradores de eje vertical operan con vientos de baja velocidad donde difícilmente superan las 200 rpm (Los aerogeneradores horizontales de alta velocidad empiezan a generar a las 1 000 rpm). Se emplean para generar potencias que van de los 200 W a los 4MW (Morales, 2009). En estricto rigor no necesitan de una torre. Generalmente se caracterizan por tener altos torques de partida (Lucas, 2008).

La referencia más antigua que se tiene es un molino de viento que fue usado para hacer funcionar un órgano en el siglo I (Drachmann, 1961). Los primeros molinos de uso práctico fueron construidos en Sistán, Afganistán, en el siglo VII (Figura 2). Estos fueron molinos de eje vertical con hojas rectangulares. Aparatos hechos de 6 a 8 velas de molino cubiertos con telas, fueron usados para moler cereales o extraer agua (Hassan, 1986).

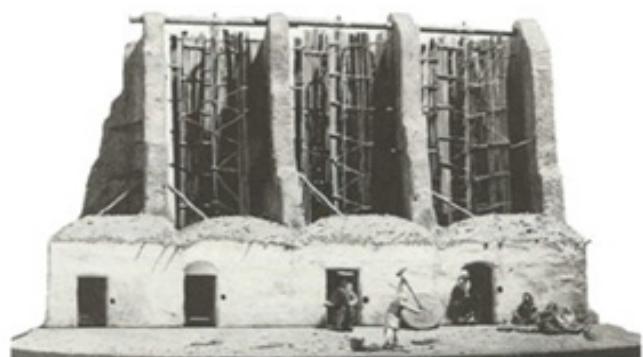


Figura 2. Primer turbina eólica.

En 1922 el finés J. Savonius fue el primero en utilizar el concepto del eje vertical, desarrollado por la civilización Persa, para estructurar su homónimo rotor vertical en la generación eléctrica (es.wikipedia.org). En la actualidad es una solución interesante sobre todo en la conversión a energía mecánica. Más exitoso que el anterior fue el rotor de eje vertical patentado en 1931 en Estados Unidos de América por el ingeniero francés Darrieus y luego cayó en un olvido casi total. Su estudio volvió a iniciarse en Canadá en 1973 y en Estados Unidos de América a partir de 1975 ya que estas máquinas, con capacidades de 1 a 60 KW, podían construirse a precios inferiores al de los molinos de viento clásicos de eje horizontal (www.angelongo.en).

Durante las últimas dos décadas la potencia de las turbinas eólicas aumentó hasta superar los 3 MW. Se han probado y desarrollado diferentes conceptos. Entre las modificaciones y evoluciones más importantes en el área de control se encuentran la implementación de paso variable de las palas (cambio del ángulo de incidencia) y el control por entrada en perdida aerodinámica de las palas. Debido a la rápida evolución de la electrónica de potencia, que ofrece tanto mayor potencia transmitida como menor precio por kW, la implementación de dicha electrónica se encuentra en aumento (Muñoz, 2008).

Algunos tipos de aerogeneradores de eje vertical son:

Savonius: es el modelo más simple de rotor, consiste en cilindros huecos partidos por la mitad desplazados respecto su eje, de forma que ofrecen la parte cóncava al empuje del viento, ofreciendo su parte convexa una menor resistencia al giro, por lo que girarán en el sentido que menos resistencia ofrezcan (Figura 3). Este sistema tiene el inconveniente de presentar una sobre presión en el interior

de las zonas cóncavas al no poder salir el aire, perjudicando el rendimiento; el sistema queda mejorado separando ambas palas y dejando un hueco entre ambas para que exista un flujo de aire (www.opex-energy.com).

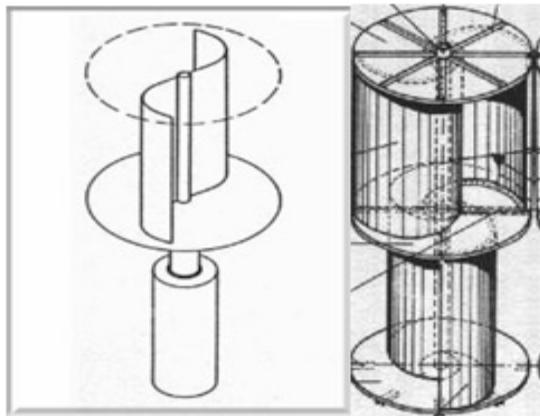


Figura 3. Aerogenerador Savonius.

No son útiles para la generación de electricidad debido a su elevada resistencia al aire, la utilización de multiplicadores de velocidad reducirían su rendimiento. Su bajo coste y fácil construcción les hace útiles para aplicaciones mecánicas como el bombeo de agua (www.opex-energy.com).

Darrieus: patentado por G. J. M. Darrieus en 1931, es el modelo de los aerogeneradores de eje vertical de más éxito comercial. Permite mayores velocidades que las del rotor Savonius, pero no alcanza a las de un rotor de eje horizontal. Consiste en un eje vertical asentado sobre el rotor, con dos o más finas palas en curva unidas al eje por los dos extremos, el diseño de las palas es simétrico y similar a las alas de un avión, sin embargo la unión de estas es compleja (www.opex-energy.com).

Al poseer una forma parecida a una cuerda para saltar, hace que los alerones del Darrieus experimenten una fuerte fuerza centrífuga. Al trabajar en pura tensión hace que los alerones sean simples y económicos. Este rotor presenta el problema que no puede arrancar por si mismo, teniendo que emplearse un sistema de arranque secundario, aunque una vez en marcha es capaz de mantenerse gracias a la aerodinámica de sus palas. Una vez que el Darrieus (Figura 4) se encuentra en velocidad de operación empieza a otorgar potencia. Este tipo de generador es simple, robusto y barato respecto a los otros tipos utilizados en generación eólica, por lo menos en teoría, ya que las ventajas que tiene este diseño son menores a todas las desventajas propias de su diseño (en.wikipedia.org).



Figura 4. Aerogenerador Darrieus.

Giromill: este tipo de generadores también fueron patentados por G. J. M. Darrieus. Consisten en palas verticales unidas al eje por unos brazos horizontales, que pueden salir por los extremos del aspa e incluso desde su parte central (www.opex-energy.com). Una variante del Giromill es la Cycloturbine (Figura 5), con palas verticales que cambian su orientación a medida que se produce el giro del rotor para un mayor aprovechamiento de la fuerza del viento. A diferencia del Darrieus original este si puede comenzar a girar por si mismo. (en.wikipedia.org).

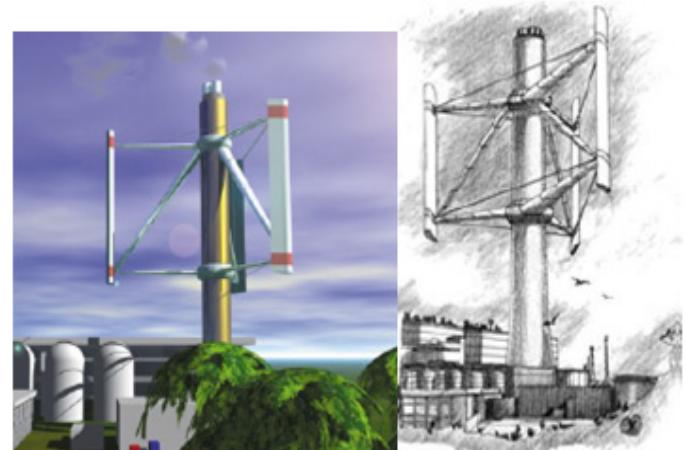


Figura 5. Aerogenerador Giromill.

Windside: este novedoso aerogenerador de eje vertical es un prototipo concebido por la empresa finlandesa Windside, tiene la particularidad de producir energía a partir de 1.5 m/s y soportar velocidades de hasta 60 m/s (www.windside.com).

Es un sistema similar al rotor Savonius, en vez de la estructura cilíndrica para aprovechamiento del viento, consiste en un perfil alabeado con torsión que asciende por el eje vertical (Figura 6). La principal diferencia frente a otros sistemas de eje vertical es el aprovechamiento del concepto aerodinámico, que le acerca a las ficiencias de los aerogeneradores de eje horizontal (www.opex-energy.com).



Figura 6. Aerogenerador Windside.



Figura 7. Aerogenerador WM.

WM (palas abatibles): consiste en un molino provisto de brazos giratorios alrededor de un eje de giro con la particularidad de que a dichos brazos se unen articuladamente unas palas abatibles (Figura 7). Las palas abatibles ofrecen la máxima resistencia al viento cuando se sitúan en la zona de avance de giro y prácticamente nula resistencia al viento cuando están en la zona de retorno del generador (Paul, 2007).

La curva de potencia del generador eólico se inicia a velocidades del viento inferiores a la de los de eje horizontal y crece exponencialmente con la velocidad de este, guardando una relación directa con la verdadera energía que contiene el viento y aprovechando las velocidades más energéticas; las que están por encima de 25 m s^{-1} (www.generadoreolicowm.com).

Tomando esto en cuenta se plantea diseñar una turbina eólica de eje vertical, para esto es necesario comprender la importancia que tienen diferentes variables al momento de elegir y diseñar un alabe para este tipo de aerogeneradores. La intención del diseño es que sea un sistema no muy complejo y a su vez, eficiente, por lo cual es necesario elegir el mejor álabe y su distribución, con la finalidad de obtener el mejor aprovechamiento del viento a velocidades bajas.

Materiales y métodos

Para realizar dicho análisis, se eligieron dos álabes muy simples: unos semicirculares, construidos con tubos de pvc de $3/4$ de pulgada de diámetro cortados por la mitad y bases de acrílico de 3 milímetros de espesor (Figura 8); y otros rectos, hechos con lámina galvanizada calibre 26 a los que se les pegaron tuercas de $1/8$ de pulgada (Figura 9), se crearon seis álabes de cada uno, en las siguientes figuras se muestran las dimensiones generales de los álabes.

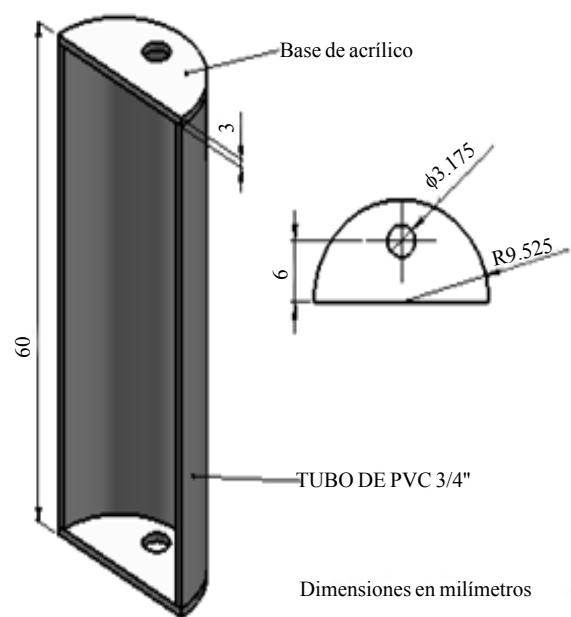


Figura 8. Alabe semicircular.

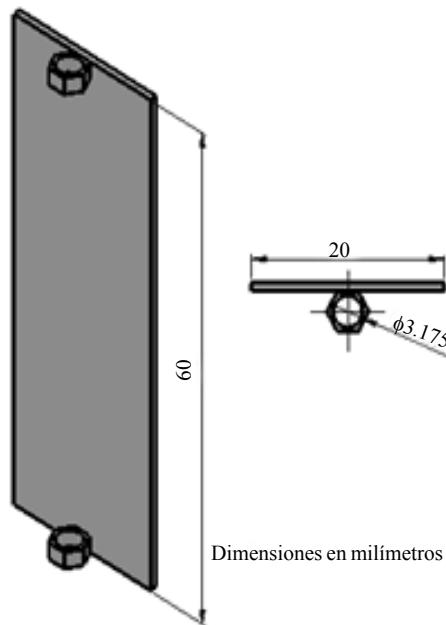


Figura 9. Alabe recto.

Estos álabes se colocaron entre dos bases circulares de acrílico de 3 milímetros de espesor y 65 milímetros de diámetro (Figura 10), en las cuales se hicieron perforaciones para poder colocar los álabes en sus distintas distribuciones.

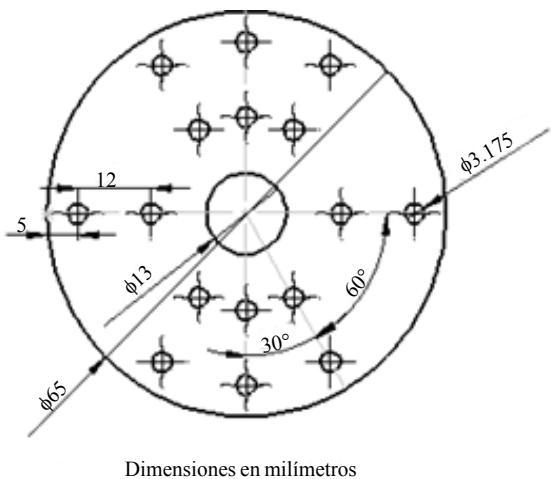


Figura 10. Base de la turbina.

Las piezas se unieron entre si utilizando tornillos de 1/8 de pulgada y 1/2 pulgada de largo. En la parte externa de las bases se colocaron rodamientos de bolas de 21 milímetros de diámetro externo, 8 milímetros de diámetro externo y 7 milímetros de espesor, entre los cuales pasa un esparrago de 8 milímetros que funciona como eje y soporte de la turbina, en la siguiente imagen se muestra el ensamble general.

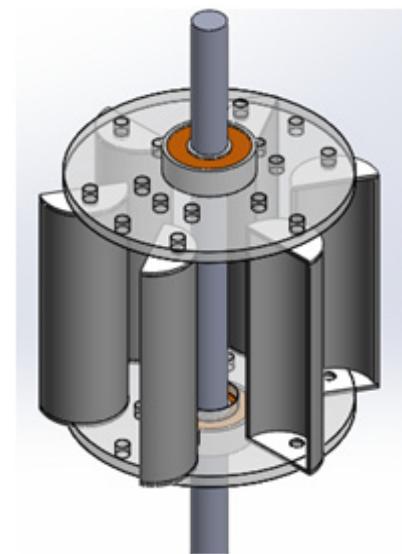


Figura 11. Ensamble de la turbina.

La turbina se colocó dentro de un túnel de viento marca Armfield, modelo C15-10 (Figura 12), centrada en la zona de pruebas, la cual tiene una área transversal cuadrada de 16 cm, debajo de la turbina se colocó un optoacoplador que sirve como sensor de revoluciones por minuto ya que este detecta cada vez que una pequeña lama, colocada debajo de la base inferior de acrílico, pasa entre este, indicando cuantas vueltas giró la turbina durante un periodo de tiempo determinado, en este caso el tiempo dado es de 30 segundos, por lo cual el valor obtenido se multiplicaba por 2 para obtener a qué revoluciones por minuto giraba la turbina a una determinada velocidad del viento.



Figura 12. Túnel de viento.

Las pruebas se realizaron del 15 al 28 de junio de 2012 en el laboratorio de energía de la Universidad Autónoma Chapingo (UACH), en un horario de 9:00 am a 9:00 pm, se tomaron mediciones utilizando 6, 4, 3 y 2 álabes, a la vez que se variaba el ángulo de ataque de estos (se colocaron a 0, 45, 90 y 135 grados). Se tomaron muestras a partir de una velocidad de 11 m/s y posteriormente se fue disminuyendo la velocidad en una unidad, hasta llegar a la velocidad a la cual

se detuviera la turbina, se tomaron 20 mediciones en cada caso y se promediaron para obtener una velocidad de giro promedio. La velocidad del viento se midió con el sensor del túnel de viento ubicado al comienzo de la zona de pruebas.

Resultados

En todos los casos se realizaron la misma cantidad de pruebas, pero sólo se colocaron aquellas que dieron resultados positivos, en los otros casos el dispositivo no comenzaba a trabajar sin importar la velocidad del viento, inclusive llevando a su máximo al túnel de viento, que en este caso es una velocidad de 30 m s^{-1} . En el Cuadro 1 se muestran los resultados (promedios) obtenidos.

En las cuatro opciones para las pruebas con los álabes semicirculares a 90 grados no hubo movimiento alguno sin importar la velocidad del viento, sólo había una vibración mínima o en ocasiones nula en la turbina. Para la opción de 3 álabes semicirculares a 135 grados, a partir de los 10 m s^{-1} comienza a moverse pero se orienta en una posición para autoestabilizarse y por lo cual no gira a velocidades superiores, sólo se mantiene en dicha posición.

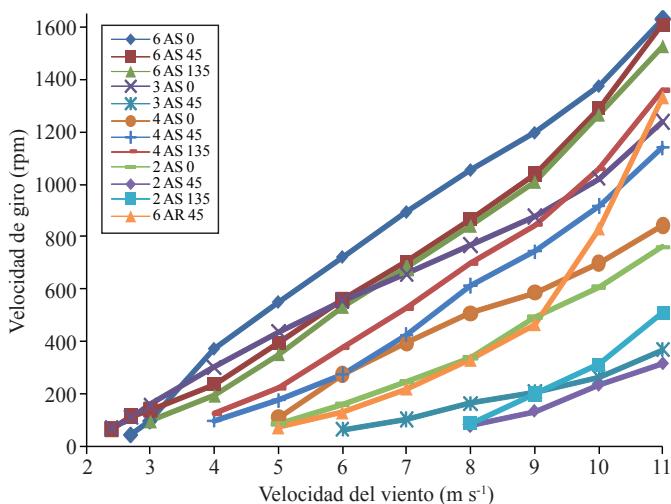
Para los álabes rectos sólo se hicieron tres pruebas (a 0, 45 y 90 grados), se omitió la de 135 grados, porque entre esta y la de 45 grados sólo cambiaba la dirección del giro de la turbina, cabe destacar que en el caso de los álabes semicirculares a 135 grados sólo se invirtió la dirección de giro de las turbinas en las pruebas hechas con 2 y 4 álabes.

Cuadro 1. Resultados promedio.

Velocidad del viento (m s^{-1})											
2.4	2.7	3	4	5	6	7	8	9	10	11	
6 álabes semicirculares a 0 grados (6 AS 0)											
0	47.1	99.7	374.7	552.6	723.5	894.2	1053.9	1195.4	1372.8	1627.4	
6 álabes semicirculares a 45 grados (6 AS 45)											
68.5	116.6	141.8	237.9	394	561	702.7	866.7	1037	1291	1608.2	
6 álabes semicirculares a 135 grados (6 AS 135)											
0	0	96.7	194.9	352.9	532.9	680.7	841.6	1009.1	1265	1525.9	
3 álabes semicirculares a 0 grados (3 AS 0)											
71.6	112.3	159.7	303.8	438.7	556.4	657.1	768.9	877.1	1022	1237	
3 álabes semicirculares a 45 grados (3 AS 45)											
0	0	0	0	0	67.3	104.1	165.6	210.4	265.8	370.1	
4 álabes semicirculares a 0 grados (4 AS 0)											
0	0	0	0	113	277.2	394	508.4	587.7	699.1	842.8	
4 álabes semicirculares a 45 grados (4 AS 45)											
0	0	0	100.3	178	275.6	426.3	613.9	742.7	917.5	1138	
4 álabes semicirculares a 135 grados (4 AS 135)											
0	0	0	128.1	225.6	380.8	528.4	697.7	845.6	1057.7	1355.8	
2 álabes semicirculares a 0 grados (2 AS 0)											
0	0	0	0	88.2	162.1	249.1	340.3	492	606.5	760.2	
2 álabes semicirculares a 45 grados (2 AS 45)											
0	0	0	0	0	0	0	84	135.7	234.2	315.8	
2 álabes semicirculares a 135 grados (2 AS 135)											
0	0	0	0	0	0	0	90.1	201.1	314.3	509.6	
6 álabes rectos a 45 grados (6 AR 45)											
0	0	0	0	73.5	130.6	221.6	330.9	466.8	831.3	1330.7	

Para los álabes rectos sólo se muestra el resultado de la prueba con 6 álabes rectos a 45 grados, ya que las pruebas a 90 grados tienen el mismo resultado de los álabes semicirculares. Para las otras tres opciones a 45 grados no hay datos porque la turbina únicamente se mueve de un lado a otro sin comenzar a girar únicamente hacia alguna dirección, en ningún momento completaban una vuelta. Para los álabes a cero grados ocurre lo mismo que en las pruebas a 90 grados, a excepción de la muestra con 3 álabes en la cual la turbina comenzaba a girar a una velocidad promedio de 14.72 m s^{-1} y se detenía a los 11.7 m s^{-1} , por lo cual se descartó dicha prueba por estar fuera del rango de las demás muestras.

En la Figura 13 se muestran los resultados con los datos obtenidos a manera de comparación entre estos.



Conclusiones

Como puede verse el rango de operación de los álabes a diferentes configuraciones es muy variado y puede tener tanto diferencias mínimas como otras muy significativas entre ellas, por lo que es de gran ayuda comprender la influencia que tienen estas configuraciones para elegir la más eficiente. Tomando en cuenta los resultados obtenidos las mejores configuraciones a utilizar en el diseño de la turbina eólica son la de 6 álabes semicirculares ubicados a una inclinación de 45 grados ya que esta es la que mejor desempeño tiene en las velocidades más bajas, y la configuración de 6 álabes semicirculares a 0 grados la cual

tiene un mejor desempeño pero a velocidades mayores, a la velocidad máxima registrada tienen un rendimiento similar, sin embargo el propósito del diseño es que trabaje eficientemente a velocidades bajas, por lo cual se elegirá la primer opción.

A partir de esto será necesario hacer una evaluación de los materiales a utilizar, así como las dimensiones de la turbina, a manera de prototipo, para poder evaluar su desempeño en un ambiente real y compararla con los datos obtenidos en el laboratorio, y poder conocer la variación existente entre ellos.

Literatura citada

- Cifuentes, J. L. 1997. El océano y sus recursos XI: acuicultura. Ed. FCE. México, D. F. 99 p.
- Drachmann, A. G. 1961. Heron's Windmill. Centaurus. 145-151 pp.
- Ahmad, Y. and Routledge, D. H. 1986. Islamic technology: an illustrated history. Cambridge University Press. 57-59 pp.
- Paul, H. 2007. Manufacturing challenges for wind turbines. Northwest composites centre. University of Manchester. A Guide for Economic Developers. 20 p.
- Morales, M. A. 2009. Energía eólica y diseño de control de voltaje y frecuencia para un convertidor de potencia con topología CA/CD- CD/CD - CD/CA. Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica. Instituto Politécnico Nacional (IPN). México, D. F. 85 p.
- Lucas, M. 2008. Estado del arte en generadores eléctricos utilizados en turbinas eólicas, Sistemas electromecánicos y maquinas eléctricas. Instituto Balseiro. 80 p.
- URL: <http://www.angelongo.en.eresmas.com/historiaenergiaeolica.htm>.
- URL: <http://www.generadoreolicowm.com/ingles/index.htm>.
- URL: http://www.opex-energy.com/EN/eolica/tipos_aerogeneradores.html.
- URL: <http://www.windsides.com/products>.