



Estimación de las características de rendimiento de un rotor eólico biomimético para aplicaciones de bombeo

David A. Castañeda *
Fabio E. Sierra **
Carlos A. Guerrero ***

Estimation of the performance characteristics to a biometric wind-rotor for pumping applications

Resumen

Los rotores bioinspirados para sistemas eólicos han sido enfocados para generación de electricidad, por ejemplo los basados en la semilla de sicomoro (Cranfield University Media Centre;) y las aletas propulsoras de la ballena azul (Wind Energy Institute of Canada, WEIC). En contraste, se desconocen rotores bioinspirados para sistemas eólicos de bombeo. En Colombia existen estudios de las Universidades Nacional y Los Andes relacionados con aplicaciones de energía eólica para bombeo, los cuales apuntan a optimizaciones y adaptaciones de componentes distintos al rotor.

Palabras clave: *Aerobombas, Aerodinámica, turbinas eólicas, Biomimética Energía eólica*

Abstract

The bioinspired rotor for Eolic systems has been created to generate electricity; for example, those rotors which are based on Sycomorus seeds (Crandfield University Media Centre), and the blue propulsion whale's fins (Wind Energy Institute of Canada, WEIC). In contrats, bioinspired rotors for pumping Eolic systems are unknown. In Colombia there several studies of the National University and Andes University related to applications of Eolic energy in pumping systems; those studies are focused to optimization and adapting components different to the rotor.

Key words: *pump, Aerodynamics wind turbines, Bio mimicry, Wind energy*

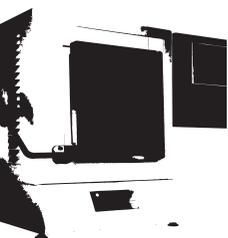
Fecha de recepción: Octubre 14 de 2011

Fecha de aprobación: Noviembre 24 de 2011

* Msc en Ingeniería Mecánica, Ingeniero Aeronáutico. daacastanedave@unal.edu.co

** Doctor en ingeniería, Msc. en Automatización Industrial, Ingeniero Mecánico, Profesor asociado del Departamento de Ingeniería Mecánica y Mecatrónica, Universidad Nacional de Colombia. Director: del Grupo de Investigación "Mecanismos de Desarrollo Limpio y Gestión Energética" (GRIN) feserrav@unal.edu.co<

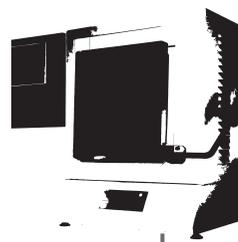
***Doctor en Ingeniería Química, Msc. Ingeniería ambiental, Ingeniero Químico, Ingeniero Mecánico, Profesor asociado del Departamento de Ciencias Universidad Nacional de Colombia. caguerrero@unal.edu.co



1. Introducción

Este estudio para sistemas eólicos de bombeo se basa en un nuevo diseño de rotor de cinco palas, que modela la inflorescencia de una planta de la familia de las verbenáceas. Smulders (Smulders & de Jongh, Wind Water Pumping: Status, Prospects and Barriers, 1994), hace tres clasificaciones de sistemas eólicos para bombeo; este nuevo diseño daría paso a una cuarta clasificación puesto que presenta un rendimiento superior, liviano, de bajo costo de fabricación y acoplable a sistemas de bombeo existentes, y posiblemente generadores eléctricos. Como producto del estudio se desarrolló la tesis de maestría en ingeniería mecánica en la Universidad Nacional “Diseño y construcción de un sistema eólico para bombeo basado en un rotor bioinspirado”. (Castañeda, 2010)

Dentro de las energías renovables se encuentra la eólica proveniente del movimiento de las masas de aire de la atmósfera. La humanidad



desde hace mucho tiempo ha usado tecnologías para la transformación de esta energía cinética contenida en una masa de aire, en potencia mecánica útil y hay evidencias de estas tecnologías desde las antiguas civilizaciones de China, Persia, Tíbet, India y Afganistán, las cuales cayeron en desuso durante el auge de la revolución industrial, siendo posteriormente retomadas con la crisis energética de los años setenta en el siglo XX (Hau, 2006). Las aplicaciones principales de estas tecnologías eólicas están enmarcadas actualmente en la generación de las energías eléctrica y mecánica.

2. Los Sistemas eólicos

Los sistemas eólicos han tenido gran auge en el campo de la generación de la energía eléctrica, desarrollo que se evidencia en el tamaño y capacidad actual de producción de estas plantas, mientras que la generación de energía mecánica ha sido más lenta.

En Colombia existen amplias extensiones de terrenos, que no cuentan con un adecuado suministro de agua o en las cuales la sostenibilidad de un sistema de abastecimiento resultaría muy costosa y es aquí donde se abre un espacio para que las aplicaciones eólicas de generación de energía mecánica puedan suplir esta necesidad mediante el bombeo de agua, teniendo en cuenta que aprovechan la energía limpia y disponible brindando un sistema independiente y autosuficiente. Por esto resulta importante cualquier desarrollo en este campo y principalmente en aquellos relacionados con la primera etapa de conversión energética, donde se encuentra el conjunto rotor.

El rotor dentro de un sistema eólico es el dispositivo primario encargado de convertir la energía cinética contenida en el viento, estos se pueden clasificar de forma general, en rotores de eje vertical y horizontal. Para esta investigación se trató solamente con rotores de eje horizontal que se caracterizan por su solidez σ , el coeficiente de

rendimiento, y la relación de las velocidades en la punta (Traducción del inglés dada a *Tip Speed Ratio*), ; parámetros que están íntimamente relacionados con la aerodinámica de las palas y por ende, su forma. Las relaciones que lo definen están en las ecuaciones Ec.(1), Ec.(2), Ec.(3).

$$(1) \quad \sigma = \frac{NA_p}{\pi R^2}$$

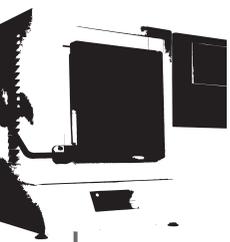
$$(2) \quad C_p = \frac{P_{extraida}}{\frac{1}{2} \rho AV^3}$$

$$(3) \quad \lambda = \frac{\Omega R}{V_\infty}$$

Donde N es el número de palas del rotor, A_p es el área frontal de la pala, R es el radio del rotor, $P_{extraida}$ es la potencia extraída por el conversor, ρ es la densidad del aire, A es el área frontal barrida por el rotor, Ω es la velocidad angular del rotor y V_∞ es la velocidad de la corriente libre de aire.

3. Relevancia del estudio

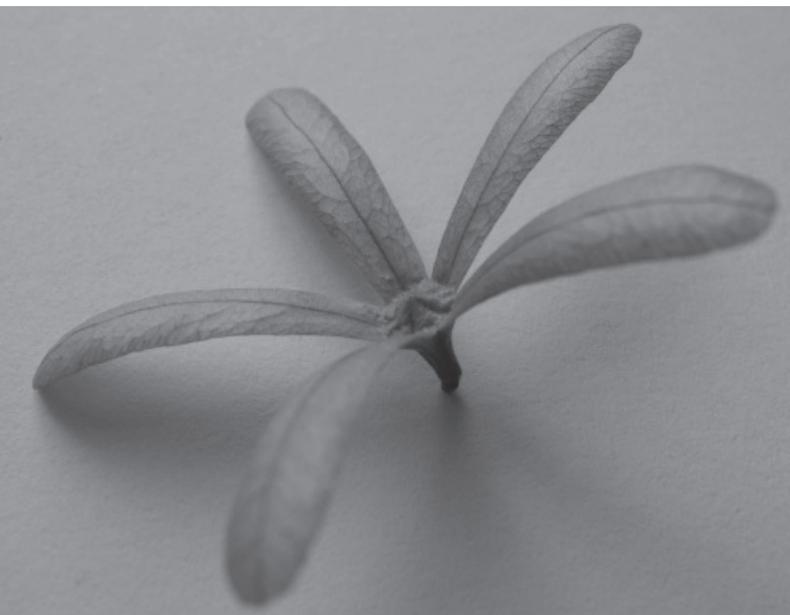
Lo relevante del estudio sobre un sistema eólico para bombeo basado en un rotor bioinspirado, radicó en la exploración de un nuevo diseño de rotor de 5 palas, que imita la inflorescencia de una planta de la familia de las verbenáceas, el cual se desarrolló en el laboratorio de Energías Renovables de la Universidad Nacional, por parte del Grupo de Investigación "Mecanismos de Desarrollo Limpio y Gestión Energética" (GRIN). Este diseño por sus características geométricas y aerodinámicas puede brindar mayores rendimientos que los



actuales para convertir la energa cin3tica disponible en la corriente de aire en energa mec3nica.

Por otro lado, segun Smulders (Smulders & de Jongh, Wind Water Pumping: Status, Prospects and Barriers, 1994), hasta el momento existen tres tipos de sistemas e3licos para bombeo de agua que est3n repartidos segun su aparici3n en tres generaciones: La primera "la cl3sica", con el rotor multipala americano, difi3cil de instalar, costoso, aunque de poco mantenimiento y alta confiabilidad. La segunda generaci3n con equipos m3s livianos, materiales y piezas m3s asequibles, sin cajas de reducci3n, menos costosos aunque con menor confiabilidad. La tercera son aerobombas de bajo costos, las cuales son hechas para necesidades particulares, con materiales de precios asequibles pero con rendimientos muy bajos.

Con este nuevo diseo se abre la puerta a una cuarta clasificaci3n que presenta como ventajas un rotor con rendimiento superior, liviano, cuya construcci3n es de bajo costo y que puede ser acoplado a los equipos de transmisi3n de potencia y sistemas de bombeo existentes.



4. El modelo bioinspirado

La biomim3tica, acudiendo a la definici3n del Biomimicry Institute (Biomimicry Institute) es "una nueva ciencia que se encarga de estudiar las mejores ideas de la naturaleza para luego imitar sus diseos y procesos, colaborando de esta manera a resolver problemas humanos". La naturaleza en su proceso de evoluci3n lleva millones de aros creando soluciones para los diferentes retos que presenta la vida, es por esto que cuando se habla de diseo bioinspirado o biomim3tico se hace referencia a un diseo efectivo y altamente probado.

Para este caso, el modelo natural bioinspirado proviene de la Petrea Volubilis, durante su inflorescencia. Esta planta para realizar el proceso de dispersi3n de su semilla recurre a adaptar su forma de la inflorescencia para que esta pueda rotar cuando cae, de manera que retrase su descenso y le d3 m3s posibilidades de ser transportada por las corrientes de aire, aumentando as3 la probabilidad de poblar nuevos territorios y fortalecer la supervivencia de su especie. (Ver figura 1).

La forma de los p3talos de la inflorescencia tiene un diseo eficiente para producir una reacci3n aerodin3mica cuando 3stos entran en ca3da libre por la acci3n de una corriente de viento. Aqu3 el momento par es obtenido por la inclinaci3n hacia adelante de la fuerza de sustentaci3n y en magnitud suficiente para oponerse al momento par contrario y resistivo provocado por la fuerza de arrastre aerodin3mica (Yasuda & Azuma, 1997).

Figura 1: Inflorescencia de la Petrea Volubilis. Fuente: David Casta3eda.

4.1 Autorotación y molinos de viento

La auto rotación se define como “la rotación auto sostenida de un rotor sin la aplicación de un momento par en el eje” (Leishman, 2006), siendo uno de los modos de operación que un rotor puede tener. Estos modos pueden ser: Molino de viento, Hélice Propulsora o Hélice Frenante cuyas características dependen de la forma como producen la fuerza de empuje definida por su coeficiente de empuje, C_T , si extraen o adicionan energía al fluido condición definida por su coeficiente de potencia, C_p , y por la reducción o aumento de la velocidad en el dispositivo rotor con respecto a la velocidad de la corriente libre, definida por el factor de interferencia, α . (Ver Figura 2).

Según Gessow (Gessow & Myers, 1952), la diferencia que existe entre un rotor en modo de auto rotación y otro de molino de viento es mínima, en este último la configuración de las palas dan el máximo momento par en el eje a pesar de la fuerza de empuje generada, mientras en la auto rotación, la configuración de las palas es apropiada para producir la máxima resistencia axial al viento con un momento par en el eje igual a cero en el modo de molino.

Esta configuración está dictada por el ángulo de paso, donde los positivos moderados pertenecen a la auto rotación y los negativos son propios para producir momento par en el eje, en este aspecto se encuentra la razón para hacer que las palas del rotor eólico tomen la forma de los pétalos de la inflorescencia de la *Petrea Volubilis*.

4.2 Sistemas Eólicos para bombeo o Aerobombas

Las aerobombas son dispositivos que aprovechan la energía cinética del aire y la transforman en

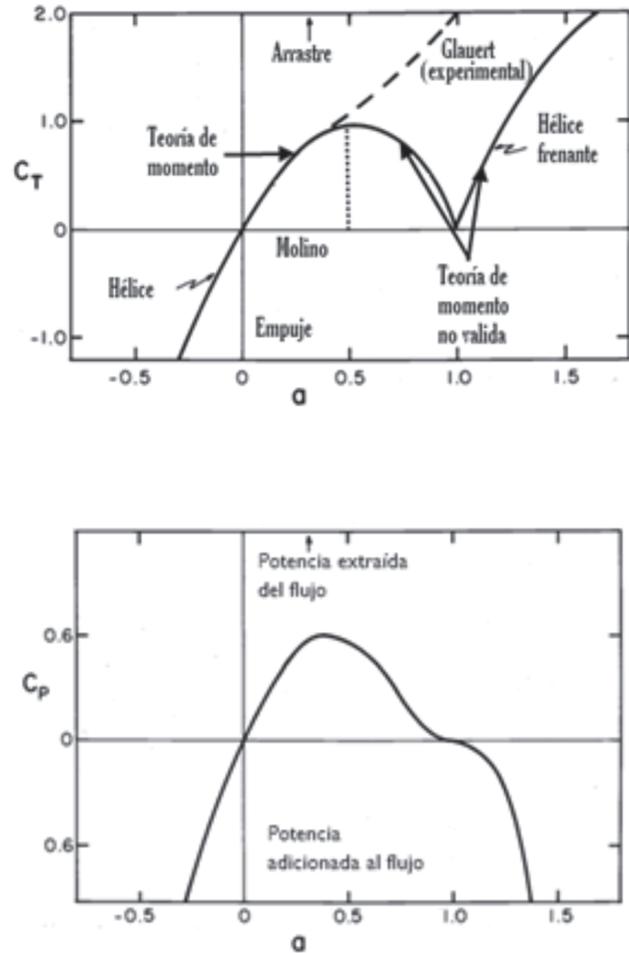
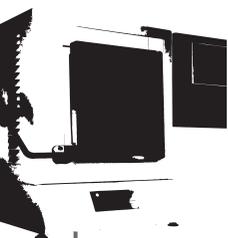


Figura 2. Modos de Operación de un Rotor. Adaptado de Wilson et al. (Wilson & Lissaman, 1974)

energía mecánica a través del rotor, la cual es transferida mediante un mecanismo de transmisión a una bomba para, de esta forma, generar el proceso de extracción del agua y este conjunto se complementa con un sistema de almacenamiento donde se tiene el agua de reserva.

Los rotores para aerobombas se distinguen principalmente por su alta solidez y su baja velocidad de rotación. Esto se traduce en un alto momento par al inicio de la rotación del rotor con una velo-



cidad de viento predeterminada. Según Smulders (Smulders & De Jongh, Wind Pumping Handbook-Introduction to wind pumps, 2009), las aerobombas están limitadas por el tamaño de su rotor encontrándose en un rango común de entre 1m a 7,5m de su diámetro.

Por otro lado, las aerobombas dependen de su sistema de bombeo y la escogencia de su bomba depende fundamentalmente de la cabeza y el caudal requerido. Según Ackermann (Ackermann, 2010), si el caudal está en un rango de pequeño a medio con una cabeza alta a media, típico para el suministro de agua a poblaciones y ganado, las bombas de pistón, las centrífugas multietapa, de tornillo y mamut son la recomendadas y si el caudal está en un rango alto con una cabeza pequeña, característico para el riego, las bombas centrífugas de una sola etapa, de diafragma, tornillo y de cadena son la recomendadas.

5. Metodología

El desarrollo de este proyecto se enmarcó en una investigación aplicada ya que los datos e información que se requerían debieron ser obtenidos de manera teórica y práctica para llegar a entender el fenómeno en cuestión. Primero, se recopiló la información necesaria sobre la aerodinámica básica que rige a los modelos actuales de rotor, funcionamiento y sistemas para aerobombas, así se obtuvieron las nociones fundamentales, terminología y características más relevantes para estos equipos.

Después con la inflorescencia, se escanearon de forma digital las características físicas del modelo con las cuales se determinaron los parámetros geométricos adecuados para la realización de un modelo a escala del rotor; a partir de este se establecieron las posibles opciones en materiales y

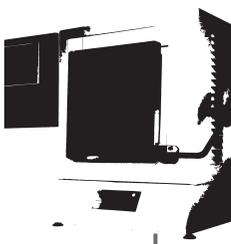
técnicas para la construcción del prototipo, el cual fue acoplado a un sistema de transmisión que va hacia una bomba; de esta manera se probó el concepto de bombeo con el nuevo rotor y se realizaron algunas pruebas.

Con base en los resultados anteriores y haciendo uso de los conceptos de rendimientos energéticos sobre sistemas eólicos, se determinaron los posibles alcances y límites de este modelo dentro de la aplicación de bombeo, así como su potencial para desempeñarse en esta aplicación confrontándolo con los modelos actuales.

6. Construcción de modelo bioinspirado

Para estudiar las características del rotor a través de un modelo real, fue necesario hacer como primer paso un proceso de ingeniería inversa al modelo natural previamente seleccionado por su geometría y solidez. La ingeniería inversa requiere de tres etapas que son: escaneado, procesamiento de puntos y aplicación de la información (Raja & Fernandes, 2008).

El proceso de digitalización inició escogiendo dentro de los especímenes con que se contaba el modelo de inflorescencia que exhibía un mayor tamaño, el cual fue sometido a la digitalización y procesamiento de puntos mediante un escáner de láser PS-3300 en los laboratorios del CEIF. Con esto se obtuvo la nube de puntos de las superficies de los pétalos de la planta, la cual luego fue poligonalizada en el software Rhinoceros y como resultado se produjo un archivo que se podía utilizar en el software de CAD. Después se aplicó la información con un proceso de prototipado rápido mediante una impresión 3D, por su rapidez y bajo costo, aunque con baja resistencia en la pie-



za, ya que ésta se crea a través de un polvo de escayola aglomerado con una solución de cianoacrilato.

Teniendo el modelo impreso, se procedió a realizar su matriz, por medio de una técnica basada en

el uso de resina poliéster, con esta matriz fue posible tener copias exactas del modelo en escayola las cuáles fueron hechas en fibra de vidrio embebida en resina. (Ver Figura 3).



(a) Matriz en resina poliéster



(b) Aplicación de la resina sobre la fibra



(e) Generación del vacío



(d) Copias de pétalos terminados

Figura 3: Proceso de copiado de las palas. Fuente: David Castañeda

6.1 Mecanismo de cambio de 3ngulo

En el funcionamiento del modelo original como rotor e3lico el par3metro aerodin3mico conocido como 3ngulo de paso, es el m3s relevante, porque trabaja como productor de momento par si se encuentra en 3ngulos de paso negativo, por esto para suplir la necesidad, fue indispensable implementar un mecanismo que permitiera establecer el 3ngulo de paso d3ndole un manejo progresivo y de forma simult3nea para cada una de las palas, as3, se pudo establecer el par3metro aerodin3mico del 3ngulo de paso de manera controlada para cambiarlo a voluntad durante la prueba en el t3nel de viento, el cual se configur3 para trabajar en un rango de 3ngulos comprendido entre los 15 y 60 grados.

6.2 Sistema de transmisi3n

Debido al tama1o con el cual se concibi3 el rotor, era de esperarse que el n3mero de revoluciones fueran altas, teniendo como base los datos conocidos en los rotores convencionales y sus relaciones de escala, por esto que el sistema de transmisi3n tuvo el papel de disminuir a la salida el n3mero de revoluciones de entrada, con el fin de evitar un movimiento muy r3pido del pist3n de la bomba axial que pudiese provocar su mal funcionamiento e ineficiencia.

De igual manera, con la ca3da en las revoluciones se produjo un aumento del momento par de inicio para la bomba y como 3sta requer3a de un movimiento lineal para la succi3n y el bombeo, fue prioritario pasar de una rotaci3n a un desplazamiento lineal, por lo que se opt3 por un mecanis-

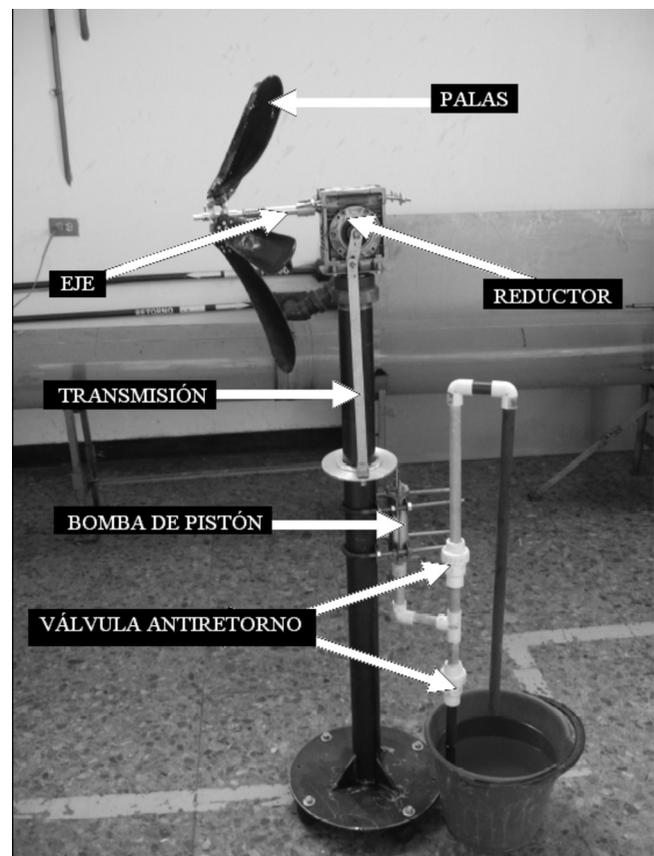
Figura 4: Prototipo de sistema e3lico para bombeo con el rotor bioinspirado acoplado. Fuente: David Casta1eda

mo simple de biela y manivela, al cual se debi3 adaptar el sistema de transmisi3n.

Teniendo en cuenta los requerimientos de operaci3n, se escogi3 un mecanismo de tornillo sin fin y rueda dentada, el cual se encuentra en los reductores de velocidades de los motores el3ctricos, su elecci3n se hizo de acuerdo a un 3ndice de reducci3n de siete y el reductor fue posicionado sobre un tubo soldado a una base redonda mediante varios pies de amigo.

6.3 Bomba

Se seleccion3 una bomba de tipo pist3n, debido a la simplicidad de su dise1o, la cual puede operar con alta presi3n de descarga, bajos caudales y posee una eficiencia cercana al 90% (Kreith, 1999), adem3s funciona con un par de v3lvulas anti-re-



torno que se encuentran a la entrada y salida de la bomba que evitan que exista un intercambio de fluido entre las líneas de succión y de descarga durante el funcionamiento de la bomba y permiten que el cebado de la bomba se haga de manera autónoma. La bomba fue calculada y diseñada para adaptarla a los requerimientos del sistema, la tubería instalada fue de PVC de 3/8 de pulgadas de diámetro. (Ver figura 4).

6.4 Pruebas realizadas

Para la prueba del rotor ensamblado al sistema de bombeo se acopló el rotor al sistema de transmisión y se instaló en el túnel de viento, frente a éste se ubicó la malla para tener un marco de referencia en la toma de las velocidades. (ver figura 5)

7. Resultados y Conclusiones

El rotor presentó una solidez, σ de 28.13%, lo que permite afirmar que posee una solidez intermedia y que su uso es adecuado en una aerobomba, además se estableció que este valor es cercano a la solidez de aerobombas de bajo peso.

En la Figura 6, se observa que en ángulos negativos moderados se presentó un aumento en la potencia extraída por el dispositivo, demostrada en el caudal de bombeo, es así como la potencia en el eje del rotor se incrementó desde los 15 grados hasta el ángulo de 30 grados, sin embargo, al establecer el parámetro aerodinámico de ángulo de paso a valores mayores se produjo una caída siendo el valor menor para el ángulo de 60 grados. Este fenómeno se debió a que en ángulos elevados, la energía del flujo no era suficiente para mantenerlo adherido a la pared de la pala y a su vez contrarrestar las pérdidas, por esto el fluido se desprendió, causando la disminución del rendimiento de la pala y por lo tanto de todo el conjunto.

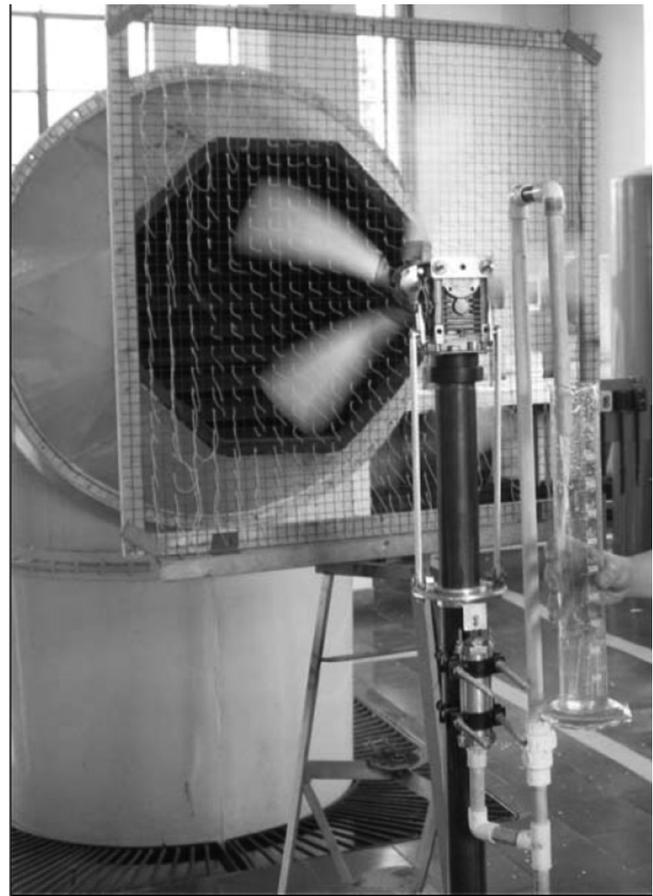
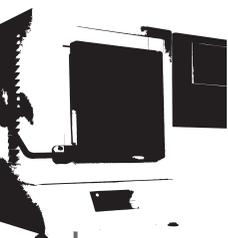


Figura 5: Montaje para la prueba de bombeo en el Túnel de Viento del Laboratorio de Hidráulica. Fuente: David Castañeda

Como se aprecia en la Figura 6, el caudal de entrega en la bomba aumentó a medida que lo hizo la velocidad. Las características de rendimiento se ven reflejadas aquí con el rotor acoplado a un nuevo sistema, dando la ventaja a la configuración de 30 grados, de igual manera, se observó que existía un comportamiento lineal al inicio de cada curva, mostrando una curvatura a partir de cierta velocidad, causado por la capacidad de llenado en la bomba, ya que al alcanzar altas velocidades de viento también se incrementaban la revoluciones del eje y por lo tanto, el número de ciclos, lo que hizo que el movimiento rápido del pistón impidiera el llenado completo de la cámara de bomba ocasionando que la capacidad de esta se viera



disminuida, y en consecuencia la bomba enviara a la descarga menos fluido.

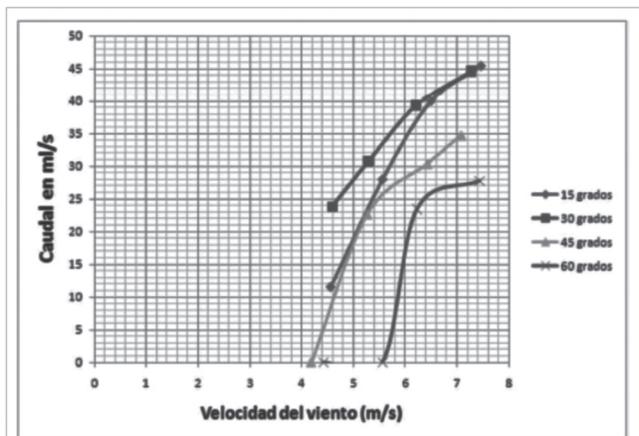


Figura 6: Resultados de la prueba bombeo realizada con el rotor bioinspirado. Fuente: David Castañeda

Agradecimientos

A los Ingenieros Natalia Ortiz, Jorge Gaitán y Carlos Contreras por su colaboración y préstamo de equipos necesarios para la construcción de las palas. Así como al personal técnico encargado de los laboratorios interfacultades CEIF de La Universidad Nacional De Colombia.

8. Bibliografía

Ackermann, T. (2010). Wind Energy- Part 8 for Renewable Energy Technology Course. Estocolmo.

Biomimicry Institute. (s.d.). What is Biomimicry? Tratto il giorno Febrero 2011 da <http://www.biomimicryinstitute.org/about-us/what-is-biomimicry.html>

Castañeda, D. (2010). Diseño y construcción de un sistema eólico para bombeo basado en un rotor bioinspirado. Bogotá: Tesis de maestría Universidad Nacional de Colombia - Sede Bogotá.

Cranfield University Media Centre;. (s.d.). Unique wind turbine funding given green light. Tratto il giorno 03 03, 2010 da <http://www.cranfield.ac.uk/>. Enero 2009.

Gessow, A., & Myers, G. C. (1952). Aerodynamics of Helycopter. New York: Frederick Ungar Publishing.

Hau, E. (2006). Wind Turbines: Fundamentals, Technologies, Applications, Economics (Segunda Edicion ed.). New York: Springer Verlag.

Kreith, F. (1999). Mechanical Engineering Handbo ok. Boca Raton: CRC Press.

Leishman, J. G. (2006). Principles of Helicopters (Segunda edición ed.). New York: Cambridge Press.

Pinilla, A. (2008). El poder del viento. Revista de Ingenieria Uniandes , 65-69.

Raja, V., & Fernandes, K. J. (2008). Reverse Engineering: An Industrial Perspective. Springer-Verlag.

Smulders, P., & De Jongh, J. (2009, Septiembre). Wind Pumping Handbook-Introduction to wind pumps. Tratto il giorno Junio 2010 da http://www.arrakis.nl/index.php?parent=Wind_energy&page=Manuals.

Smulders, P., & de Jongh, J. (1994). Wind Water Pumping: Status, Prospects and Barriers. Renewable Energy , 587-594.

Wilson, R. E., & Lissaman, P. B. (1974). Applied Aerodynamics of Wind Power Machines. Corvallis, Oregon: Oregon State University.

Wind Energy Institute of Canada, WEIC. (s.d.). WhalePower: Tubercle Blade Power Performance Test. Tratto il giorno 2010 da http://www.whalepower.com/drupal/files/PDFs/WEIC_WhalePower_Test_Report_2008.pdf.

Yasuda, K., & Azuma, A. (1997). The autorotation Boundary in the Flight of Samaras. Journal of Theoretical Biology , 185 (3), 313-320.