

10

Sistema de riego en campos de cultivos y pastizales mediante aerobomba

John Calle¹, Juan Guaman², Luis Chunchi²

1. Introducción

En Ecuador, el desarrollo de la producción agrícola y ganadera se encuentra determinado en gran parte por el riego, tanto en los campos de cultivo como en los pastizales para la cría de ganado (especialmente ganado vacuno destinado a la producción de leche y carne), se necesita irrigación para producir con eficiencia.

En virtud de esto, el Estado ecuatoriano ha emprendiendo proyectos de trasvase de agua para aplicaciones de riego, en la gran mayoría la obra principal ha sido la construcción de canales de riego de uso múltiple. Cuando los terrenos de cultivo o pastos se encuentran por debajo del canal, no existen problemas para el riego, ya que el agua por el efecto de la presión de la fuerza de gravedad fluye libremente hacia éstos; sin embargo cuando dichos terrenos se encuentran por encima del canal, se presentan inconvenientes en el riego, pues en esas circunstancias el agua por si sola no puede llegar a la zonas de irrigación.

1 Director del proyecto de investigación, Director de las Carreras de Ingeniería Mecánica e Ingeniería Industrial de la Universidad Politécnica Salesiana.

2 Egresados de la Carrera de Ingeniería Mecánica. Universidad Politécnica Salesiana.

Esta es la razón por la cual el agricultor y el ganadero se han visto en la necesidad de llevar el líquido vital desde el canal de distribución hasta sus propiedades mediante la implementación de algún sistema de bombeo de agua que, por lo general, funciona a partir de combustibles fósiles o energía eléctrica; estos sistemas de impulsión representan el 100% de los utilizados hasta hoy en Ecuador y tienen algunos problemas sobre todo de tipo ecológico. Por ejemplo, al almacenar combustible fósil surge un gran inconveniente, porque si no se lo hace de la manera correcta, puede dar lugar a filtraciones hacia el subsuelo con el riesgo de contaminar las aguas subterráneas, además del peligro inminente de incendio. Si la estación de bombeo funciona a base de electricidad y si ésta es generada en plantas térmicas, se ocasionan los mismos problemas mencionados anteriormente; sin señalar que se contribuye a la emisión de dióxido de carbono a la atmósfera por la quema del combustible.

Ante lo mencionado y en completa identificación con las políticas de la Universidad Politécnica Salesiana, que se fundamentan en el servicio a la sociedad garantizando la sostenibilidad del medio ambiente; se buscará solucionar el problema de bombeo de agua utilizando energías alternativas, específicamente la energía eólica, la misma que deberá garantizar eficiencia, sostenibilidad en el tiempo y costos competitivos en el mercado nacional e internacional; además de fomentar el uso de estas energías limpias, para que en un periodo de tiempo corto se puedan notar sus beneficios.

2. Materiales y métodos

Considerando las características de diferentes zonas del austro del país fue necesario establecer la viabilidad en el uso de la energía eólica, visitando algunos sectores rurales como Paute, Gualaceo, Sigsig y Tarqui se buscó las bondades requeridas para la implementación de una turbina eólica refiriéndose a la escala de Beaufort, propuesta por el almirante inglés Sir Francis Beaufort, en 1805, y aceptada internacionalmente (ver Tabla 1).

Tabla 1. Escala de Beaufort, consta de 12 grados y es utilizada para tener una idea precisa de la fuerza del viento por observación ocular y aceptada internacionalmente

	Definición	Velocidad			Especificaciones	
		Nudos	m/sg	km/h	En tierra	En mar
0	CALMA	<1	0-0,2	<1	El humo sube verticalmente.	La mar esta como un espejo.
1	VENTOLINA	1-3	0,3-1,5	1-5	La dirección del viento se define por el humo, no por las veletas y banderas.	Rizos sin espuma.
2	FLOJITO (Suave)	4-6	1,6-3,3	6-11	El viento se siente en la cara, se mueven las hojas de los árboles, veletas y banderas.	Olas pequeñas que no llegan a romper.
3	FLOJO (Leve)	7-10	3,4-5,4	12-19	Las hojas de los árboles se agitan constantemente. Se despliega las banderas.	Olas mayores cuyas crestas comienzan aromper. Borreguillos dispersos.
4	BONANCIBLE (Moderado)	11-16	5,5-7,9	20-28	El viento levanta los árboles pequeños. En los estanques se forman olas pequeñas.	Las olas se hacen más largas. Borreguillos numerosos.
5	FRESQUITO (Regular)	17-21	8,0-10,7	29-38	Se mueven los árboles pequeños, en los estanques se forman olas pequeñas.	Olas moderadas alargadas. Gran abundancia de borreguillos eventualmente algunos rociones.
6	FRESCO (Fuerte)	22-27	10,8-13,8	39-49	Se mueven las ramas grandes de los árboles, silban los hilos del telégrafo Se utilizan con dificultad los paraguas.	Comienzan a formarse olas grandes. Las crestas de espuma blanca se extienden por todas partes. Aumentan los rociones.
7	FRESCACHON (Muy fuerte)	28-33	13,9-17,1	50-61	Todos los árboles se mueven. Es difícil andar contra el viento.	La mar engruesa. La espuma de las crestas empieza a ser arrastrada por el viento, formando nubecitas.
8	TEMPORAL	34-40	17,2-20,7	62-74	Se rompen las ramas delgadas de los árboles. Generalmente no se puede andar contra el viento.	Olas de altura mediana y más alargadas. De las crestas se desprenden algunos rociones en forma de torbellinos. La espuma es arrastrada en nubes blancas.
9	TEMPORAL (Fuerte)	41-47	20,8-24,4	75-88	Ocurren desperfectos en las partes salientes de los edificios, cayendo chimeneas y tejados.	Olas gruesas: la espuma es arrastrada en capas espesas. Las crestas de las olas comienzan a romper.
10	TEMPORAL DURO	48-55	24,5-28,4	89-102	Se observa rara vez. Arranca árboles y ocasiona daños de consideración en los edificios.	Olas muy gruesas con crestas empenachadas. La espuma se aglomera en grandes blancos, siendo arrastrada por el viento en forma de espesas estelas blancas. La superficie del mar parece blanca. La visibilidad se reduce
11	TEMPORAL MUY DURO	56-63	28,5-32,6	103-117	Observada muy rara vez. Ocasiona destrozos en todas partes.	Olas excepcionalmente grandes (los buques de pequeño y mediano tonelaje pueden perderse de vista). La mar está completamente cubierta de bancos de espuma blanca extendida en la dirección del viento. Se reduce aún más la visibilidad.
12	TEMPORAL HURACANADO (huracán)	64-71	32,7-36,9	118-133		El aire esta lleno de espuma y de rociones. La mar está completamente blanca debido a los bancos de espuma. La visibilidad es muy reducida.

Para este efecto, se emplazó en el sector una mini estación anemométrica que mida la velocidad del viento durante al menos 7 meses. Así, se determinó que el sector de Paute se ubica en una escala Beaufort entre 0 y 3; Gualaceo entre 0 y 3; Sigsig entre 1 y 5; y, Tarqui entre 1 y 6, por lo que se decide establecer al molino eólico en este último lugar debido a que presenta las mejores condiciones climáticas y geográficas debido a su accesibilidad.

Además, una región específica de Tarqui cumple con las condiciones necesarias a parte de la velocidad del viento: que no existan obstáculos que varíen la dirección y velocidad del viento y que se encuentre cerca de una fuente de agua.

2.1 Datos del lugar escogido

El lugar escogido para el estudio se ubica en la Granja de Irquis de propiedad del CREA (Centro de Reconversión Estatal del Austro) a las orillas del río Irquis, al noreste de la provincia del Azuay, a aproximadamente 18 km al sur de la ciudad de Cuenca, capital de la provincia, en la parroquia Victoria del Portete (ver figura 1).



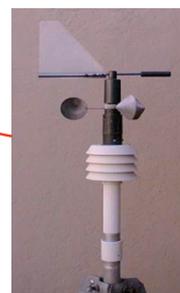
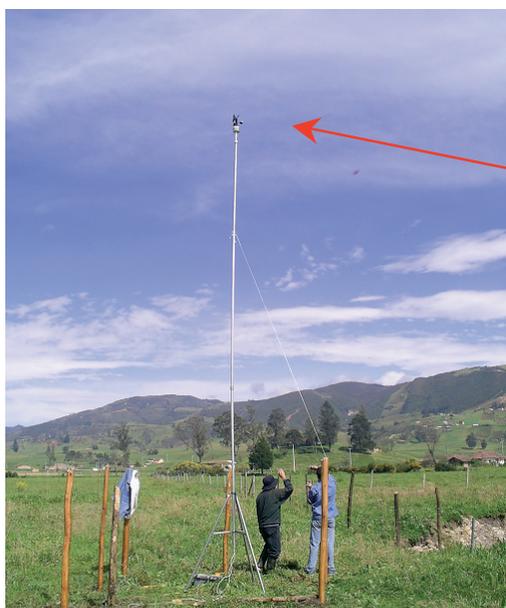
Figura 1. Fotografía satelital de la parroquia Victoria del Portete

2.2 Evaluación del recurso eólico de la zona

El método más acertado para cuantificar correctamente los datos requeridos tanto de dirección como de velocidad del viento es la medición

directa; de acuerdo con este criterio se instaló una estación meteorológica en el lugar del emplazamiento a una altura de 10 m (ver figura 2), y ésta se encargo de recopilar las variaciones de viento durante los siete meses de estudio.

La estación utilizada es una miniestación anemométrica WS 14 marca Weather Port, la misma que está provista de un anemómetro de cazoletas que registra valores de dirección y velocidad del viento. Estos datos se almacenan en un data logger y posteriormente son bajados mediante un programa de computadora y almacenados en formato Excel. (ver figura 3).



Anemómetro de cazoletas

Figura 2. Miniestación anemométrica ubicada a 10 m de altura en la Hacienda Irquis, en la parte superior se ubica el anemómetro de cazoletas



Figura 3. Sistema para registro de datos entregados por el anemómetro de cazoletas

Los datos son tabulados y graficados para identificar los parámetros de viento desde el mes de julio de 2007 hasta enero de 2008, obteniéndose una grafica de cada mes como muestra el ejemplo (ver figura 4):

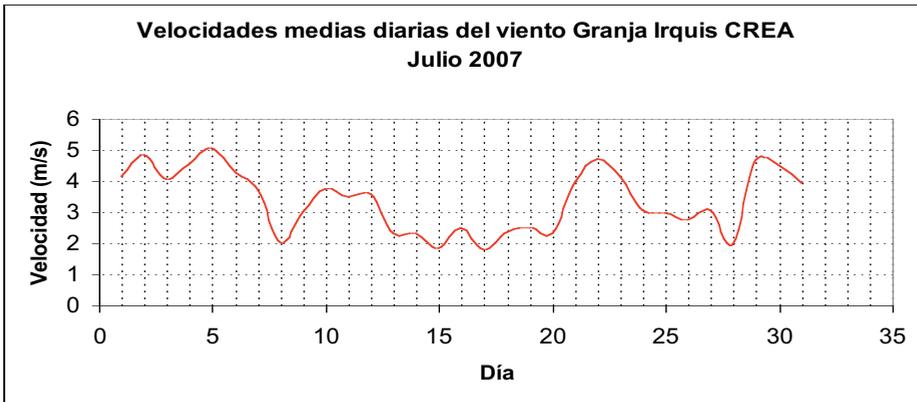


Figura 4. Velocidad del viento en julio 2007

De los datos obtenidos determinamos los siguientes valores que son importantes para el diseño: velocidad máxima 5,04 m/s, velocidad mínima 1,8 m/s, velocidad media 3,5 m/s. Con los datos tomados por la estación anemométrica se realiza el análisis estadístico y la distribución de Weibull para la zona (ver figura 5).

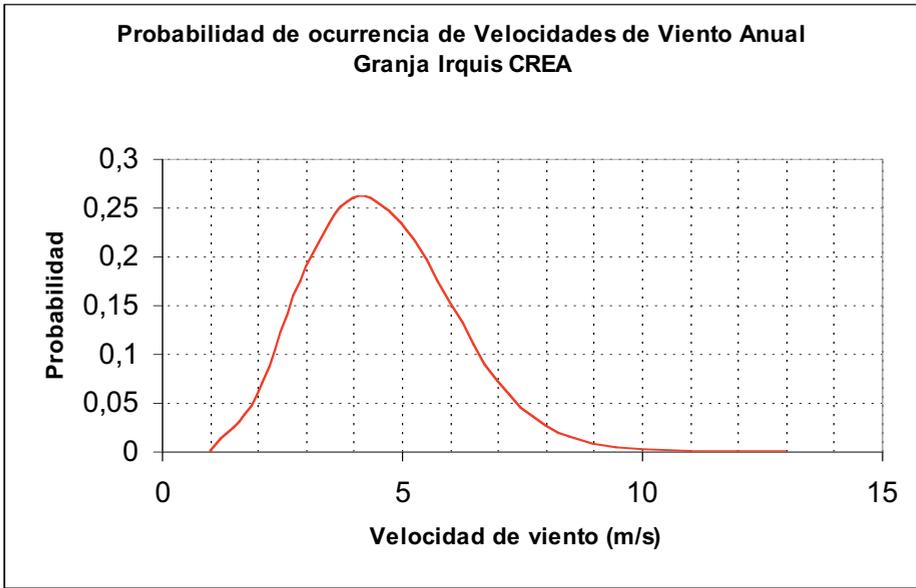


Figura 5. Distribución de Weibull para el análisis estadístico de la velocidad del viento en la Granja Irquis.

El rango de probabilidad más alto está entre las velocidades de 2 m/s y 6 m/s (Manual de Energía Eólica IDAE, 2004). Un molino multiaspas para bombeo de agua puede aprovechar velocidades de viento comprendidas entre los 3 m/s y 7,5 m/s, por lo tanto el estudio realizado garantiza que existe la energía necesaria para la utilización eficiente de la aerobomba en el sistema de riego del sector

2.3 Diseño y cálculos de la aerobomba

Para realizar los cálculos y el diseño de la aerobomba fue importante especificar los siguientes datos: una velocidad media del viento de 3,5 m/s, una velocidad máxima del viento de 6 m/s, temperatura ambiente promedio de 10°C y una presión barométrica sobre el nivel del mar de 96,927 kPa. La altura sobre el nivel del mar fue de 2680 m con una superficie de riego o extensión de pastizales de 2 ha.

Se determinó que el caudal de agua necesario para irrigar los pastizales fue de 1,5 l/s con una frecuencia de riego cada ocho días (Estudio de riego para la Granja de Irquis, 2005); el desnivel cuenta con una altura de bombeo de 4 m cuya fuente de agua es el río Irquis, Subcuenca del río Portete de la cuenca del río Paute.

2.3.1 Rango de Operación

Debido a que un molino multipalas para bombeo de agua puede aprovechar velocidades de viento comprendidas entre los 3 m/s y 7,5 m/s, éste se diseñó para trabajar en este rango de velocidades. A partir de los 8 [m/s] el molino dejará de operar por seguridad, ya que si funcionara a una velocidad superior a los 8 m/s se correrían riesgos perjudiciales para sus componentes mecánicos.

2.3.2 Potencia de bombeo

La potencia necesaria para elevar el agua desde la fuente hasta una altura de 4 metros viene dada por la siguiente fórmula:

$$P_B = \gamma \cdot Q \cdot H$$

Donde:

γ =Peso específico del agua = 9806 N/m³

Q =Caudal de bombeo = 1,5 l/s

H =Altura de elevación = Altura de desnivel + Pérdidas por fricción
= 5m

Reemplazando los datos en la fórmula dada anteriormente tenemos que la potencia necesaria para el bombeo es:

$$P_B = \gamma \cdot Q \cdot H = 9810 \frac{N}{m^3} \cdot 1,5 E^{-03} \frac{m^3}{s} \cdot 5m$$

$$P_B = 73,575W$$

2.3.3 Diámetro del rotor del molino

Para obtener el diámetro del rotor igualamos la ecuación de la potencia de bombeo con la ecuación de la potencia de un molino multipala, luego despejamos el área del rotor de la ecuación de potencia del molino para encontrar el diámetro del rotor. Este proceso se muestra a continuación:

Potencia del molino multipala esta dada por:

$$P_M = 0,5 \cdot \rho_A \cdot A_R \cdot v_D^3 \cdot C_P$$

Donde:

ρ_A =Densidad del aire en el lugar del emplazamiento

v_D =Velocidad de diseño = 3,5m/s

C_P =Coeficiente de potencia o Rendimiento aerodinámico de molino multipala

A_R =Área del rotor

La densidad del aire viene dada por la ecuación de los gases ideales:

$$\rho_A = \frac{P_B}{R \cdot T}$$

Donde:

ρ_A =Densidad del aire en el lugar del emplazamiento.

P_B =Presión barométrica en el lugar del emplazamiento = 96,927 kPa,

T =Temperatura absoluta en el lugar del emplazamiento = 10+273 = 283K,

Reemplazando los datos en la fórmula tenemos que la densidad del aire es:

$$\rho_A = \frac{P_B}{R \cdot T} = \frac{96,927 \text{ kPa}}{0,2870 \frac{\text{kPa} \cdot \text{m}^3}{\text{kg} \cdot \text{K}} \cdot 283 \text{ K}}$$

$$\rho_A = 1,193 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

El coeficiente de potencia se relaciona directamente con la velocidad específica del molino multipala; esta velocidad para el bombeo de agua según el Departamento de Ingeniería Eléctrica y Energética de la Universidad de Cantabria – España, y según la mayoría de constructores de turbinas eólicas suele ser de 1. Como podemos ver en la figura 6 el rendimiento aerodinámico o coeficiente de potencia correspondería a un valor del 29%.

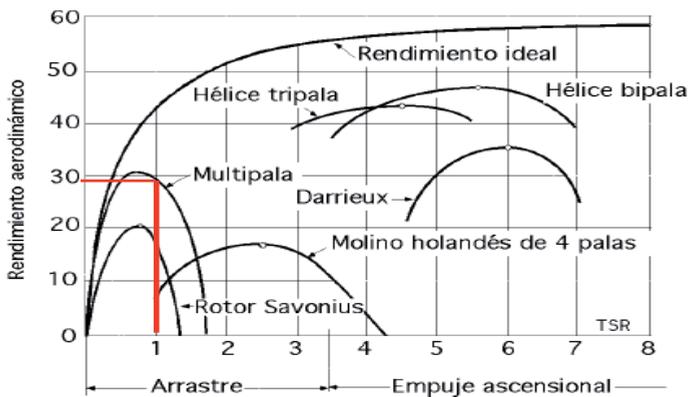


Figura 6. Rendimiento aerodinámico en función de la velocidad específica de un molino multipala para bombeo de agua. (Departamento de Ingeniería Eléctrica y Energética Universidad de Cantabria – España – 2000)

Reemplazando los datos de la densidad del aire así como el coeficiente de potencia del molino multipala se tiene la ecuación (2) en función del área del rotor de la siguiente forma:

$$P_M = 0,5 \cdot \rho_A \cdot A_R \cdot v_D^3 \cdot C_P = 0,5 \cdot 1,193 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot A_R \cdot \left(3,5 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^3 \cdot 0,29$$

$$P_M = 7,672 \cdot A_R$$

Igualando la ecuación de la potencia del molino con la ecuación de la potencia de bombeo se llega a determinar el área y diámetro del rotor, de la siguiente manera:

$$P_M = 7,672 \cdot A_R$$

$$P_B = 73,575 \text{ W}$$

$$P_M = P_B$$

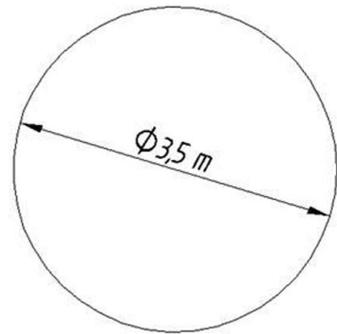
$$7,672 \cdot A_R = 73,575$$

$$A_R = \frac{73,575}{7,672} = 9,589 \text{ m}^2$$

$$r_R = \sqrt{\frac{A_R}{\pi}} = \sqrt{\frac{9,589 \text{ m}^2}{\pi}} = 1,747 \text{ m} \approx 1,75 \text{ m}$$

$$D_R = 3,5 \text{ m}$$

$$A_R = \pi \cdot (1,75 \text{ m})^2 = 9,621 \text{ m}^2$$



Rotor - Molino Multipala

2.3.4 Curva de potencia molino multipala

Con el área y el diámetro del rotor calculados se puede graficar la curva de potencia del molino en función de la velocidad del viento para el intervalo de diseño, esto es desde 3m/s a 7,5m/s. Esta curva se puede ver a continuación en la figura 7

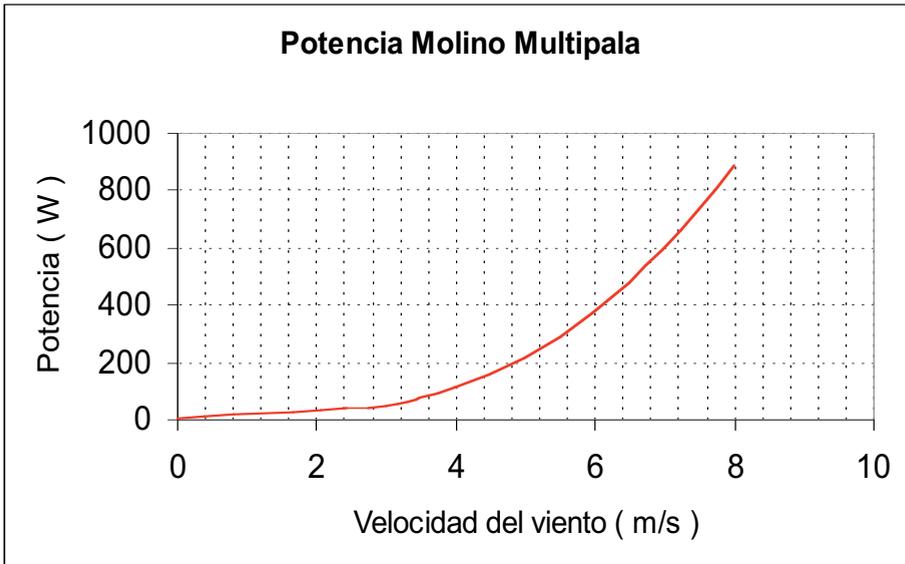


Figura 7. Curva de potencia del molino en función de la velocidad del viento.

2.3.5 Revoluciones por minuto del rotor

Para obtener la velocidad de giro del rotor utilizamos la siguiente expresión:

$$N = \frac{60 \cdot TSR \cdot v_D}{\pi \cdot D_R}$$

Donde:

TSR =Velocidad específica del molino = 1.

v_D =Velocidad de diseño = 3,5m/s.

D_R =Diámetro del rotor = 3,5m.

Reemplazando los datos tenemos:

$$N = \frac{60 \cdot TSR \cdot v_D}{\pi \cdot D_R} = \frac{60 \cdot 1 \cdot 3,5 \frac{m}{s}}{\pi \cdot 3,5m}$$

$$N = 19,098rpm$$

En la siguiente gráfica figura 8 se puede ver como varía las revoluciones por minuto del rotor en función de la velocidad del viento para el intervalo de 3m/s a 7,5m/s.

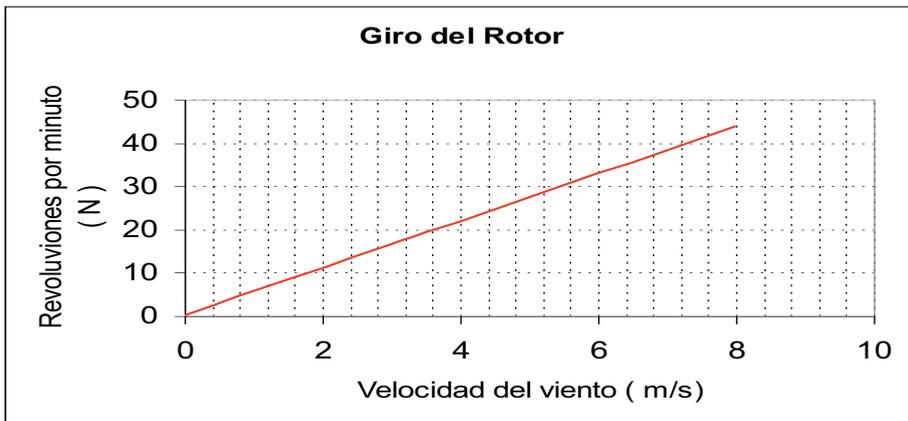


Figura 8. Revoluciones por minuto del rotor en función de la velocidad del viento.

2.3.6 Elección del perfil para las palas para el rotor

Para la elección del tipo de perfil para las palas del rotor utilizamos la siguiente tabla:

Tabla 2. Perfil de las palas de un rotor en función del ángulo de ataque, el Coeficiente de sustentación y el Coeficiente de arrastre. (Lauven, 1980).

	Forma Perfil	Arrastre/ Sustentación	Angulo ataque	Coef. Sustentación
Lámina Plana		0,1	5	0,8
Lámina curvada 10% de curvatura		0,02	3	1,25
Lámina curvada con un tubo en el lado cóncavo		0,03	4	1,1
Lámina curvada con un tubo en el lado convexo		0,2	14	1,25
Perfil NACA 4412		0,01	4	0,8

Debido a que se diseña un molino para bombeo de agua se elige el perfil de la segunda fila de la tabla, este perfil es una lámina curvada con un 10% de curvatura.

Las características del perfil seleccionado de acuerdo a la tabla son las siguientes:

$$\alpha = \text{Ángulo de ataque} = 3^\circ$$

$$C_L = \text{Coeficiente de sustentación} = 1,25$$

$$C_D = \text{Coeficiente de arrastre} = 0,025$$

2.3.7 Número de palas o álabes del rotor:

El número de palas del rotor está en función de la velocidad específica de diseño que en este caso es de uno ($TSR = 1 = \lambda$). En la tabla se puede ver como se relaciona el número de palas del rotor con la velocidad específica de diseño también llamada celeridad.

Tabla 3. Número de palas del rotor recomendadas en función de la celeridad del rotor. (T. Sánchez, 2007)

Celeridad (λ)	Número de álabes Recomendado (Z)
1	6 - 20
2	4 - 12
3	3 - 6
4	2 - 4
5 - 8	2 - 3
8 - 15	4 - 2

De acuerdo a la tabla para una celeridad de 1, podemos elegir entre 6 y 20 álabes para el rotor, pero como nuestro molino multipala no se caracteriza por ser una maquina rápida no elegiremos 6 álabes para el rotor, y mas bien se optará por 16 álabes para lograr que el rotor alcance una solidez de un 75%; por lo tanto, $Z = 16$ álabes. En el gráfico (ver figura 9) se puede ver como varía la solidez de una máquina eólica en función de la velocidad específica:

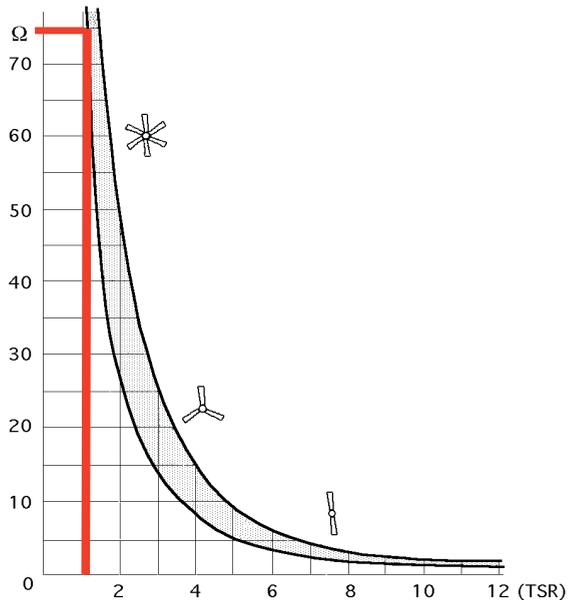
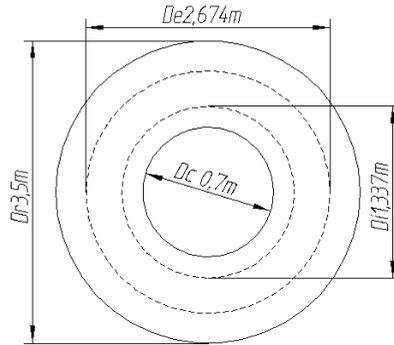


Figura 9. Curva que indica la solidez de una máquina eólica en función de la velocidad específica. (Departamento de Ingeniería Eléctrica y Energética. Universidad de Cantabria, España)

El radio del cubo del rotor, el radio de los anillos de sujeción de los álabes luego del cálculo correspondiente presentan las siguientes dimensiones:



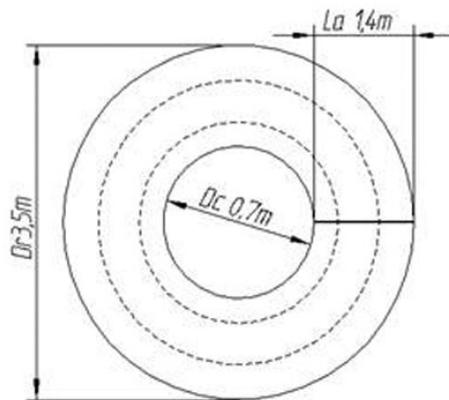
2.3.8 Longitud del álabes:

La longitud del álabes es la diferencia entre el radio del rotor y el radio del cubo, esto se expresa de la siguiente manera:

$$L_A = r_R - r_C$$

$$L_A = 1,75m - 0,35m$$

$$L_A = 1,4m$$



2.3.9 Forma del álabe

La forma del álabe se rige por medio de las siguientes fórmulas (5). Y se muestra en la figura 10. (Departamento de Ingeniería Eléctrica, Universidad de Zaragoza, España)

$$\lambda_R = \frac{\lambda \cdot r}{r_R}$$

$$\phi = \frac{2}{3} \cdot \arctan\left(\frac{1}{\lambda_R}\right)$$

$$C = \frac{8 \cdot \pi \cdot r \cdot (1 - \cos \phi)}{Z \cdot C_L}$$

$$\beta = \phi - \alpha$$

Donde:

λ_R = Celeridad local a la distancia r del rotor

λ = Celeridad de diseño = 1

r = Distancia desde el centro del rotor a la distancia evaluada

ϕ = Ángulo formado por la velocidad relativa con el plano de giro del rotor

C = Longitud de la cuerda de la sección del álabe

β = Ángulo formado por el álabe con el plano de giro

α = Ángulo de ataque = 3°

C_L = Coeficiente de sustentación del álabe

Z = Número de álabes = 16

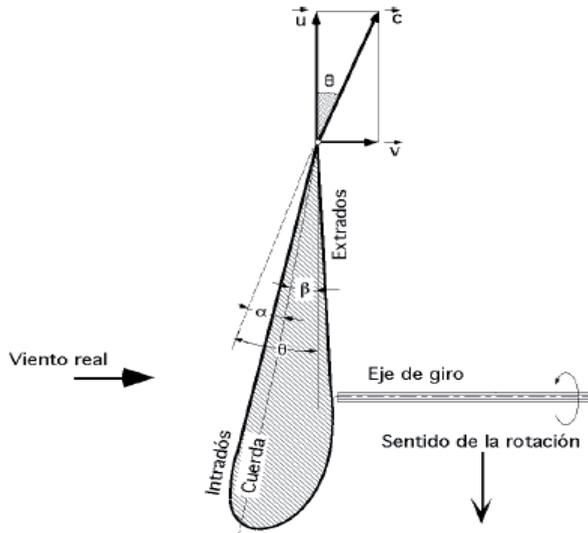


Figura 10. Gráfica del álabes con las condiciones calculadas.

Haciendo uso de las ecuaciones anteriores, realizando la linealización del perfil del álabes y linealizando el ángulo, se logra obtener los que determinaran las dimensiones para la construcción de la pala (figuras 11.a y 11.b)

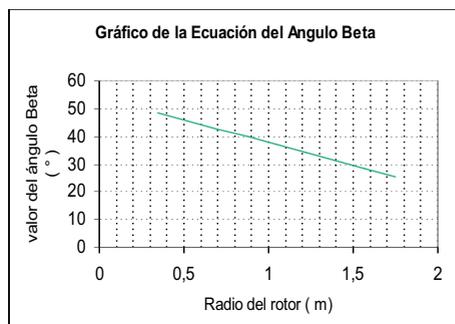
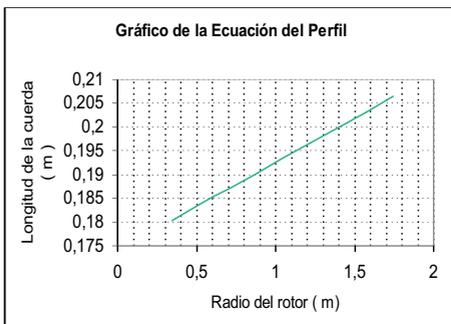


Fig. 11 a) Gráfico de la Ecuación del Perfil del álabes, mostrando la longitud de la cuerda en función del radio del rotor, b) Se muestra la variación del ángulo beta en función del radio del rotor.

2.3.10 Fuerza centrífuga en el álabe

Con todas las variables calculadas la fuerza centrífuga en el álabe sería:

$$F_C = \frac{m \cdot v_P^2}{r_G}$$

$$F_C = \frac{3,181 \text{ kg} \cdot \left(7,513 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2}{1,0657 \text{ m}}$$

$$F_C = 168,514 \text{ N}$$

Donde:

m =Masa del álabe

v_P =Velocidad periférica del rotor

r_G =Distancia desde el dentro del rotor al centro de gravedad del álabe

2.3.11 Cálculos de la Tornamesa

El centro de gravedad de la tornamesa figura 12 está dado por las siguientes relaciones (Small Aerogenerators for the rural areas of Perú, 2002)

$$L_1 = \frac{1}{14} \cdot D_R$$

$$L_2 = \frac{2}{3} \cdot D_R$$

$$L_1 = \frac{1}{14} \cdot D_R$$

$$L_1 = \frac{1}{14} \cdot 3,5 m$$

$$L_1 = 0,25 m$$

$$L_2 = \frac{2}{3} \cdot D_R$$

$$L_2 = \frac{2}{3} \cdot 3,5 m$$

$$L_2 = 2,33 m$$

Donde:

L_1 =Distancia desde el rotor hasta el centro de gravedad de la tornamesa

L_2 =Distancia desde la veleta hasta el centro de gravedad de la tornamesa

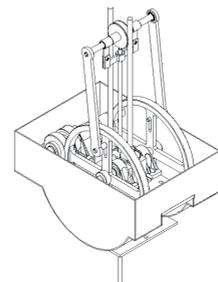
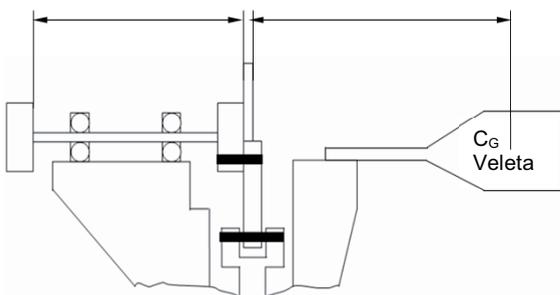


Figura 12. Diseño y distancias de la tornamesa

2.3.12 Peso del rotor:

El peso del rotor está dado por:

$$\begin{aligned}
 W_R &= m_{Total} \cdot g + 0,10 \cdot (m_{Rotor} \cdot g) \\
 W_R &= 76,344kg \cdot 9,806 \frac{m}{s^2} + 0,10 \cdot \left(76,344kg \cdot 9,806 \frac{m}{s^2} \right) \\
 W_R &= 823,492N
 \end{aligned}$$

Donde:

$$\begin{aligned}
 W_R &= \text{Peso del rotor} \\
 g &= \text{Gravedad} \\
 m_{Total} &= \text{Masa total de las palas del rotor}
 \end{aligned}$$

2.3.13 Fuerza de la veleta:

Como ya se tiene la ubicación del centro de gravedad de la torname-sa se procede a calcular la fuerza vertical que ejerce la veleta, para esto se realiza una sumatoria de momentos con respecto al centro de gravedad de la torname-sa de la siguiente forma.

$$\sum M_0 = W_R \cdot L_1 - F_V \cdot L_2 = 0$$

Donde:

F_V =Fuerza vertical ejercida por la veleta, dada por (9)

$$F_V = \frac{W_R \cdot L_1}{L_2}$$

$$F_V = \frac{823,492N \cdot 0,25}{2,33m}$$

$$F_V = 88,3575N$$

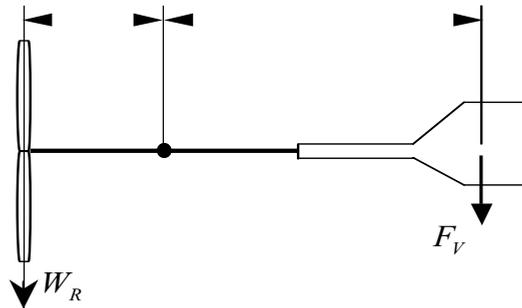


Figura 13. Diseño y dimensiones de la veleta

2.3.14 Área de la veleta

El área de la veleta está en función del área del rotor de la siguiente forma:

$$A_V = \frac{1}{8} \cdot A_R$$

Donde: A_R = Área del rotor =

$$A_V = \frac{1}{8} \cdot 9,589m^2 = 1,198m^2$$

Al conocer el área de la veleta podemos determinar sus dimensiones, de la siguiente manera.

$$A_v = 0,437 \cdot x^2$$

$$x = \sqrt{\frac{A_v}{0,437}} = \sqrt{\frac{1,198m^2}{0,437}} = 1,656m$$

Conociendo la longitud de la veleta podemos determinar las dimensiones restantes, que se muestran en la figura 10.

$$y = \frac{x}{2} = \frac{1,656m}{2} = 0,828m$$

$$a = \frac{x}{4} = \frac{1,656m}{4} = 0,414m$$

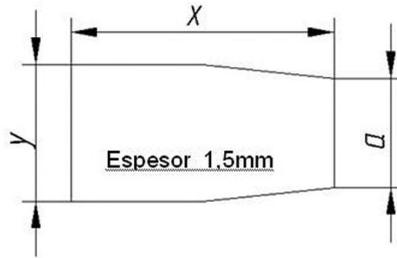


Figura 14. Diseño con las dimensiones x , y e a de la veleta.

2.3.15 Diámetro del Pistón de la Bomba

El área del pistón de la bomba viene expresado con la siguiente fórmula matemática (Torquati, 2001):

$$A_p = \frac{Q}{S \cdot N \cdot \eta_v \cdot i}$$

Donde.

A_p =Área del pistón

Q =Caudal de bombeo = $1,5E^{-3}m^3/s$

S =Recorrido del pistón, entre 70 y 100mm

N =Golpes por minuto = Revoluciones por minuto del rotor = 19rpm

η_V =Rendimiento volumétrico = 0,9

i =Constante = 1

Para el cálculo del diámetro se tiene:

$$A_p = \frac{Q}{S \cdot N \cdot \eta_V \cdot i}$$

$$A_p = \frac{1,5E^{-3} \frac{m^3}{s}}{90E^{-3} m \cdot 19 \cdot 0,9 \cdot 1} = 9,746E^{-04} m^2$$

$$D_p = \sqrt{\frac{4A_p}{\pi}} = 0,03522m = 3,522cm = 35mm$$

De acuerdo al cálculo se puede ver que el diámetro del pistón es de 35mm, pero es necesario determinar con pruebas de campo la eficiencia de la bomba.

2.3.16 Diseño del eje principal

Seleccionamos en primer lugar los diámetros de 50 y 60 mm para el eje principal, considerando carga y factor de escala.

Para la determinación de la resistencia del eje, se realizan los cálculos necesarios: en primer lugar: F_a , que es la fuerza ejercida en la columna de agua por la bomba hasta la altura establecida, y con este dato calculamos el eje a fatiga, como indica la figura 11.

Datos:

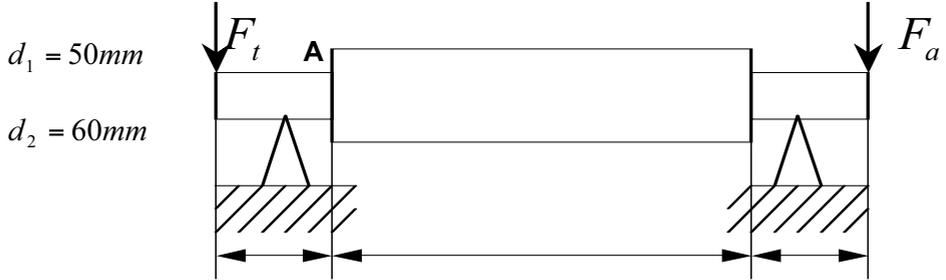


Figura 15. Diseño del eje principal y sus dimensiones

Posteriormente escogemos el material. Para nuestro caso elegimos un acero AISI 1045, el mismo que presenta las siguientes características:

Resistencia última a la tensión = $S_{ut} = 630\text{ MPa}$ (91 kPsi)

Resistencia de fluencia = $S_y = 530\text{ MPa}$

Para garantizar la resistencia tenemos la siguiente condición:

$$S'_e = 0,504 * S_{ut} \quad \text{cuando} \quad S_{ut} \leq 200\text{ kPsi} (14000\text{ MPa})$$

Se tiene que la resistencia a la fatiga es:

$$S'_e = 0,504 * S_{ut}$$

$$S'_e = 0,504 * 630\text{ MPa}$$

$$S'_e = 317,52\text{ MPa}$$

Finalmente se tiene que el esfuerzo es:

$$\sigma = 1480353177 Pa = 17,45 MPa$$

Por lo tanto, el esfuerzo es menor que el límite a la fatiga lo que quiere decir que el eje construido en el material escogido y las dimensiones correspondientes resistirá con toda seguridad.

2.3.17 Diseño de la torre

Para el diseño de la torre se utilizó el software de Multiframe con el que se desarrolló un análisis estructural adecuado tanto en forma como en dimensiones y se definió como material ángulo estructural de 2 x 2 x 3/16 que es un material que fácilmente se puede encontrar en el mercado local, y que soporta el peso y las solicitaciones mecánicas a las que va a estar expuesto. Tal como se muestra en la figura 12.

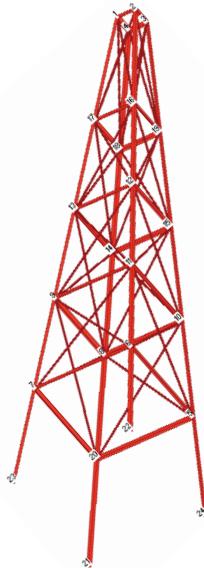


Figura 16. Diseño escogido para la torre

2.3.18 Construcción de la aerobomba.

Con los planos de todos los elementos realizados se procedió a la construcción de todas las partes de la aerobomba en los laboratorios de Ingeniería Mecánica de la Universidad Politécnica Salesiana de la sede Cuenca, tal como se muestra en la secuencia de la figura 13.

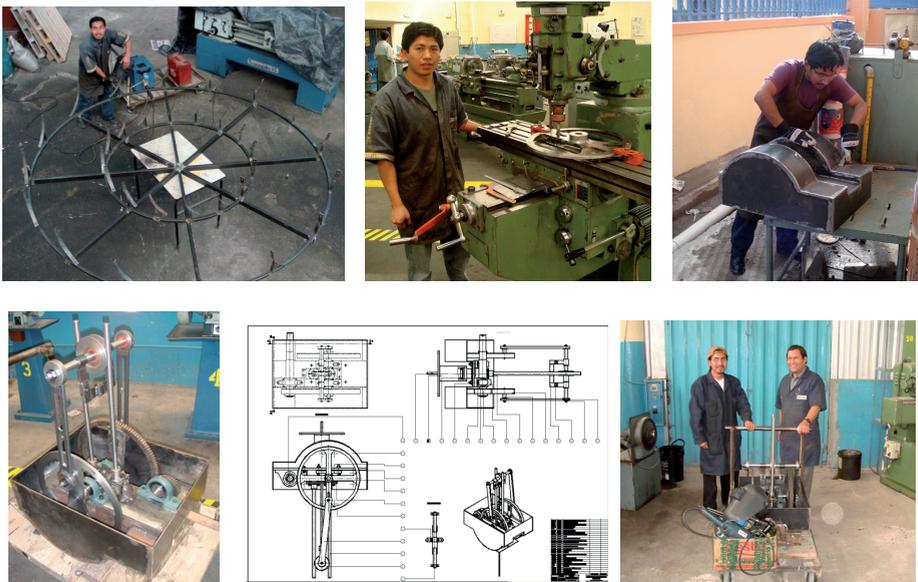


Figura 17. Construcción de las partes de la aerobomba en los laboratorios de Ingeniería Mecánica de la Universidad Politécnica Salesiana. Sede Cuenca

2.3.19 Emplazamiento de la aerobomba

Para realizar el emplazamiento de la aerobomba se requirió en primer lugar realizar una derivación del río Iruquis con maquinaria pesada, luego construir un tanque y las zapatas correspondientes para la sujeción de la torre, las mismas que debían garantizar que no se produzca el vuelco de la misma, y posteriormente se realizó el montaje que por las condiciones del sector se tornó dificultoso, como se indica en la secuencia de la figura 14.



Figura 18. Pasos para la construcción y emplazamiento de la aerobomba en la derivación del Río Irquis

2.4 Costo de construcción y emplazamiento de la aerobomba

	<i>Costo</i>
Aerobomba	\$4.000,00
Emplazamiento	\$1.500,00
Total	\$5.500,00

3. Resultados

El análisis preliminar del sitio de estudio se realizó con la Escala de Beaufort determinándose dos posibles lugares, de los cuales se escogió el que se encuentra en la parroquia Victoria del Portete, en la granja de Irquis de propiedad del CREA, el mismo que presenta las bondades requeridas

para el desarrollo del proyecto. Al realizar la toma de datos en el sitio escogido mediante la estación anemométrica WS 14, para su posterior tabulación estos datos y análisis estadístico con la distribución de Weibull, se determinó una velocidad media de 3,5 m/s y una alta probabilidad de ocurrencia de vientos entre 3 m/s y 5 m/s

Se realizó el cálculo y diseño de todos los componentes de la aerobomba tomando como punto de partida los datos de viento y las características necesarias para realizar el riego en el sector. Asimismo, se construyeron todos los elementos con materiales que se pueden conseguir en la localidad, con maquinaria y tecnología convencional. Además se realizó el emplazamiento de la aerobomba, obteniéndose como resultado un adecuado funcionamiento de la máquina eólica. Finalmente, se acopló la bomba al molino multiaspas para producir el bombeo del agua satisfactoriamente.

El arranque de la Aerobomba se dió con una velocidad de viento de 2 m/s y el sistema mecánico de la Aerobomba funciona con una eficiencia de un 95%. Además el sistema de orientación es óptimo, ya que se adapta rápidamente a las variaciones de la dirección del viento con facilidad.

Finalmente, con una velocidad de viento de 3 m/s se logra bombear un caudal de de 12 gal/min, a una altura de 15 m con un costo de construcción y emplazamiento de aproximadamente \$5.500,00

4. Discusión

La escala de Beaufort es una herramienta simple pero valiosa y nos permite cuantificar de forma general la energía del viento en zonas determinadas por lo que se recomienda su utilización.

La aerobomba diseñada se puede construir en su totalidad con materiales que se pueden conseguir con facilidad en el Ecuador con un costo de construcción y emplazamiento de la aerobomba es competitivo con sistemas que se pueden conseguir fuera del país, y al utilizar energía renovable

es un sistema limpio que aporta al cuidado del medio ambiente, además el impacto ambiental generado por la implementación del sistema es mínimo comparado con las ventajas que presenta, se convierte en una alternativa viable para el riego en campos de cultivos y pastizales, por esto se recomienda ampliamente el uso de este tipo de energías limpias cuyo uso ha sido discriminado únicamente por falta de conocimiento.

La eficiencia de la bomba debe ser monitoreada con las diferentes velocidades de viento y se podría trabajar para mejorar su diseño.

Bibliografía

BUSTOS, Fernando

2007 *Manual de gestión y control ambiental*, R.N. Industria Gráfica. Ecuador, 2007.

CIEMAT

1997 *Principios de conversión de la energía eólica*. Edit, CIEMAT. Madrid, España.

FERNANDEZ, Diez Pedro

2000 *Antecedentes Históricos y fuentes eólicas*, Universidad de Cantabria, España.

FOLLETO

1998 *Energía Eólica* Ministerio de Energía y Minas Dirección de Energías Alternativas. Quito, Ecuador.

FUNIBER

2004 *Módulos para Maestría en Gestión y Auditorías Ambientales*.

GREENE, Richard W.

1988 *Válvulas selección, uso y mantenimiento*. McGraw Hill. México D. F.

MORA HIDROVO, Eduardo W.

1983 *Utilización de energía eólica para extracción de agua*, ESPOL. Dpto. de Ingeniería Mecánica, Guayaquil, Ecuador.

McNAUGHTON, Kenneth

1988 *Bombas selección, uso y mantenimiento*, McGraw Hill. México D. F.

OLADE. 1983. *Atlas Eólico preliminar de América Latina y el Caribe*. Volumen III OLADE. Quito Ecuador

ROBERT L. MOTT. *Diseño de Elementos de Máquinas*, Prentice Hall. México, 1992.

REGISTRO Histórico de la dirección predominante del viento en rumbos

2001 Aeropuerto Mariscal Lamar. Cuenca.

REGISTRO de Frecuencias de la distribución del viento en rumbos

1996 Aeropuerto Mariscal Lamar. Cuenca.

RODRIGUEZ, Florencio

1992 *Riego por goteo*, Edit. A.G.T. México D.F. 158, 1992.

SHIGLEY, Joseph Edward/MISCHKE Charles

1997 *Diseño de Energía Mecánica*, McGraw Hill. México D.F., Madrid. 883 p.

SANCHEZ, Teodoro

2007 Informe del II Seminario Internacional sobre energías renovables, ITDG. Santa Cruz, Bolivia.

Manual de energía eólica IDAE (*Instituto para la Diversificación del Ahorro de Energía*)

2004 Madrid, España.

Estudio de riego para la Granja de Irquis, CREA, 2005.

LAUVEN J. Van

1980 *Introduction to Wind Energy Conversion*, Holanda.

Departamento de Ingeniería Eléctrica y Energética, Universidad de Cantabria, España.

Departamento de Ingeniería Eléctrica, Universidad de Zaragoza, España.

Small Aerogenerators for the rural areas of Perú, 2002.

TORQUATI, Ing. Carlo Enzo, Industrias Jobber, Colombia.

Páginas electrónicas

<http://www.energias-renovables.com/paginas/index.asp>.

<http://www.windpower.dk.org>. Asociación danesa de la industria eólica.

<http://www.cepis.ops-oms.org/eswww/revistas/agua5/agua5.html>

<http://www.unb.br/fav/renova/reno/enerpmya.pdf> Sitio Web sobre energías renovables.

http://www.iter.es/pre_metereo.htm. Sitio Web sobre meteorología.

<http://www.jbornay.com> Sitio Web sobre características y selección de molinos de viento.

<http://www.geociites.com/jandradem2001/Infogen.htm> Sitio Web sobre diseño de molinos de viento.

http://www.hispagua.cedex.es/GRUPO1/Tes_hidro/HTML/HID_C2.HTM

<http://www.solarweb.net>

<http://www.eostechnic.com>

http://www.fiasa.com.ar/molinos_fiasa_sapnish.htm

<http://www.chileriego.cl/revista/diario3.htm> Sitio Web sobre riego

<http://www.eead.csic/riego/a1/riego1.htm> Sitio Web sobre riego por aspersores