

APLICACIÓN INFORMÁTICA PARA SELECCIÓN Y DIMENSIONAMIENTO DE UN SISTEMA DE BOMBEO EÓLICO: CASO DE ESTUDIO EN TIERRAS AGRÍCOLAS DEL ESTADO DE QUINTANA ROO

^aSala Macias Amparo Sonia, ^aMoreno Pacheco Luis Alfonso, ^bEspinosa Girón Mario Arturo, ^aGuilbaldo Tolentino Eslava, ^aMiguel Toledo Velazquez, ^aClaudia del Carmen Gutiérrez Torrez

^aInstituto Politécnico Nacional ESIME-Zacatenco
Sección de Estudios de Posgrado e Investigación, LABINTHAP.
Av. IPN s/n, UPALM Edif. 5, 3er piso, C.P. 07738 México, D.F.

^bInstituto Politécnico Nacional ESIME-Ticomán
Av. Ticomán # 600, Col. San José Ticomán, C.P. 07340 México, D.F.

sala901119@hotmail.com

RESUMEN

El presente estudio muestra una herramienta para determinar, seleccionar y calcular a través de un entorno de programación, todos los elementos que constituyen un sistema de bombeo eólico, pudiendo tener un pre diseño de una aero-bomba cuyo fin práctico es la extracción de agua para un sistema de riego, ganadería o inclusive abastecimiento de agua potable a comunidades aisladas. Con fines demostrativos, este trabajo se enfoca específicamente en la implementación del programa para el municipio Othón Pompeyo Blanco perteneciente al estado de Quintana Roo, México. Esta aplicación fue desarrollada en una interfaz gráfica llamada GUIDE de Matlab, la cual permite realizar y ejecutar programas que necesiten un ingreso continuo de datos. A través de un ambiente interactivo con el usuario, este instrumento es capaz de procesar las condiciones de entrada (disponibilidad de viento y de agua) para proponer las características técnicas de los elementos que conforman la aero-bomba, es decir, el dimensionamiento o la selección de un rotor eólico, el diseño de la transmisión, el tipo de bomba a usar, los requerimientos de la estructura que soportará el sistema así como la selección de algunos accesorios, con el único objetivo de facilitar la construcción de sistemas más eficientes, económicos y obtener un panorama más amplio en la implementación de la energía eólica en nuestro país.

Palabras Clave: Energía Eólica, Aero-Bomba, Sistema de Riego.

INTRODUCCIÓN

La energía cinética del viento se puede transformar en energías útiles para bombear agua, moler granos, o bien para producir electricidad, se le llama energía eólica, y posee una gran ventaja al ser una fuente renovable, cuya implementación ayuda a reducir la emisión de gases de efecto invernadero ya que reemplaza fuentes de energía que utilizan combustibles fósiles. De acuerdo a un reporte emitido por la Global Wind Energy, a finales del año 2013, la energía eólica sumó 318 GW instalados, que equivalen al 3% del suministro de la energía

global. Sin embargo, la generación de energía proveniente del viento se remonta a miles de años atrás, en el año 3000 A.C los egipcios hacían uso de embarcaciones propulsadas por velas que ocupaban el viento para desplazarse. En China, existe evidencia de la implementación de molinos cuya tarea era el bombeo de agua. En el año 1724 Leopold Jacob dio a conocer un molino que movía una bomba de embolo; pero sin duda alguna el desarrollo más significativo de las aero-bombas se dio en 1854, con la aparición del Molino Multipala Americano,

constituido por un rotor acoplado a una bomba de embolo mediante un sistema biela-manivela. De forma paralela en las primeras décadas del siglo XX se desarrolló la teoría de la aerodinámica, dando paso al perfeccionamiento de perfiles aerodinámicos que ayudarían a diseñar aerogeneradores más rápidos ofreciendo mayores potencias, reduciendo el número de palas para realizar dicha tarea. Por otro lado, los sistemas eólicos de baja potencia fueron creados debido a la necesidad de generar energía sobre todo en las comunidades rurales, o en regiones aisladas en donde no existía el acceso a las redes eléctricas, implementándolos en actividades como el bombeo de agua para abastecer regiones dedicadas a la agricultura.

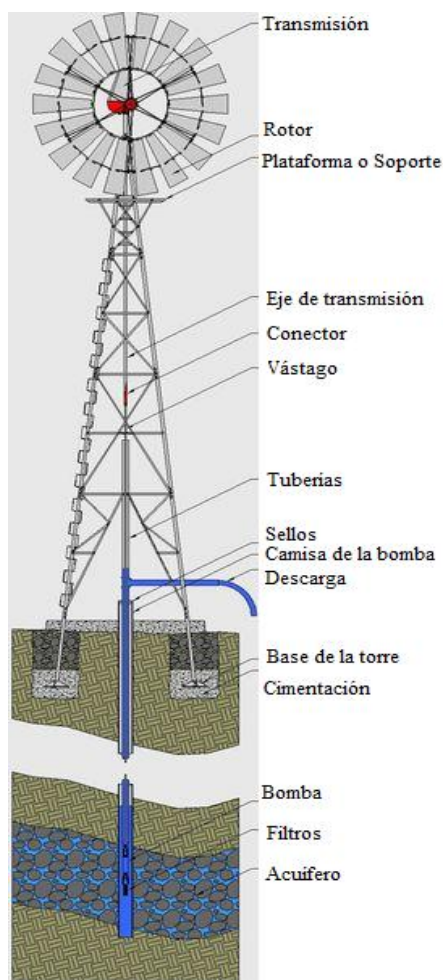


Figura 1. Molinos de viento para el bombeo de agua.

Dichos sistemas extraen energía del viento a través de un rotor que contiene una serie de palas que pueden o no tener un perfil aerodinámico y que a través de ese rotor transforman el movimiento rotacional en energía mecánica para mover una bomba (Figura 1), además de estar diseñados para ser autónomos, permitiendo así, aprovechar al máximo la capacidad de la máquina eólica y los recursos: viento y agua.

En México, si bien es cierto que desde hace varias décadas se usan aerogeneradores para la extracción de agua en pozos de hasta 30 metros de profundidad, sigue siendo una técnica a la cual le falta desarrollo, inversión y sobretodo el interés para generar proyectos con tecnología mexicana, sin tener que importar productos de otros países o requerir personal extranjero. En el año 2002, el programa de energía renovable para usos en la agricultura, tuvo como objetivo la implementación de 50 sistemas eólicos para el bombeo de agua, la dirección del Fideicomiso de Riego Compartido (FIRCO), decidió su implementación en el estado de Zacatecas debido a que cuenta con potencial eólico aprovechable.

El predio elegido para dicha tarea tiene una extensión de 6 hectáreas dedicadas al cultivo de chile y nopal, con un pozo de profundidad de 15 metros y un caudal disponible de $0.11 \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$.

El proyecto se llevó a cabo de manera exitosa, sin embargo, fue requerida la compra de un rotor eólico del extranjero, así como la inversión de un mayor tiempo en el desarrollo de todos los cálculos de los demás proyectos. A raíz de esto, surge la primicia de acoplar una metodología parcialmente establecida para el diseño y los cálculos de estos mecanismos a un entorno de programación que sirva como punto de partida para la construcción, si así se desea, de la aerobomba. Si el sitio elegido cuenta con una velocidad de viento aprovechable, una fuente de distribución de agua directa o remota, se pueden

determinar o seleccionar los componentes del sistema eólico, y así obtener un panorama inicial que evite costos innecesarios.

Algunos sitios estudiados dentro de la República Mexicana que resultaron ser aptos para el desarrollo de la energía eólica son: San Luis Potosí, Michoacán, Tamaulipas, Baja California Sur, Hidalgo y Quintana Roo (Figura 2).

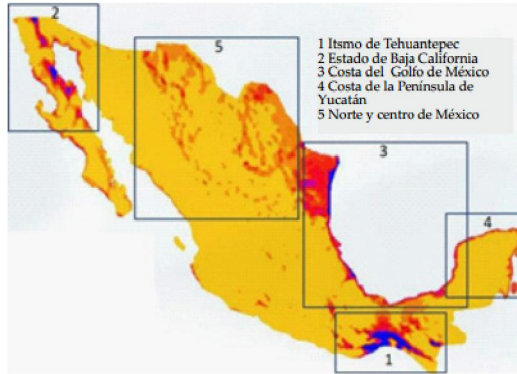


Figura 2. Zonas potenciales para el desarrollo de proyectos de energía eólica.

En el estado de Quintana Roo, existen municipios cuya actividad principal es la agricultura y en donde el potencial eólico está demostrado y es favorable para la implementación de una aero-bomba. Tal es el caso del Municipio Othón Pompeyo Blanco ubicado en la zona sur del estado, con una velocidad de viento promedio medida y reportada por la estación meteorológica la Arrocería de 5.8 m-s^{-1} .

En las actividades agrícolas del Municipio sobresalen de acuerdo a su importancia económica y generadora de empleo en las comunidades rurales, los cultivos de caña de azúcar, maíz, cocotero como fruta para agua, maíz elotero, chile jalapeño, frijol para autoconsumo, papaya Maradol, jícama, pitahaya, plátano, y algunos cítricos.

Como se puede observar en la figura 3, en el municipio existen fuentes de agua disponibles que pueden servir para incrementar la

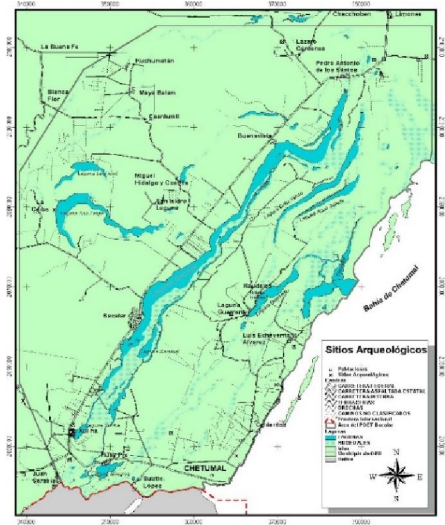


Figura 3. Hidrografía del municipio Othón Pompeyo Blanco.

productividad agrícola. De acuerdo a la hidrografía del lugar, se tienen dos ríos importantes: el Río Escondido y el Río Hondo, en la parte sur, cercana a la ribera del Río Hondo es zona de vocación agrícola, teniendo también áreas donde se practica la ganadería. Existen importantes lagunas como: Bacalar, San Felipe, Milagros y Guerrero, que también puede ser una fuente de abastecimiento.

METODOLOGÍA

1. Medición del Viento

Una vez que se tiene seleccionado el lugar que será objeto de estudio, es necesario evaluar el recurso eólico, esta tarea puede llevarse a cabo por medio de dispositivos que miden el flujo de aire llamados anemómetros y que se instalan en el sitio de interés ya que es conveniente registrar la actividad del viento por lo menos un año. Sin embargo, esto a veces no es posible debido a los costos que se generan en la instalación, el monitoreo, la transportación, etc.

Si se cuenta con datos registrados del comportamiento del viento, según el método MCP (Medición, Correlación, Predicción), y

3. Cálculo del Potencial Eólico

De acuerdo a la teoría conocida como la Ley de Betz, no es posible convertir más del 59.3% de la energía cinética del viento en energía mecánica mediante un rotor o turbina eólica, por lo que se debe considerar un coeficiente de potencia C_p que depende de la configuración de la turbina e incluye también la eficiencia del sistema completo. La potencia eólica se determina como:

$$P_{eólica} = \frac{1}{2} C_p \rho_{aire} A V^3 \quad (2)$$

Para el diseño de las aero-bombas es necesario igualar el potencial eólico, con la capacidad de extracción del recurso hidráulico ya que el rotor será el encargado de realizar dicho trabajo, por lo tanto, la ecuación (1), se debe igualar con la ecuación (2) tal que:

$$\rho_{agua} \cdot Q \cdot g \cdot h = \frac{1}{2} C_p \rho_{aire} A V^3 \quad (3)$$

De la ecuación 3, se despeja el término A, para obtener el área del rotor:

$$A = \frac{2 \rho_{agua} Q g h}{C_p \rho_{agua} V^3} \quad (4)$$

Considerando que el área del rotor está definida como:

$$A = \pi \frac{d_R^2}{4} \quad (5)$$

Se puede obtener la ecuación para determinar el diámetro del rotor, solo sustituyendo la ecuación anterior (5), en la ecuación (4), y despejando el término diámetro del rotor (d_R).

$$d_R = \sqrt{\frac{8 \rho_{agua} Q g h}{C_p \rho_a V^3 \pi}} \quad (6)$$

4. Cálculo de la Transmisión

De acuerdo a los requerimientos de bombeo, y al diseño de la turbina eólica es posible dimensionar todos los elementos mecánicos para acoplar el sistema. Es necesaria una transmisión que modifique la velocidad de giro de la turbina a la velocidad de rotación requerida por la bomba. El tamaño de la máquina determina la transmisión, así como su configuración, tal como se muestra en la Tabla 1.

Tipo de Transmisión	Esquema	Uso	Relación de Transmisión
Engranajes Rectos		Bombeo Generación	$\leq 1:5$
Engranajes Planetarios		Bombeo Generación	$\leq 1:7$
Engranajes Cónicos		Bombeo	$\leq 1:5$
Transmisión por correa		Bombeo	$\leq 1:3$
Transmisión por cadena		Bombeo	$\leq 1:5$

Tabla 1. Tipos de transmisiones utilizables en el bombeo eólico.

Una vez que se realiza el dimensionamiento de la transmisión, se deben calcular las flechas, ejes, etc., que unen a los mecanismos, para lo cual la interfaz ha sido ya previamente programada. Es muy importante analizar y obtener un cálculo de las fuerzas a las que estarán sometidos los componentes para evitar un mal funcionamiento, mayor desgaste y rompimiento de las piezas.

5. Cálculo de la Torre

Es necesaria una torre que soporte los componentes de la aero-bomba y su cálculo es incluido también en el programa. Un cálculo correcto de esfuerzos, impedirá que la estructura pueda volcarse o caerse, para evitar dicho acontecimiento, el esfuerzo vertical debe ser mayor que el horizontal. El esfuerzo vertical corresponde al peso de todos los elementos que

soporta la estructura, por lo tanto es la suma del rotor y de la caja de transmisión, ecuación (7). Para el cálculo de los esfuerzos horizontales, correspondientes a la fuerza del viento que incide en el rotor, y a la fuerza del viento incidente en la torre, se tienen las ecuaciones (8) y (9), en donde a través de una iteración se obtiene la altura adecuada de la torre para que los esfuerzos horizontales no sean mayores a los verticales.

$$F_v = F_r + F_m + F_{cm} \quad (7)$$

$$F_{rotor} = k \cdot v^2_{max} \quad (8)$$

$$F_{torre} = C_a \cdot L_t \cdot v^2_{max} \quad (9)$$

6. Funcionamiento de la aplicación informática

Esta aplicación está diseñada en la herramienta de software matemático Matlab R2012b (Matrix Laboratory), a través de una GUIDE, la cual es un entorno de programación que sirve para la creación de interfaces gráficas que requieran ingreso de datos. Una guide consta de dos archivos: *.m* y *.fig.*, para poder crearse. El archivo *.fig.*, es en donde se diseñan los espacios, etiquetas, botones, etc., es decir la pantalla donde se llevará a cabo la interacción con el usuario, y el archivo *.m* es en donde se concentra el código para poder ejecutarla.

Una vez creada la interfaz, se llevó a cabo la concentración de la información de los modelos tanto de aero-bombas como de las bombas hidráulicas, estos datos, fueron ordenados en tablas con el fin de realizar las condicionantes necesarias al momento de obtener los parámetros que le permitan al programa realizar una

sugerencia al usuario. Por ejemplo, al obtener el cálculo del diámetro del rotor, se ejecuta internamente una sentencia de comparación de la información previamente guardada específicamente del campo diámetro del rotor de las aero-bombas comerciales, y con ello se ofrece al usuario un modelo que cumpla o se aproxime a tal dimensión. Por otro lado, en el caso de la obtención de las dimensiones de los componentes, fueron introducidas al código, las ecuaciones con las que se obtienen dichos datos. A continuación, se muestra el diagrama de flujo que describe el proceso de la aplicación:

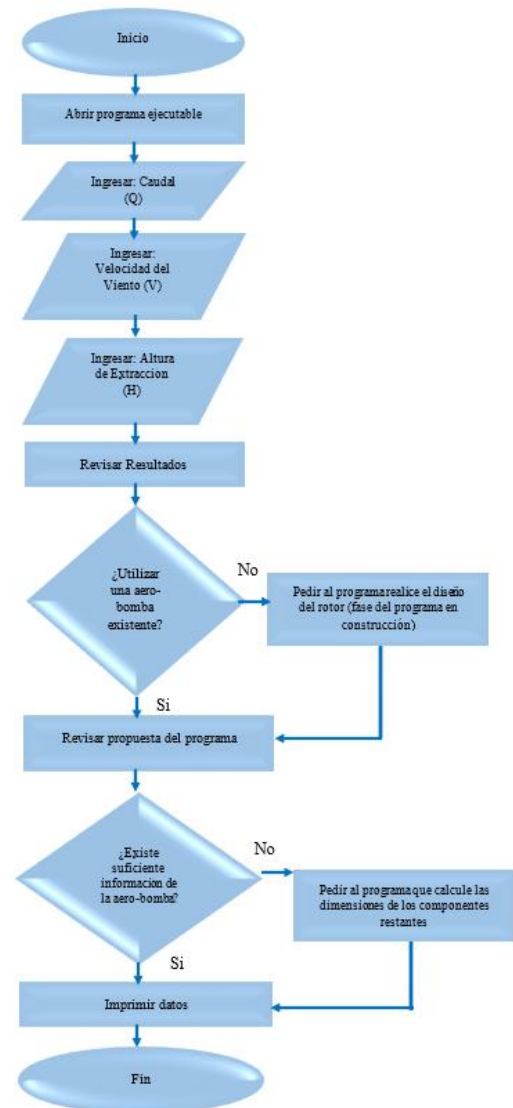


Figura 5. Diagrama de flujo de la aplicación informática.

RESULTADOS

Se realizó una corrida de prueba para el Municipio Othón P. Blanco, con una velocidad promedio del viento (obtenida) de 5.8 m·s⁻¹. Mediante la búsqueda de terrenos destinados al cultivo agrícola se encontró una extensión de terreno de 10 hectáreas para la siembra de caña de azúcar, el rancho disponible cuenta con medio cenote ideal para utilizarlo en el riego ya que se puede obtener un caudal de 1200 L·min⁻¹ con una profundidad de extracción de hasta 15 metros (Figura 6).



Figura 6. Ingreso de datos al programa.

Después del ingreso de los parámetros de entrada, se obtuvo una potencia hidráulica necesaria para la extracción del caudal de 2943 W para lo cual es necesario una turbina eólica de 5.85 metros de diámetro (Figura 7).



Figura 7. Cálculo de los parámetros de la aero-bomba.

Se recomienda una bomba centrífuga vertical marca Altamira serie KOR cuyas aplicaciones son el bombeo de agua para pozos profundos, cisternas, norias, ríos, tinacos, lagos, fuentes decorativas, estanques, etc., y se muestran todas sus características (Figura 8). El programa muestra los datos técnicos de la bomba, y si existe alguna otra bomba que aplique para dichas condiciones también es capaz de mostrarla.

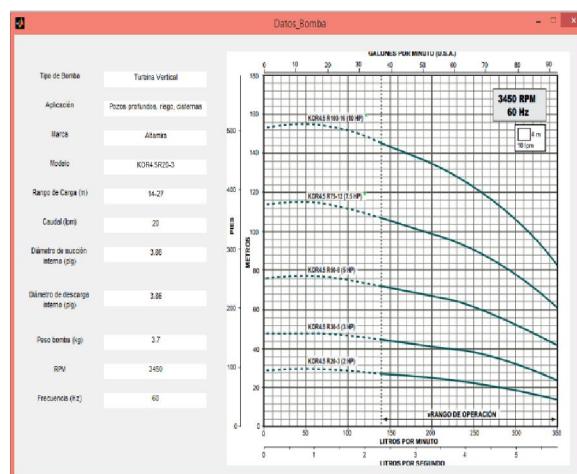


Figura 8. Datos técnicos de la bomba.

El programa tiene dos opciones, calcular el sistema con los datos de un aerogenerador propuesto, o bien, determinar los parámetros del rotor para construirlo, esta etapa se encuentra en fase de construcción para poder ofrecerle al usuario el perfil aerodinámico que genere una mayor eficiencia del sistema. Si se elige la opción de usar la turbina eólica propuesta, el programa toma los datos de dicha turbina para realizar los cálculos. Se sugiere la turbina eólica de eje horizontal ENAIR 7.5, con un diámetro de 5.9 metros (Figura 9). Es necesaria la implementación de una caja multiplicadora de engranes para poder accionar la bomba, se recomienda el uso de 4 engranes planetarios, con un número de dientes de 17, 19 y 53.

Parámetro	Valor	Parámetro	Valor
RPM Aerogenerador	75.2587	Límite de fluencia en la flecha (Mpa)	370
Potencia (W)	2943	Esfuerzo Cortante (Mpa)	148
Frecuencia Aerogenerador (Hz)	60	Par torsión en la flecha Aerogenerador- Multiplicadora	55.55
Modelo Bomba	Altamira k20	Par torsión en la flecha Multiplicador- Bomba	13.17
Caudal (lpm)	1200	Fuerza Horizontal Torre (N)	8882.9
Potencia (hp)	3.9450	Fuerza Vertical Torre (N)	6399.98
Frecuencia Bomba (Hz)	60	Profundidad (m)	0.26
Tipo de Transmisión	E.PLANETARIOS	Altura de Empotramiento (m)	0.56
Número de Engranajes	4	Cimentación den apoyos (m3)	0.054
Par Nominal en el Acoplamiento A-T (N-m)	66.66		
Tipo de Acoplamiento A-T	42-55		
Par nominal en el Acoplamiento T-B (N-m)	15.804		
Tipo de Acoplamiento B-T	19-24		

Figura 9. Esquema propuesto de la acro-bomba.

CONCLUSIÓN

El uso de sistemas eólicos para el bombeo de agua es una excelente herramienta que se puede implementar en comunidades donde no exista red eléctrica, no solo para uso agrícola o ganadero sino también para abastecer de agua potable a comunidades que carezcan del servicio. La interfaz programada sirve para dar un panorama más amplio de los pasos a seguir para adoptar este tipo de tecnología y para visualizar los puntos clave en donde pueden realizar mejoras a este tipo de diseños e inclusive acelerar la recaudación de información del potencial eólico en nuestro país.

La importancia de esta herramienta radica en el hecho de que puede ofrecer el pre-diseño de un sistema para una región en específico aun sin siquiera estar presente en el lugar, dándole al usuario la posibilidad de conocer si es un candidato para implementar este tipo de solución en algún campo o terreno que se tenga disponible. Se han realizado ciertos proyectos en donde debido a un mal cálculo, no se obtiene el resultado esperado, traduciéndolo en pérdida de tiempo y dinero, por lo que se ofrece este programa para minimizar riesgos y conocer las mejores opciones en cuanto a la tecnología ya disponible.

Muestra también una guía para todos los productores agrícolas y ganaderos, que no cuentan con la asesoría adecuada, pudiendo acelerar sus tiempos de siembra y cosecha al conseguir el control del abastecimiento del agua, todo esto con el fin de contribuir al desarrollo de nuestro país, y dando soluciones prácticas, sencillas, pero que cumplan con los requerimientos del cliente. Otra de las ventajas que ofrece la implementación de una aerobomba, es la disminución del uso de contaminantes y el bajo mantenimiento que requiere. Se pueden realizar algunas mejoras a los sistemas, por lo que se está trabajando en la introducción de un módulo de diseño dentro del programa que permita darle al usuario, un mejor aprovechamiento del recurso eólico, calculando las características de las palas del rotor, el tipo de perfil aerodinámico a utilizar, el número de palas, así como los materiales con los que se puede llevar a cabo la construcción, el usuario podrá seleccionar si desea se le genere un pre-diseño del rotor, o se elija uno de la base de datos existente que se adecue a las necesidades.

REFERENCIAS

Carta, J., Calero, R., Colmenar, A., Castro, M. 2009. *Centrales de Energías Renovables: Generación Eléctrica con Energías Renovables*. Madrid. Pearson Educación 2009.

Ecoturismo y Nuevas Tecnologías S.A de C.V. *Casos de estudio de Sistemas Eólicos para bombeo de agua en México*. 2000. México.

Fernandez, P. *Energía Eólica*. Cantabria, España.

Gasch, R. & Twele, J. 2011. *Wind Power Plants*. Berlín. Springer.

Global Wind Energy Council. 2014. *Global Wind Energy Outlook 2014*, pp. 3-9.

IronMan Windmills Corporation. *Water Pumping Windmills*. Recuperado de: Fuente: Obtenida en línea: <http://www.ironmanwindmill.com/how-windmills-work.htm>

Kristoferson. 1986, *Wind Pumps*, Renewable Energy Technologies, vol 26, pp. 296-307.

Mattio, H. & Tilca, F. 2009. *Recomendaciones para mediciones de velocidad y dirección de viento, con fines de generación eléctrica y medición de potencia eléctrica generada por aerogeneradores*. Argentina.

Orbegozo, C. & Arivilca, R. 2010. *Manual Teórico para pequeñas instalaciones*.

Ruz, J. 2010. *Hidrografía del municipio Othon P. Blanco*. Recuperado de: <http://quintanaroo.webnode.es/news/mapa-completo-carretero-caminos-pueblos-de-la-region-de-la-laguna-de-bacalar/>

SAGARPA (Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación). *Red de Estaciones Meteorológicas*. Recuperado de: Fuente: Obtenida en línea: <http://clima.inifap.gob.mx/redinifap/estaciones.a.spx>.

Valle, J. & Ortega H., *Prospectiva de Energías Renovables 2012-2026*. 2012. Secretaría de Energía. México.

NOMENCLATURA

$P_{hidráulica}$	Potencia hidráulica	[W]
$P_{eólica}$	Potencia eólica	[W]
ρ_{agua}	Densidad del agua	[kg-m ³]
ρ_{aire}	Densidad del aire	kg-m ⁻³
Q	Caudal	[m ³ -s ⁻²]
g	Constante de aceleración gravitacional	[m-s ⁻²]
h	Altura	[m]
C_p	Coefficiente de potencia	[adimensional]
A	Área del rotor	[m ²]
d	Diámetro del rotor	[m]
V	Velocidad promedio del viento	[m-s ⁻¹]
F_r	Fuerza del rotor	[N]
F_m	Fuerza del motor	[N]
F_{cm}	Fuerza de la caja multiplicadora	[N]
F_{torre}	Fuerza de la torre	[N]
k	Constante que depende del área efectiva del rotor	[adimensional]
C_a	Coefficiente de resistencia al aire	[adimensional]
L_t	Longitud de la torre	[N]
V_{max}	Velocidad del viento máxima	[m-s ¹]
F_v	Fuerza Vertical	[N]
d_R	Diámetro del rotor	[m]

