UNIVERSIDAD NACIONAL DE LOJA

ÁREA DE LA ENERGÍA, LAS INDUSTRIAS Y LOS RECURSOS NATURALES NO RENOVABLES

CARRERA DE INGENIERÍA ELECTROMECÁNICA

TÍTULO

"DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA AEROBOMBA TIPO MOLINO MULTIPALA AMERICANO PARA EL LABORATORIO DE ENERGÍAS RENOVABLES DEL A.E.I.R.N.N.R."

TESIS DE GRADO PREVIO A OPTAR POR EL TÍTULO DE INGENIERO ELECTROMECÁNICO

AUTOR:

Tlgo. Mario Ramiro Tinoco Córdova

DIRECTOR :

Ing. Jorge Luís Maldonado Correa Mg. Sc.

LOJA - ECUADOR

2012

CERTIFICACIÓN

Ingeniero

Jorge Luis Maldonado Correa

Certifica:

Haber dirigido, asesorado, revisado y corregido el presente trabajo de Tesis de Grado, en el proceso de investigación, del Tema "DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA AEROBOMBA TIPO MOLINO MULTIPALA AMERICANO, PARA EL LABORATORIO DE ENERGÍAS RENOVABLES DEL A.E.I.R.N.N.R.", previo a la obtención del Título de Ingeniero Electromecánico, realizado por el Egresado Mario Ramiro Tinoco Córdova, la misma que cumple con los reglamentos y políticas de investigación, por lo que autorizo su presentación y posterior sustentación y defensa.

_____

Ing. Jorge Luis Maldonado Correa Mg. Sc.

DECLARACIÓN DEL AUTOR

Mario Ramiro Tinoco Córdova, autor único del presente trabajo de investigación Teórico-Práctico, certifico la propiedad intelectual a favor de la Universidad Nacional de Loja, la cual podrá hacer uso del mismo con el propósito académico que estime conveniente.

_____

Egdo. Mario Ramiro Tinoco Córdova

PENSAMIENTO

“AQUEL QUE OBTIENE UNA VICTORIA SOBRE OTRO HOMBRE, ES PODEROSO,…

PERO QUIEN OBTIENE UNA VICTORIA SOBRE SI MISMO ES ILUMINADO”

Lao – Tse

DEDICATORIA

Dedico este sencillo pero significativo trabajo con inmenso cariño y amor,… a Dios y a mis padres Rosita y Mario, por darme la vida…por que no tendría valor alguno este esfuerzo si ellos no existieran. Pero de manera especial dedico este maravilloso logro a mis amados hijos Ximena, David y Diego…quienes fueron la inspiración durante toda mi vida de estudiante; de la misma manera a mis queridos hermanos que siempre me supieron dar su apoyo incondicional a cada momento.

Mario Ramiro…

AGRADECIMIENTO

Un afán de superación, es lo que me impulsó a tomar la decisión de transitar por los caminos del conocimiento; y lograr culminar esta meta que hoy pretendo constituir como un homenaje de agradecimiento y pleitesía a quienes abrieron el camino con sus sabios consejos y conocimientos impartidos durante mi vida de estudiante… A MIS MAESTROS.

De igual manera hago público mi agradecimiento a todas las Autoridades de nuestra querida Universidad Nacional de Loja, y de manera especial a las Autoridades del Área de la Energía las Industrias y los Recursos Naturales No Renovables, y en general a todas las personas que de una u otra forma me dieron su apoyo.

Mario Ramiro…

INDICE DE GENERAL

CERTIFICACIÓN……... I

DECLARACIÓN DEL AUTOR……..... II

PENZAMIENTO……. III

DEDICATORIA……... IV

AGRADECIMIENTO…… V

INDICE GENERAL……. VI

INDICE DE FIGURAS……. IX

INDICE DE TABLAS……...….. X

a. TÍTULO……...……...……...…… 12

b. RESUMEN……...……...……. 13

c. INTRODUCCIÓN…...……...……. 14

d. REVISIÓN DE LITERATURA……...…… 16

d.1. CAPÍTULO I: Generalidades de la Energía Eólica…....…...…...…...…..... 16

d.1.1. Reseña Histórica……..…….…… 16

d.1.1.1. Historia del Uso de las Aerobomba……..……...……. 19

d.2. CAPÍTULO II Descripción Técnica de la Tecnología...…..……..... 22

d. 2. 1. Tipo de bombas hidráulicas……...……..... 25

d. 2. 2. Tipo de aerobombas……. 26

d. 2. 3. Componentes de una aerobomba tipo Multipala americano…… 28

d. 2. 3. 1. El rotor……. 29

d. 2. 3. 2. La transmisión……. 30

d. 2. 3. 3. Sistema de seguridad……..... 31

d. 2. 3. 4. Torre……. 33

d.3. CAPÍTULO III: Circulación Atmosférica General…….……..... 35

d.3.1. El viento…….……..……...…… 36

d. 3. 2. Tipo de vientos…… 38

d. 3. 2. 1. Viento geostrófico…… 38

d. 3. 2. 2. Viento del gradiente…… 38

d. 3. 2. 3. Vientos originados por fenómenos particulares: vientos locales……. 39

d.4. CAPÍTULO IV: Características importantes a considerar……..... 43

d. 4. 1. Parámetros…… 43

d. 4. 2. La aerobomba más utilizada…… 45

d. 4. 3. Aspectos técnicos de uso de aerobombas…… 45

d. 4. 4. Compatibilidad entre bomba y el sistema general…….. 47

d. 4. 5. Almacenamiento de agua y distribución……. 48

d. 4. 6. Medida de la dirección del viento: veleta…… 50

d. 4. 6. 1. Ubicación del sistema de medida……. 51

d. 4. 7. Formas de presentación de los datos de viento: velocidad y dirección…… 52

e. MATERIALES Y MÉTODOS……..……..... 58

e.1. Métodos……...……..... 58

e. 1. 1. Requerimientos de energía y necesidades de bombeo…… 58

e. 1. 2. Energía hidráulica (Eh)…… 59

e. 1. 3. El recurso eólico……..... 60

e. 1. 4. Potencia del viento (P_v)…… 60

e. 1. 5. Cuantificación del recurso eólico……. 60

e. 1. 6. Caracterización energética del viento: Potencial eólico……..... 61

e. 1. 6. 1. Energía cinética (E_c)…… 61

e. 1. 6. 2. Potencia disponible (p_d)…….. 62

e. 1. 7. Potencia eólica aprovechable (P_a)…… 63

e.1. 7. 1. Coeficiente de potencia (C_p)……. 63

e. 1. 7. 2. Factor de capacidad (FC)…….. 67

e. 1. 7. 3. Factor de generación específica (FGE)…… 67

e. 1. 8. Ley de distribución de Weibull de la velocidad del viento…….. 68

e. 1. 8. 1. Rugosidad……. 74

e. 1. 8. 2. Volumen de agua bombeado…… 76

e. 1. 8. 3. Estimación de la demanda de agua……..... 78

e. 1. 9. Cálculo aproximado del diámetro del rotor…….. 82

e. 1. 10. Calculo de la bomba…….. 84

e. 1. 11. Determinación de números de ciclos por minuto……..... 85

e. 1. 12. Cálculo del diámetro del pistón de la bomba……. 88

e. 1. 13. Cálculos para la construcción de la aerobomba……..... 89

e. 1. 13. 1. Cálculo aproximado del diámetro del rotor……. 89

e. 1. 13. 2. Cálculo de los mecanismos de transmisión del movimiento……. 91

e. 1. 13. 3. Calculo de bombeo…… 98

e.2. Materiales...…...…..……..……..…… 101

e. 2. 1. Calculo de la torre……..…… 101

e. 2. 2. Selección y diseño…….. 106

f. RESULTADOS: tabla y gráfico de datos…...……..…..... 108

ÍNDICE DE FIGURAS

f. 1. Estructura superior, fig. 1 y fig. 2……...……. 109

f. 2. Manzana para sujeción de las aspas, fig. 3……...…….…….. 110

f. 3. Estructura principal, fig. 4……...……. 110

f. 4. Construcción del mecanismo Biela-Manivela……...…… 111

f. 4. 1. Construcción de la excéntrica de trabajo, fig. 5 y fig. 6…….…… 111

Construcción del pasador de la excéntrica fig.7 y fig. 8……..……....…… 112

Construcción de la canastilla porta rodamiento fig.9 y fig. 10……....…… 113

Conjunto de la excéntrica fig. 11 y fig.12……..... 114

fig. 13…… 115

f. 5. Construcción de bomba, fig. 14……...……...……. 115

fig. 15 y figura 16……..... 116

fig. 17 y fig. 18……. 117

Acoplado de las partes de la bomba fig. 19 y fig. 20…….…….. 118

Conjunto bomba y excéntrica fig. 21 y fig. 22…….……..……. 119

fig. 23…….. 120

f. 6. Preparación de la tubería, fig. 24...…….…… 120

fig. 25 y fig. 26……..…….. 121

fig.27 y fig. 28…….…… 122

f. 7. Excavación del pozo, fig. 29 y fig. 30……...…….. 123

fig. 31 y fig. 32……...…….. 124

fig. 33 y fig. 34……...…….. 125

fig. 35 y fig. 36……. 126

f. 8. Colocación de la tubería dentro del pozo fig. 37 y fig. 38…….……. 127

fig. 39 y fig. 40……..…….. 128

fig. 41 y fig.42…...…….. 129

fig. 43 y fig. 44……..... 130

fig. 45……..…….. 131

f. 9. Construcción de la base de hormigón, fig. 46……..…… 131

fig. 47 y fig. 48……...…….. 132

fig. 49 y fig. 50……..…… 133

fig. 51 y fig. 52……..... 134

fig. 53 y fig. 54……. 135

fig. 55…….…… 136

f. 10. Montaje de la estructura principal sobre la base de hormigón, fig.56……. 136

fig. 57……..……. 137

f. 11. Montaje del rotor sobre la estructura principal, fig. 58…….. 137

fig. 59 y fig. 60……. 138

fig. 61 y fig. 62…… 139

fig. 63 y fig. 64……. 140

INDICE DE TABLAS

Tabla1.1Velocidad media y dirección dominante mensual del viento en el AEIRNNR……..... 52

Tabla1.2.Frecuencias por dirección y grupo de velocidad (velocidad media mensual). Lugar: A.E.I.R.N.N.R. (observatorio A.E.I.R.N.N.R.). Periodo año 2010. Umbral de calmas: 0.2m⁄s……. 54

Tabla 2. 1. Valores de relaciones del parámetro k para una distribución de

Weibull ……. 74

Tabla 2.2 Rangos de rugosidad…… 75

Tabla 2.3 Estimativo de Límites de capacidad hidráulica en Bombas Comerciales……. 78

Tabla 2.4. Distribución de la demanda en LPD…… 79

Tabla 2.5. Consumos para servicios comunales…….. 80

Tabla 2.6 Consumo de agua por animal……..... 80

Tabla 2.7 Incremento de la población para varias tasas de crecimiento……. 81

Tabla 2. 8 Carreras recomendadas para diferentes rotores…… 88

Tabla 3.1. Criterios para esfuerzos de diseños……. 95

Tabla 3.2. Criterios para la especificación del factor de seguridad esfuerzos de diseños……. 97

Tabla 3.3. Fuerza requerida en la biela a diferentes radios……. 98

Tabla 3.4. Para cálculo de fuerza a diferentes alturas y diferente diámetro de pistón……. 101

Tabla 3.5. Resultados de las mediciones realizadas con el Anemómetro en tiempo real..... 108

g. DISCUSIÓN……. 141

h. CONCLUSIONES…...……..... 142

i. RECOMENDACIONES…… 143

j. BIBLIOGRAFÍA…….……..... 144

k. NOMENCLATURA……...……...…… 145

l. ANEXOS…….. 147

a.- TÍTULO

“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA AEROBOMBA TIPO MOLINO MULTIPALA AMERICANO PARA EL LABORATORIO DE ENERGÍAS RENOVABLES DEL A.E.I.R.N.N.R.”

b.- RESUMEN

El presente trabajo de investigación denominado “DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA AEROBOMBA TIPO MOLINO MULTIPALA AMERICANO PARA EL LABORATORIO DE ENERGÍAS RENOVABLES DEL A.E.I.R.N.N.R.”, luego de recopilada la información inherente al tema, se distribuyó en cuatro capítulos.

En el primer capítulo, se hace referencia a la historia del uso de la energía eólica y de las aerobombas, desde los albores de la civilización hasta la época actual en el mundo entero, sus generalidades, aplicaciones, ventajas y desventajas. En el segundo capítulo se describe la formulación y modelo matemático, para el dimensionamiento de las aerobombas a utilizarse según los requerimientos técnicos y disponibilidad del recurso eólico.

En este mismo capítulo, se realiza la evaluación del recurso eólico para determinar el potencial energético de la zona, como también se describe a los instrumentos para medir la velocidad y dirección de los vientos. En el tercer capítulo se indican los resultados obtenidos después de las actividades realizadas en los capítulos anteriores, con la presentación de datos de las prácticas con la aerobomba. El cuarto y último capítulo se destina a las conclusiones y recomendaciones que se pueden sugerir al momento de implementar un proyecto de estas características. Así como también se incluyen los anexos, fotos y planos.

b. – SUMMARY

This research paper entitled "DESIGN AND CONSTRUCTION OF A KIND WINDPUMP MULTIBLADE MILL AMERICAN LABORATORY AEIRNNR Renewable Energy", after gathering the information inherent in the subject, is divided into four chapters.
In the first chapter, referring to the history of the use of wind power and windmills, since the dawn of civilization to the present time in the world, their generalizations, applications, advantages and disadvantages. The second chapter describes the formulation and mathematical model for the dimensioning of windmills used according to the technical requirements and availability of the wind resource.
In this chapter, it makes wind resource assessment to determine the energy potential of the area, as also described instruments to measure wind speed and wind direction. In the third chapter gives the results obtained after the activities undertaken in the previous chapters, with data reporting practices with wind pump. The fourth and final chapter will present the conclusions and recommendations can be suggested when implementing a project of this nature. As well as including the annexes, photos and drawings.

c.- INTRODUCCIÓN

La energía eólica o la energía del aire en movimiento en forma de viento, ha sido utilizada por cientos de años tanto para aplicaciones mecánicas como para la navegación en barcos. Históricamente se le atribuye, al uso de molinos de viento y molinos de agua el desarrollo agrícola europeo desde el siglo XII hasta finales del siglo XIX.
Primordialmente los equipos eólicos eran utilizados en la molienda de granos y en movimiento y bombeo de agua.

Recientes desarrollos tecnológicos han permitido un uso amplio de la energía eólica en sistemas de generación de electricidad de gran tamaño sobre todo en países desarrollados, por el contrario en países en vías de desarrollo se ha dado uso amplio de esta energía para fines agrícolas, esencialmente, en labores de bombeo de agua.

En particular los molinos de viento mecánicos para bombeo de agua son utilizados para una variedad de aplicaciones como el suministro de agua limpia para fines domésticos, para suministro de agua para ganado, labores de irrigación, drenaje, movimiento de agua en granjas piscícolas, entre otras.

Las aerobombas extraen la energía del viento a través de un rotor y convierte su movimiento rotacional en acción mecánica con algún mecanismo que permite mover una bomba y así producir la acción de bombeo. Es por esto que existen diversas alternativas de disposición de elementos mecánicos para bombear agua con la energía de los vientos, como se verá más adelante.

Esencialmente, una instalación de aerobombeo consiste de: rotor, torre, un sistema de trasmisión de movimiento, la bomba misma, un sistema de tuberías para el movimiento de agua y cuando se requiera un tanque de almacenamiento.

Dependiendo de la aplicación y de la disponibilidad tecnológica, diferentes tipos de sistemas de aerobombeo se han desarrollado. La elección del tipo de bombas es bastante amplia y se han realizado diseños con bombas de pistón, bombas centrífugas, de tornillo, de ascenso de aire, de mecate, etc.; indudablemente que cualquier combinación depende de la fuente de agua disponible.

El tamaño de las aerobombas de acción mecánica directa puede estar entre 1 hasta 8 metros de diámetro del rotor, y dependiendo de la altura de bombeo (cabeza hidráulica) y de las velocidades promedio del viento, la potencia hidráulica promedio puede estar entre unos cuantos vatios hasta cerca de 1kW.

Para demandas hidráulicas mayores se pueden utilizar sistemas eólicos-eléctricos de bombeo, los cuales permiten generar electricidad y a través de una trasmisión eléctrica se maneja un motor eléctrico con su respectiva bomba. En el mercado internacional se encuentran disponibles estos sistemas para aplicaciones típicas con demandas de hasta 10 kW. Sin embargo, sistemas de mayor potencia pueden ser también utilizados.

En la actualidad, existen más de un millón de instalaciones de aerobombas en operación alrededor del mundo, primordialmente en países como la India, China, Brasil, Nicaragua, Colombia, Botswana, Zimbabwe, Sudáfrica, Australia, entre otros; en los cuales se han realizado desarrollos tecnológicos locales interesantes y el uso de esta alternativa energética ha sido amplio en los años más recientes.

Desde finales de los 70, se ha tenido un desarrollo tecnológico en la industria de aerobombeo interesante, sobre todo con diseños de aerobombas de tipo liviano de muy pocas palas, para aplicaciones de bombeo de medianas y bajas alturas y equipos para bajas velocidades de viento.

Para la implementación de la aerobomba tipo molino Multipala americano, se han propuesto objetivos específicos cuya finalidad es la consecución de del cumplimiento de cada uno de ellos. Estos objetivos son:

Un estudio meteorológico, construir un sistema de bombeo utilizando la aerobomba multipala, realizar las pruebas experimentales y finalmente socializar y difundir estos trabajos dentro y fuera de la Universidad Nacional de Loja.

d.- REVISIÓN DE LITERATURA

CAPÍTULO I

d. 1. GENERALIDADES DE LA ENERGÍA EÓLICA

d. 1. 1. RESEÑA HISTÓRICA

En el presente trabajo se hace una breve reseña histórica del aprovechamiento de la energía eólica, desde los albores de nuestra civilización hasta la época actual. El documento describe así mismo el proceso evolutivo que han sufrido estos sistemas conversores de energía eólica (SCEE) a través del tiempo, tanto en el aspecto propiamente de concepto, como en el relacionado con la tecnología inherente a su construcción y el uso final de la energía.

Desde el molino Persa para la molienda de granos (600 d.C.), (*Ver figura 1.1*) hasta los actuales y modernos aerogeneradores para la generación de electricidad en gran escala. Se describe el concepto físico y la manera de calcular la energía contenida en el viento, abordando el tema de la medición de éste con propósitos de cuantificación del potencial eoloenergético en un sitio determinado. Para ello se hacen algunas recomendaciones sobre las características y configuración de las estaciones anemométricas. Y la manera de calcular y utilizar la función de densidad de probabilidad (FDP) de Weibull para la estimación de la producción de energía útil en un sitio. Asimismo, el documento enumera los diferentes usos finales que tiene la energía eólica, así como su ámbito de aplicación. No obstante que los dos principales ámbitos de aplicación de los SCEE son el bombeo de agua y la producción de electricidad, a pequeña y mediana escala, existen diferentes conceptos constructivos de los SCEE, tecnologías de construcción y configuraciones de los sistemas en su conjunto que los hacen más idóneos para cubrir cada tipo de aplicación en particular.

Fig. 1.1 Molino Persa

Fuente: http://libros.redsauce.net/

Uno de los principales usos del molino de viento que se ha conservado hasta nuestros tiempos es de la molienda de granos, se cree que el primero de estos sistemas surgió en Persia (600 d.C.) y constaba de una torre que permitía el paso del viento. El movimiento de las aspas se transmitía a unas muelas cuya posición era adaptada a las diversas necesidades de molienda mediante una cuña.

El uso de la energía del viento se remonta a los albores de nuestra civilización. Los actuales sistemas que aprovechan la energía eólica son el resultado de un desarrollo evolutivo. La referencia más antigua sobre el uso del viento para la navegación a vela procede del imperio egipcio y data del quinto milenio a.C.; (*Ver figura 1.2*), de manera similar a los desplazamientos por el río Nilo, los sumerios se trasladaban por los ríos Tigris y Éufrates usando la fuerza del viento.

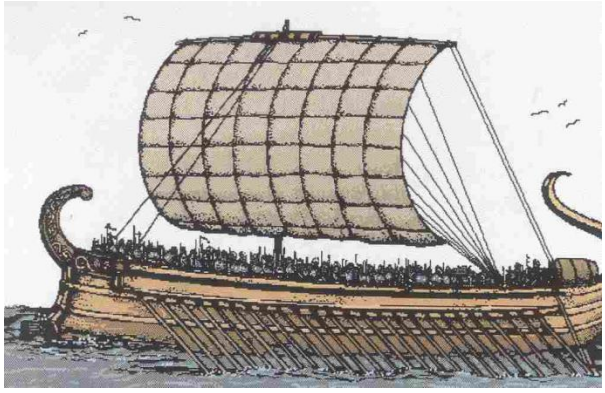


Fig. 1.2 Antigua navegacion por el Mediterráneo
Fuente: http://libros.redsauce.net/

En el Mediterráneo los molinos de viento eran de uso común poco antes del año 1200 d.C. así como también lo eran en la península Ibérica. El molino tomó características muy específicas de la región del Mediterráneo. Los palos con las velas se insertaban en el rotor, adaptándose a la velocidad del viento soltando o recogiendo la vela, cosa que ya conocían muy bien los navegantes.

Para lograr una mejor estructura del rotor las velas se unían al rotor mediante tirantes, el rotor era fijo y por ello no se podía orientar conforme la dirección del viento, así que se limitaba solo a aprovechar los vientos perpendiculares a las aspas, como respuesta a esta limitación se montó el rotor sobre una torre de mampostería en la que en la parte

superior se encontraba una cúpula orientable en la cual residía un mecanismo de transmisión.

A partir de los siglos XII a XIII empieza a generalizarse el uso de los molinos de viento para el bombeo de agua y la molienda de granos, los más antiguos aparecieron en Turquía, Irán y Afganistán.

A principios del siglo XII en Europa se empleó una gran cantidad de molinos, sobre todo en Bélgica y en los Países Bajos. En Holanda los molinos tenían 4 aspas de lona, mientras que los de Baleares y Portugal 6 aspas, y los de Grecia 12 aspas. Los molinos con gran número de palas tenían velocidades de rotación relativamente bajas y un funcionamiento útil a partir de velocidades del viento del orden de los 2 m/s.

El desarrollo de los molinos de viento se ve interrumpido con la revolución industrial y la utilización del vapor y los combustibles fósiles como fuentes de energía. Sin embargo, en la segunda mitad del siglo XIX tiene lugar uno de los más importantes avances en la tecnología del aprovechamiento del viento, con la aparición del popular "Molino tipo americano", utilizado para bombeo de agua prácticamente en todo el mundo, y cuyas características habrían de sentar las bases para el diseño de los modernos sistemas eólicos.

Los molinos de viento existían ya en la más remota antigüedad. Persia, Irak, Egipto y China disponían de máquinas eólicas muchos siglos antes de J.C.; Hammurab I. rey de Babilonia, 17 siglos antes de J.C. utilizó molinos accionados por el viento para regar las llanuras de Mesopotamia y para la molienda del granos. Se trataba de primitivas máquinas eólicas de rotor vertical con varias palas de madera o caña, cuyo movimiento de rotación era comunicado directamente por el eje a las muelas del molino. En China hay referencias de la existencia de molinos de rotor vertical y palas a base de telas colocadas sobre un armazón de madera, que eran utilizados para el bombeo de agua, máquinas conocidas como *panémonas*, precursoras de los molinos persas. El egipcio Hero de Alejandría representa en un estudio un molino de eje vertical de cuatro palas.

Los molinos de viento fueron utilizados en Europa en la Edad Media, comenzando a extenderse por Grecia, Italia y Francia. Si el origen de las máquinas eólicas presenta notables incertidumbres, no menos lo hace su expansión por el Mediterráneo y por toda

Europa. Según algunos autores, se debe a los cruzados la introducción de la tecnología eólica en Occidente, si bien otros opinan que Europa desarrolla su propia tecnología, claramente distinta de la oriental, ya que en Europa se imponen fundamentalmente los molinos de eje horizontal, mientras que los molinos orientales eran de eje vertical.

En el siglo XVI Holanda perfecciona el diseño de los molinos y los utiliza para el drenaje; entre los años 1609 y 1612, Beemster Pólder fue drenado con la ayuda de estas máquinas; sin embargo, no sólo utilizaron los molinos para drenar el agua, sino también para extraer aceites de semillas, moler granos, etc. precisamente el nombre de molinos proviene de este tipo de aplicaciones.

En 1724 Leopold Jacob proyecta un molino de ocho palas que mueve una bomba de pistón; en 1883 aparece el pequeño ***Multipala americano*** diseñado por Stewart Perry. Este molino, de unos 3 metros de diámetro utilizado para bombeo, ha sido el más vendido de la historia, llegándose a fabricar más de seis millones de unidades, de las que existen varios miles en funcionamiento.

d. 1. 1. 1. HISTORIA DEL USO DE LAS AEROBOMBAS.

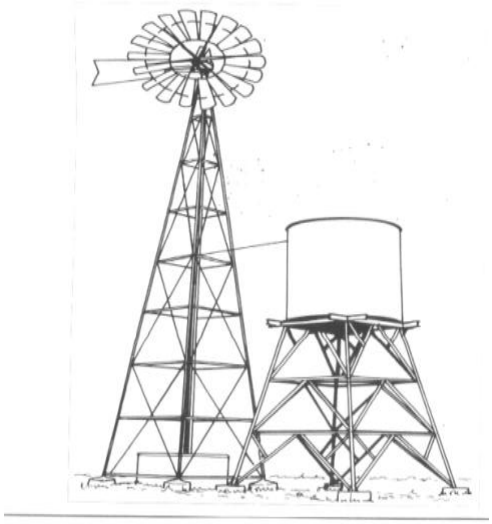


Fig. 1.3 Molino de viento Multipala tradicional
Fuente: http//libros.redsauce.net/

Los sistemas mecánicos de aerobombeo como se conocen en la actualidad (*Ver figura 1.3*) fueron desarrollados fundamentalmente hacia mediados del siglo XIX, particularmente en Estados Unidos. En la actualidad, estos equipos son conocidos

comúnmente como el "*Molino de Viento Multipala Americano*". Su uso fue masivo en la conquista del Oeste americano hacia finales del siglo XIX, lo cual permitió el desarrollo de compañías comerciales que ofrecían equipos de aerobombeo mecánico de diversos tamaños para las múltiples soluciones de bombeo de agua.

El primer fabricante exitoso de aerobombas autogobernadas en Estados Unidos fue la "*U.S. Wind Engine & Pump Company*" establecida en 1857 en Batavia, Illinois.

Las maquinas producidas fueron conocidas como el Halladay Standard, por su inventor, Daniel Halladay, quien las patentó en 1854. Los primeros desarrollos consistían de rotores en madera de cuatro a seis palas pivotadas, los cuales fueron reemplazados rápidamente por los rotores con muchas palas lo cual le dieron el nombre mundialmente conocido como el *Molino Multipala Americano*. Poco después, muchos otros fabricantes empiezan a aparecer, realizando modificaciones técnicas a los originales Halladay Standard.

En 1890 varias compañías americanas buscan mercados extranjeros y estos equipos empiezan a ser exportados por todo el mundo, de manera similar en otros países se desarrollaron industrias similares. Hacia principios del siglo XX, las aerobombas fueron construidas completamente en acero haciendo de estos equipos unas maquinas robustas y muy confiables.

La época de mayor prosperidad de los molinos multipala americanos terminó hacia 1930 donde cerca de 6, 000,000 de ellos se encontraban en operación por todo el mundo. Con los programas de electrificación rural americano de los años 30, los motores eléctricos reemplazaron los rotores eólicos como fuente de movimiento y muchos fabricantes empezaron a desaparecer. Hoy, solo algunos fabricantes, en Estados Unidos, sobreviven y la mayoría de su producción es exportada. Fabricantes de equipos similares todavía existen en países como Australia, Sudáfrica y Argentina, entre otros. En el Ecuador se dispone de algunas experiencias, como en Riobamba para la selección se considero: Molinos de ejes verticales, híbridos y molinos de eje horizontal; optándose por este ultimo por destacarse en operaciones de bombeo de agua (molino de viento multiaspas). Estos modelos son de baja rotación, proporcionan mayor potencia; además han demostrado mejor rendimiento y eficiencia. Los equipos fueron localizados en los

predios de la ESPOCH, por tener las condiciones climatológicas adecuadas; para el efecto se registraron los datos en periodos de 15 días y posteriormente comprobados con los obtenidos en estaciones meteorológicas de la zona.

En el recinto Cerezal de la Península de Santa Elena, Provincia del Guayas, la Escuela Politécnica Nacional diseño y construyo una bomba de succión eólica, con el propósito de contribuir con el desarrollo de la zona, haciendo uso de los materiales de la zona, y de la energía eólica. Señala que la construcción de la torre fue construida con pingos de madera, la misma que soporto tres meses de invierno riguroso, evento que permitió determinar el buen estado de la madera.

d. 2. CAPITULO II

DESCRIPCIÓN TÉCNICA DE LA TECNOLOGÍA.

La tecnología de aerobombeo ha sido materia de estudio y desarrollo de algunas soluciones interesantes, particularmente desde 1980 donde algunas soluciones son realidades comerciales y disponibles en el mercado. Sobra mencionar que equipos tradicionales de aerobombeo directo como los molinos multipala americanos, han tenido poco desarrollo en años recientes, ya que estos equipos han demostrado su viabilidad y robustez desde principios del siglo XX.

El tipo de solución técnica al problema de aerobombeo depende de la disponibilidad del recurso hidráulico, ya que su localización determina la estrategia de bombeo. En este sentido se distinguen dos situaciones prácticas, a saber: aerobombeo directo y aerobombeo remoto.

La primera situación de bombeo ocurre cuando la fuente de agua es un pozo o aljibe y la solución de aerobombeo es la aplicación de bombeo directo en el cual el molino se coloca directamente sobre la fuente de agua. Este tipo de instalación es la más común de las aplicaciones de aerobombeo. (*Ver figura 1.4.1*). Una variante de esta aplicación puede ser cuando la bomba esta extrayendo agua de un río y la bomba hidráulica puede ser localizada en la base de la torre y la acción de bombeo se realiza lateralmente. La (*Ver figura.1.5*) resume estos tipos de instalaciones.

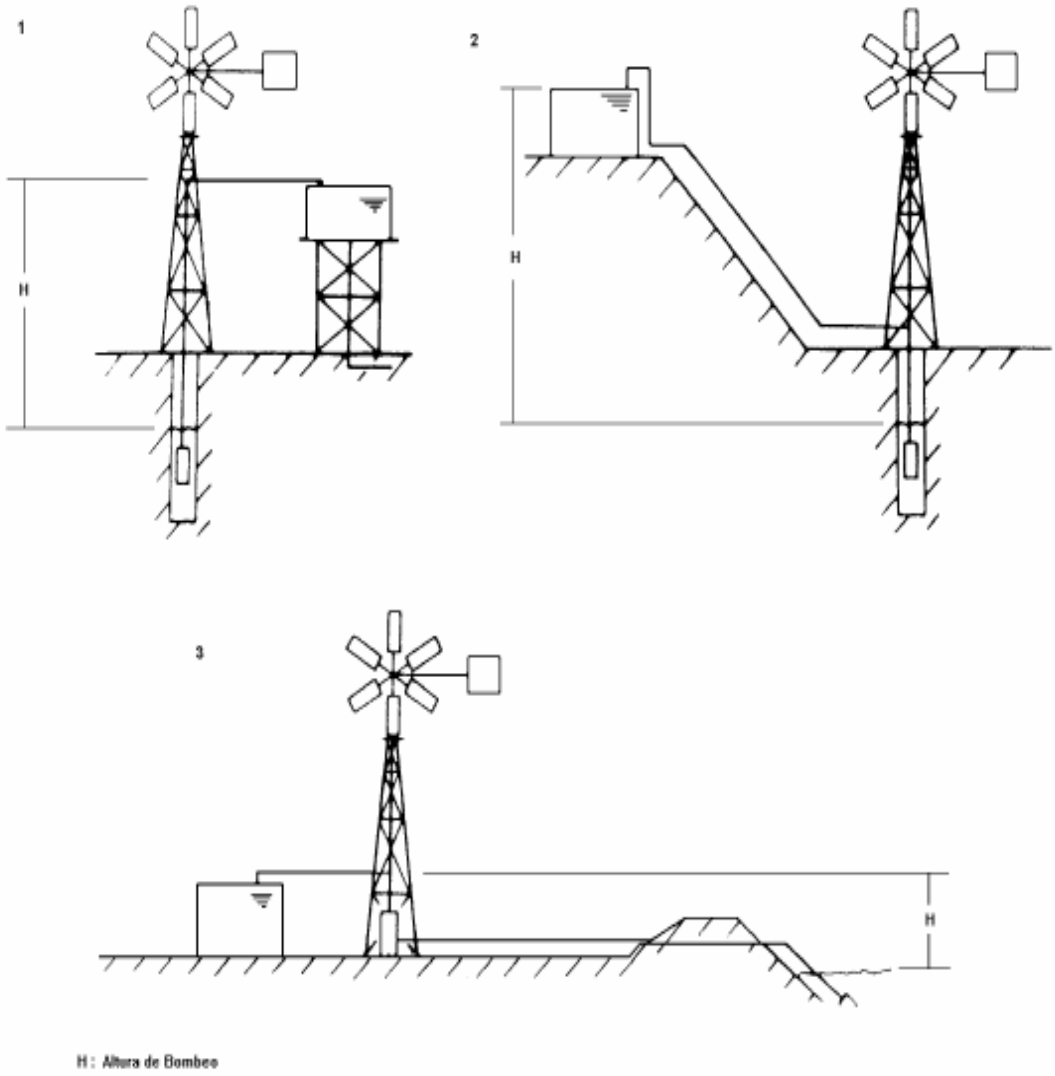


Figura 1.4 Configuración típica de aerobombeo directo.
Fuente: www.windpower.org

1) Molino colocado sobre la fuente de agua.
2) Bombeo y conducción a mayor altura.
3) Bombeo lateral desde un rio.

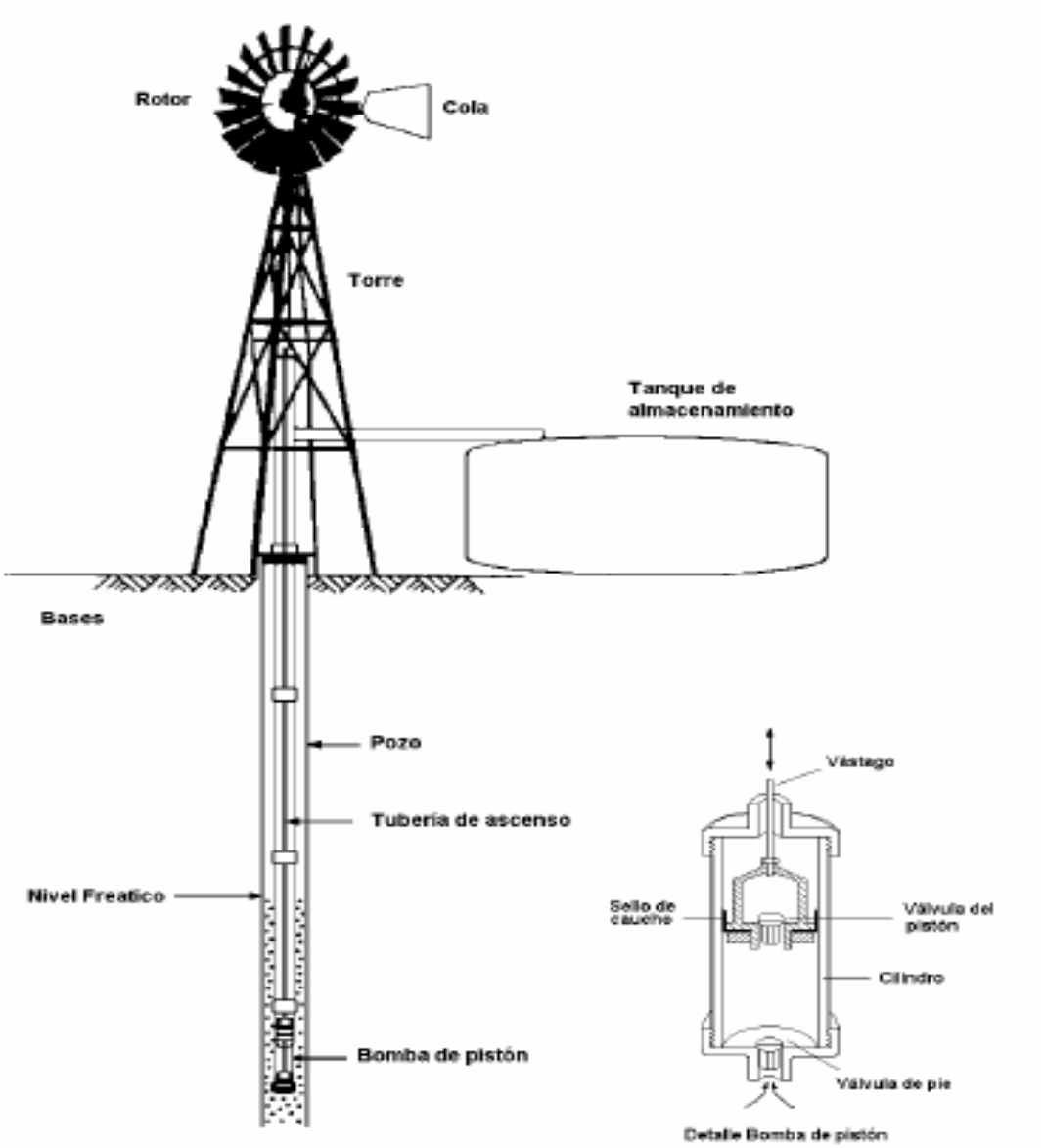


Fig. 1.5 Instalación típica de aerobombeo directo
Fuente: www.windpower.org

La segunda opción, la de aerobombeo remoto, consiste en el tipo de solución, en la cual la fuente de agua se encuentra apartada de la posible localización de la torre de la aerobomba. Esta situación es típica de regiones montañosas en las cuales el recurso eólico tiene mayor intensidad en la cima de las montañas y la fuente de agua es un río, un pozo o aljibe que se encuentra a gran distancia, tanto lateral como vertical.

Dependiendo del tipo de instalación, sea directa o de bombeo remoto, se han desarrollado esquemas de bombeo en el cual se incluyen transmisiones de movimiento

de diversas formas. Por lo tanto cada solución determina el tipo de bomba hidráulica que se puede utilizar.

d. 2. 1. TIPO DE BOMBAS HIDRÁULICAS

Dentro de la hidro-maquinaria, las bombas se emplean para aumentar el nivel energético de fluidos (gases, líquidos, ó mezclas de los anteriores entre sí ó con sólidos), convirtiendo energía mecánica externa en energía hidráulica. Su uso no se limita exclusivamente a cambiar un líquido de altura, sino a llevar fluidos a través de largas distancias o de condiciones de baja a alta presión.

Las bombas hidráulicas se dividen en dos grandes grupos: Bombas roto dinámicas y Bombas de desplazamiento positivo.

- **Las bombas roto-dinámicas**

Radican en el aumento de energía en el fluido de trabajo, en principios dinámicos a través de la acción de la fuerza centrífuga ejercida por un rotor. Entre las maquinas más comunes están las bombas centrífugas, especiales para aplicaciones de alta cabeza de bombeo, y por supuesto, bajo caudal bombeado. Las bombas roto-dinámicas de flujo mixto son adecuadas para caudal y cabezas de bombeo intermedio y las bombas de flujo axial, especialmente útiles para condiciones de bombeo de baja cabeza y grandes caudales del fluido de trabajo.

- **Las bombas de desplazamiento positivo**

Cuentan con una o más cámaras que se llenan o vacían cíclicamente, este tipo de bomba desplaza "paquetes" de flujo a intervalos regulares desde la succión hasta la descarga. Hay dos grupos grandes de maquinaria de desplazamiento positivo: las bombas reciprocantes de pistón, y las rotatorias, que utilizan piñones, engranajes, tornillos, husillos y paletas deslizantes. No importa si son reciprocantes o rotativas, las bombas de desplazamiento positivo tienen, en contraste con las bombas roto-dinámicas la siguiente característica: en teoría, un sello permanente que no permite por instante alguno la comunicación simultanea entre las tuberías de succión y descarga. El sellamiento por lo

general es logrado por medio de válvulas internas ó por ajustes con huelgos restringidos entre las partes internas de la bomba.

d. 2. 2. TIPO DE AEROBOMBAS

El acople de rotores eólicos a diversos tipos de bombas se realiza a través de algún tipo de transmisión, sea esta de acción mecánica rotatoria, de acción mecánica reciprocante, acción hidráulica reciprocante, ó aun transmisión con cables eléctricos. (*Pinilla, 1985*).

Las aerobombas comerciales se han centrado en solo cinco tipos de soluciones confiables, sin embargo algunas de ellas requieren mayor desarrollo e investigación, al igual que otro tipo de esquemas no mencionados en este documento, ya que no son soluciones viables económicamente en la actualidad.
Las cinco soluciones de aerobombas son:

- **Aerobombas acopladas a bombas de pistón**

El rotor eólico esta acoplado mecánicamente (o con acople directo o con un reductor de velocidad) a una bomba de pistón a través de un vástago que transmite el movimiento oscilante desde la parte superior de la torre hasta la bomba sumergida generalmente dentro del pozo o fuente de agua. Esta instalación, es por lejos, la más común en las soluciones de aerobombeo al nivel mundial.

- **Aerobombas con transmisión rotatoria**

El rotor eólico transmite su energía rotacional a través de una transmisión mecánica rotatoria (*caja de cambios*) para acoplarse a una bomba rotodinámica (*una bomba centrífuga ó axial*) o de desplazamiento rotatoria (*una bomba de tornillo ó un tornillo de Arquímedes*). Este esquema de aerobombeo generalmente es usado para aplicaciones de baja cabeza y grandes volúmenes de agua

- **Aerobombas con transmisión neumática**

Algunas compañías comerciales fabrican equipos eólicos provistos de compresores reciprocantes. El aire comprimido puede ser utilizado para operar bombas de Ascenso de aire (*air lift pumps*) ó acopladas a cilindros hidráulicos para el accionamiento de

bombas reciprocantes convencionales. Esta solución neumática permite su uso para aplicaciones de aerobombeo remoto.

- **Aerobombeo eléctrico**

En la generación de energía eléctrica, la cual puede ser transmitida a través de cables para la operación de bombas sumergibles eléctricas comerciales (*sin requerir acoplamiento a la red eléctrica*). Este esquema, al igual que la transmisión neumática, es útil en aplicaciones de aerobombeo remoto.

- **Aerobombeo con transmisión hidráulica**

Este tipo de solución se encuentra en una fase experimental, y es muy similar a la transmisión neumática con la diferencia que el fluido de trabajo es agua. Esta solución ha sido aplicada en condiciones de bombeo remoto.

Generalmente los tipos de esquemas de aerobombeo, brevemente descritos, son operados con rotores eólicos de eje horizontal. Algunos desarrollos de esquemas de aerobombeo en los años setenta utilizaron rotores eólicos de eje vertical (*esto es: Rotor Savonius*). Estos intentos no han guiado a soluciones de bombeo prácticas debido a las bajas eficiencias de conversión de energía y aerobombas excesivamente pesadas, con costos de bombeo muy altos.

Las componentes principales de un sistema de aerobombeo son: (*Ver figura.1.6*), el rotor eólico, el cual extrae la energía cinética del viento y la convierte en energía rotacional. La energía rotacional mecánica en el eje del rotor eólico es convertida en un movimiento oscilatorio ascendente-descendente a través de la transmisión. Esta puede tener una caja de reducción de velocidad y un sistema biela-manivela para excitar el vástago que mueve la bomba de pistón o simplemente con acción directa sin reducción de velocidad.

Todo este conjunto esta soportado por una torre y generalmente está provisto con un sistema de seguridad para evitar la operación de la aerobomba en condiciones de extrema velocidad de viento, para su protección.

d. 2. 3. COMPONENTES DE UNA AEROBOMBA TIPO MULTIPALA AMERICANO

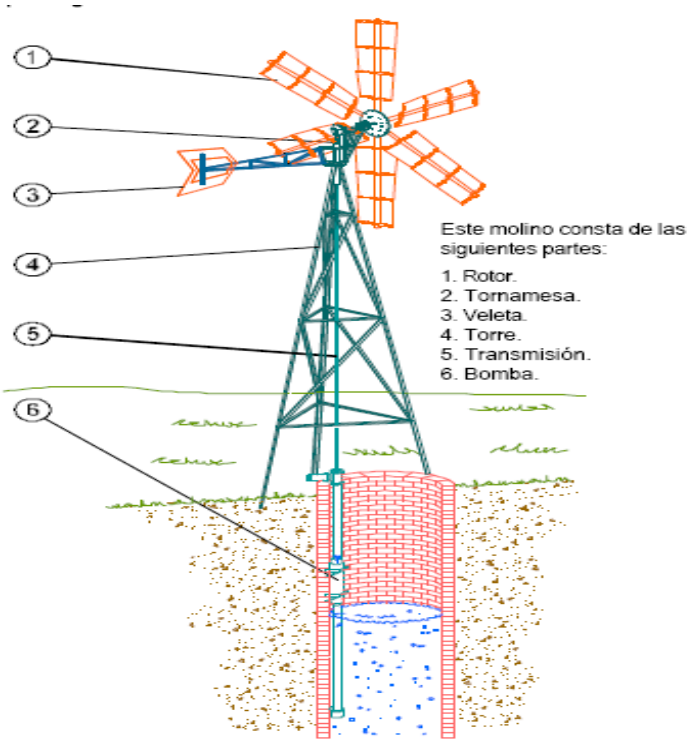


fig. 1.6 Componentes de un sistema de aerobombeo
Fuente: www.ewea.org

Existen componentes adicionales y las cuales juegan un papel importante en la acción de bombeo como es el sistema de tuberías para ascenso y distribución de agua y dependiendo de la instalación se requiere de un tanque de almacenamiento de agua.

En el caso de un sistema Eolo-eléctrico, la energía rotacional del eje del rotor eólico alimenta un generador eléctrico, generalmente un generador de imanes permanentes en sistemas pequeños, el cual produce energía eléctrica.

Componentes adicionales como controles electrónicos de carga, baterías, cables son requeridos en estos sistemas.

En función de la estrategia de emplazamiento de la aerobomba, existen elementos adicionales como los sistemas de transmisión hidráulica, neumática, etc., los cuales imprimen cierta complejidad a la solución de aerobombeo.

Como se mencionó anteriormente, algunas estrategias de aerobombeo no son totalmente confiables, aunque algunas de estas sean comerciales. Debe tenerse en cuenta que los sistemas convencionales de aerobombeo tienen la ventaja de trabajar desatendidos por largos periodos de tiempo y algunos de estos sistemas como el aerobombeo remoto neumático ó hidráulico requieren de permanente supervisión, para un satisfactorio funcionamiento.

d. 2. 3. 1. EL ROTOR

Fig.1.7 Rotor Multipala americano de alta solidez
Fuente: www. windpower.org

Los rotores eólicos utilizados en aerobombas, generalmente deben estar provistos de muchas palas debido a que son equipos de baja velocidad y requieren de fuerzas altas para realizar la función de bombeo. Es por esto que el rotor Multipala americano puede llegar a tener 12, 18, 24 ó aún 36 palas (*Ver figura 1.7*). Estos rotores se conocen técnicamente como rotor eólico de alta solidez, baja velocidad y alto momento par en el eje. Rotor Multipala americano de alta solidez.

Desarrollos recientes, como en el rotor del molino de viento Gaviotas, es un rotor de solidez intermedia, más rápido y su diseño es considerado de bajo peso.

La solidez de un rotor se define como la relación entre el área ocupada por las palas del rotor y el área circular del rotor barrida en un giro. El rotor Multipala americano puede alcanzar una solidez cercana al 85% contra una solidez del rotor Gaviotas del 30%.

En el otro extremo de diseño de rotores eólicos, por ejemplo, para generación eléctrica en la cual se requiere de mayor velocidad se utilizan rotores con solamente 3 palas aerodinámicas. La solidez de estos rotores de alta velocidad puede ser tan baja como de 7 a 8%.

Otro aspecto importante que define la operación de un rotor eólico es la relación que existe entre la velocidad periférica de la punta de las palas y la velocidad axial de viento que incide sobre el rotor.

Esta relación se conoce como la velocidad específica **(λ).** Así pues, un rotor con alta solidez tiene una relación de velocidad específica con un valor entre 1 y 2. Rotores con menor número de aspas (*5 ó 6*) tienen una relación de velocidad específica entre 2 y 4. Rotores eólicos para generación de electricidad son diseñados con relaciones de velocidad específica entre 6 y 10.

Un correcto acople entre sistema de transmisión de movimiento para pulsar una bomba de pistón típica exige que esta no exceda los 40 ciclos por minuto en todo el rango de operación. Evidencia teórica y experimental demuestran que mayores velocidades de operación de bombas de pistón resultan en un incremento en los daños producidos en todos los componentes de las aerobombas, reduciendo sustancialmente la vida útil del sistema.

d. 2. 3. 2. TRANSMISIÓN

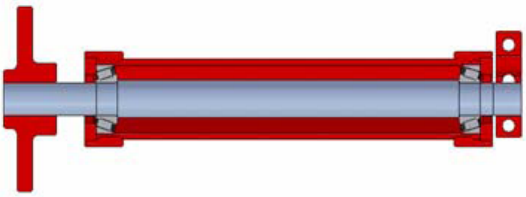


Fig. 1.8 Transmisión
Fuente: www. windpower.org

La transmisión en una aerobomba es aquella que toma el movimiento giratorio del eje del rotor y lo convierte en un movimiento lineal de ascenso y descenso para pulsar la bomba de pistón.

Aquellas aerobombas que requieren reductor de velocidad generalmente utilizan doble engranaje para aliviar las cargas disparejas en el mecanismo de biela manivela (*Ver Figura 1.8*). La reducción de velocidad típica es de 3 a 1 y el conjunto viene sumergido en un baño de aceite para la adecuada lubricación. (*Ver figura 1.9) Caja reductora de velocidad en aerobomba*

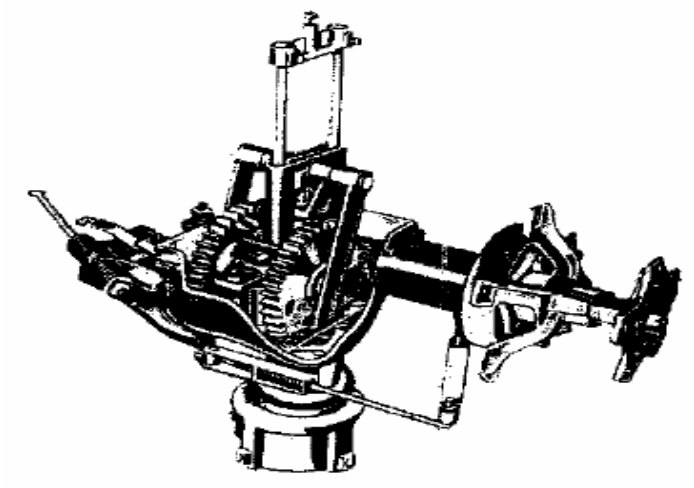


Fig. 1.9 Caja reductora de aerobomba
Fuente: www. windpower.org

El movimiento oscilante producido por el sistema de bielas y manivelas es transmitido a la bomba por un vástago guiado en varios puntos, ya que puede alcanzar longitudes considerables sobretodo en bombeo desde un pozo profundo.

Los vástagos cuentan con un eslabón giratorio para desacoplar cualquier giro vertical causado por cambios en la dirección del viento, para prevenir que este giro sea transmitido a la bomba. Adicionalmente, el vástago cuenta con un fusible mecánico para proteger la bomba de eventuales daños que pueden ocurrir.

d. 2. 3. 3. SISTEMA DE SEGURIDAD

Los rotores eólicos deben tener la capacidad de girar para encarar el viento en caso de que éste cambio su dirección y al mismo tiempo protegerse de intensidades de viento

muy altas que pueden causar sobrecargas excesivas a la torre, a la transmisión y al rotor. Diversos diseños se han probado e implementado para alcanzar la acción de control y seguridad necesarios para la protección del equipo de eventuales rachas de alta velocidad de viento y tormentas.

Generalmente los sistemas de seguridad se combinan con los sistemas de orientación, (*Ver figura.1.10*) del tipo mecánico, y en los cuales se garantiza que a bajas velocidades de viento el rotor enfrente plenamente el viento y con velocidades de viento mayores el rotor se desoriente para limitar la velocidad de excitación de la bomba y reducir, así, las fuerzas y cargas inducidas en todo el sistema.

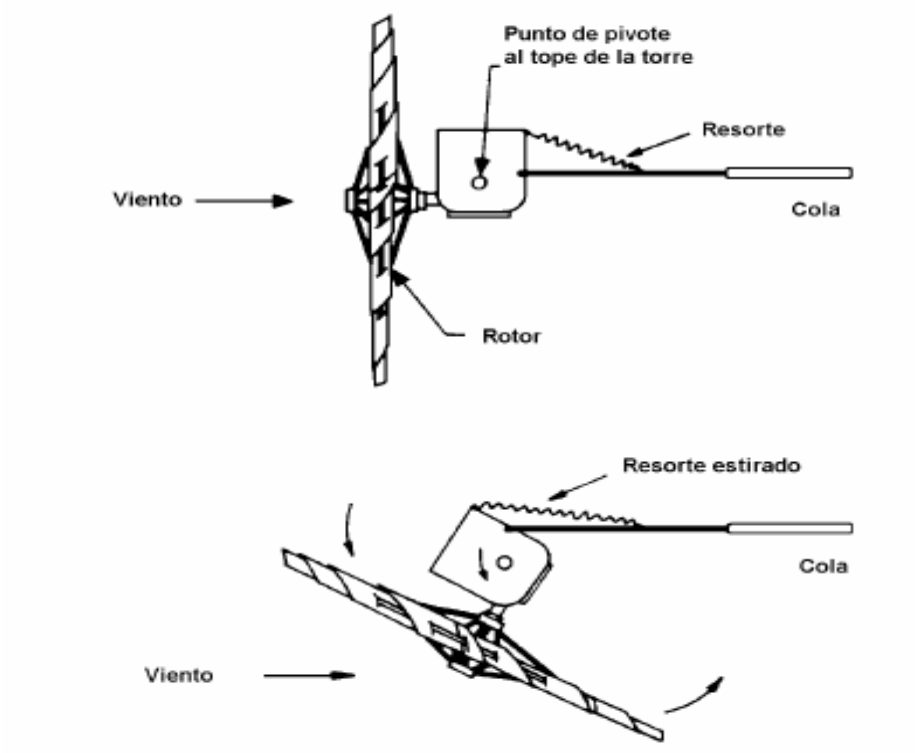


Fig. 1.10 sistemas de seguridad
Fuente: www. windpower.org

Los sistemas mecánicos de seguridad y orientación, fundamentalmente, se basan en la colocación excéntrica entre el eje del rotor y el eje vertical de la torre. Esta excentricidad es pequeña y permite la presencia de una fuerza de empuje horizontal ejercida por el rotor tendiendo a auto-rotar alrededor del eje vertical de la torre. El balanceo o desbalanceo de esta fuerza de empuje horizontal (*representado en un*

momento par vertical) se logra a través de fuerzas aerodinámicas ejercidas sobre la cola de la aerobomba o sobre placas laterales que regulan este movimiento vertical.

Generalmente, el desequilibrio de estas fuerzas, cuando se saca el rotor de la dirección del viento incidente, es compensado por contrapesos o resortes que recuperan la colocación del rotor eólico cuando la velocidad del viento disminuye.

Los sistemas de seguridad y orientación comienzan a operar a velocidades de viento entre 10 y 12 m/s (*35 a 40 km/h*) y detienen complemente el rotor y lo sacan de operación a velocidades cercana a los 15 m/s (*50 km/h*). Adicionalmente, al sistema mecánico de seguridad y orientación, algunas aerobombas también cuentan con frenos mecánicos operados manualmente para frenar totalmente el sistema para permitir actividades de mantenimiento o detenerlo cuando no se requiere abastecimiento de agua.

Vale la pena mencionar que la inadecuada operación de un sistema de seguridad y orientación conduce a situaciones catastróficas poniendo en riesgo la alta inversión que implica una instalación de aerobombeo.
La Figura 1.10, ilustra el mecanismo de seguridad simplificado de las aerobombas convencionales Multipala americano.

d. 2. 3. 4. TORRE

Generalmente las aerobombas utilizan torres conocidas como auto portantes, las cuales no requieren de soportes externos, teniendo sus bases ancladas en bloques de concreto. Las aerobombas requieren de torres robustas debido al tipo e intensidad de las fuerzas que deben aguantar para una adecuada operación.

Dependiendo del tamaño de la aerobomba, las fuerzas transmitidas por la acción de bombeo pueden exceder una o varias toneladas de fuerza. Esto sin tener en cuenta la carga adicional que impone la fuerza de empuje causada por el viento sobre el rotor y los momentos giroscópicos por cambios en la dirección del viento incidente sobre el rotor eólico.

La Figura 1.11, ilustra una torre típica de una aerobomba. Note en la figura la presencia de una placa lateral como elemento de seguridad y orientación del equipo.

Fig. 1.11 Torre de aerobomba
Fuente: www.enercon.de

Las torres de aerobombas se construyen de ángulo estructural de acero Galvanizado con uniones atornilladas, tensores estructurales y la base tiene cuatro puntos de apoyo. Esta configuración facilita el transporte y el ensamblaje *in-situ*.

Las torres tienen, además, una escalera de ascenso para facilitar labores de mantenimiento e inspección de los elementos mecánicos en el rotor, la caja de transmisión y el sistema de seguridad y orientación.

No existe un tamaño estándar de altura de torre, aun cuando una altura común es 10 metros. Dependiendo del lugar elegido para la instalación de la aerobomba puede requerir una torre de unos cuantos metros (por ejemplo, 6 metros) hasta los 20 metros de altura, para superar obstáculos como pequeños árboles, pequeños galpones, etc.

d. 3. CAPÍTULO III

CIRCULACIÓN ATMOSFÉRICA GENERAL

La atmosfera es una capa muy delgada en comparación con las dimensiones de la tierra. El movimiento del aire se realiza fundamentalmente en la troposfera y sobre el mismo influyen los siguientes factores:

- La radiación solar, mayor en la zona ecuatorial que en los polos.
- La rotación de la tierra, que produce el efecto Coriolis, desviando la dirección de los vientos hacia la derecha en el hemisferio norte y hacia la izquierda en el hemisferio sur.

La acción sobre las masas de aire de las diferencias de presión atmosférica, distintos tipos de superficies terrestres (*continentes y mares*) y la orografía

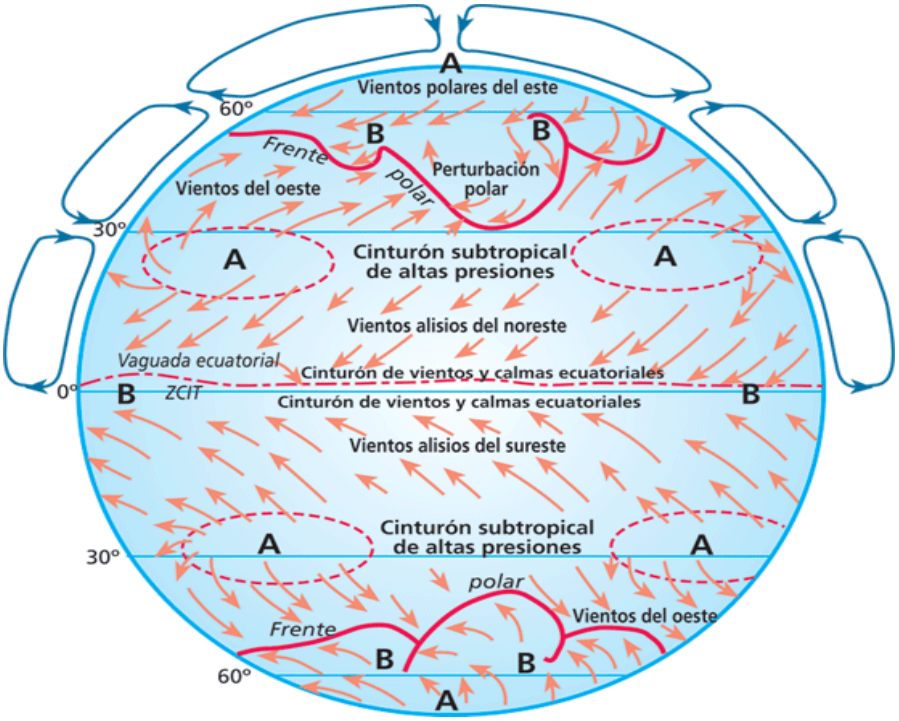


Fig. 1.12 Esquema de circulación general atmosférica
Fuente: es.wikipedia.org.

El aire tiende a ascender en las regiones ecuatoriales debido a su calentamiento por la radiación solar, en una franja denominada *zona de convergencia intertropical*.

En el ecuador, a nivel de la superficie llega aire más fresco procedente de los trópicos (*vientos alisos*). En las latitudes medias, los vientos son básicamente del oeste pero con tendencia hacia las zonas polares.

Para un valor de latitud próximo a 50° se produce una separación entre el aire tropical cálido y el aire polar frio, formándose un *frente polar*, que presenta muchas ondulaciones dando lugar a depresiones frontales.

En zonas polares, el frio tiende a desplazarse a latitudes más bajas.

En la fig. 1.12, se muestra el esquema de circulación general atmosférica. En el interior de la circunferencia se representa esquemáticamente los campos de presión y de viento, y en la parte izquierda se muestra la circulación en un plano meridiano.

En cada hemisferio se pueden distinguir tres grandes núcleos o regiones: tropical, templado y polar.

Los núcleos templados están separados de los tropicales por zonas de altas presiones subtropicales situadas hacia los 30°de latitud. Estas zonas son de calma y de muy escasas precipitaciones, encontrándose en ellas los desiertos más importantes (*Sahara, Arabia, Gobi en el hemisferio norte y Kalahari y Australia en el sur*).

d. 3. 1. EL VIENTO

El viento es el movimiento del aire respecto de la superficie terrestre. Este movimiento es fundamentalmente horizontal. La velocidad y dirección del viento es el resultado de la acción de las siguientes fuerzas:

- Fuerza debido al gradiente horizontal de presión (F_p): esta fuerza va dirigida desde las isobaras de alta presión a las de baja presión, presentando una dirección perpendicular a las mismas, según la *figura. 1.13(a)*

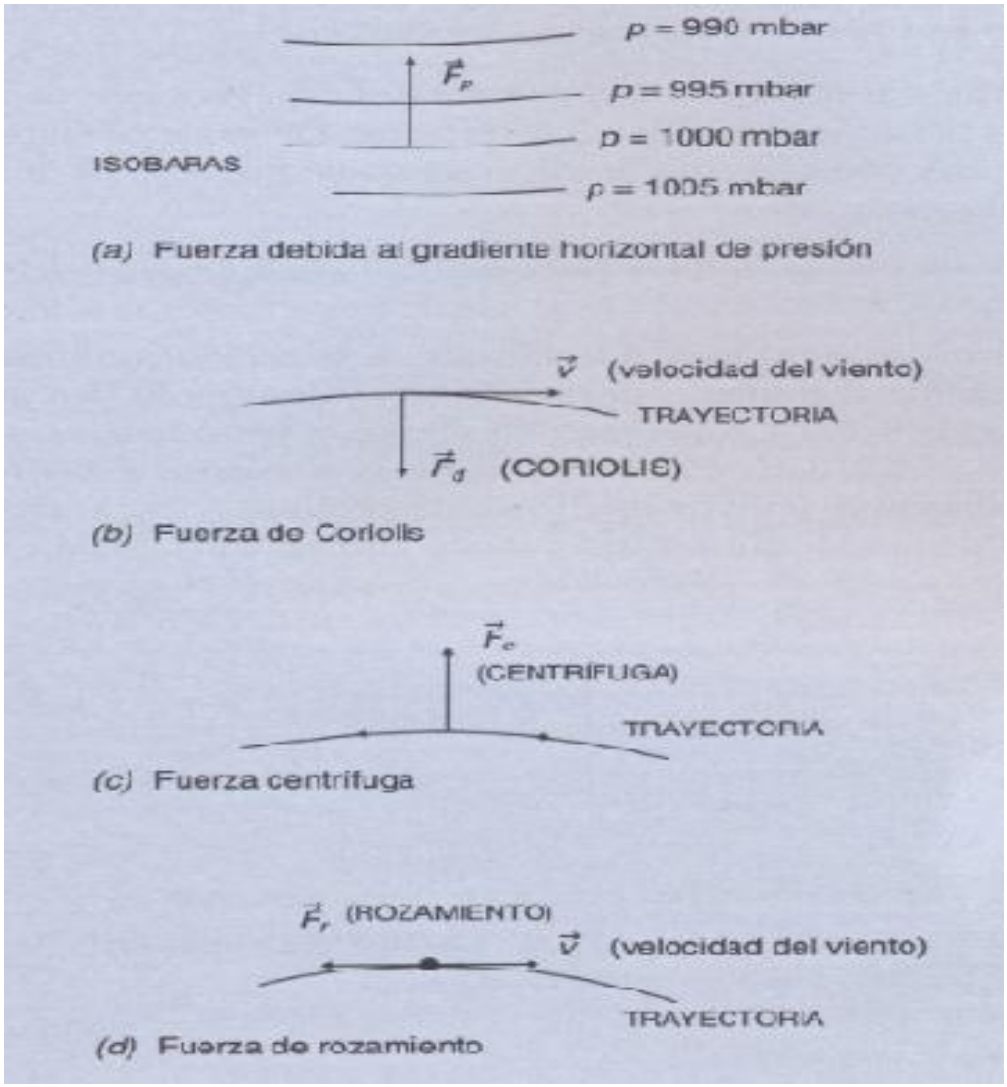


Fig. 1.13 Fuerzas que intervienen en la velocidad y dirección del viento
Fuente: www.editorialceac.com

- Fuerza debido a la rotación de la tierra (fuerza de Coriolis) (F_d): debida al movimiento de rotación del globo terrestre de oeste a este, la trayectoria de una masa de aire en movimiento sufre una desviación hacia la derecha en el hemisferio norte (en sentido contrario en el hemisferio sur), según *figura. 1.13 (b).*

- Fuerza centrifuga debida a la curva de las isobaras (F_c): esta fuerza actúa según la dirección del radio de curvatura de la trayectoria, en sentido opuesto al centro de curvatura de la misma, según muestra la fig. 1.13 (c).

- Fuerza debido al rozamiento (F_r): interviene en las capas bajas de la atmósfera próximas a la superficie terrestre, depende de factores tan diversos tales como el tipo de superficie o la orografía de la misma, según la fig. 1.13 (d).

Según el tipo de fuerzas considerado, se distinguen los siguientes tipos de vientos:

d. 3. 2. TIPOS DE VIENTOS

d. 3. 2. 1. Viento geostrófico.

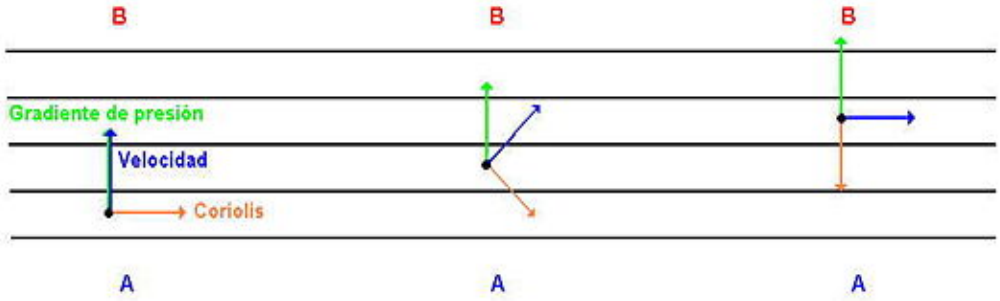


Fig. 1.14 Resultante de la acción conjunta de las fuerzas debidas al gradiente de presión.
Fuente: www.sandia.org

Es el viento resultante de la acción conjunta de las fuerzas debidas al gradiente de presión (F_p) y de Coriolis (F_d), según se muestra en la *figura 1.14.* Este tipo de viento es paralelo a las isobaras; en general puede decirse que es tanto mayor cuanto más próximas estén las isobaras (*mayor gradiente de presión*) y para un mismo gradiente de presión disminuye cuando aumenta la latitud.

d. 3. 2. 2. Viento del gradiente

Es el resultante de la combinación de las fuerzas debidas al gradiente de presión (F_p), de Coriolis (F_d) y de la centrífuga (F_c), según se muestra en la *figura 1.15*

La fuerza debido al gradiente de presión actúa perpendicularmente a las isobaras (*desde las altas a las bajas presiones*) y la fuerza centrífuga hacia la parte convexa de la trayectoria. Por eso, en el caso de un anticiclón, la fuerza centrífuga (F_c) se suma a la fuerza de presión (F_p), mientras que en una depresión se resta.

Por ello, y para un mismo gradiente de presión alrededor de un anticiclón, la velocidad del viento geostrófico es inferior a la del viento de gradiente.

El viento de gradiente constituye una buena aproximación al viento real en aquellas condiciones en las que la fuerza de rozamiento es despreciable. Esta situación se da en

las capas que no están próximas a la superficie terrestre, ya que la rugosidad de la misma introduce variaciones relativamente importantes en el movimiento del aire.

Por estas razones, los vientos geostróficos y los de gradiente predicen y describen bastante bien las condiciones del viento reales por encima de unos 1000m de altura sobre el nivel del suelo. Menores, por ejemplo de unos 100m, el *viento de superficie* está muy influenciado por dos factores: la rugosidad de la superficie terrestre y los obstáculos. Para aplicaciones de energía eólica, nos interesa conocer los vientos de superficie, ya que de ellos se extrae la energía mecánica para el accionamiento de las aerobombas.

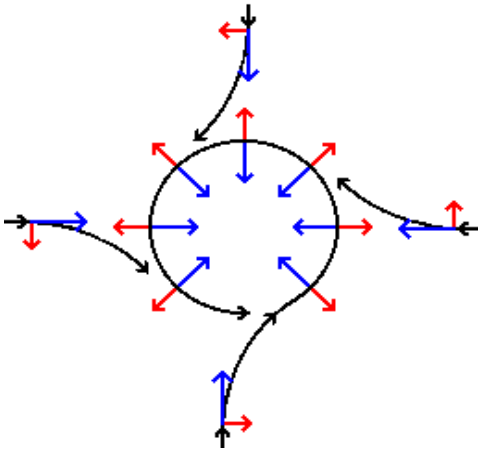


Fig. 1.15 Resultante de la combinación de las fuerzas debidas al gradiente de presión.
Fuente: www.sandia.org

En el centro del dibujo existe una baja presión, por lo que la fuerza del gradiente de presión (*flechas azules*) apunta hacia él. La fuerza de Coriolis (*flecha roja*) actúa a la derecha de la velocidad (*suponiendo que estamos en el hemisferio norte*).

Aunque inicialmente la trayectoria del aire apunta hacia el centro, rápidamente se ve desviado por Coriolis, hasta establecer una trayectoria curvada en torno a la baja presión.

d. 3. 2. 3. Vientos originados por fenómenos particulares*: vientos locales.-*

Existen condiciones climáticas locales que originan un tipo de vientos que se apartan de las leyes generales expuestas anteriormente para los vientos globales a gran escala. Entre ellos cabe citar:

- **Brisas de mar y brisas de tierra**

Durante el día la tierra se calienta más rápidamente que el mar, dado que el calor específico del suelo es menor que el del agua. Por consiguiente, se produce una corriente de aire ascendente creándose una depresión que provoca la circulación del aire de mar a tierra *(brisa marina).*

Durante la noche, el fenómeno se invierte y el viento sopla de tierra a mar *(brisa terrestre)* (*Ver figura 1.16*). Durante el anochecer y el amanecer acostumbran a aparecer periodos de calma. Los periodos de calma se observan en las proximidades de las costas alcanzando el aire un recorrido máximo de alrededor de 20km, aunque sus efectos pueden en algunos casos hacerse notar hasta unos 50km de la línea de costa. La velocidad del viento no acostumbra a sobrepasar 18km/h (*5m/s*), aunque las condiciones orográficas locales pueden en algunos casos aumentar o disminuir los valores de la velocidad del viento de brisa. En general, las brisas de tierra son más débiles que las de mar.

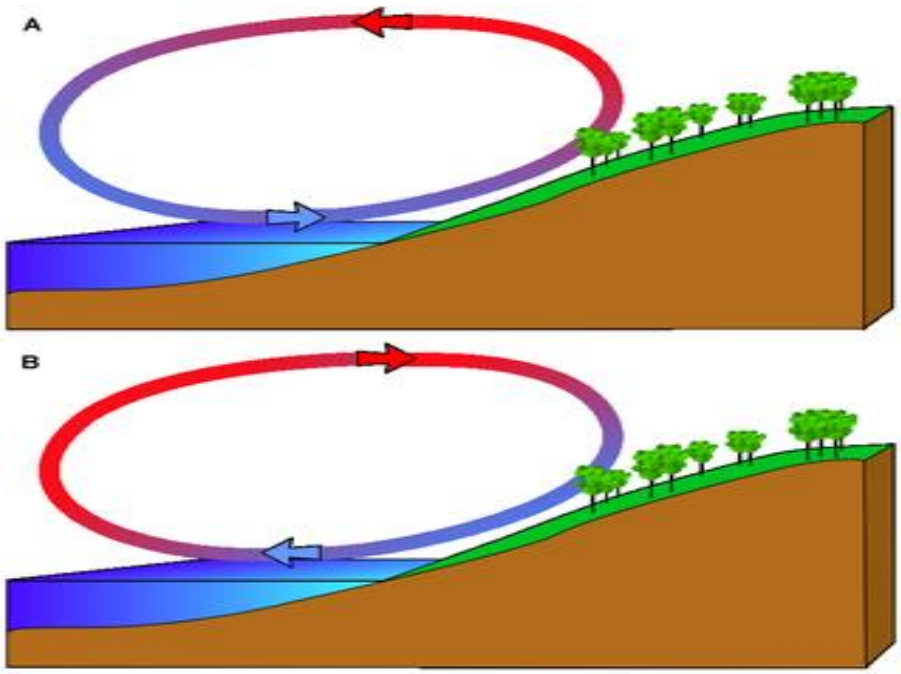


Fig.1.16 Brisas de mar y brisas de tierra.
Fuente: www.sandia.org

a) Brisa marina diurna.

b) Brisa terrestre nocturna.

- **Brisas de valle y de montaña *(vientos anabáticos y catabáticos)***

En una montaña, al anochecer, el aire en contacto con el terreno más elevado de la montaña se enfría más rápidamente que el aire situado sobre el valle, por lo que tiende a descender hacia el valle siguiendo la ladera. Es el denominado viento catabatico, generalmente de carácter suave.

Durante el día, y por efecto de la radiación solar, el proceso se invierte y es el viento en contacto con el terreno situado en la proximidad de los valles, el que tiende a ascender por la ladera (*vientos anabáticos).*

Este tipo de vientos también se conoce con el nombre de *vientos cañón o brisas de montaña.* En la *figura.1.17* se muestra el mecanismo de formación de este tipo de viento.

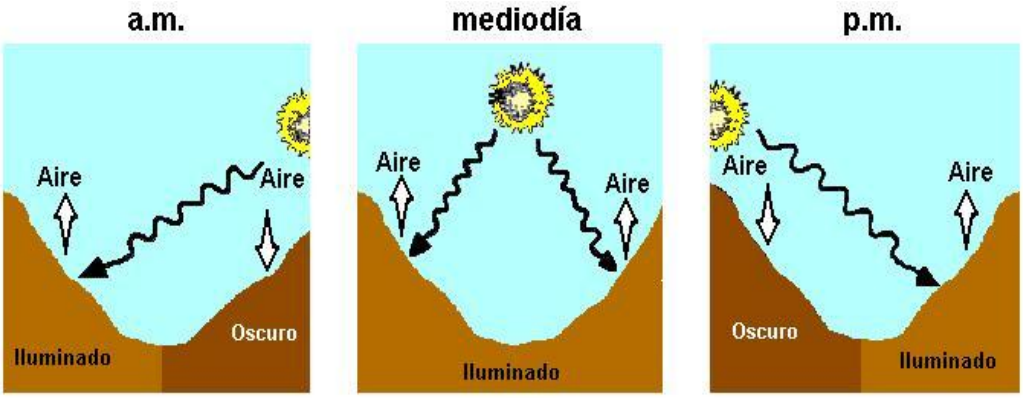


Fig. 1.17 Brisas de valle y de montaña.
Fuente: www.sandia.org

- **Foehn**

Cuando el aire remonta la pendiente de una cadena de montañas, sufre una expansión y en consecuencia un enfriamiento. Si la altura es elevada, su disminución de temperatura puede ser notable y en consecuencia se produce condensación de la humedad del mismo en forma de nieblas, lluvias e incluso nieve.

Al descender por la ladera opuesta hacia los valles situados a sotavento, se produce un calentamiento, con lo cual llega al fondo del valle el aire es cálido y seco. Este

fenómeno se produce siempre que una cadena montañosa es franqueada por masas de aire húmedo y es característico de algunos valles alpinos de donde recibe su nombre.

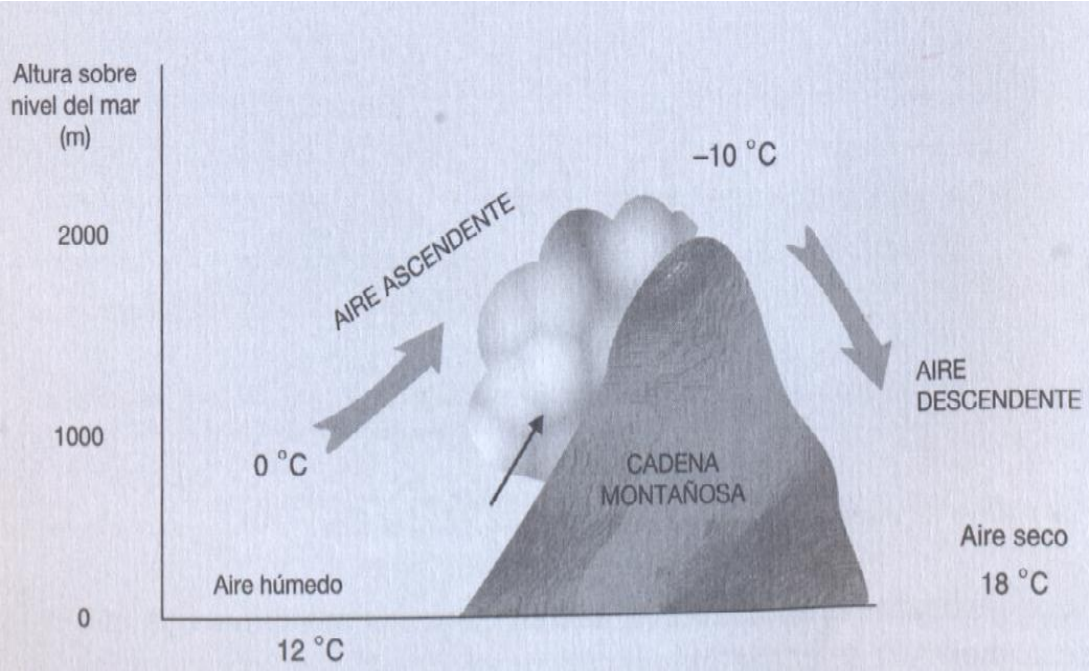


Fig. 1.18 Proceso de formación del viento Foehn.
Fuente: www.editorialceac.com

d. 4. CAPÍTULO IV

CARACTERÍSTICAS IMPORTANTES A CONSIDERAR

d. 4. 1. PARÁMETROS

La selección de cualquier estrategia para la extracción y conversión de energía eólica para abastecimiento de agua tendrá que acoplar los requerimientos del usuario, el comportamiento del viento y el sistema de conversión de energía eólica a ser utilizado para cumplir una demanda específica. Estos tres aspectos que deben estar adecuadamente acoplados son, entonces:

- La necesidad del usuario (*fuente y cantidad de agua, patrón de consumo*)
- La fuente de energía (*el viento, su distribución a lo largo del año*)
- El equipo conversor de energía (*el rotor eólico, transmisión, bomba*).

El acoplamiento que se debe lograr entre una necesidad de abastecimiento de agua y la fuente energética se realiza a través de la selección de la aerobomba más adecuada.

Otros aspectos importantes que deben estar presentes en la decisión son: la relación beneficio-costo de la instalación, la disponibilidad de la aerobomba, los costos iniciales de los equipos, costos de mantenimiento de los equipos, el volumen del tanque de almacenamiento de agua y costo, costos comparativos de soluciones alternas como motobomba operadas con combustibles fósiles, costo de perforación de pozo, etc.

De los tres aspectos, quizás, el más sencillo de cuantificar es la necesidad de suministro volumétrico de agua para una aplicación dada. Esto implica conocer, de antemano, cual va a ser la fuente de agua de que se dispone, bien sea un pozo profundo, un río, un lago, etc. La determinación de la energía hidráulica necesaria ($expresada\ en\ m^4/día$) y su patrón de consumo a lo largo del año son parámetros iniciales para la exploración de uso de aerobombas.

En lo que respecta al recurso eólico, es deseable, además de indispensable, conocer la variación de la velocidad de viento a lo largo del año. Las variaciones de viento tienen un patrón conocido y más importante que un nivel de potencia eólica en un instante de

tiempo específico, es la cantidad de energía que se puede convertir en energía mecánica útil a lo largo de un mes o un año.

Se sabe que el contenido energético eólico aprovechable, a bajas velocidades de viento, aun cuando tienen una frecuencia alta de ocurrencia, su cantidad de energía (*potencia eólica x tiempo*) es baja. Por otro lado, para velocidades de viento altas, donde el nivel de potencia eólico es alto su frecuencia de ocurrencia es baja y por lo tanto su contenido energético, también es bajo.

Es así como para el rango de velocidad de viento entre 80% y 250% de la velocidad promedio anual de viento, se tiene el mayor nivel energético eólico aprovechable.

Aproximadamente, para ese rango de velocidades está disponible cerca del 80% de la energía eólica aprovechable para bombeo y esto ocurre, generalmente, entre el 30 y 50% del tiempo del año, esto es entre 3000 y 4500 horas del año.

Esto quiere decir que se debe permitir un balance entre el tiempo del año que un sistema de aerobombeo suministra agua, conocido técnicamente como disponibilidad del sistema, y la cantidad total de energía que el sistema es capaz de extraer durante ese periodo de tiempo del año.

Se puede presentar que la energía puede ser extraída muy eficientemente durante un periodo corto de tiempo al año (*por ejemplo, grandes volúmenes de agua por solo 2 ó 3 meses del año para labores de irrigación*) ó, por el contrario, una menor capacidad energética a lo largo del año pero, un suministro constante de agua a lo largo del año, para la entrega de agua al servicio domestico.
A continuación se describe en detalle, aspectos técnicos importantes y parámetros que determinan la mejor selección de una aerobomba para una aplicación específica.

d. 4. 2. LA AEROBOMBA MÁS UTILIZADA

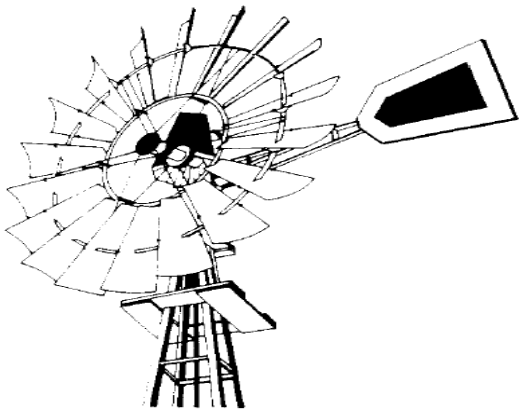


Fig. 1.19 Molino de viento Multipala americano
Fuente: www.enercon.de

El equipo de aerobombeo más utilizado al nivel mundial es el llamado Molino de viento mecánico Multipala americano. Este sistema ha probado su robustez y confiabilidad por cerca de un siglo, y aun cuando mayores desarrollos no se han realizado sobre este equipo en los últimos años, todavía es una de las mejores alternativas tecnológicas para aerobombeo. (Ver figura 1.19). Es usual observar equipos instalados a mediados de siglo XX, todavía operando después de 50 años de uso, claro eso sí, con mantenimiento adecuado. Desarrollos recientes (*desde los años setenta*) de aerobombas livianas no han probado totalmente su confiabilidad, aun cuando son una alternativa atractiva de menor costo que la aerobomba convencional.

d. 4. 3. ASPECTOS TÉCNICOS DE USO DE AEROBOMBAS

Algunas relaciones físicas básicas son necesarias para entender la operación y el rendimiento de las aerobombas. En términos generales se sabe que:

- La potencia disponible en el viento varía de acuerdo a la densidad del aire y ésta varía con la altura sobre el nivel del mar. Para una misma velocidad de viento, la potencia eólica disponible en la Sabana de Guayaquil es el 75% de aquella disponible al nivel del mar.

- El momento par (*llamado torque*) en el eje del rotor eólico, al igual que las fuerzas transmitidas a todos los elementos mecánicos en la transmisión y la torre varían con el cuadrado de la velocidad del viento.

- La potencia eólica disponible varia con el cubo de la velocidad del viento.

- La potencia extraída por el rotor varia con el cuadrado de su diámetro.

- Debido a la alta solidez de las aerobombas, la velocidad especifica de operación se encuentra en 1 y 2, esto es que la velocidad de la punta de las palas del rotor es un poco mayor que la velocidad del viento que le incide.

Un problema crucial en la selección, tanto de diámetro de rotor, transmisión de velocidad, diámetro de bomba y su respectiva carrera; es el adecuado momento-par de arranque del sistema necesario para levantar la masa de agua alojada en las tuberías.

En correspondencia se deberá elegir la adecuada velocidad de viento de arranque. En este aspecto vale la pena mencionar que para condiciones de arranque, las fuerzas necesarias son hasta 4 veces mayores que las fuerzas necesarias para operación de la bomba, toda vez que el rotor haya adquirido velocidad de rotación estable. Es por esto que rotores eólicos con mayor solidez (*muchas palas*) se eligen por su mayor momento-par de arranque. Rotores eólicos con menor solidez (pocas palas) presentan menor momento-par de arranque.

Generalmente las aerobombas están diseñadas y se seleccionan para comenzar a bombear en vientos cercanos a los 3 m/s, y mantener operación de bombeo hasta velocidades de vientos de 12 a 14 m/s, por encima de esta velocidad el equipo se detiene para evitar excesivas cargas en todos los elementos del sistema.

Es posible seleccionar una aerobomba para operar en condiciones de sobrecarga o por el contrario, con carga hidráulica más baja de lo común para mejorar su rendimiento o incrementar la altura de bombeo.

La carga hidráulica impuesta a la aerobomba es una función lineal de la altura de bombeo como también del cuadrado del diámetro de la bomba de pistón que se desea elegir.

Teniendo en cuenta estas relaciones se puede entonces afirmar que:

- La velocidad de arranque de la aerobomba varía con la raíz cuadrada de la altura de bombeo.

- La velocidad de arranque de la aerobomba varía linealmente con el diámetro del pistón de la bomba.

- La cantidad de agua bombeada en cada carrera (*ó pistonada*) varía con el cuadrado del diámetro del pistón.

Estos principios técnicos deben estar siempre presentes en la lectura de catálogos comerciales de fabricantes de aerobombas, sobre todo en lo que respecta a las indicaciones de la capacidad de bombeo y rendimiento hidráulico de los equipos que se ofrecen.

Es típico encontrar catálogos de algunos fabricantes que presentan el rendimiento hidráulico de equipos para velocidades promedio de viento cercanas a los 7 - 8 m/s.

Cuando se comparan rendimientos hidráulicos de aerobombas es necesario averiguar las velocidades de arranque de manera que es posible conocer con mayor precisión un estimado de la cantidad real de agua bombeada por día. No tiene sentido, presentar caudales de bombeo grandes para velocidades de viento altas, si las regiones en que las aerobombas pueden ser localizadas rara vez experimentan valores tan altos de velocidad promedio de viento.

d. 4. 4. COMPATIBILIDAD ENTRE BOMBA Y EL SISTEMA GENERAL

En párrafos anteriores se mencionó que las bombas típicas reciprocantes de acción simple operan intermitentemente, para lo cual se requiere que su velocidad de pulsación no sea demasiado alta. Vale la pena acordarse además que generalmente a la bomba se adicionan conexiones de tubería de largas extensiones.

Las máximas velocidades de excitación de las bombas de acción simple, para sistemas de aerobombeo convencionales, se limitan a 60 ciclos por minuto o un ciclo por segundo. Es por esto que equipos eólicos pequeños hasta de 4.5 metros de diámetro requieren de una caja reductora de velocidades para transmitir movimiento a la bomba

de cerca de 40 ciclos por minuto. Rotores más grandes pueden transmitir el movimiento directamente ya que estos rotores giran más lentamente.

Por la naturaleza intermitente de acción de las bombas reciprocantes, se producen aceleraciones en el liquido alojado en la tubería de ascenso, lo cual se traduce en valores cíclicos de fuerzas dinámicas que exceden entre 3 a 5 veces la condición de carga estática, representada en la columna de agua encima de la bomba. Estos niveles de fuerzas se traducen además en sobrepresión sobretodo en la cámara de la bomba, que si su diseño no es el adecuado tiende a estallar. Adicionalmente, tanto el vástago como la torre deben aguantar estas cargas dinámicas impuestas por la acción de bombeo.

Vale la pena anotar que las fuerzas y sobrepresiones varían con el cuadrado de la velocidad de excitación, es así como la velocidad de excitación de las bombas se debe limitar al máximo 60 ciclos por minuto.

Algunas soluciones se han tratado para permitir mayores velocidades de excitación de las bombas reciprocantes, sobre todo cuando se desean acoplar con nuevos diseños de rotores más livianos y más rápidos. Generalmente se incluye elementos flexibles en la transmisión como resortes o cámaras de aire, las cuales resultan viables para condiciones de bombeo de muy baja altura (*sea 10 metros*); ya que para alturas de bombeo mayores, desde pozos muy profundos, la mejor practica sigue siendo limitar la velocidad de excitación de la bomba.

d. 4. 5. ALMACENAMIENTO DE AGUA Y DISTRIBUCIÓN

Una parte importante de un sistema de bombeo es el almacenamiento de agua y su distribución. La Figura 1.20 ilustra algunos esquemas de almacenamiento utilizados en sistema de aerobombeo.

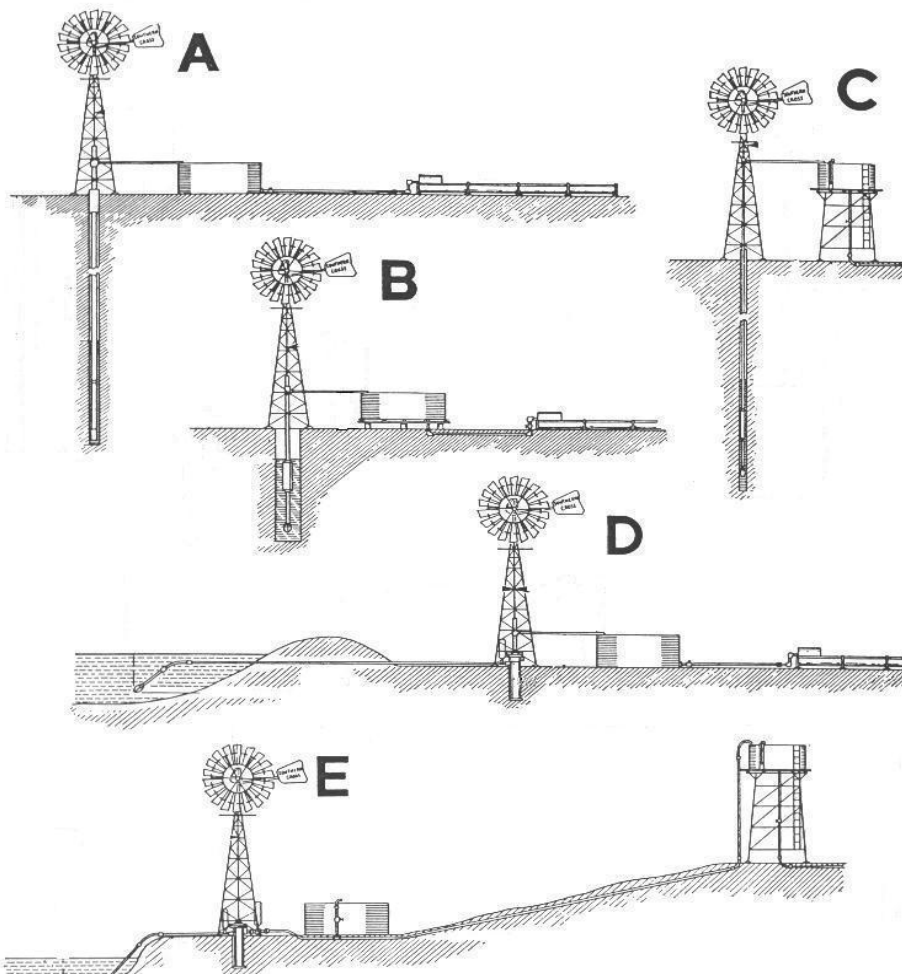


Fig. 1.20 Instalaciones típicas de tanque de almacenamiento de agua con aerobombas.
Fuente: www.windpower.org

Generalmente el tanque de almacenamiento regulariza el suministro de agua. La aerobomba entrega el fluido de manera variable a lo largo del día. Igualmente el tanque permite almacenar cantidades adicionales de agua que se pueden obtener en periodos de viento de alta intensidad, compensando con aquellos periodos de calma en los cuales no hay bombeo.

En sistemas de aerobombeo, generalmente, la dimensión volumétrica del tanque se determina para almacenar entre medio día y dos días de suministro de agua.
Almacenamiento para más días puede resultar en una solución muy costosa.

La selección del tipo de tanque depende de las circunstancias locales y de la aplicación. Mano de obra y materiales locales definirán el costo del tanque y la manera en que éste puede ser construido.

Para instalaciones donde se requiere alta presión de entrega de agua, se requerirá un tanque elevado, lo cual implica la necesidad de montar el tanque sobre una torre (*Figura 1.19– instalación C y E*).

En la actualidad se consiguen en el mercado, tanques de polietileno con un costo cercano a USD 90/m^3 ó tanques de concreto reforzado con acero a un costo de casi el doble (*USD 180/m^3*).

El sistema de distribución de agua, el cual depende de la aplicación impone las condiciones en las cuales el agua deba ser almacenada, sea que es un tanque elevado sobre una torre o simplemente colocado al ras de piso. Para sistemas de distribución se tendrá que cuantificar las pérdidas hidráulicas por fricción en tubería y accesorios hidráulicos como válvulas, rociadores, etc.

d. 4. 6. MEDIDA DE LA DIRECCIÓN DEL VIENTO: VELETA

Fig. 1.21 Veleta

La dirección acostumbra a medirse a través de una veleta (*Ver figura 1.21*), que se coloca próxima al anemómetro, instalándose todo el conjunto en la misma torre. Igual que ocurre con la velocidad, la dirección sufre continuas fluctuaciones. El sistema determina una dirección media, promediando los valores instantáneos durante un periodo igual al usado en el cálculo de la velocidad (*generalmente 10 minutos*).

d. 4. 6. 1. UBICACIÓN DEL SISTEMA DE MEDIDA

Velocidad del viento Dirección del viento

Fig. 1.22 Conjunto anemómetro y veleta.

La ubicación del conjunto anemómetro y veleta se realiza en un mástil. (*Ver figura 1.22*).En estaciones fijas se sitúa a una altura estándar de 10 m sobre el nivel del suelo a fin de evitar las perturbaciones del mismo sobre el viento. Para evitar los efectos de apantallamiento de la torre del mástil conviene usar un poste cilíndrico delgado, tensado por cables o vientos. En estaciones móviles o semipermanentes se aceptan alturas de 2 o 3 m. La colocación de los sensores (*anemómetro y veleta*) debe ser en un lugar despejado libre de perturbaciones provocadas por los obstáculos próximos, ya que estos perturban notablemente la velocidad y dirección del viento.

Fig. 1.23 Estación móvil

En general un obstáculo de altura h perturba el flujo de aire a una distancia $2h$ a barlovento y de $10h$ a $20h$ a sotavento. En la dirección vertical la perturbación puede alcanzar hasta una altura $2h$.

Por ello conviene situar los sensores lo más alejados de la zona de perturbación. Idealmente, interesaría colocarlos en un lugar despejado cuyo horizonte no presentase obstáculos de altura igual o superior al mástil en un radio de 300 m. La colocación de los sensores de medida en las zonas urbanas y en la proximidad de edificaciones, bosques o irregularidades del terreno puede provocar distorsiones importantes en las medidas de velocidad y dirección.

d. 4. 7. FORMAS DE PRESENTACIÓN DE LOS DATOS DE VIENTO: VELOCIDAD Y DIRECCIÓN

Dependiendo del método de medición y el posterior tratamiento de las medidas, en la práctica se pueden encontrar varias formas de presentación de los datos de viento. A continuación, se indican las más usuales, ordenándolas de mayor a menor detalle y siempre tomando como referencia un periodo de un año (*8760h*).
Conviene indicar que los resultados obtenidos en una campaña de medición de un año son poco representativos del comportamiento del viento, dada la variabilidad del mismo. Para tener un cierto nivel de representatividad de la información eólica, interesa manejar series históricas lo más largas posibles.

Sería deseable disponer de series históricas de 25 o 30 años, aunque periodos comprendidos entre 5 y 10 años ya comienzan a ser representativos. Los servicios nacionales de meteorología son los puntos donde puede obtenerse información sobre datos de viento. (*Ver Tabla 1.1*) Velocidad media y dirección dominante mensual del viento en el A.E.I.R.N.N.R.

Tabla 1.1 Velocidad media y dirección dominante mensual del viento en el A.E.I.R.N.N.R.

Mes	En	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Agt	Sep	Oct	Nov	Dic	Año
Velocidad (m/s)	2,4	3,1	2,6	5,2	3,7	2,1	1,6	6,6	5,2	3,3	2,7	1,1	2010
Dirección dominante	NE	SW	N	NE	SW	SW	N	SW	E	N	SW	N	

Fuente: propia

a) Datos de viento en forma de tablas o series numéricas.

- Valores promedio durante 10 minutos de la velocidad y dirección instantáneas: constituyen series de gran detalle y para un año representan 6 x 8760 = 52560 valores para cada magnitud (*velocidad y dirección*).

- Valores medios horarios de la velocidad y dirección: se elaboran promediando para cada hora los seis valores horarios indicados en el apartado anterior. Para un año se disponen 8760 valores de velocidad y otros tantos de dirección.

- Valores medios trihorarios de la velocidad y dirección: se forman a partir de la media trihoraria de los valores anteriores y se calculan para las 0, 3, 6,…21 horas de cada día. Para un año se tienen 2920 valores de velocidad y otros tantos de dirección.

- Valores medios diarios (*365*), decenales (*36*), mensuales (*12*) y anual (*1*) de la velocidad y la dirección obtenidos por promedio de los apartados anteriores. Se pueden encontrar resúmenes meteorológicos de la velocidad media mensual y la dirección dominante, tal como se muestra en el ejemplo de la tabla 1.1.
- En algunos observatorios se dispone de una tabla en la que se indica, junto con la velocidad media anual, las frecuencias relativas de la velocidad media anual por intervalos de velocidad.
- En todos los casos, se indica siempre el umbral de calmas, que constituye el límite inferior de la velocidad que es capaz de captar el anemómetro.

Dada la variabilidad del viento, los valores medios horarios, trihorarios, diarios o anuales deben corresponder a medias de medidas de varios años, a fin de que tengan un adecuado grado de aproximación a las condiciones de comportamiento que pueden esperarse. Una serie de valores correspondientes sólo a un año es poco representativa y es muy incierto elaborar a partir de ellos conclusiones con relación al posible aprovechamiento energético del potencial eólico del lugar.

Tabla 1. 2. Frecuencias por dirección y grupo de velocidad (velocidad media mensual). Lugar: A.E.I.R.N.N.R. (observatorio A.E.I.R.N.N.R.). Periodo año 2010. Umbral de calmas: 0.2$^{m}/_{s}$

Dirección	V ($^{m}/_{s}$)	% (0.3-0.5)	% (1.6-3.3)	% (3.4-5.4)	% (5.5-10.7)	% (>10.7)	% Total
N	4,6	0,2	0,6	0,7	0,7	0,0	2,2
NNE	5,1	0,4	1,1	2,1	2,1	0,1	5,8
NE	5,5	0,5	1,7	2,6	4,0	0,5	9,4
ENE	4,5	0,9	2,5	2,2	2,4	0,2	8,2
E	2,5	0,7	2,1	0,7	0,0	0,0	3,6
ESE	2,5	0,4	1,2	0,4	0,0	0,0	2,0
SE	2,6	0,4	1,4	0,4	0,1	0,0	2,2
SSE	3,1	0,2	1,1	0,8	0,1	0,0	2,1
S	3,7	0,4	0,8	1,5	0,4	0,0	3,1
SSW	5,9	0,5	1,5	3,1	6,6	0,4	12,1
SW	5,2	0,7	2,2	4,2	4,5	0,4	12,0
WSW	5,4	0,4	1,6	3,2	4,6	0,1	9,9
W	5,7	0,3	0,9	1,9	3,7	0,0	6,8
WNW	6,3	0,2	0,8	1,5	3,4	0,4	6,3
NW	7,6	0,2	0,7	1,6	4,4	1,7	8,6
NNW	5,5	0,2	0,7	1,0	1,2	0,3	3,4
Total							97,7
Calma	—	—	—	—	—	—	2.3

Fuente: propia

b) representaciones gráficas.

La representación gráfica más usada es la denominada *rosa de los vientos.*

Consiste en un diagrama polar en el cual se definen para diferentes direcciones o rumbos distintos valores relacionados con la velocidad del viento. El número de rumbos, cuyos valores principales se hacen corresponder con los puntos cardinales, acostumbra a ser 8, 12 o 16. El porcentaje de calmas se indica en el centro del diagrama.

La rosa de los vientos permite determinar las direcciones dominantes de los vientos. En general, no coincide la dirección dominante con la intensidad del viento, ya que en muchos casos los vientos más intensos no son los que soplan más horas al año procedentes de una determinada dirección. Este es un aspecto importante a tener en cuenta para una adecuada orientación de los rotores eólicos.

De esta forma se puede establecer varios tipos de rosas de los vientos:

- Porcentaje del tiempo total que el viento sopla procedente de una determinada dirección (Ver figura 1.24). Así, en esta figura se puede ver que la dirección dominante del viento es la NW, de la cual sopla el viento el 23,6% de las horas anuales.

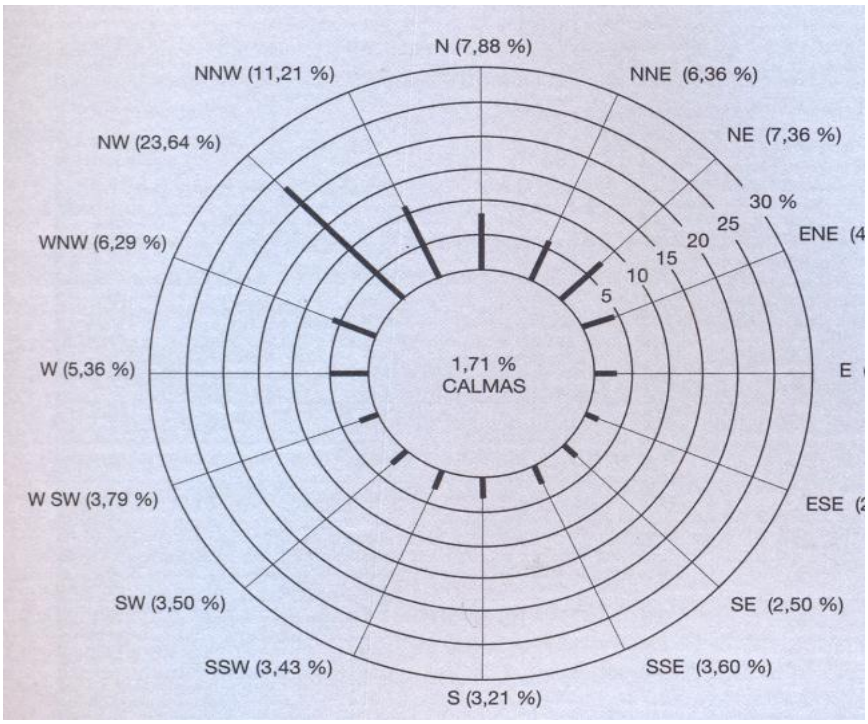


Fig. 1.24 Porcentaje de tiempo total que el viento procede de una determinada dirección.
Fuente: www.editorialceac.com

- Velocidad media del viento para cada dirección. Junto a cada segmento que representa a escala la velocidad, se indica el porcentaje de tiempo anual (*frecuencia relativa porcentual*) que sopla el viento procedente de una determinada dirección. Por ejemplo, en la figura 1.25, donde se han representado los datos de la tabla 1.2, se observa que los vientos más intensos (v=7,6m/s) proceden del NW y se presentan un 8,6% de las horas anuales (*753 h/año*), mientras que los más frecuentes son los de la dirección SSW (*12,1%*) correspondiendo 1060 h/año, con intensidad 5,9 m/s

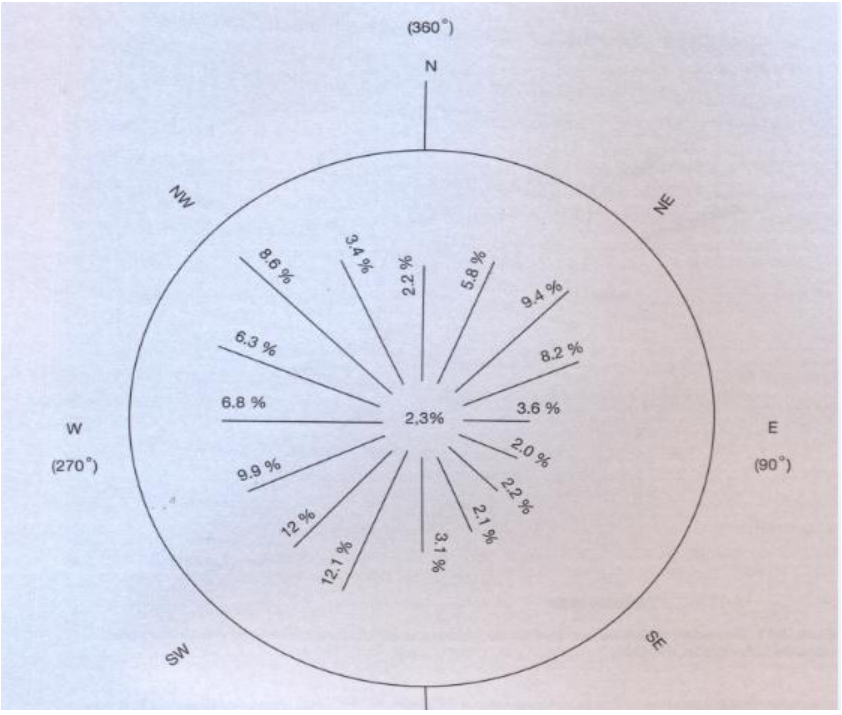


Fig. 1.25 Representación de velocidades medias y frecuencias porcentuales de tiempo (valores anuales).
Fuente: www.editorialceac.com

- Representación para cada dirección de porcentajes de tiempo total para los que la velocidad se mantiene en determinados intervalos de tiempo (Ver figura 1.26).

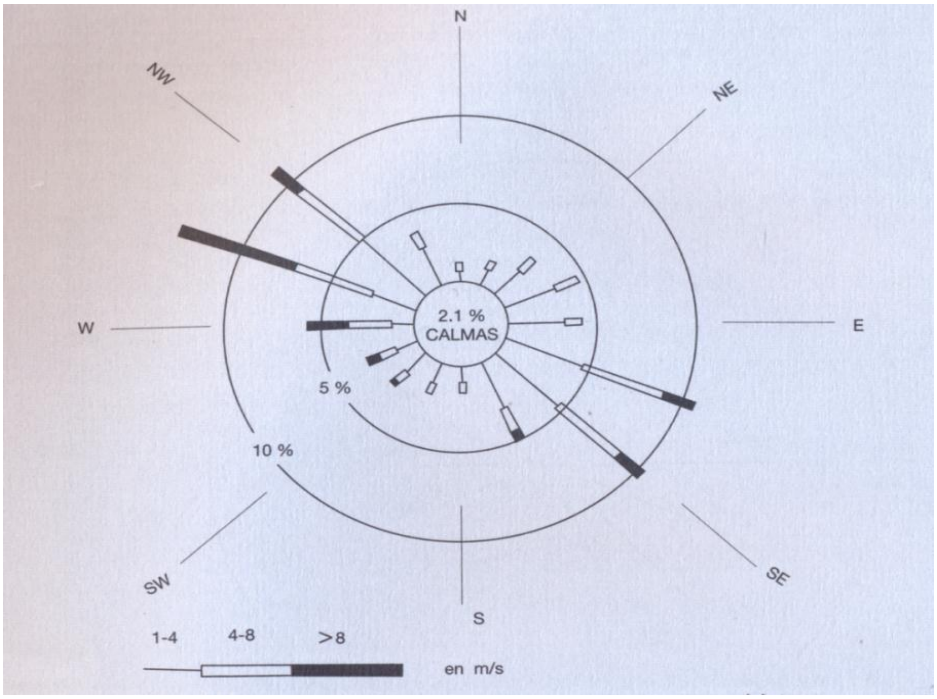
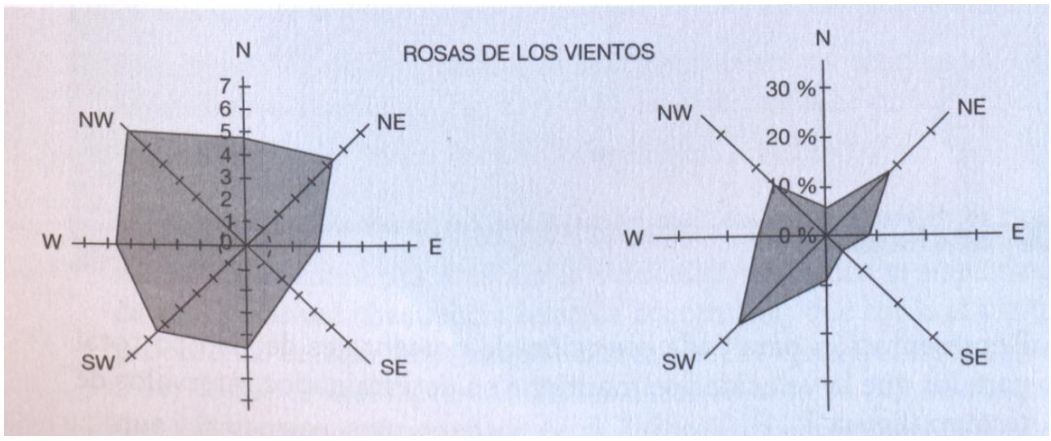


Fig. 1.26 Rosa de los vientos porcentaje de frecuencias de las direcciones del viento para tres grupos de velocidades medias.

Fuente: www.editorialceac.com

En la figura 1.27 se muestra otra forma de representar las rosas de los vientos para los valores correspondientes a la tabla 1.2. En este caso se han escogido 8 rumbos.



Velocidad del viento ($^{m}/_{s}$) para cada dirección Frecuencia por cada dirección

Fig. 1.27 Rosa de vientos de 8 rumbos.
Fuente: www.editorialceac.com

e.- MATERIALES Y MÉTODOS

e. 1. MÉTODOS

e. 1. 1. REQUERIMIENTOS DE ENERGÍA Y NECESIDADES DE BOMBEO.

Los usos típicos de las aerobombas comerciales se centra en el abastecimiento de agua limpia para uso domestico, agua para ganado; para labores de irrigación, drenajes y algunas otras menos comunes como en la industria piscícola.

Cada una de estas aplicaciones determina la cantidad de agua necesaria para ser entregada con un sistema de aerobombeo ó si se requiere un complemento adicional con otra fuente de energía como es la operación intermitente de una motobomba diesel, a gasolina o un sistema de bombeo fotovoltaico, entre otras.
Sin embargo, algunos aspectos adicionales deben ser tenidos en cuenta por el usuario como la localización de la fuente de agua, ya que esta puede ser bombeada de un pozo, un aljibe, un río, una corriente de agua, etc. Aparte de esto, es fundamental, determinar la calidad del agua para una aplicación especifica.

Adicionalmente se tendrá que determinar si la potencial instalación requiere tanque de almacenamiento o no.

Como un primer paso, entonces, se debe cuantificar la demanda de agua para la aplicación dada y el total de la altura de bombeo. Así pues, es indispensable conocer el consumo diario promedio ($m^3 por\ día$) y si es posible, su variación en diferentes épocas del año. Además es importante pensar en la necesidad futura de abastecimiento de agua, ya que este puede crecer en el inmediato plazo y probablemente la instalación eólica no responda a las exigencias futuras. Sobra indicar que en caso de que una instalación con el tiempo no pueda con las exigencias de abastecimiento de agua, siempre se puede instalar otra aerobomba para complementar el suministro.

Vale la pena mencionar que un aspecto atractivo del uso de aerobombas, ha sido, que estos equipos pueden suministrar cantidades adecuadas de agua por periodos razonables de tiempo, sin intervención humana, totalmente desatendidos.

Igualmente, es común escuchar usuarios de esta tecnología que otro aspecto atractivo es que los molinos de viento no son robados, como si sucede con motobombas pequeñas en las cuales requieren de la presencia permanente de un operario.

En cuanto a la cantidad de agua limpia requerida para consumo humano, se estima que el consumo mínimo diario por persona puede variar entre 20 y 40 litros por día.

En lo que respecta al abastecimiento de agua para animales este consumo diario varía entre 20 y 40 litros por cabeza, para caballos y reces de ganado; llegando hasta 100 litros para vacas lecheras y, para ovejas, cabras y cerdos puede estar entre 1 y 10 litros por día.

En lo que respecta al cálculo de demandas de agua para irrigación dependerá del tamaño y tipo de cultivo, teniéndose en cuenta los niveles de evapotranspiración en el lugar. Estas cantidades de agua diaria requerida generalmente están contenidas en manuales de irrigación.

Toda vez que se realice una estimación de la demanda y su variación mensual a lo largo del año se tendrá que cuantificar la capacidad de la fuente de agua, la cual deberá estar acorde con las necesidades de abastecimiento. En este aspecto, por ejemplo, es necesario medir la capacidad de entrega de agua de un pozo o aljibe, ya que este recoge aguas subterráneas y no sería deseable dejarlo seco durante ciertos periodos de tiempo. No solamente esto afecta el pozo mismo, sino que seguramente afectará el adecuado funcionamiento de la bomba de extracción de agua.

Para obtener el cálculo de la energía eólica total implica utilizar diversas fórmulas como las que indicamos a continuación:

e. 1. 2. Energía hidráulica (Eh).- Conocida la cantidad necesaria de agua en un periodo de tiempo (Q en m^3) y la altura de bombeo incluidas las perdidas hidráulicas en el sistema (H en m). La demanda total de energía hidráulica podrá ser expresada en m^4 ($m^3 . m$) a través de:

$$Eh = \rho.g.\ Q.H = 1000 \times 9.81 \times Q \times H \qquad \text{(Ecuación. 2.1)}$$

$$Q \times H = Eh / 9810$$

Donde:

Eh = Energía Hidráulica requerida en Julios

ρ = densidad del agua ($1000kg/m^3$).

g = Constante de gravedad (9.81m/s^2).

Q = Cantidad necesaria de agua en m^3.

H = Altura de bombeo.

e. 1. 3. EL RECURSO EÓLICO

El viento es aire en movimiento y es una forma indirecta de la energía solar. La energía eólica es, entonces, la energía cinética de las masas de aire en movimiento.

e. 1. 4. POTENCIA DEL VIENTO (P_v).- Este movimiento de las masas de aire se origina de un calentamiento desigual de la superficie terrestre, que junto a la rotación de la tierra, crean entonces los patrones globales de circulación. Existen tres componentes del viento que determinan su energía disponible, estos son: la velocidad del viento, su variación en el tiempo y, en menor grado, la densidad del aire.

Así pues, la potencia contenida en el viento, soplando con una velocidad V y pasando a través de un área A perpendicular a V, es:

$$P_{viento} = \frac{1}{2} \cdot \rho . V^3 \cdot A \qquad \text{(Ecuación 2.2)}$$

Donde:

P_{viento} = es la potencia eólica expresada en vatios

ρ = es la densidad del aire (1.2 Kg/m^3 a nivel del mar)

V = es la velocidad del viento en m/s

A = es el área del rotor en m^2

e. 1. 5. CUANTIFICACIÓN DEL RECURSO EÓLICO

La cantidad de energía contenida en las masas de aire en movimiento en su circulación por las capas bajas atmosféricas representa el nivel del potencial energético del recurso

eólico, que puede ser relativamente elevado, de tal modo que se justifica el esfuerzo de transformarla en energía útil y su aprovechamiento en condiciones favorables de eficiencia y rentabilidad, dado el grado de desarrollo alcanzado por las tecnologías de conversión eólica.

El viento, al considerarlo como recurso energético tiene sus características específicas: es una fuente con sustanciales variaciones, a pequeña y gran escala de tiempo y espaciales, tanto en superficies como en altura contando además con una componente aleatoria que afecta en gran parte a su variación total.

Al mismo tiempo, y como se verá posteriormente, hay que considerar que la energía eólica disponible por unidad de área expuesta al viento es proporcional al cubo de la velocidad, por lo que pequeñas variaciones en la velocidad del viento se reflejan sensiblemente en la energía suministrada.

La caracterización de los recursos eólicos, interviene de forma muy importante en varias áreas de trabajo relacionadas con los sistemas de aprovechamiento de la energía eólica:

- En la selección del emplazamiento más favorable para la instalación de los sistemas eólicos
- En la estimación de su producción energética y de su funcionamiento global del sistema eólico en lugares específicos.
- En su diseño
- En su operación y regulación del sistema eólico.

Estos elementos permiten afirmar que la evaluación y caracterización del viento como fuente de energía es un campo de trabajo de especial importancia en el aprovechamiento de la energía eólica, de tal modo que conocer el régimen de vientos a que va a estar sometido el sistema es necesario tanto para optimizar las aplicaciones energéticas como para predecir las condiciones de operación y mantenimiento.

e. 1. 6. CARACTERIZACIÓN ENERGÉTICA DEL VIENTO: POTENCIAL EÓLICO

e. 1. 6. 1. ENERGÍA CINÉTICA (E_c).- Una masa de aire, m, que se mueve a una velocidad, v, tiene una energía cinética E_c:

$$E_c = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2$$ (Ecuación .2.3)

La energía por unidad de volumen de la corriente de aire es:

$$e = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2$$ (Ecuación 2.4)

Donde:

ρ = la densidad del aire.

El flujo de aire a través de una superficie A es:

$$\phi = v \cdot A$$ (Ecuación 2.5)

e. 1. 6. 2. POTENCIA DISPONIBLE (P_d).- Por lo tanto, la energía que fluye por unidad de tiempo, es decir la potencia eólica disponible, (P_d), a través de una sección transversal de área A perpendicular a la corriente de aire a una velocidad v, es:

$$Pd = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 \cdot v \cdot A = \frac{1}{2} \rho \cdot A \cdot v^3$$ (Ecuación 2.6)

Así pues la potencia mecánica disponible en las masas de aire en movimiento es fundamentalmente proporcional al cubo de la velocidad del viento que atraviesa al área expuesta a la corriente de aire (*tamaño del rotor de la turbina*).

Como se puede observar la densidad del aire afecta la energía disponible en una magnitud mucho menor que la velocidad de viento. La densidad del aire al nivel del mar puede tomarse como 1.2 kg/m^3 aunque ésta varía con la altitud, temperatura y presión atmosférica local. Los efectos de temperatura y presión atmosférica son muy pequeños comparados con la altitud y pueden ser despreciados. En las condiciones de nuestro país el efecto de la altitud, no es importante y se considera como bueno si se trabaja con el valor de 1.2 kg/m^3.

e. 1. 7. POTENCIA EÓLICA APROVECHABLE (P_a)

La potencia aprovechable se refiere a la potencia mecánica en el eje del rotor, y no a la potencia final ya sea hidráulica o eléctrica, las pérdidas de potencia debidas a la eficiencia mecánica de la transmisión y la eficiencia de la bomba o generador deben ser tenidas en cuenta aparte.

La potencia aprovechable por una máquina eólica de área A, frente a un flujo de aire de velocidad v y densidad ρ es:

$$Pa = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v^3 \cdot Cp \qquad \text{(Ecuación 2.7)}$$

$C_{p=\ Coeficiente\ de\ Potencia}$

e. 1. 7. 1 COEFICIENTE DE POTENCIA (C_p)

Teoría de la cantidad de movimiento: límite de Betz.

Esta teoría se establece bajo las llamadas hipótesis de Rankine - Froude, es decir:

- Supone el aire como un fluido ideal sin viscosidad, en todo el campo fluido, excepto en las proximidades muy cercanas al plano del rotor.

- El movimiento en todo el campo fluido es subsónico y a muy bajos números de Mach, con lo que se puede considerar a éste como incompresible. El problema fluido esta desacoplado del problema fluido mecánico.

- El movimiento del fluido es estacionario o permanente, es decir que no depende del tiempo.

- No tiene en cuenta la rotación del rotor ni la de su estela.

- Contempla el rotor como un disco poroso al cual se llegaría colocando infinitos álabes infinitamente delgados.

- Las magnitudes empleadas para representar las variables en una sección recta determinada del tubo de corriente, son magnitudes equivalentes de su perfil de distribución a lo ancho de dicha sección.

Bajo estas fuertes restricciones, el modelo físico utilizado en esta teoría es el mostrado en la figura 2.1, donde:

V_1= Velocidad del viento a la entrada del rotor

V_2= Velocidad del viento a la salida del rotor

V = Velocidad incidente en el plano del rotor

F = Fuerza provocada por la corriente sobre el plano del rotor

P_1= Presión aguas arriba del rotor (p1= p2= p atm.)

P^+, P^- = Presión en el plano del rotor a barlovento y sotavento respectivamente.

Si aplicamos el teorema de conservación de la cantidad de movimiento a este modelo y siendo ρ la densidad del aire:

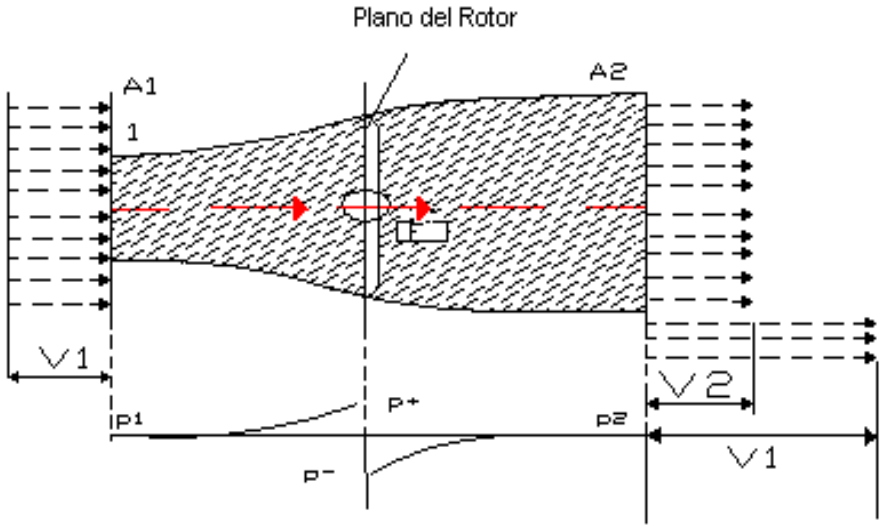


Fig. 2.1 Representación del Teorema de Betz.
Fuente: Metodología de cálculo para un Aerogenerador de eje horizontal

$$\Sigma F = \rho . Q . \Delta V \implies F = \rho . A . V . (V_1 - V_2) \qquad \text{(Ecuación 2.8)}$$

También podemos calcular esta fuerza como:

$$F = A . (P^+ - P^-) \qquad \text{(Ecuación 2.9)}$$

Aplicando la ecuación de conservación de energía, bajo la hipótesis formulada, es decir el teorema de Bernoulli al tubo de flujo, entre la sección 1 y el plano del rotor y entre éste y la sección 2, resulta:

$$P_1 + \frac{\rho}{2} . V_1^2 = P^+ + \frac{\rho}{2} . V^2 \qquad \text{(Ecuación 2.10)}$$

$$\text{Como } P_1 = P_2 \implies p^+ - p^- = \frac{1}{2} . \rho . (V_1^2 - V_2^2) \qquad \text{(Ecuación 2.11)}$$

$$p_2 + \frac{\rho}{2} . V_2^2 = P^- + \frac{\rho}{2} . V^2 \qquad \text{(Ecuación 2.12)}$$

Luego aplicando esta igualdad a ecu. (2.9) e igualando a (2.8), se tiene:

$$F = A . (P^+ - P^-) = \frac{1}{2} . A . \rho . (V_1^2 - V_2^2) = A . \rho . V . (V_1 - V_2) \qquad \text{(Ecuación 2.13)}$$

De esta manera se llega a:

$$V = \frac{V_1 + V_2}{2} \qquad \text{(Ecuación 2.14)}$$

La velocidad axial **V**, que atraviesa el disco del rotor, es menor que la velocidad del viento (en el infinito antes de pasar el rotor) y se puede representar introduciendo un factor de interferencia **a,** llamado coeficiente de velocidad inducida axial.

De este modo:

$$V = V_1 . (1 - a) \quad \text{y} \quad V_2 = V_1 . (1 - 2 a) \qquad \text{(Ecuación 2.15)}$$

Ahora, la potencia captada por el rotor es el producto de la fuerza ejercida por el fluido, **F**, por la velocidad incidente en el mismo, V:

Pcaptada = F. V = A. ρ. V. (V_1 - V_2).

$$V = 2.\ \rho.\ A.V_1^3.\ a.\ (1-a)^2 = (\rho.\ A.\ \frac{V1+V2}{2}).\ (\frac{V1^2}{2} - \frac{V2^2}{2}) \qquad \text{(Ecuación 2.16)}$$

El último miembro de esta expresión tiene un significado especial, ya que dice que la potencia extraída del viento es, por una parte proporcional al caudal másico que atraviesa el rotor y por otra parte proporcional a la diferencia de energía cinética de la corriente entre las secciones antes y después del mismo.

$$\text{Pcaptada} = \underbrace{(\rho.\ A.\ \frac{V1+V2}{2})}_{\text{caudal másico que atraviesa el rotor}} .\ \underbrace{(\frac{V1^2}{2} - \frac{V2^2}{2})}_{\text{perdida de energía cinética}}$$

Como ρ, A, V_1 son constantes; Pcaptada = Pcaptada(a), luego resolviendo la ecu. (2.9), se tiene:

$$\frac{dPcaptada}{da} = 0 \Rightarrow 3 \cdot a^2 - 2 \cdot a + 1 = 0 \Leftrightarrow a_{PcaptMÁX} = \frac{1}{3}$$

Reemplazando este valor en la expresión:

$$\text{Pcapt (a)} = P_{\text{cap MÁX}} = \frac{8}{27}\ \rho.\ A.V_1^3 \qquad \text{(Ecuación 2.17)}$$

Esta es la máxima potencia que se puede obtener del flujo de aire con una turbina ideal.

Recordando, ahora, Cp= $\frac{Pcaptada}{Pdisponible}$ y la potencia del viento, tendremos:

$$Cp = \frac{Pcaptada}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot V1^3} = \text{Cp (a)} = 4.\ a.\ (1-a)^2 \qquad \text{(Ecuación 2.18)}$$

$$Cp_{\text{MAX}} = \frac{16}{27} = 0{,}5926$$

La definición del límite teórico de Betz (1927) expresa la máxima potencia que se puede obtener teóricamente de una corriente de aire con una aeroturbina ideal nunca puede superar al 59,26% de la potencia del viento incidente, esto define el coeficiente aerodinámico Cp real siempre menor que este y para un rotor eólico rápido es igual.

e. 1. 7. 2 FACTOR DE CAPACIDAD (FC)

El factor de capacidad viene dado por la relación entre los kWh producidos durante un año y la potencia instalada.

$$FC = \frac{(kWh)\,\mathrm{Pr}\,oducidos..Anualmente}{(kW)Instalado \times 8760} = \frac{\overline{Pa}}{Potencia..Instalada} \qquad \text{(Ecuación 2.19)}$$

Dónde 8760 son las horas que tiene un año.

Este valor debe ser mayor que un 20 % para aerogeneradores para que se considere preliminarmente factible.

e. 1. 7. 3. FACTOR DE GENERACIÓN ESPECÍFICA. (FGE)

También se emplea con este fin el *factor de generación específica* dado por la relación entre los kW producidos anualmente y la potencia instalada.

$$FGE = \frac{(kWh)\,\mathrm{Pr}\,oducidos..Anualmente}{(kW)Instalado}\left[\frac{kWh}{kW}\right] \qquad \text{(Ecuación 2.20)}$$

Esta cifra debe ser mayor de 1500 kWh/kW también para aerogeneradores.

Como se puede observar de todo lo anterior, el conocimiento de la distribución de probabilidades es importante para caracterizar el potencial eólico de un sitio determinado y calcular los parámetros energéticos de interés.

La determinación de la distribución de probabilidades p (v) se basa en las mediciones del viento en el lugar donde se quiere determinar la potencia.

e. 1. 8. LEY DE DISTRIBUCIÓN DE WEIBULL DE LA VELOCIDAD DEL VIENTO.

Es importante disponer de una función que permita determinar la distribución de la velocidad del viento a lo largo de un periodo de tiempo (por ejemplo, un año). Se ha comprobado experimentalmente que la velocidad del viento sigue aproximadamente una densidad de probabilidad similar a la de la figura 2.2, y que se ajusta bastante bien a una distribución de la función densidad de probabilidad de Weibull. La función densidad de probabilidad *p (v)* correspondiente a la ley de Weibull es del tipo de dos parámetros (*k*, *c*) y viene dada por la expresión:

$$p(v) = \frac{k}{c}\left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} . e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^{k}} \qquad \text{(Ecuación 2.21)}$$

En donde:

v = es la velocidad del viento (m/s),

p (v) = es la probabilidad estadística que ocurre en una velocidad.

c = es el factor de escala (m/s), valor que suele ser próximo a la velocidad media y.

k = es el factor de forma que caracteriza la asimetría o sesgo de la función de probabilidad.

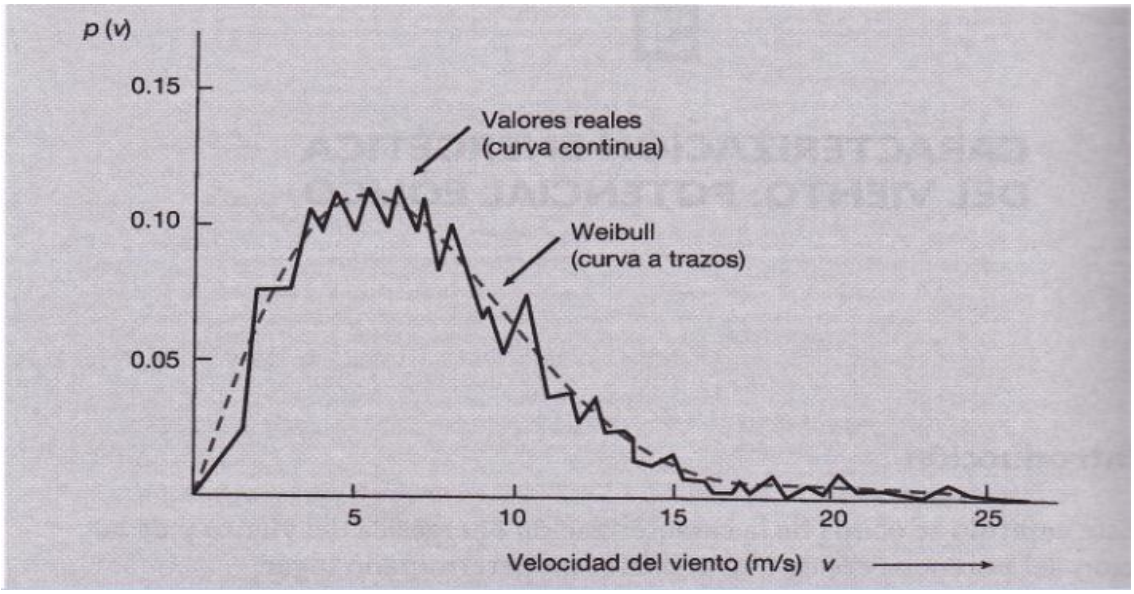


Fig. 2. 2. En línea continua, valores reales y en discontinua, el ajuste a una distribución de Weibull.

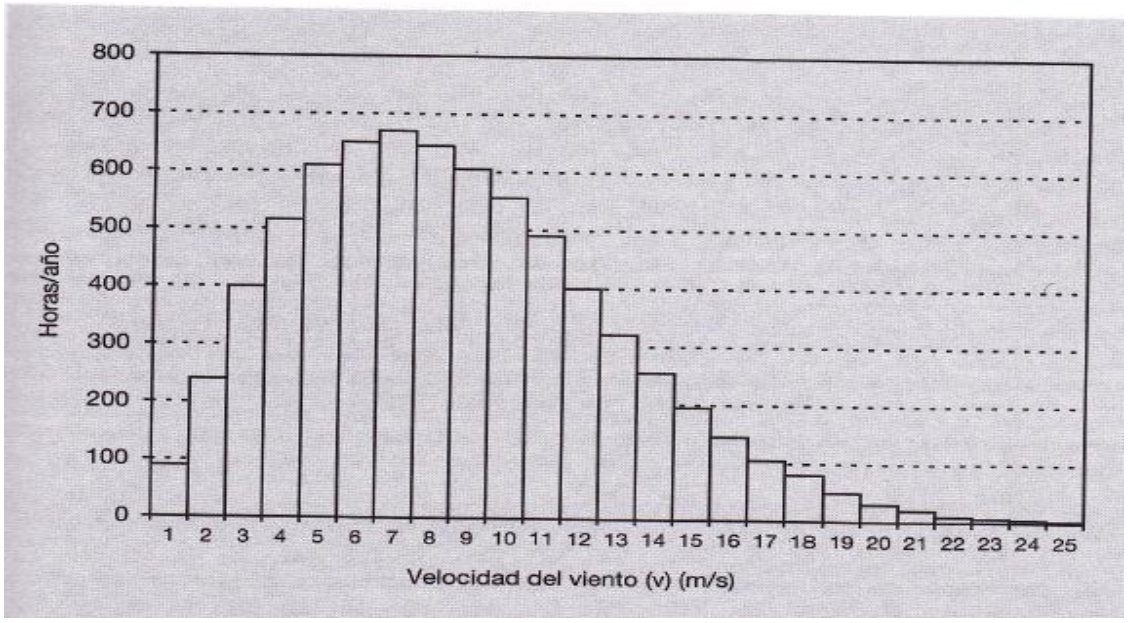


Fig. 2. 3. Ejemplo de histograma de velocidades del viento para un periodo anual (8760).

En la figura 2.3 se muestra un histograma real anual de las velocidades del viento, para que el lector pueda comprobar el aspecto del mismo y su gran similitud a la grafica de la figura 2.2 que muestra a la ley de Weibull.

A continuación se muestran algunas propiedades interesantes de la función de Weibull y que posteriormente se utilizarán.

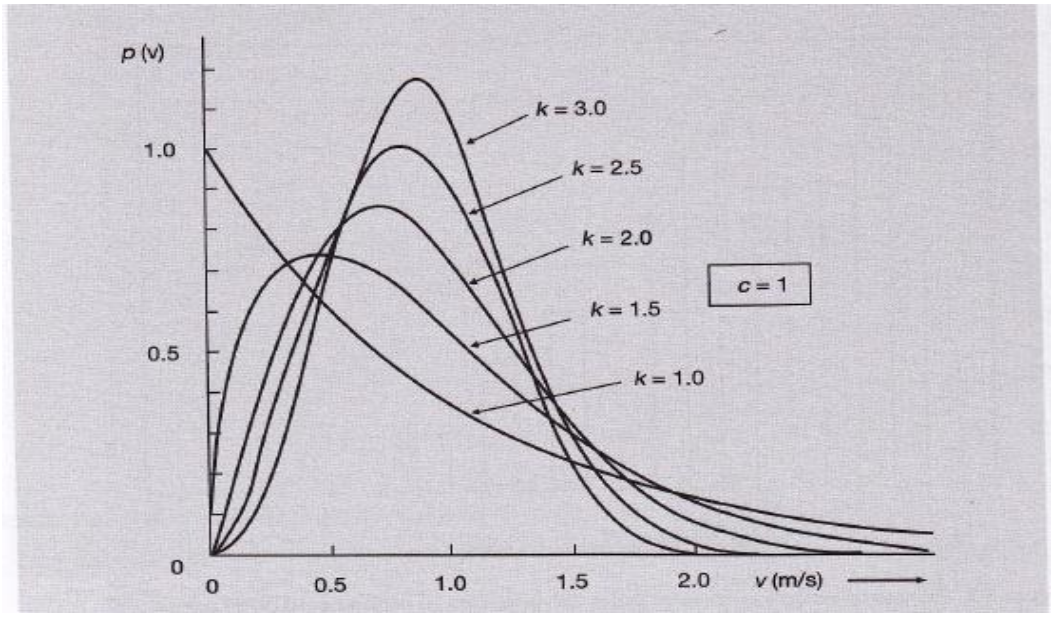


Fig. 2. 4. Función densidad de probabilidad de Weibull para la velocidad del viento.

La densidad de probabilidad presenta un máximo (moda) para una velocidad v_m dada por:

$$\frac{v_m}{c} = \left(\frac{k-1}{k}\right)^{1/k} \qquad \text{(Ecuación 2.22)}$$

v_m = velocidad media.

Solo a titulo ilustrativo, y sin que los valores que se presentan correspondan a valores reales de la velocidad del viento, en la figura 2.4 se muestra la forma de la densidad de probabilidad de Weibull para varios valores del parámetro *k*, para el caso *c* = 1

La frecuencia acumulada *F* para un valor de la velocidad *V* viene dada por:

$$F\ (v \leq V) = \int_0^v . p(v) d.v = 1 - e^{-\left(\frac{V}{c}\right)^k} \qquad \text{(Ecuación 2.23)}$$

La expresión anterior permite determinar la frecuencia acumulada de las velocidades que son menores o iguales que un valor *V*. Muchas veces se utiliza la distribución acumulada complementaria *F'* que permite calcular la frecuencia acumulada de las velocidades que son mayores o iguales a un valor *V*. La función *F'* viene dada por:

$$F'\ (v \geq V) = 1 - F\ (v \leq V) = e^{-\left(\frac{V}{c}\right)^k} \qquad \text{(Ecuación 2.24)}$$

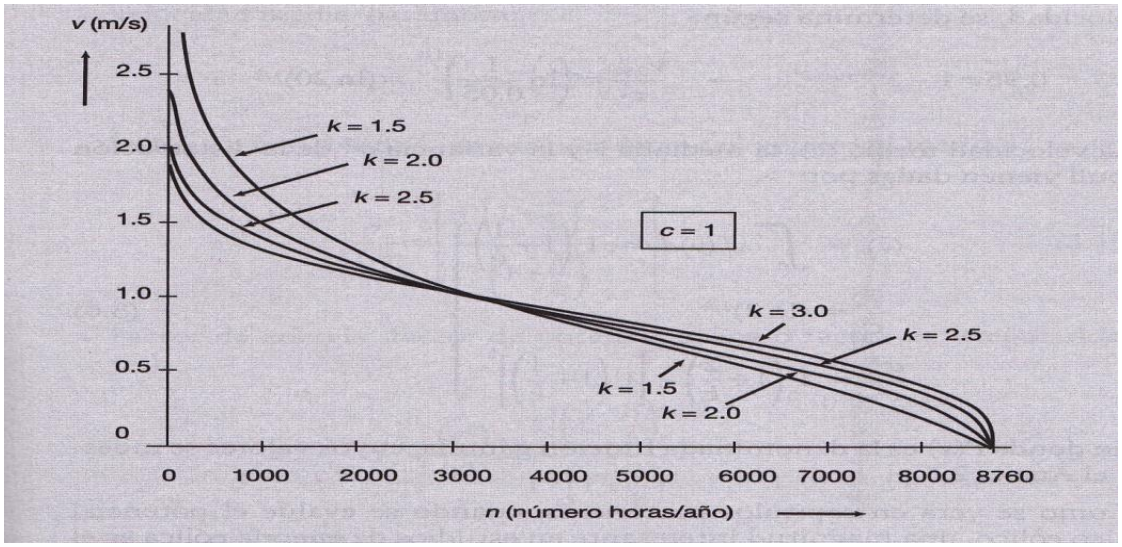


Fig. 2. 5. Curvas de duración de la velocidad del viento (correspondientes a las frecuencias relativas acumuladas ≪ igual o mayor que ≫) para una distribución de Weibull.

En la figura 2.5 se muestran, para c = 1, las curvas de duración de la velocidad para distintos valores de *k*, calculadas a partir de la expresión (2.24).

La probabilidad de la velocidad *v* se encuentra comprendida entre dos valores de la velocidad v_1 y v_2 vendrá dada por la expresión:

$$P\,(v_1 \leq v \leq v_2) = \int_{v_1}^{v_2} p(v)d.v = F(v_2) - F(v_1) = F'(v_1) - F'(v_2)$$

(Ecuación 2.25)

Cualquier percentil se puede calcular a partir de la expresión (2.23).

Como se verá posteriormente, cuando se evalúe el potencial energético eólico, una magnitud interesante en estudios de energía eólica es el valor medio del cubo de las velocidades del viento $\langle v^3 \rangle$, que no debe confundirse con el cubo de la velocidad media $\langle v \rangle^3$. Para una distribución de Weibull este valor viene dado por:

$$\langle v^3 \rangle = \int_0^\infty f(v)dv = c^3 \Gamma\left(1 + \frac{3}{k}\right)$$ (Ecuación 2.26)

Se define la *velocidad eficaz* v^* como aquella velocidad que elevada al cubo coincide con la media de los cubos de las velocidades.

El papel que juega la velocidad eficaz (v^*) en energía eólica es muy importante y se comentará en el apartado de relativo a la potencia eólica. La velocidad eficaz viene dada por:

$$v^* = \langle v^3 \rangle^{1/3}$$ (Ecuación 2.27)

A partir de las expresiones anteriores se tiene el siguiente conjunto de relaciones:

Velocidad media/ parámetro *c*:

$$\frac{\langle v \rangle}{c} = \Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right)$$ (Ecuación 2.28)

Índice de variabilidad (desviación estándar/ velocidad media):

$$\frac{\sigma}{\langle v \rangle} = \left[\frac{\Gamma\left(1+\frac{2}{k}\right)}{\Gamma^2\left(1+\frac{1}{k}\right)} - 1\right]^{1/2} \qquad \text{(Ecuación 2.29)}$$

Factor de energía, factor de potencia eólica o factor de irregularidad (F_e):

$$F_e = \frac{\langle v^3 \rangle}{\langle v \rangle^3} = \frac{\Gamma\left(1+\frac{3}{k}\right)}{\Gamma^3\left(1+\frac{1}{k}\right)} \qquad \text{(Ecuación 2.30)}$$

Relación entre la velocidad eficaz v^* y la velocidad media $\langle v \rangle$:

$$\frac{v^*}{\langle v \rangle} = F_e^{1/3} \qquad \text{(Ecuación 2.31)}$$

Relación entre la mediana y la media:

$$\frac{\tilde{v}}{\langle v \rangle} = \frac{(\ln 2)^{1/k}}{\Gamma\left(1+\frac{1}{k}\right)} \qquad \text{(Ecuación 2.32)}$$

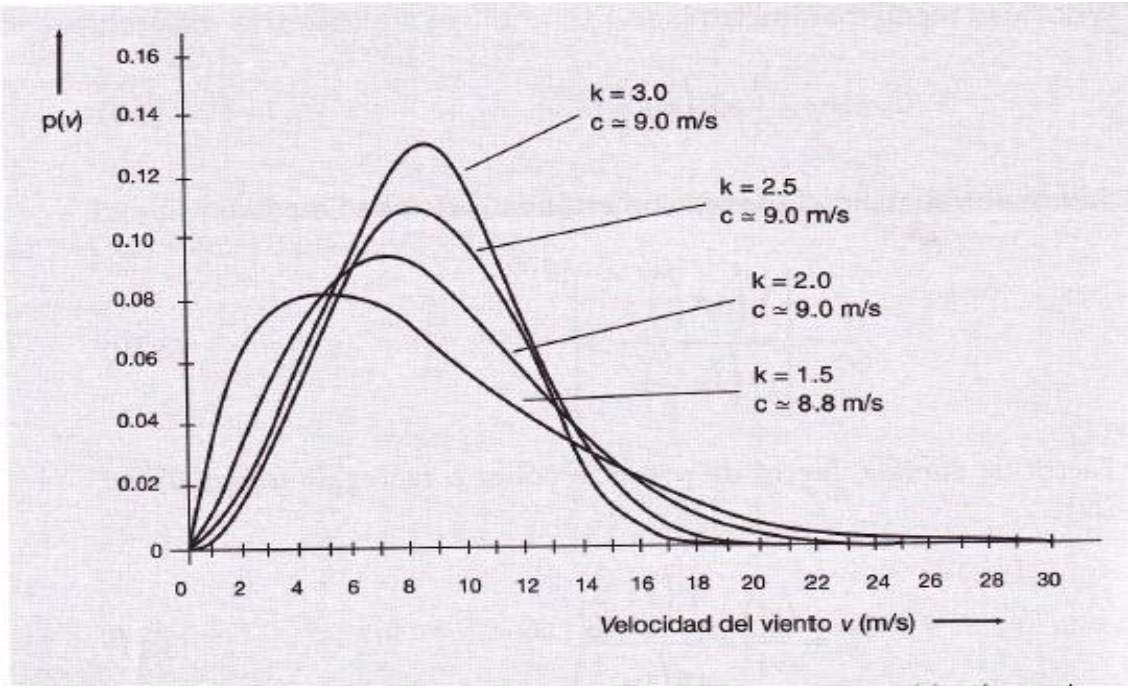


Fig.2. 6. Función densidad de probabilidad de Weibull para distintos valores del parámetro de forma (k). Todas las curvas de la familia corresponden a una velocidad media anual a 8 m/s.

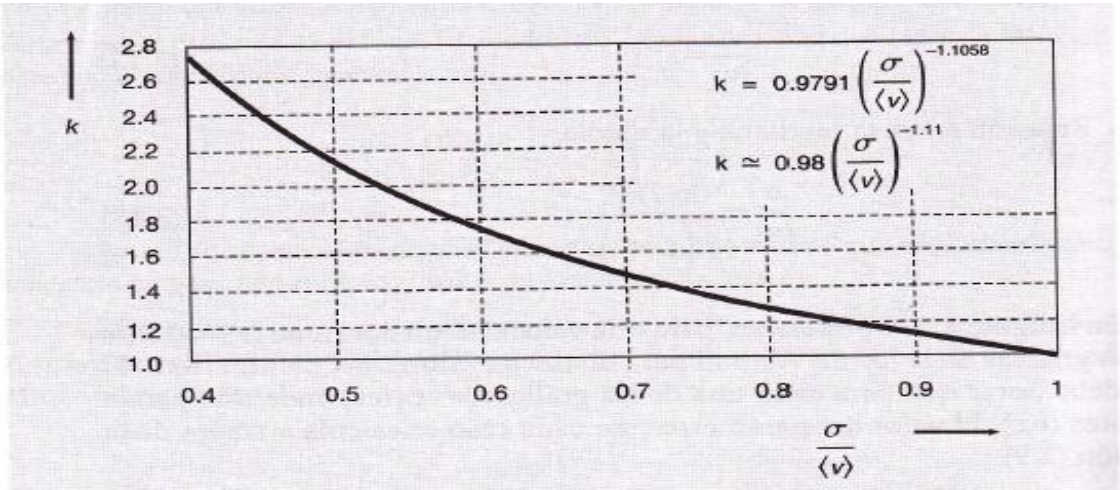


Fig. 2. 7. Variación del factor forma (k) de la ley de Weibull en función del índice de variabilidad de la distribución de velocidades de viento. (Índice de variabilidad = Desviación estándar/velocidad media anual).

En la figura 2.6 se presentan, para una velocidad media anual $\langle v\rangle = 8m/s$ diversas gráficas de la ley de Weibull para distintos valores del parámetro *k*. El lector debe notar que para una de las gráficas le corresponde una pareja de valores (*k*, *c*). El valor del parámetro c en cada caso se calcula a través de la expresión (2.28). Así mismo en la figura 2.7 se muestra la variación del parámetro *k* en función del índice de variabilidad

(desviación estándar/ media). Es importante hacer notar que cuanto menor es este índice mayor es el valor de *k*, es decir, cuanta menos dispersión presenten los datos de velocidad del viento respecto del valor medio de la misma mayor es el parámetro *k*.

Tabla 2. 1. Valores de relaciones del parámetro k para una distribución de Weibull.

K	$\langle v \rangle / c$	$\sigma / \langle v \rangle$	$\tilde{v} / \langle v \rangle$	$V_m / \langle v \rangle$	$F_e = \langle v^3 \rangle / \langle v \rangle^3$	$F_e^{1/3}$
1.2	0.941	0.837	0.783	0.239	3.99	1.59
1.4	0.911	0.724	0.844	0.448	3.03	1.45
1.6	0.897	0.640	0.887	0.604	2.48	1.35
1-8	0.889	0.575	0.917	0.717	2.14	1.29
2.0	0.886	0.523	0.939	0.798	1.91	1.24
2.2	0.886	0.480	0.956	0.857	1.75	1.21
2.4	0.886	0.444	0.968	0.901	1.63	1.18
2.6	0.888	0.413	0.978	0.934	1.53	1.15
2.8	0.890	0.387	0.985	0.959	1.46	1.13
3.0	0.893	0.363	0.991	0.978	1.40	1.12
3.2	0.896	0.343	0.996	0.993	1.36	1.11
3.5	0.900	0.316	1.001	1.010	1.30	1.09
4.0	0.906	0.281	1.007	1.027	1.23	1.07
5.0	0.918	0.229	1.012	1.042	1.15	1.05
6.0	0.928	0.194	1.014	1.046	1.11	1.04
7.0	0.935	0.168	1.014	1.046	1.08	1.03
8.0	0.942	0.148	1.014	1.044	1.06	1.02
9.0	0.947	0.133	1.014	1.042	1.05	1.02
10.0	0.951	0.120	1.013	1.040	1.04	1.01

Fuente: Villarrubia Miguel, Ediciones Ceac, 2004

En la tabla 2.1 se presentan los valores de las relaciones anteriormente definidas en función de los distintos valores de *k.* según las expresiones anteriormente expuestas y de la observación de la tabla 2.1, se concluye que para la distribución de Weibull quede definida, deben conocerse dos valores cualesquiera del conjunto (*k*, *c*, velocidad media, mediana, velocidad que hace máxima la función densidad y desviación típica). En adelante se indicará la forma de determinar la distribución de Weibull en función del conocimiento que se disponga de estos valores.

e. 1. 8. 1. RUGOSIDAD.

En las capas próximas al suelo, la velocidad del viento disminuye, produciéndose un efecto de cizallamiento del viento. La variación o gradiente de velocidad con respecto a la altura depende esencialmente de la rugosidad del terreno. Superficies lisas, como superficies de agua, terrenos llanos sin arbolado o llanuras nevadas, producen un gradiente suave, al contrario que superficies de gran rugosidad, como edificaciones

urbanas, terrenos muy irregulares o superficies boscosas. En la figura 2.1 se muestra el efecto de distintos tipos de terreno sobre el perfil vertical de la velocidad del viento.

Tabla 2.2 Rangos de rugosidad

1	Plana (playa, hielo, paisaje de nieve, océano)	α = 0,08 ÷ 0,12
2	Abierta (pasto corto, aeropuertos, tierra de cultivo vacía)	α = 0,14
3	Áspera (cultivos altos de hilera, arboles bajos)	α = 0,13 ÷ 0,16
4	Muy áspera (bosques y huertos)	α = 0,2
5	Cerrada (pueblos, suburbios)	α = 0,2 ÷ 0,26
6	Ciudad (centros de ciudades, espacios abiertos en bosques)	α = 0,25 ÷ 0,4

Fuente: Villarubia Miguel, Ediciones Ceac 2004

De la tabla 2.2, si se considera que el terreno donde se hará el emplazamiento de los equipos es predominantemente plano, con la presencia de algunos arbustos, el índice de rugosidad del terreno está entre 2 y 3, aproximando por la región critica 2.5.

La altura de la torre, debe ser elegida de tal manera que el rotor esté dispuesto en toda su dimensión al viento predominante del lugar de emplazamiento, para lo cual, debe tenerse en cuenta la altura de los obstáculos presentes y la influencia que estos pueden hacer sobre el aprovechamiento del recurso eólico, la figura 1.11 puede ayudar a hacer una buena elección de la altura del equipo.

Si se elige un equipo con una altura de torre de nueve metros, la altura del centro del rotor eólico del molino de viento se encuentra a 9.5 metros, procedemos a calcular la velocidad del viento a esa altura.

Donde h_1 y V_1 son la altura y velocidad del viento en las condiciones de trabajo del equipo y h_2 y V_2 son la altura y velocidad del viento en las condiciones estándar ó condiciones de referencia, en este caso del mapa de identificación eólica.

El molino se debe ubicar donde reciba la máxima cantidad de viento, tanto en duración como en velocidad. Esto significa en la práctica un sitio donde:

a) Este lejos de obstáculos (árboles y edificios altos).

b) Sobresalga lo suficiente de los obstáculos.

c) Reciba el viento predominante.

d) Se evite al máximo el viento turbulento.

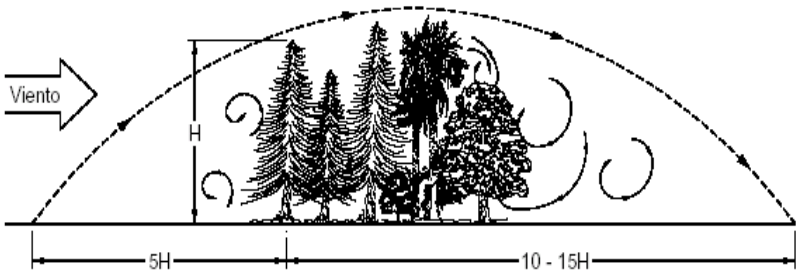


Figura. 2.8. Influencia de los obstáculos en la velocidad del viento.

En el sitio escogido la altura de la torre debe ser lo suficiente para que el rotor este totalmente en una corriente de viento uniforme, es decir por encima de un nivel donde no haya viento turbulento.

La figura 2.8 nos ilustran sobre la forma de salvar los obstáculos que puedan existir, ya sea colocando el molino lo suficientemente lejos de los obstáculos o dando la altura suficiente al rotor con una altura de torre que salve los obstáculos.

e. 1. 8. 2. VOLUMEN DE AGUA BOMBEADO

Una vez determinada los valores de k y c, se puede establecer la función de probabilidad de Weibull. En esta situación se puede entonces estimar la energía o el volumen de agua bombeado que produce una máquina eólica en el emplazamiento estudiado en un periodo de tiempo determinado, que es la expresión fundamental de la evaluación de potencial eólico.

El método más empleado realiza la estimación de la energía (aerogenerador) o el volumen de agua bombeada (aerobomba) que puede suministrar una turbina eólica de modo analítico o de modo grafico a partir de la curva de probabilidad de velocidades del viento p(v) (fig. 2.9) que da la probabilidad de ocurrencia o el estimado de tiempo que ocurre cada intervalo de velocidad y la curva de funcionamiento de la máquina que da la potencia suministrada o el volumen de agua que bombeado (fig.2.10) para cada intervalo de velocidad.

Con la curva de funcionamiento se puede hallar la función $C_p = C_p$ (v) y mediante la ecuación 2.11 se halla la potencia producida o el volumen de agua bombeado en el periodo de tiempo analizado. La potencia media producida multiplicada por el número de horas del intervalo de tiempo analizado da la energía producida.

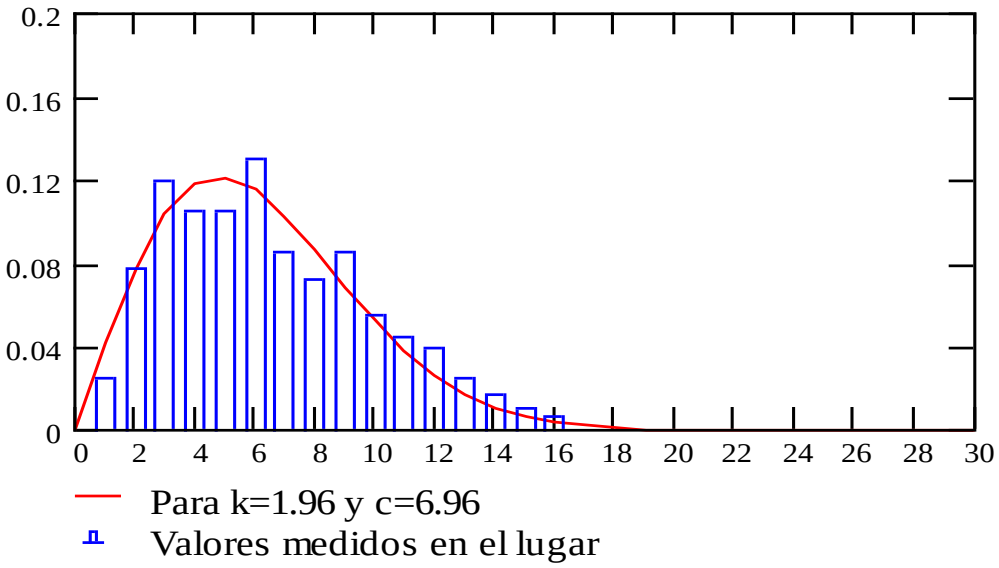


Figura 2.9 Distribución de Weibull superpuesta con el histograma de velocidades.
Fuente: www.enercon.de

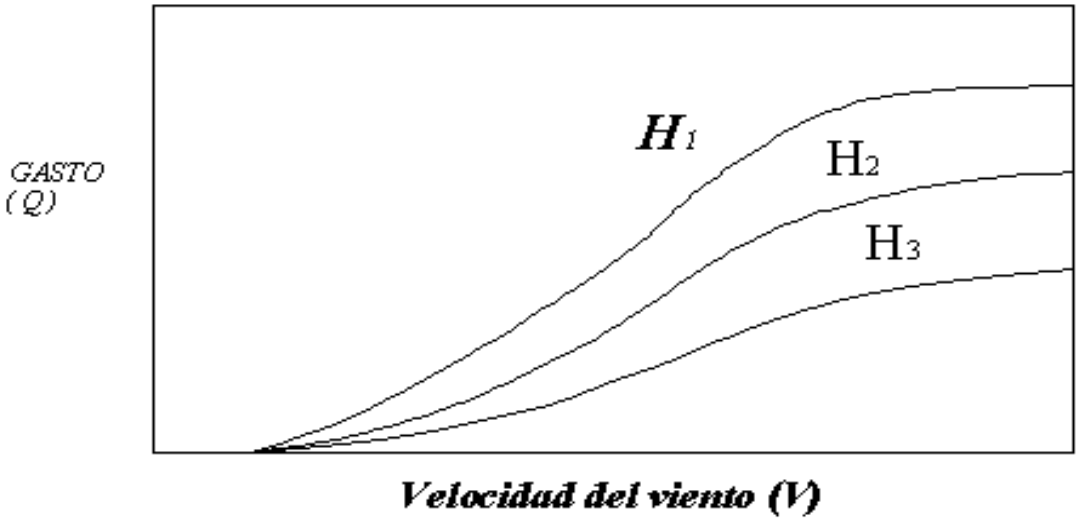


Figura 2. 10. Curvas de funcionamiento de un molino de viento.
Fuente: www.enercon.de

También el volumen de agua bombeado VAB se puede calcular mediante el histograma de velocidades y la curva de funcionamiento de caudal bombeado en función de la velocidad del viento (fig. 2.9), es decir,

Volumen de agua bombeado:

$$VAB = \Sigma . Q_i . T_i \qquad \text{(Ecuación 2.33)}$$

Donde:

Q_i = volumen de agua entregado para un rango de velocidades i

T_i = tiempo en base anual que la velocidad del viento se encuentra en el rango i que suele ser de 1 m/s.

e. 1. 8. 3. ESTIMACIÓN DE LA DEMANDA DE AGUA.

Tabla 2.3 Estimativo de Límites de capacidad hidráulica en Bombas Comerciales

Tipo de Aerobomba y Régimen de viento	**Energía hidráulica anual en** $kwh/_{año}$	**Energía hidráulica en** $m^4/_{año}$	**Energía hidráulica diaria en** $m^4/_{dia}$
Diámetro: 2 metros Velocidad promedio baja	50	18,500	51
Diámetro: 8 metros Velocidad promedio alta	9,000	3,300,000	9,200

Fuente: Fundamentos para el diseño y selección de aerobombas, Dr. Moreno Figueredo Conrado M.Sc. Canosa Díaz Túpac

Lo contenido en la Tabla 2.3 se debe interpretar como una estimación de la capacidad promedio, lo cual no implica que no se puedan desarrollar aerobombas mecánicas de mayores o menores diámetros a los allí estipulados.

En lo que respecta a las alturas de bombeo típicas, cuando se realiza bombeo directo de pozos o aljibes, se pueden encontrar profundidades típicas de algunos cuantos metros en pozos poco profundos, hasta profundidades que están entre 70 y 100 metros. Alrededor del mundo se encuentran algunas pocas instalaciones de sistemas de aerobombeo con profundidades mayores a los 100 metros.

Según la tabla este equipo puede suministrar 9.200 $m^4/día$, que para la altura de bombeo de 30 metros, la aerobomba puede suministrar cerca de 300 m^3 diarios de agua, capacidad suficiente para actividades de irrigación de cerca de 5 hectáreas.

En una sección más adelante, se presentan criterios de selección de aerobombas comerciales y su relación con la capacidad de abastecimiento de agua para una aplicación dada.

El primer paso en el diseño de cualquier sistema hidráulico consiste en estimar las necesidades del volumen de agua a bombear. El consumo diario de agua en diferentes

periodos del año debe ser estimado, además del crecimiento de este consumo en un futuro próximo, que debe ser igualmente satisfecho por el sistema diseñado. La estimación debe ser hecha teniendo en cuenta el consumo de agua doméstico y otras necesidades tales como riego, abasto de agua para el ganado y otros propósitos agrícolas y sociales si existieran.

Determinación de la demanda doméstica.- La forma tradicional de estimar la demanda doméstica de agua es multiplicar el consumo per cápita por el número de personas al final del período de diseño. El consumo per cápita variará en dependencia con los servicios domésticos a satisfacer y con la estación del año.

La demanda de agua a la población dependerá del número de habitantes. En el caso de comunidades con menos de 2000 habitantes, la demanda total es de 300 Litros/Persona/Día (LPD), siendo la distribución como sigue:

Tabla 2.4. Distribución de la demanda en LPD

Consumo domestico	**Uso comercial**	**Uso público**	**Industria local**	**Otros usos**	**Sumatoria**
145	87	44	15	9	300

Fuente: Fundamentos para el diseño y selección de aerobombas, Dr. Moreno Figueredo Conrado M.Sc. Canosa Díaz Túpac

Para aquellos asentamientos poblacionales con menos de 500 personas el consumo doméstico se reduce a 50-100 LPD.

Para viviendas aisladas el consumo será de unos 40 LPD.

La población futura se puede calcular a partir de la población actual y asumiendo una tasa de crecimiento anual de la población (usualmente 3 – 6 %) y un período de diseño (a menudo 10 – 20 años) el valor del período de diseño es el tiempo en que no se ampliará el sistema. En otras palabras si otra bomba va a ser instalada dentro de 10 años, entonces el período de diseño es de 10 años, o si se estima que el sistema de bombeo será útil por 20 años, este será el período de diseño.

Determinación de la demanda para usos sociales.- El consumo de las necesidades sociales comprende los suministros de agua para escuelas, hospitales, centros de recreación y otros y otros usos sociales, en este caso igualmente debe tenerse en cuenta

el crecimiento futuro de estas demandas sobre la base de estimaciones locales. Algunos valores útiles se muestran en la Tabla 2.5.

Tabla 2.5. Consumos para servicios comunales.

CONSUMIDORES	LPD (litros/persona/día)
Guarderías y Pre-escolares por un niño	110
Escuelas (primarias, secundarias, pre – universitarios por un alumno)	60
Escuelas talleres por un alumno	110
Hospital por una cama	300-680
Policlínicas por visitantes	30
Albergues con baño central	150
Albergue con un baño para dos aptos por un visitante	190
Oficinas para un empleado	20-50
Cafeterías para un visitante	20
Restaurante para un visitante	50
Cine por un puesto	20
Teatro por un puesto	30
Casas de cultura por visitantes	40
Campamento militar por un soldado	100

Fuente: Fundamentos para el diseño y selección de aerobombas, Dr. Moreno Figueredo Conrado M.Sc. Canosa Díaz Túpac

Demanda de agua para la ganadería.- El cálculo de la demanda de agua para la ganadería seguirá un procedimiento similar al doméstico. Para la ganadería el consumo de agua puede ser estimado a partir del número de animales y el consumo por animal por estación del año o por mes. Es necesario tener en cuenta la tasa de crecimiento de la población ganadera para estos cálculos.

En lo concerniente al ganado, las necesidades varían según razas, época, duración del estabulado, etc. (Tabla 2.6).

Tabla 2.6 Consumo de agua por animal.

TIPO DE ANIMAL	CONSUMO DIARIO (litros/cabeza)
Vaca en producción	200
Vaca	120
Ternero	30
Añojo	60
Novilla	90
Toro	120
Buey	120
Cabra	5
Caballo de trabajo	80
Yegua madre	75
Puerca madre	80
Puerco	40
Oveja	15
Aves	2

Fuente: Fundamentos para el diseño y selección de aerobombas, Dr. Moreno Figueredo Conrado M.Sc. Canosa Díaz Túpac

Como los molinos de viento se seleccionan para trabajar por 5 años o más, la tasa de crecimiento de la población local (personas y/o animales) debe ser tenida en cuenta en el momento de estimar la demanda de agua para uso doméstico, social y ganadería .La Tabla 2.7 puede resultar útil para calcular el incremento de la población para varias tasas de crecimiento.

Tabla 2.7 Incremento de la población para varias tasas de crecimiento.

Tasa de crecimiento anual	% de incremento La población		
	En 5 años	En 10 años	En 20 años
1 %	5	10	22
2 %	10	22	48
3 %	16	34	81
4 %	22	48	119
5 %	28	63	265
6 %	34	79	321

Fuente: Fundamentos para el diseño y selección de aerobombas, Dr. Moreno Figueredo Conrado M.Sc. Canosa Díaz Túpac

Demanda de para el riego.- La cantidad de agua necesaria para el riego de una determinada parcela de tierra depende de varios factores, los más importantes son:

- El tipo de cultivo.
- Las características del clima.
- El tipo y condiciones de suelo.
- La topografía del terreno.
- La proporción de agua suministrada que es realmente aprovechada por las plantas.
- La eficiencia del método de transportación de agua, que tiene en cuenta las pérdidas por fugas en tuberías mangueras, etc.

La cantidad de agua no va ser constante en todos los meses. En algunos períodos, el agua de lluvia puede ser suficiente, para suministrar toda el agua necesaria para los cultivos. Como los diferentes cultivos crecen en diferentes épocas, sus requerimientos de agua serán también diferentes. El diseño de un sistema de bombeo para el riego debe por tanto tener en cuenta todos los factores mencionados anteriormente. A modo de

ejemplo en la Tabla 4.5 se presenta la demanda diaria de agua por planta de plátano fruta en las provincias centrales, usando el riego localizado, cuya eficiencia es de un 90 %.

e. 1. 9. CÁLCULO APROXIMADO DEL DIAMETRO DEL ROTOR

La potencia que requiere una masa de agua para ser elevada a una altura H es:

$$P = \rho_{agua}\, g\, H\, Q \qquad \text{(Ecuación 2.34)}$$

Donde:

P = potencia requerida por el agua, W

ρ_{agua} = densidad del agua, kg/m^3, se toma igual a 1000 kg/m^3.

g = aceleración de la gravedad, m/s^2.

H = altura total de bombeo, m.

Q = gasto volumétrico, m^3/s.

Como ya se sabe la potencia eólica aprovechable se determina por la ecuación.

$$\frac{\overline{Pa}}{A} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \overline{v^3} \cdot \overline{Cp} \qquad \text{(Ecuación 2.35)}$$

Si el coeficiente de potencia Cp se multiplica por la eficiencia mecánica del molino y la eficiencia de la bomba, el resultado es la eficiencia total del sistema η. Sustituyendo la velocidad cúbica media por el cubo de la velocidad media multiplicada por el FPE e introduciendo la eficiencia total del sistema se obtiene:

$$\overline{Pa} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \overline{v}^3 \cdot FPE \cdot A \cdot \eta \qquad \text{(Ecuación 2.36)}$$

Dónde:

FPE = Factor Patrón de Energía.

Ŋ= Eficiencia total del sistema

Igualando la potencia requerida por el agua (ecuación. 2.34) y la potencia que debe entregar el molino de viento, y despejando el área del rotor, A, se obtiene:

$$A = \frac{\rho_{agua} \cdot g \cdot H \cdot Q}{\frac{1}{2} \cdot \rho_{aire} \cdot \bar{v}^3 \cdot FPE \cdot \eta} \qquad \text{(Ecuación 2.37)}$$

Si en la fórmula anterior se sustituye la densidad del agua por 1000 kg/m^3 y se considera que el gasto Q se obtuvo en m^3/día, una variante más cómoda de la fórmula anterior sería:

$$A = \frac{g \cdot H \cdot Q}{3.6 \cdot 24 \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho_{aire} \cdot \bar{v}^3 \cdot FPE \cdot \eta} \qquad \text{(Ecuación 2.38)}$$

El área del rotor se calcula como:

$$A = \frac{\pi}{4} \cdot D^2 \qquad \text{(Ecuación 2.39)}$$

Donde D es el diámetro del rotor. Despejando se obtiene:

$$D^2 = \frac{g \cdot H \cdot Q}{3.6 \cdot 24 \frac{\pi}{4} \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho_{aire} \cdot \bar{v}^3 \cdot FPE \cdot \eta} \qquad \text{(Ecuación 2.40)}$$

Esta fórmula puede ser simplificada de la siguiente manera:

$$D = \sqrt{\frac{C \cdot H \cdot Q}{\bar{v}^3 \cdot FPE}} \qquad \text{(Ecuación 2.41)}$$

Dónde C es una constante. Considerando g = 9.81 m/s^2 , la densidad del aire 1.2 kg/m^3 y η = 8 %, se obtiene el valor de C = 3.01.

Una situación que puede presentarse es que sólo se conozca la velocidad media anual del viento en el sitio donde se va instalar el molino de viento, en este caso el procedimiento a seguir para calcular el área de rotor necesaria se realizará de la siguiente forma:

En este caso se puede suponer k=2 esto implica que FPE = 1.91 y este valor se puede sustituir en la ecuación (2. 33) y la velocidad media anual se sustituye en el lugar de la velocidad media.

e. 1. 10. CÁLCULO DE LA BOMBA.

Las bombas que se utilizan para el bombeo de agua son por lo general de dos tipos, bombas centrífugas o bombas de desplazamiento positivo, entre estas últimas se encuentran las bombas reciprocantes o de pistón. Las bombas que serán objeto de estudio seguidamente son las bombas de pistón, ya que estas son las que se usan más comúnmente en los molinos de viento.

En la bomba de pistón, este es movido en forma oscilatoria vertical, por el vástago de la bomba. Cuando el pistón se mueve hacia abajo la válvula del pistón se abre permitiendo que el agua pase de la parte inferior a la superior del pistón. Cuando el pistón se mueve hacia arriba, la válvula del pistón se cierra y la válvula de pie abre. El agua contenida encima del pistón es impulsada hacia arriba a través del tubo de descarga mientras que al mismo tiempo se crea una succión debajo del pistón que hace que el agua penetre a través de la válvula de pie. Este ciclo se repite periódicamente cada vez que el mecanismo de transmisión da una vuelta. En la figura 2. 16 se muestra esquemáticamente este principio de trabajo.

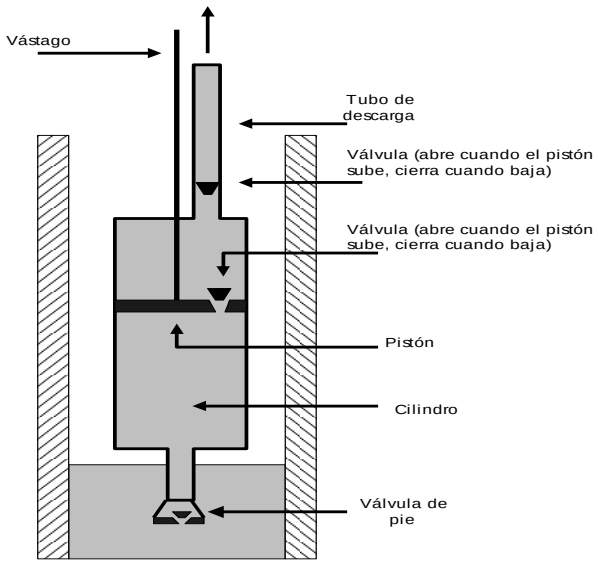


Figura 2.11 Esquema de una bomba de pistón
Fuente: Fundamentos para el diseño y selección de aerobombas, Dr. Moreno Figueredo Conrado M.Sc. Canosa Díaz Túpac

Una bomba de pistón debe ser diseñada de forma tal que garantice la cantidad de agua demandada lo más eficientemente y barato posible. El gasto de una bomba de pistón se determina por las dimensiones del cilindro y el número de carreras del pistón. Si el pistón trabaja con solamente uno de sus lados como el de la figura 2. 16 (bomba de simple efecto) la cantidad de líquido, en m^3/h, suministrada por la bomba es igual a:

$$Q = \frac{\pi}{4} \cdot Dp^2 \cdot S \cdot 60 \cdot n \cdot \eta_v \qquad \text{(Ecuación 2.42)}$$

Donde:

Q = Gasto volumétrico m^3/s

Dp = diámetro del pistón, m

S = carrera del pistón.

n = número de carreras dobles de pistón, por minutos

η_v = rendimiento volumétrico, comúnmente entre 0.7 y 0.97

De lo anterior se deduce que al dimensionar la bomba hay que calcular el diámetro del pistón Dp y la carrera S.

Antes de entrar al cálculo de estas dos dimensiones principales, es necesario determinar el número de ciclos o emboladas por minuto, *n*.

e. 1. 11. DETERMINACIÓN DEL NÚMERO DE CICLOS POR MINUTO

Para la determinación del número de ciclos por minutos, n, del pistón, es necesario conocer dos parámetros:

- La velocidad de rotación del rotor, n_r
- La relación de transmisión de la caja reductora.

La velocidad de rotación del rotor depende del diseño aerodinámico de éste, es decir del tipo de rotor y del número de palas. Como es lógico pensar una máquina eólica con pocas palas (2-3 palas) debe girar a más alta velocidad que una máquina con 18, si

ambas tienen el mismo diámetro. La velocidad tangencial de la punta de la pala es U, definida por:

$$U = \pi \cdot d \cdot \frac{n}{60} \qquad \text{(Ecuación 2.43)}$$

Tomando como base esta velocidad y la velocidad del viento, v, se define un factor adimensional, conocido como velocidad específica de la punta λo:

$$\lambda o = \frac{U}{v} \qquad \text{(Ecuación 2.44)}$$

Donde: U = velocidad tangencial de la punta de la pala.

En la figura 2. 12 se presenta la relación que existe para diferentes tipos de rotores entre el coeficiente de potencia Cp. y λo.

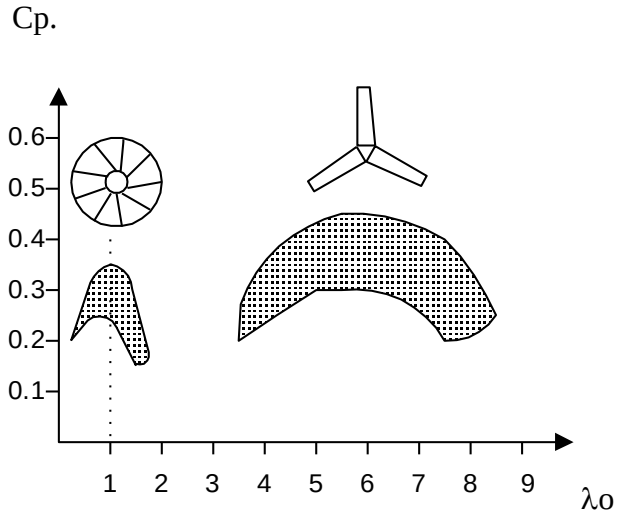


Figura 2.12 Dependencia de Cp vs λo para diferentes números de aspas.
Fuente: Fundamentos para el diseño y selección de aerobombas, Dr. Moreno Figueredo Conrado M.Sc. Canosa Díaz Túpac

En la figura se muestra la dependencia Cp. (λo) para dos tipos de rotores, el multipala y un rotor de 3 palas solamente. De esta figura se pueden sacar las siguientes conclusiones:

- Para cada tipo de rotor existe un valor de Cp máximo, con su correspondiente valor de λo, a este valor de λo se le llama velocidad específica de diseño, λd.

- El máximo valor alcanzable Cp hasta este momento es de alrededor de 0.45 en los rotores de 3 palas. Normalmente un valor de Cp entre 0.3 y 0.35 puede ser fácilmente alcanzable en los rotores de molinos multipalas tradicionales, para un valor de λd = 1.

Conocida la velocidad específica de diseño λd, de las ecuaciones. (2. 43) (2. 44) se despeja n_r:

$$n_r = \frac{60 \cdot v_d \cdot \lambda_d}{\pi \cdot D} \text{ [rpm]} \qquad \text{(Ecuación 2.45)}$$

Donde:

n_r = velocidad de rotación del rotor.

Vd = velocidad de diseño.

La velocidad de diseño se define como la velocidad para la cual se alcanza el Cp máximo. Los valores recomendables de la velocidad de diseño se encuentran entre.

$$V_d = (1.5 – 2.0)\,\bar{v} \qquad \text{(Ecuación 2.46)}$$

Siendo $\bar{v}$ la velocidad media del mes de diseño.

Conociendo la velocidad media del mes de diseño, a través de las ecuaciones (2.41) y (2.40) se determina v_d y n_r respectivamente. Los ciclos por minuto, n, del pistón se calcula mediante el valor de la relación de transmisión, i:

$$i = \frac{n_r}{n}$$

Es decir:

$$n = \frac{n_r}{i} \qquad \text{(Ecuación 2.47)}$$

e. 1. 12. CÁLCULO DEL DIÁMETRO DEL PISTÓN DE LA BOMBA.

Igualando la potencia requerida para el bombeo (ecuación 2. 29) con la entregada por la máquina (ecuación 2. 31) y sustituyendo el gasto entregado por la bomba de pistón (ecuación 2. 37). Se despeja el producto:

$$S \cdot Dp^2 = \frac{30 \cdot \rho_{aire} \cdot \bar{v}^3 \cdot FPE \cdot \eta \cdot D^2}{\rho_{agua} \cdot n \cdot \eta_v \cdot H \cdot g} \qquad \text{(Ecuación 2.48)}$$

En este punto se tienen dos variables independientes, que son el diámetro del pistón y la carrera, por lo que se hace necesaria otra ecuación que nos permita relacionar los términos en el producto despejado. En la práctica la carrera del pistón viene predeterminada por el diseño de la transmisión y por lo tanto sólo se puede variar el diámetro del pistón.

En general una bomba con una carrera larga y un diámetro pequeño tiene una eficiencia volumétrica mayor que una bomba con una carrera corta y un diámetro grande si ambas manejan la misma cantidad de agua en cada carrera. La carrera corta incrementa la carga total de bombeo y disminuye el gasto de agua entregado.

En la selección de la longitud de carrera optima para un diámetro determinado influyen muchos factores por lo que tomarán las recomendaciones hechas por uno de los fabricantes de mayor renombre, Airmotor. En la Tabla 2. 8 se dan las carreras recomendadas por el fabricante para diferentes diámetros del rotor.

Tabla 2. 8 Carreras recomendadas para diferentes rotores

Diámetro (pies)	Carrera larga (pulg.)	Carrera corta (pulg.)
6	5	$3\,{}^{1}/_{4}$
8	$7\,{}^{1}/_{8}$	$5\,{}^{1}/_{2}$
10	$9\,{}^{1}/_{4}$	$7\,{}^{1}/_{4}$
12	$11\,{}^{1}/_{4}$	$8\,{}^{1}/_{4}$

Fuente: Fundamentos para el diseño y selección de aerobombas, Dr. Moreno Figueredo Conrado M.Sc. Canosa Díaz Túpac

Con los datos de la tabla anterior se puede entonces determinar el diámetro del pistón a partir de la ecuación (2.42). Una vez hecho el cálculo del diámetro del pistón se busca

en los catálogos una bomba comercialmente disponible, con dimensiones cercanas a la calculada. Se recomienda elegir la bomba con diámetro del pistón más cercano al calculado, por defecto.

Eligiendo un cilindro con una longitud de unos 50 mm más grande que la carrera del pistón quedaría la bomba completamente determinada.

e. 1. 13. CÁLCULOS PARA LA CONSTRUCCIÓN DE LA AEROBOMBA.

La construcción de una aerobomba implica todo un proceso de modelación matemática, cuya formulación se la ha determinado en el desarrollo del capítulo anterior.

El objetivo de este procedimiento es ofrecer la información necesaria para diseñar y construir un sistema de bombeo eólico, para satisfacer las necesidades de agua a una determinada zona. En este capítulo se desarrolla el proceso paso a paso y se presentan las tablas y gráficos necesarios para los cálculos. Al finalizar, el usuario de este documento debe ser capaz de:

- Realizar totalmente el diseño y construcción de un sistema de bombeo eólico.
- Estimar el costo del sistema y compararlo con otras opciones.

En el desarrollo de este proceso no se incluirán los aspectos teóricos pues han sido tratados en los capítulos anteriores y solamente se harán referencia a estos.

El proceso, objeto de análisis puede ser aplicado tanto para aerobombas mecánicas como para sistemas eólo-eléctrico de bombeo.

Por ser el molino multipala tradicional el más difundido en nuestro país, y el que actualmente se fabrica, el diseño, calculo y construcción se aplicarán para este tipo de máquina.

e. 1. 13. 1. CÁLCULO APROXIMADO DEL DIÁMETRO DEL ROTOR.

- **Velocidad y presión del viento.**

La velocidad del viento ha sido medida previamente con un anemómetro en el sitio preestablecido para la colocación de la aerobomba, la cual nos dio una lectura promedio de 3m/s.

La presión ejercida por el viento, se la determina de acuerdo a la velocidad del viento (V), densidad del aire (ρ), y la gravedad (g) (estándar):

En dónde:

$$P_v = \rho \cdot V^2 / 2g \qquad \text{(Ecuación 2.49)}$$

Según los siguientes datos obtenemos:

DATOS:

ρ = 1, 013 Kg. / m³

V= 2, 8 m/s

g = 9, 8 m/s²

P_v =?

P_v= 1.013 Kg. / m³ · (3 m/s)²/ 2 · 9,8 m/s²

P_v= 1.013 Kg. / m³ · 0, 46 m

P_v= 0,465 Kgf / m²

La fuerza ejercida por el viento (F_v), se la obtiene de la presión (p_v) y el área de la aspa (A_a).

$$F_v = P_v \cdot A_a \qquad \text{(Ecuación 2.50)}$$

DATOS:

P_v= 0,465 Kgf / m²

X A_a= 7, 2 m²

F_v=?

F_v= 0,465 Kgf / m² · 7, 2 m²

F_v= 2, 88 Kgf

El diámetro del rotor lo calculamos mediante la siguiente fórmula: (Ecuación 2.41)

$$D = \sqrt{\frac{C \cdot H \cdot Q}{\bar{v}^3 \cdot FPE}}$$

Datos:

H= 6m

C= 3,01

Q= $12m^3/día$

$\bar{v}$= $2m/s$

FPE= 1, 91

$$D = \sqrt{\frac{C \cdot H \cdot Q}{\bar{v}^3 \cdot FPE}}$$

$$D = \sqrt{\frac{3{,}01\ .6m\ .12m^3/dia}{2^3.\ 1{,}91}} = \sqrt{\frac{216{,}72}{15{,}28}} = 3{,}765\text{m}$$

D ≈ 4m

e. 1. 13. 2. CÁLCULO DE LOS MECANISMOS DE TRANSMISIÓN DEL MOVIMIENTO.

- **ASPAS.**

El área del aspa se la determina con la siguiente fórmula:

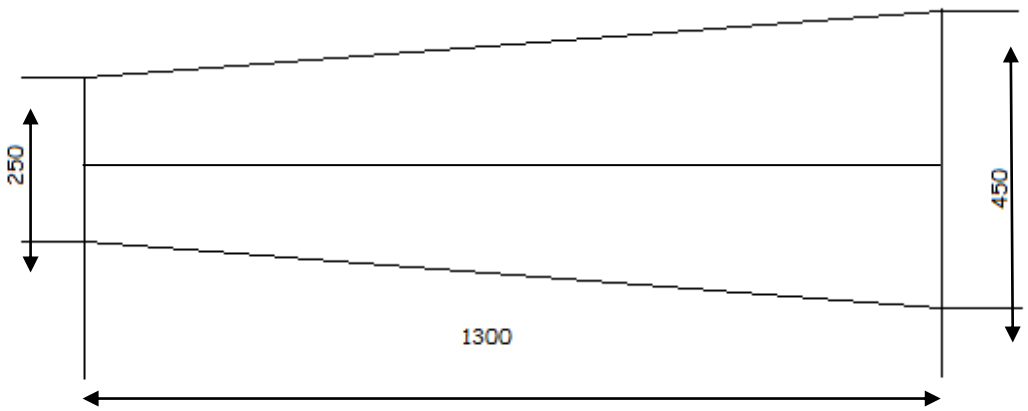
$$A = a + b / 2 \cdot h \qquad \text{(Ecuación 2.51)}$$

A = 0,45m + 0,25m/ 2 x 1,30m

A = 0,70m / 2,6 m

A = 0,269m²

Los datos de a, b y h son condiciones de diseño.



- **CÁLCULO DEL ÁRBOL DEL ROTOR DE LA AEROBOMBA.**

El árbol del rotor sostiene al elemento giratorio (rotor) y transmite el momento torsor que proviene del rotor, por lo que está cargado por los esfuerzos tangenciales generados por estos momentos torsores. El árbol además está cargado por momentos flectores por lo que también soporta esfuerzos normales.

El árbol va acoplado a la manzana del rotor y va apoyado en un rodamiento antes de conectarse con el sistema de transmisión de movimiento biela manivela, por lo que soporta el momento de rotación transmitido por el rotor y las fuerzas que actúan sobre el rotor; es decir, el peso del rotor, el empuje axial del viento y el momento de las fuerzas giroscópicas. En especial, este último juega el papel principal y se debe comprobar la tensión de flexión provocada por su acción.

Para el diseñar el eje, se debe considerar las fuerzas o cargas que actúan en el mismo las cuales son las siguientes y se muestran en la figura 33.

- La fuerza de empuje (Pw)
- Mw: es el momento flector debido a fuerza de empuje Pw.
- El momento giroscopio Mz.
- Momento flector Mp debido al peso de las palas.
- Momento torsor M_o

Flexión de la pala en el plano de rotación X-Z debido al peso propio en la posición horizontal que genera el momento (Mp).

Este momento flector Mp debido al peso de las palas, se genera cuando la pala se encuentra en posición horizontal, tal como se muestra en la figura xx.

Finalmente, el momento Mp,

$$Mp = P_g Y \qquad \text{(Ecuación 2.52)}$$

En donde:

Pg: es el peso de la pala

Y: es la distancia desde el plano A-A, hasta el centro de gravedad de la pala.

Para determinar el peso de la pala se multiplica la masa de la misma por la acción de la gravedad.

$$P_g = \text{mp (g)} = 8,46 \text{ kg } (9,81\frac{m}{s^2}) = 82,99\text{N}$$

$$M_p = 82,99\text{N } (0,833\text{m}) = 69,13\text{Nm}$$

Flexión de la pala en el plano X-Z por acción del momento de rotación (M_o).

Por la acción del momento de rotación se crea por el efecto de la acción sobre la pala las fuerzas aerodinámicas en el plano de rotación X-Z. El punto de aplicación de estas fuerzas aerodinámicas, denominadas P_o, se encuentran a una distancia de alrededor de 0,7R del eje de rotación.

En tal sentido, el máximo valor de la fuerza P_o, se encuentra de forma aproximada partiendo de la magnitud del máximo momento de rotación, en cual puede aparecer cuando el rotor trabaja a plena carga con viento fuerte. Pero sin entrar en acción el seguro contra ráfagas fuertes que frenará el rotor a una velocidad de alrededor de Vp=20ms.

La potencia P, transmitida por un par constante M_o, que gira a una velocidad angular constante ω, está dada por la siguiente ecuación:

$$P = M_o \omega \qquad \text{(Ecuación 2.53)}$$

En donde:

P: es la potencia del aerogenerador arrojadas por la corrida del programa empleado para la selección del perfil de alabe.

M_o: es el momento torsor.

ω: es la velocidad rotación máxima (ω_{max}).

Para encontrar el momento torsor se despeja de la ecuación anterior, queda la siguiente ecuación.

$$M_o = \frac{P}{\omega} = \frac{1{,}78kW}{48{,}17\frac{rad}{s}} = 36{,}91\text{Nm}$$

Sin embargo, este momento es total y se necesita el momento generado por una sola pala el cual se determinó de la siguiente forma:

$$M'_o = \frac{M_o}{24} = 1{,}54\text{Nm}$$

Este momento M'_o genera la fuerza P_o, que es la resultante de las fuerzas aerodinámicas actuantes en el plano de rotación en el mismo lugar donde actúa la fuerza resultante de la fuerza de empuje axial. Por lo tanto, se calcula a través de la siguiente expresión:

$$P_o = \frac{M'_o}{0{,}7R} = 2{,}2\text{N} \qquad \text{(Ecuación 2.54)}$$

Mientras que el momento para debido a para el plano A-A, es el siguiente:

$$M_{AA} = P_o(0{,}7R - r_o)$$

$$M_{AA} = 2{,}2[0{,}7(1{,}45m) - 0{,}11m] = 1{,}991Nm$$

Todas estas fuerzas o cargas se deben considerar al momento de dimensionar el diámetro del eje rotor. Para este diseño se va analizar la acción de los momentos flectores, la acción de los momentos torsores y la combinación de los ambos. A continuación se calcula el diámetro del eje.

- **CÁLCULO DEL EJE A FLEXIÓN.**

Para el cálculo de diámetro del eje del rotor por flexión se parte de la siguiente expresión.

$$\sigma max = \sigma adm = \frac{4M_e}{\pi * r^3} = \frac{32\ M_e}{\pi *\ d^3} \qquad \text{(Ecuación 2.55)}$$

Despejado el diámetro de la ecuación anterior se obtiene:

$$d \geq \sqrt[3]{\frac{32\ M_e}{\pi * \sigma_{max}}}$$

Dónde:

Me: momento flector equivalente en la sección del eje (Nm).

σadm: esfuerzo normal admisible por flexión (MPa).

El esfuerzo admisible, es aquel nivel de esfuerzo que puede desarrollarse en un material, al tiempo que asegura que el miembro soporta la carga sea seguro; es decir:

$$\sigma adm = \frac{Resistencia\ de\ material\ (Sy;Sut)}{Factor\ de\ seguridad\ (N)}$$

El esfuerzo de diseño, se especifica a través de la siguiente tabla.

Tabla 3.1. Criterios para esfuerzos de diseños.

Forma de Carga	Material Dúctil	Material Quebradizo
Estática	$\sigma d = \frac{Sy}{2}$	$\sigma d = \frac{Su}{6}$
Repetida	$\sigma d = \frac{Sy}{8}$	$\sigma d = \frac{Su}{10}$
De impacto o Choque	$\sigma d = \frac{Sy}{12}$	$\sigma d = \frac{Su}{15}$

Fuente: R.L. Mott.

El material de eje rotor es un acero AISI 1040, estirado en frio cuya resistencia a la cedencia del material es Su=393MPa y el factor de seguridad es 8 debido a que la carga es repetida. En base a la tabla anterior el esfuerzo de diseño es:

$$\sigma adm = \frac{S_y}{N} = \frac{393MP_a}{8} = 49{,}13MPa \qquad \text{(Ecuación 2. 56)}$$

Mientras que el momento equivalente se determina a través de la siguiente fórmula:

$$M_e = \frac{1}{2}(M + Te) \qquad \text{(Ecuación 2.57)}$$

Dónde:

M: es el momento resultante, se determina a través de la siguiente ecuación:

$$M = \sqrt{(M_{MY})^2 + (M_{XZ})^2} \qquad \text{(Ecuación 2.58)}$$

T_e: es el torque equivalente, se determina a través de la siguiente ecuación.

$$T_e = \sqrt{M^2 + T^2} \qquad \text{(Ecuación 2.59)}$$

A continuación se presenta el cálculo realizado para determinar estos valores.

$M_{YZ} = M_W + M_Z$ = 369,27Nm + 84,82 Nm = 454,09Nm

$M_{XZ} = M_p + M_{AA}$ = 69,13Nm + 10,99Nm = 80,12Nm

$M = \sqrt{(454{,}09\ Nm)^2 + (80{,}12\ Nm)^2}$ = 461,10Nm

$Te = \sqrt{M^2 + T^2}$ = 461,10Nm

$Me = \frac{1}{2}(M + Te) = \frac{1}{2}$(461,10$Nm$+461,10$Nm$) = 461,10$Nm$

- **CÁLCULO DEL EJE A TORSIÓN**

Para el cálculo de diámetro del eje del rotor por torsión se parte de la siguiente expresión.

$$d \geq \sqrt[3]{\frac{16 * T_e}{\pi\ \tau_{adm}}} \qquad \text{(Ecuación 2.60)}$$

Dónde:

Te: momento torsor equivalente en la sección del árbol (Nm)

τadm: esfuerzo cortante admisible según ciclo de carga del torsor (MPa).

El esfuerzo admisible a cortante,

$$\tau adm = \frac{Resistencia\ a\ la\ cedencia\ a\ corte\ (Sys)}{Factor\ de\ seguridad\ (N)} = \frac{Sy}{2N}$$

El esfuerzo de diseño, se especifica a través de la siguiente tabla.

Tabla 3. 2. Criterios para la especificación del factor de seguridad esfuerzos de diseños

Forma de Carga	Diseño por esfuerzo $\tau d = Sys/N$	Material Dúctiles $\tau d = \frac{Sy}{2N}$
Estática	$N=2$	$\tau d = Sy/4$
Repetida	$N=4$	$\tau d = Sy/8$
De impacto o Choque	$N=6$	$\tau d = Sy/12$

Fuente: R.L. Mott.

El procedimiento que se muestra, es similar al realizado en paso anterior por lo tanto, el esfuerzo cortante de diseño es:

$$\tau adm = \frac{Sy}{2N} = \frac{296\ MPa}{2(4)} = 37MPa$$

$$T = M0 = 12{,}32Nm$$

$$Te = \sqrt{M^2 + T^2} = \sqrt{(461{,}10\ Nm)^2 + (12{,}32\ Nm)^2} = 461{,}26Nm$$

$$d \geq \sqrt[3]{\frac{16 * T_e}{\pi * \tau_{adm}}} = \sqrt[3]{\frac{16*(429{,}38\ Nm)}{\pi*(37\ MPa)}} = 39{,}89mm$$

- **CÁLCULO DEL ÁRBOL SOMETIDO A FLEXIÓN Y TORSIÓN COMBINADAS**

El caso más general de diseño corresponde al de un árbol con momento flector y momento torsor. Este es el caso del árbol del rotor. Se puede demostrar fácilmente que la relación a la que se llega para el cálculo del diámetro mínimo de un árbol de sección circular maciza es, empleando el criterio de Soderberg para el fallo a fatiga.

$$d \geq \left[\frac{32}{\pi}\sqrt{\left(\frac{M_f}{\sigma}\right)^2 + \left(\frac{M_t}{\tau}\right)^2}\right]^{\frac{1}{3}}$$

Sustituyendo los valores correspondientes resulta,

$$d \geq \left[\frac{32}{\pi}\sqrt{\left(\frac{461{,}10\ Nm}{49{,}13\ MPa}\right)^2 + \left(\frac{461{,}26Nm}{37MPa}\right)^2}\right]^{\frac{1}{3}} = 54{,}17$$

Por lo tanto se tomara como diámetro del eje del árbol: d = 55 mm

e. 1. 13. 3. CÁLCULO DEL BOMBEO

Para el cálculo del bombeo empezaremos por la fuerza entregada por el mecanismo biela-manivela *Fb* (fuerza de la biela), y este se lo obtiene del momento torsor del eje principal *Mt*, sobre el radio de la biela.

$$Fb = Mt / r \qquad \text{(Ecuación 2. 61)}$$

Fb = *Mt* / r

Fb = 22,114N m/ 0,15m

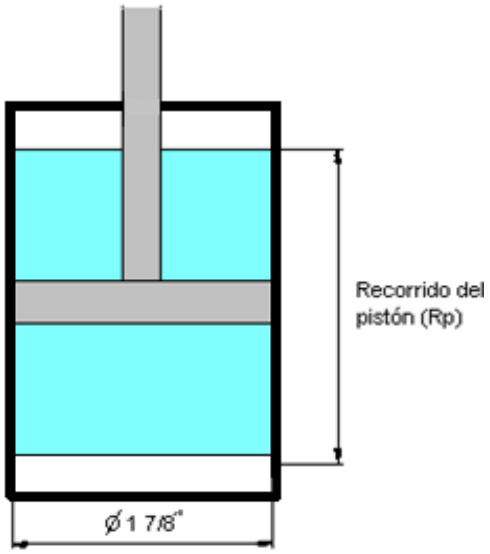
Fb = 147, 42N

r = 0,15m.

Para establecer la fuerza requerida en la biela *Fb* a diferentes radios adjuntamos siguiente tabla: la

Tabla 3. 3. Fuerza requerida en la biela a diferentes radios

Biela r (m)	Fuerza de la Biela Fb (kgf)	Biela R (pul)	Fuerza de la Biela Fb (lb.f)
0,0508	75,1	2	165
0,0635	60,1	2 ½	132
0,08	47,75	4	110
0,1	38,2	4	82,5
0,15	25,4	6	55
0,20	19,1	8	41,25



Para determinar la fuerza de la bomba empezaremos calculando el volumen; donde (υ) es el volumen del cilindro, (d=17/8") diámetro interno del cilindro y (Rp) recorrido del pistón.

$$v = \frac{\pi \,.\, d^2}{4} \,.\, R_p \qquad \text{(Ecuación 2. 62)}$$

$$v = \frac{\pi \,.\, \left(\frac{17}{8}\right)^2}{4} \,.\, 5''$$

v = 17,732 pulg^3

Luego estableceremos los ciclos de trabajo, para lo cual determinamos la velocidad angular ⟨W⟩, que se la obtiene de acuerdo a la velocidad del viento (V_v), y el perímetro del rotor (P_r).

$$\langle W \rangle = \frac{V_v}{P_r} * 60 \text{ s} \qquad \text{(Ecuación 2. 63)}$$

$$\langle W \rangle = \frac{2{,}8 \text{ m/s}}{7{,}2 \text{ m}} * \frac{1 \text{ min}}{60\text{s}}$$

⟨W⟩ = 23, 3 rpm

⟨W⟩ = Del momento torsor

El ciclo de trabajo (*Ct*), con una bomba de simple efecto es igual a un ciclo por carrera de trabajo.

$$Ct = \langle W \rangle \qquad \text{(Ecuación 2. 64)}$$

Ct = 23,3

Ct = ciclo de trabajo

- **CAUDAL A BOMBEAR POR DÍA:**

$$Q = \upsilon * Ct \qquad \text{(Ecuación 2. 65)}$$

Q = 0,000227 m³ x 23 ciclos

$$Q = \frac{0{,}0052\ m^3}{min} \ x \ \frac{60\ min}{1hr}$$

$$Q = \frac{0{,}312\ m^3}{1hr} \ x \ \frac{8\ hr\ viento}{1\ dia}$$

Q = 2,496 m³/día

Q = 3 m³ / día

Fuerza requerida para bombear 6 metros de altura.

Para calcular la fuerza *Fb*, obtendremos la presión (*P*) que tiene el a agua a 6m de altura (H)

$$P = \text{ H x 1,033 Kg. /cm}^2 \text{ / 10,33m de agua} \qquad \text{(Ecuación 2. 66)}$$

$$P = \frac{6m\ x\ 1{,}033 Kg/cm^2}{10{,}33m}$$

P = 0,6 Kg/cm²

Fb = *P* · A

Fb: fuerza de bombeo

P: presión del agua

A: área del pistón.

En dónde:

- **ÁREA DEL PISTÓN.**

$$\pi \cdot r^2 \qquad \text{(Ecuación 2. 67)}$$

A = π · (2,37cm)

A = 17,6 cm²

Fuerza que necesita la bomba:

Fb = P · 17, 6 cm²

Fb = 0,6 Kg. / cm² · 17,6cm²

Fb = 10,56 Kgf

Para calcular la fuerza a diferentes alturas, con diferentes diámetros de pistón, para mayor facilidad, adjuntamos la siguiente tabla.

Tabla 3. 4. Para cálculo de fuerza a diferentes alturas y diferente diámetro de pistón.

		20 m	40m	60m
∅ Pistón cm	Área del pistón Ap. (cm²)	Fb Kg.f	Fb Kg.f	Fb Kg.f
1,9	2,8	5,6	11,3	16,8º
2,2	3,8	7,6	15,2	22,8
2,54	5,06	10,1	20,2	30,36
3,2	8	16	32	48
3,8	11,3	22,6	45,3	67,8
4,44	15,4	30,8	61,9	92,4
4,76	**17,7**	**35,4**	**71,1**	**106,2**
5,08	20,2	40,4	81	121,2
6,35	31,6	63,2	126,6	189,6
7,62	45,6	91,2	182,4	273,6

e. 2. MATERIALES PARA LA CONSTRUCCIÓN DE LA AEROBOMBA

e. 2. 1. CÁLCULO DE LA TORRE

Con respecto a la construcción de la torre, se utilizó ángulo estructural de 2” de ala x ¼” de espesor, sobre la cual se encuentran los componentes principales como: el rotor, la torna mesa y la veleta.

Debido a que se requiere que el equipo este seguro, se calculó del factor de seguridad de la torre. Para esto, se estudió el comportamiento de la torre utilizando el análisis de estructuras. El procedimiento fue extraído de los libros “Resistencia de Materiales Aplicada” por Robert L. Mott y Estructuras de Acero/Análisis básico/Primera Edición/Cesar Medina Salvador.

La torre sirve como soporte del rotor y todos los mecanismos que funcionan a una cierta altura, esta altura depende de las condiciones geográficas en donde va a trabajar la aerobomba.

La torre está construida de dos partes, una rectangular que tiene 1m de ancho de base y una altura de 2m, y otra trapecial de 6m de altura, un ancho de 2m de base y 1m en la parte superior. Esta separación de la torre en dos partes se da para facilitar su transporte e instalación.

Una de las tareas más importantes a que se enfrenta un ingeniero es la que consiste en calcular las cargas, no se puede pasar por alto ninguna de las posibles cargas que puedan actuar sobre la estructura de una torre durante su vida útil.

Como primer paso, fue necesario calcular la razón de esbeltez, utilizando la siguiente fórmula:

$$SR = \frac{L_{ef}}{r_{minimo}} \qquad \text{(Ecuación 2.68)}$$

Dónde:

RS = razón de esbeltez

L_{ef} = es la Longitud efectiva (La cual se calcula multiplicando la longitud real de la columna por el factor de fijación de los extremos, k)

r_{minimo}= es radio mínimo de giro de la sección transversal**.**

La longitud utilizada es la de la sección central de la torre; es decir, una altura de 8,5 metros como se muestra en la figura 2. 19.

El factor de fijación de extremos utilizado fue de 0.8 ya que se tomó la estructura como fija en los cuatro extremos. Esto se debe a que los vientos, generan el movimiento en la parte superior, lo que causa un efecto similar al de una columna.

Entonces, la longitud efectiva es:

L_{ef} = $L\ (k)$ = $(8{,}5m)\ (0{,}8) = 6{,}8m$

Para el cálculo del radio mínimo, se utilizó la siguiente fórmula:

$$r_{minimo} = \sqrt{\frac{I_{torre}}{A_{torre}}} \qquad \text{(Ecuación 2.69)}$$

Dónde:

I_{torre} = Momento de inercia de la sección transversal

A_{torre} = Área de la sección transversal

Se seleccionó un ángulo de acero de 2” x ¼”, para lo que:

- I_{torre} = 15,16in4 = 6.31∗10−6m^4
- A_{torre} = 4,3in2 = 2.774∗10^−3∗m^2

Con estos valores se obtuvo un r_{minimo}= 0.048m y se procedió al cálculo de la razón de esbeltez, obteniendo un valor de:

SR = 293,55

Luego de calculado la razón de esbeltez, se calculó la constante de columna “Cc” mediante la siguiente fórmula:

$$Cc = \sqrt{\frac{2*\pi^2* E_{torre}}{Sy_{torre}}} \qquad \text{(Ecuación 2.70)}$$

Dónde:

E_{torre}: Módulo de elasticidad del material, que para los aceros es 207x10^3MPa

Sy_{torre} : Resistencia de la cedencia es 414 MPa

Sustituyendo los valores se tiene que Cc = 99.346.

Luego de obtenida la razón de esbeltez y la constante de columna, se compararon los resultados, obteniendo la siguiente relación:

SR>Cc

Al ser la razón de esbeltez mayor a la constante de columna, la torre se puede catalogar como una columna larga sometida a compresión, por lo que es necesaria la aplicación de la fórmula de Euler para el análisis de columnas cortas:

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 E_{torre}\, A_{torre}}{SR^2} \qquad \text{(Ecuación 2.71)}$$

Dónde:

P_{cr} = es la carga crítica de la columna. Indica el punto donde la columna comienza a pandearse.

E_{torre} = 207 x 10^3 MPa

A_{torre} = 2.774 ∗ 10^ − $3m^2$

SR = 293,55

Sustituyendo los valores, se obtuvo que la carga máxima que puede soportar la torre antes de empezar a pandearse es:

$$P_{cr} = 151{,}55 \text{ kN}$$

Para obtener el valor de la carga máxima admisible por la torre, se dividió ese valor entre un Factor de Seguridad de 3, obteniendo una mayor confiabilidad.

$$P_{adm} = \frac{P_{cr}}{N} = \frac{131{,}55\ kN}{3} = 43{,}85kN \qquad \text{(Ecuación 2.72)}$$

Teniendo el valor de la carga admisible, se procedió a calcular el esfuerzo por compresión admisible de la torre, utilizando la siguiente fórmula:

$$\sigma_{adm} = \frac{P_{admisible}}{A_{torre}} = 15{,}8 \text{ MPa} \qquad \text{(Ecuación 2.73)}$$

Luego de haber calculado el máximo esfuerzo admisible por la torre, se calcularon las diferentes cargas que afectarían la torre, para así poder comparar los esfuerzos y confirmar que la torre no se pandeará.

Para calcular el esfuerzo presente en la torre, se utilizó la formula AISC de una columna cargada excéntricamente.

$$\sigma_c = \frac{\sum P}{A} + \frac{M}{Z_x} \qquad \text{(Ecuación 2.74)}$$

Dónde:

σ_c = Esfuerzo por compresión presente en la columna

ΣP = sumatoria de cargas en la columna

A = área transversal de la columna

M = Momento flexionante generado por las cargas excéntricas

$$M = P * e \qquad \text{(Ecuación 2.75)}$$

E = excentricidad de la carga

Zx = módulo de Sección

La sumatoria de cargas presentes en la torre:

∑p = Pgn + Protor = 33 kg (9, 81m/s^2) + 3(82,99N)

∑p = Pgn + Protor = 572, 7 N

Se calcula el módulo de sección para la sección transversal, es de:

$$Z_x = 10{,}90in^3 = 1{,}786x10^{-4}\ m^3 \qquad \text{(Ecuación 2.76)}$$

Luego de obtenidos todos los valores de las variables que intervienen en el cálculo del esfuerzo en la torre, se procedió a plantear la formula. Se agregaron los valores de las distancias de las cargas hasta el punto central de la columna para el cálculo de los momentos de flexión generados por las cargas aplicadas. Para los momentos a flexión, se tomó el sentido anti horario como positivo.

$$\sigma_{torre} = \frac{\sum P}{A_{torre}} + \frac{M}{Z_x} = \frac{572{,}7\ N}{2{,}74*10^{\wedge}-3m^2} + \frac{(-163{,}92N)(0{,}5m)+(323{,}73N)(0{,}4m)}{1{,}786\ x\ 10^{-4}\ m^3}$$

σ_{torre} = 1,39 MPa

Luego de haber calculado el esfuerzo presente en la torre, se comparó ese valor con el valor admisible por la torre obtenido anteriormente. Se dividió el esfuerzo presente sobre el esfuerzo admisible para observar si soportaría la carga o no. Se debe recordar que el factor de seguridad utilizado para el diseño fue de 3, es decir que el valor que se obtenga de la comparación debe ser mayor de 3 para que cumpla con las especificaciones de diseño.

$$FS_{torre} = \frac{\sigma_{admisible}}{\sigma_{torre}} = \frac{15{,}8\ MPa}{1{,}39\ MPa} = 11{,}36$$

Este valor indica que la torre, bajo las cargas aplicadas, no fallará por pandeo, ya que puede soportar una carga aproximadamente 11 veces más elevada.

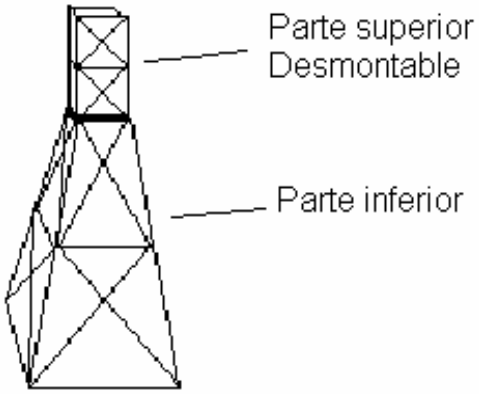


Figura 2. 19. Torre diagrama de cuerpo libre

e. 2. 2. SELECCIÓN Y DISEÑO

A lo largo del presente trabajo se han dado pautas generales para la decisión de uso de aerobombas para el suministro de agua en sus diversas aplicaciones. Es claro que para seleccionar el sistema de aerobombeo se deberá tener en cuenta los aspectos técnicos y económicos. En el mercado se han consolidado, podría decirse, dos tipos de alternativas de aerobombas comerciales.

Las aerobombas de baja solidez comerciales han demostrado su utilidad en condiciones donde la altura de bombeo no exceda los 25 metros y las condiciones de viento sean de baja intensidad. Esto cubre buena parte del territorio nacional, exceptuando algunas regiones del país en las cuales los niveles de velocidad viento son altos. No es recomendable utilizar alguna de estas aerobombas en condiciones de alta intensidad de velocidad de viento ya que no están diseñadas para aguantar cargas dinámicas de tan alta magnitud. Se han presentado ocasiones en los cuales, algunos de estos equipos se instalan en lugares con vientos altos y días después de la instalación, estos equipos se destruyen.

Para instalaciones de suministro de agua en las cuales las alturas de bombeo exceden los 25 metros y el régimen de vientos es alto, es indudable que las aerobombas del tipo Multipala americano han demostrado por varias décadas ser las maquinas óptimas para estas aplicaciones. Claro está que para condiciones de bajo régimen de viento y bajas alturas de bombeo estas máquinas también pueden suplir las necesidades de agua.

Sobra indicar que cualquiera sea la solución de aerobombeo elegida, su operación en el tiempo dependerá fuertemente de la adecuada instalación, mantenimiento y supervisión en la operación con cierta regularidad. Si alguno de estos factores no está correctamente manejado por el usuario es bien probable que la maquina por robusta y confiable que sea, no será la mejor decisión en el mediano o largo plazo.

Ahora bien la mejor fuente de información sobre los esquemas de operación, supervisión y mantenimiento son los catálogos de estas máquinas, que contienen muchos años de experiencia práctica en este campo.

f.- RESULTADOS

Tabla 3. 5. Resultados de las mediciones realizadas con el Anemómetro en tiempo real.

N°	Medición de la velocidad del viento (V_v) en $^m/_s$	Volumen de agua bombeado en litros	Tiempo (seg.)
1	2.8	3.36	180
2	3.8	5.48	180
3	2.6	2.71	180
4	3.3	4.75	180
5	2.5	1.89	180
6	4.5	5.59	180
7	5.2	7.9	180
8	3.1	4.12	180
9	1.1	0.17	180
10	7.9	6.8	180

Fuente: Propia

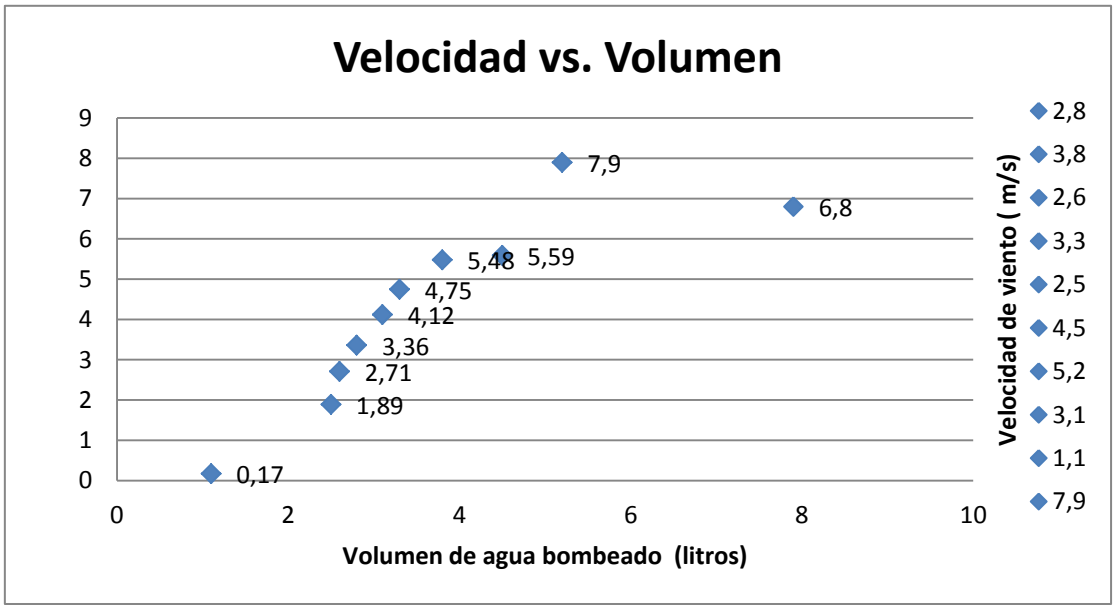


Gráfico de resultados obtenidos entre la relación de la velocidad del viento (m/s) y el volumen de agua bombeada (litros).

Fuente: Propia

f.1. CONSTRUCCIÓN DE ESTRUCTURA SUPERIOR

Fig. N° 1 Estructura superior

Figura N° 2 Estructura superior

f. 2. MANZANA PARA SUJECIÓN DE LAS ASPAS

Figura N°3 Manzana

f. 3. ESTRUCTURA PRINCIPAL

Figura N° 4 Estructura principal

f. 4. CONSTRUCCIÓN DEL MECANISMO BIELA-MANIVELA

f. 4. 1. CONSTRUCCIÓN DE LA EXÉNTRICA

Figura N° 5 Excéntrica de trabajo

Figura N° 6 Excéntrica de trabajo

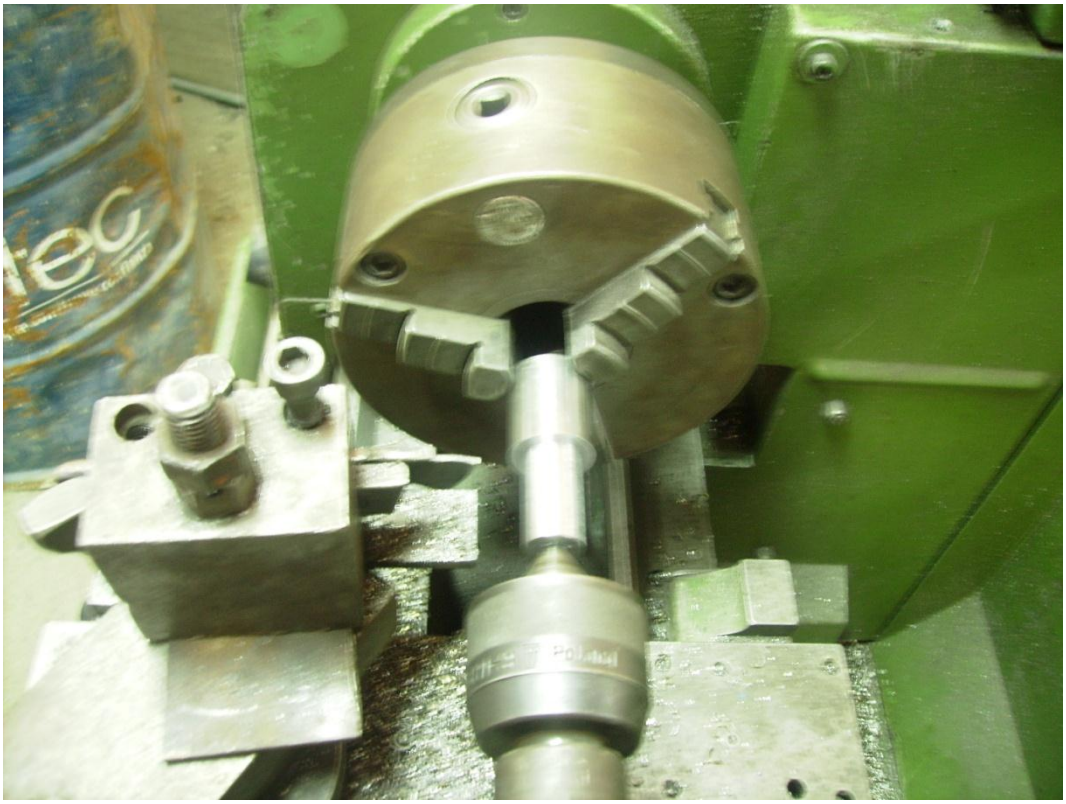


Figura N° 7 Construcción del pasador de la excéntrica

Figura N° 8 Pasador de la excéntrica

Figura N° 9 Agujero para el pasador

Figura N° 10 Construcción de la canastilla porta- rodamiento

Figura N° 11 Conjunto del sistema de la excéntrica

Figura N° 12 Conjunto de la excéntrica

Figura N° 13 Conjunto de la exentrica

f. 5. CONSTRUCCIÓN DE LA BOMBA

Figura N° 14 Materiales utilizados en la construcción de la bomba

Figura N° 15 Bomba construida

Figura N° 16 Cámara de la bomba

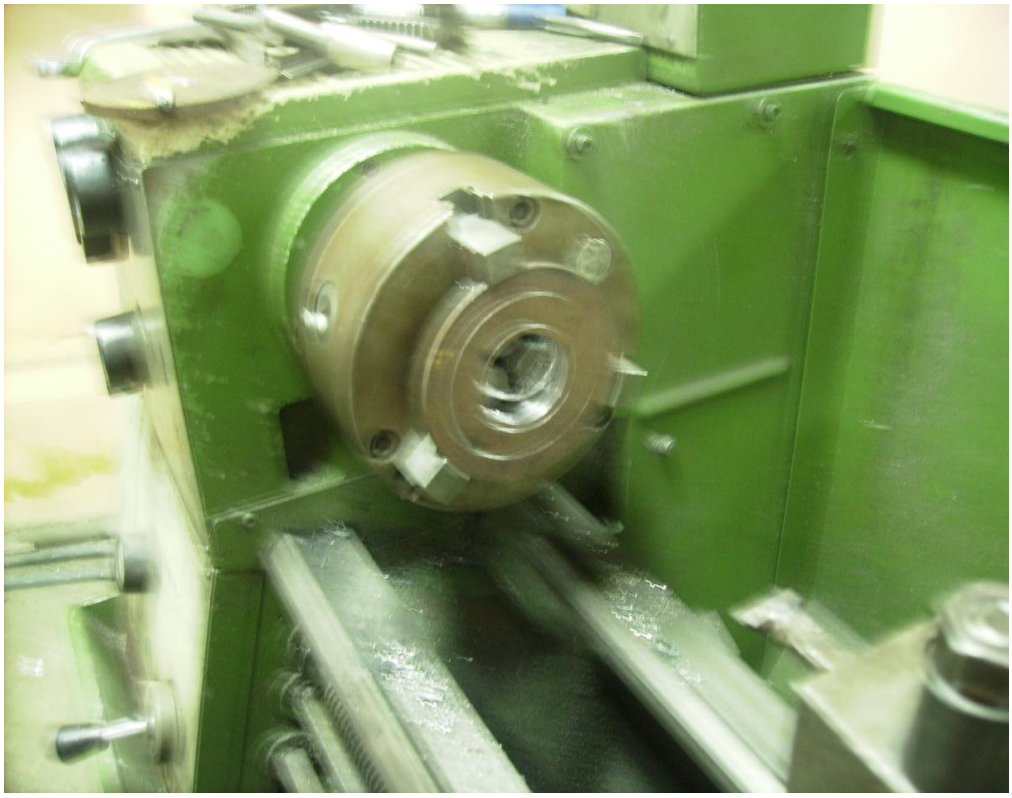


Figura N° 17 Base superior de la bomba

Figura N° 18 Tapa de la base superior con agujeros pasantes para fijación

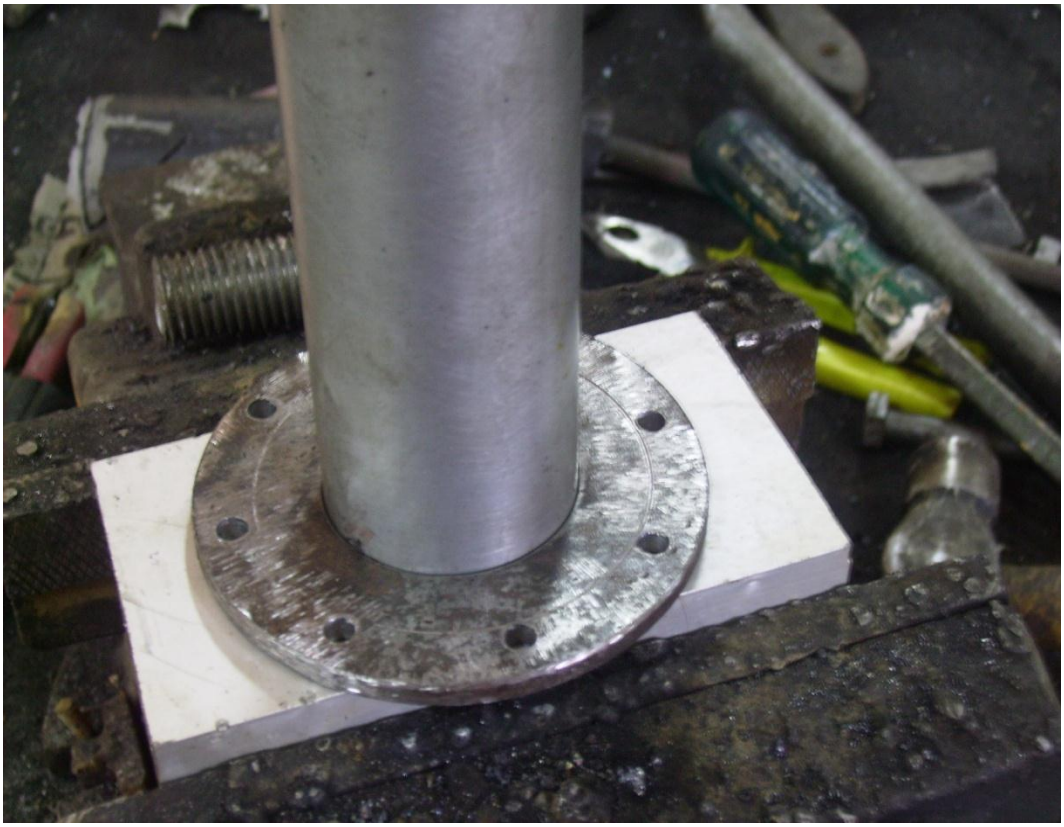


Figura N° 19 Acoplado de las partes de la bomba (soldadura)

Figura N° 20 Acoplamiento de la camisa (tubo PVC ⌀ 1”)

Figura N° 21 Bomba construida

Figura N° 22 Conjunto bomba y exentrica

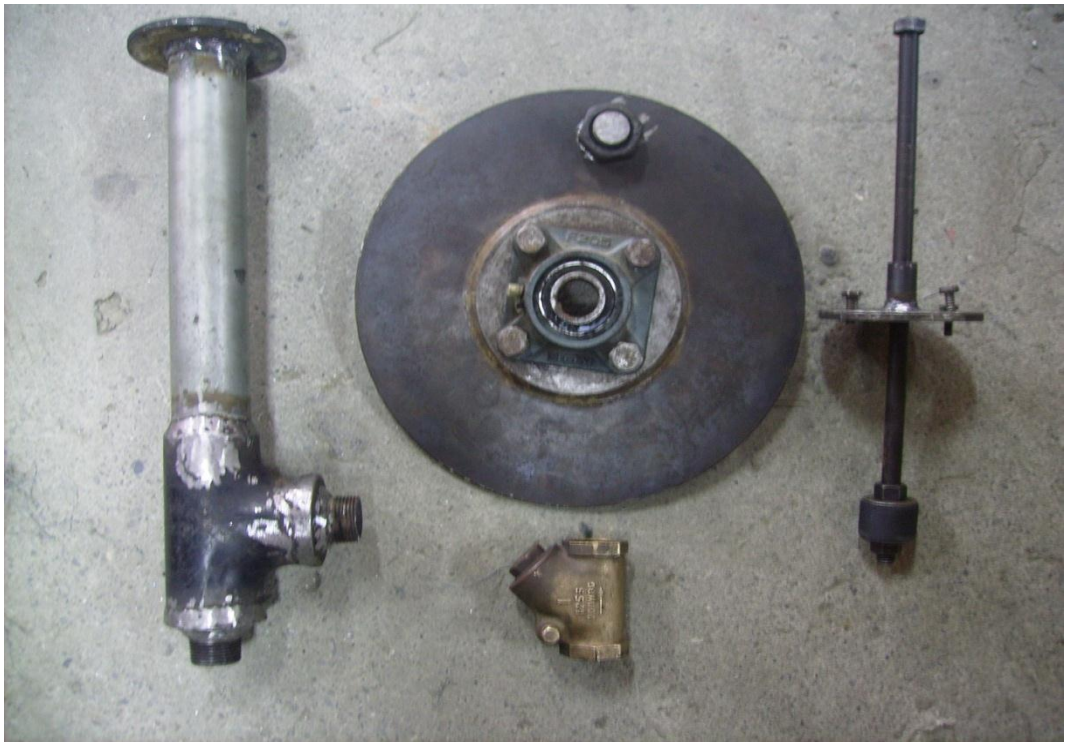


Figura N° 23 Conjunto y accesorios de la bomba y excéntrica

f. 6. PREPARACIÓN DE LA TUBERIA PARA SUMERGIRLA EN EL POZO

Figura 24 Trazo de distancias para agujeros tubería principal

Figura N° 25 Perforación de agujeros en el tubo principal

Figura N° 26 Colocación de malla para filtrado del agua

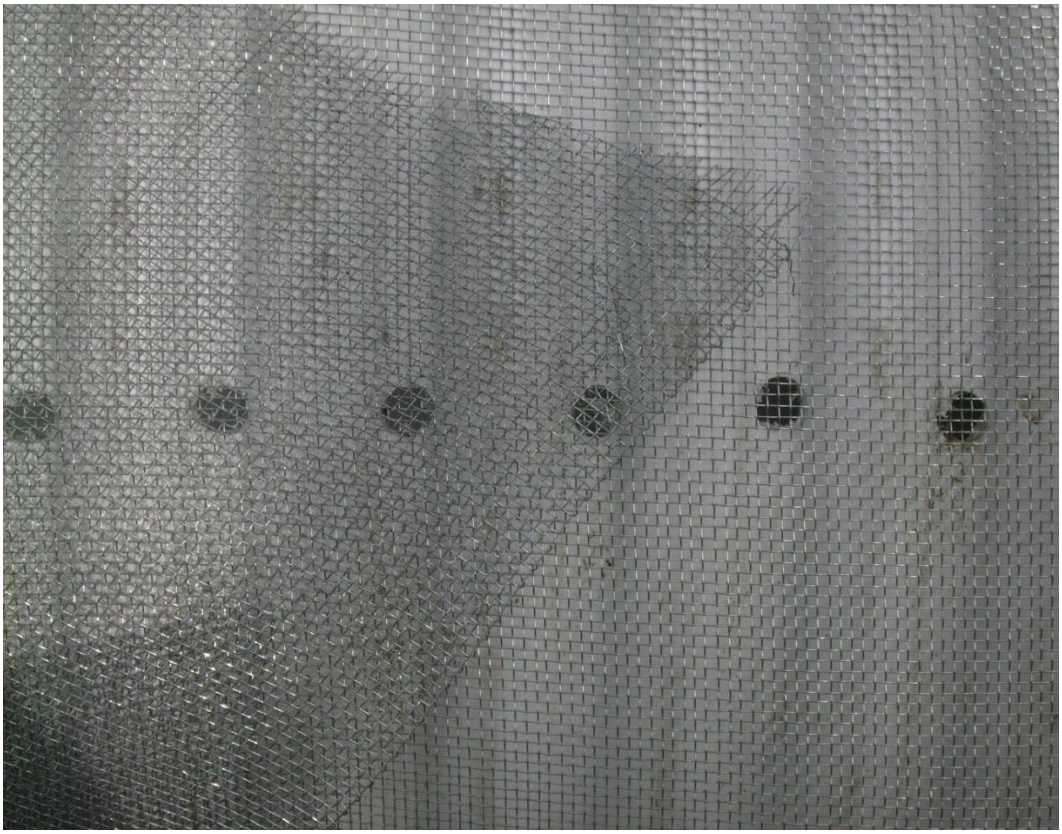


Figura N° 27 Malla y agujeros en la tubería principal

Figura N° 28 Tubería lista para ser sumergida

f. 7. EXCAVACIÓN DEL POSO

Figura N° 29 Maquina Retroexcavadora

Figura N° 30 Inicio de excavación del pozo

Figura N° 31 Excavación a 5,50 m Profundidad

Figura N° 32 Construcción de rampa para alcanzar mayor profundidad

Figura N° 33 Máquina realizando excavación más profunda

Figura N°34 Excavación a 7,50m

Figura N° 35 Excavación a 8,50m

Figura N° 36 Excavación a 9,50m

f. 8. COLOCACIÓN DE LA TUBERÍA DENTRO DEL POSO

Figura N° 37 Levantando el tubo principal

Figura N° 38 Posición de descenso del tubo principal

Figura N° 39 Bajando el tubo hacia en el pozo

Figura N° 40 Entrada del pozo

Figura N° 41 Tubo principal ubicado en el pozo

Figura N° 42 Empotrado de la tubería de salida

Figura N° 43 Empotrado de la tubería de salida

Figura N° 44 Colocación de malla para fundir con hormigón

Figura N° 45 Fundición del acople con hormigón

f. 9. CONSTRUCCIÓN DE LA BASE DE Hº

Figura N° 46 Columnas de hierro armado para construcción de la base

Figura N° 47 Replanteo de la base de H°

Figura N° 48 Replanteo de la base de H°

Figura N° 49 Encofrado interior para fundir la base de H°

Figura N° 50 Encofrado interior armado

Figura N° 51 Colocación de las columnas de hierro armado

Figura N° 52 Colocación de las cadenas de amarre de hierro armado

Figura N° 53 Encofrado para fundición de cadenas de amarre

Figura N° 54 Fundición de los bordillos

Figura N° 55 Base terminada (tanque)

f. 10. MONTAJE DE LA ESTRUCTURA PRINCIPAL SOBRE LA BASE DE Hº

Figura N° 56 Levantando la estructura principal

Figura N° 57 Estructura principal colocada sobre la base de H°

f. 11. MONTAJE DEL ROTOR SOBRE LA ESTRUCTURA PRINCIPAL

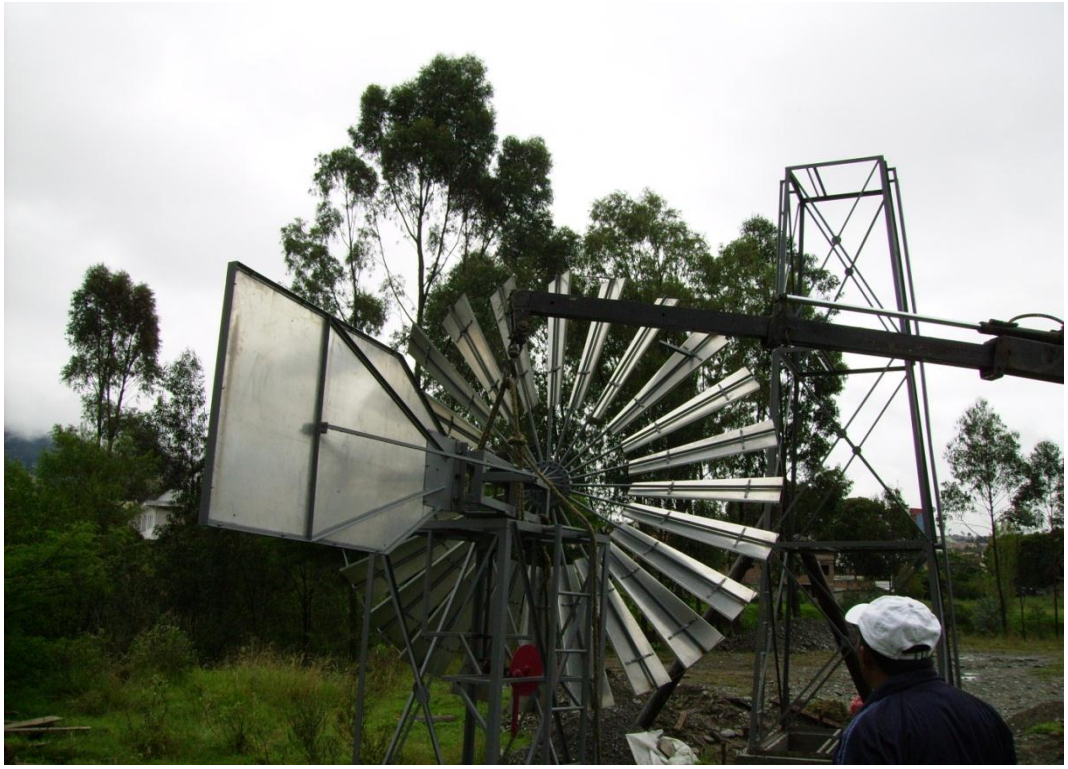


Figura N° 58 Rotor acoplado a la estructura superior

Figura N° 59 Enganchando el rotor a la grúa para el montaje

Figura N° 60 Realizando pruebas de levantamiento

Figura N° 61 Pruebas de levantamiento

Figura N° 62 Rotor en ascenso

Figura N° 63 Rotor tomando ubicación en la torre principal

Figura N° 64 Rotor colocado sobre la estructura principal

g.- DISCUSIÓN

Realizada la revisión de los datos registrados por la estación meteorológica respecto al sensor de velocidad y dirección del viento, se pudo determinar que estos representan un potencial eólico considerable, por lo que se estima relevante la realización del proyecto con la aerobomba Multipala americano.

En lo referente al sitio en dónde se implementará el proyecto de la aerobomba, puedo indicar que se trata de un área en la cual existe la necesidad de suministrar agua para sus distintos usos como son: para consumo humano, y labores de riego.

Como se ha visto en el CAPÍTULO I, varios países desarrollados están explotando cada vez más el recurso eólico, invirtiendo enormes recursos económicos en ello. Sin embargo, esta práctica no es exclusiva de los países desarrollados. La India, país de grandes contrastes sociales, es el mejor ejemplo de ello, apostando fuertemente a la explotación de este recurso natural como fuente permanente de energía. Se tiene la esperanza que India no resulte ser la excepción que confirme la regla, sino la inspiración para que otros países en vías de desarrollo (como el nuestro) impulsen la creación de una plataforma científica, económica y legal que promueva la explotación de este recurso renovable, limpio y gratuito.

El recurso eólico representa una atractiva solución económica, ecológica y técnica para abastecer de agua en sitios s aislados.

El resumen sobre el desarrollo histórico de la explotación de la energía eólica proporciona una visión general de los problemas que se han presentados a lo largo de los años y que han sido resueltos con el tiempo, la experiencia y las nuevas tecnologías.

Se observa una clara tendencia a desarrollar la explotación de los recursos renovables, por un lado por el agotamiento de los combustibles fósiles y por el otro, la preocupación por la alteración climática que está sufriendo el planeta por el denominado efecto invernadero.

h.- CONCLUSIONES

Al finalizar el trabajo se pude concluir lo siguiente:

- Se realizaron mediciones puntuales de la velocidad de viento con el fin de determinar el potencial eólico en el sitio de estudio, se rediseñaron todos los componentes de transmisión y bombeo de la aerobomba tipo multipala americano y se repotenció el rotor de la aerobomba con el objetivo de mejorar su eficiencia.

- Se realizaron las adecuaciones necesarias para el emplazamiento de la aerobomba en los terrenos pertenecientes al AARNR destinados a permacultura, en donde existe la necesidad de agua para el riego de los cultivos; las principales obras realizadas fueron el des-asentamiento de lugar, excavaciones y la base de hormigón armado para dar estabilidad y seguridad a la aerobomba.

- Se construyó con la ayuda de maquinaria pesada un pozo somero de 9.50 metros de profundidad, nivel al cual se encontró el nivel freático del agua en el sitio de emplazamiento de la aerobomba. Para esta actividad y con el objetivo de garantizar la estabilidad en las paredes de pozo, se introdujo un tubo corrugado de PVC de 55 pulgadas de diámetro y se realizaron adecuaciones para permitir que el agua se filtre hasta el interior del tubo con la menor cantidad de solidos posibles.

- Se realizaron las pruebas necesarias para la validación técnica de la aerobomba, determinado el volumen de agua bombeado para valores aleatorios de velocidad de viento medidos a la altura del eje del rotor.

- El presente trabajo se realizó en busca de proporcionar a la sociedad de una posible alternativa de bombeo de agua en sitios remotos, haciendo uso de las energías alternativas, así como también incursionar en el desarrollo y la explotación del recurso eólico en nuestro país, y finalmente contribuir en la conservación del medio ambiente con el uso de energías alternativas.

i.- RECOMENDACIONES

- Promover este tipo de proyectos con fines de ayuda social, con el uso de la energía eólica, que conlleven al mejoramiento de vida de las personas que habitan en los sectores rurales de nuestra provincia de Loja.

- Impulsar la realización de una base de datos en todos los cantones de la provincia de Loja, y de esta manera contar con una información elemental y fehaciente de los valores energéticos encontrados en cada uno de ellos, y proporcionarlos para las distintas aplicaciones tanto en los recursos eólicos y solares.

- Crear un proyecto amplio de difusión para las comunidades que carecen de servicios básicos, sobre energías alternativas: sus aplicaciones, funcionamiento y mantenimiento de equipos; ventajas y desventajas con el fin de incentivar a los habitantes a hacer uso de la diversidad de aplicaciones que nos ofrecen las energías alternativas de manera especial la eólica y solar.

- Se recomienda realizar el mantenimiento periódico a todos los componentes del aerobomba, con el objetivo de conservar la vida útil del sistema.

j.- BIBLIOGRAFÍA

Libros:

1. JUTGLAR, Lluís. (2004), Energía Eólica. Ediciones CEAC.

   Barcelona –España.

2. Ortega Rodríguez, Mario. (2000), Energías Renovables.

   Editorial Paraninfo. Madrid – España.

3. Villarrubia Miguel, (2004), Energía Eólica. Ediciones CEAC.

   Universidad de Barcelona.

Páginas web:

4. es. Wikipedia. Org / wiki / Turbina_eolica

El molino multipala se utiliza para bombear agua y fue de enorme utilidad en el siglo XIX.

5. www.acsaeolica.com/es/productos_molinos.htm

Los molinos multipala se utilizan exclusivamente para el bombeo de agua, derivado del aprovechamiento de la energía mecánica que generan.

www.molinosjober.com

info@molinosjober.com, molinos de viento para bombeo de agua.

6. www.slideshare.net/anaquinche/powereolica

14 Ene 2010 – Aerobombas. Molinos. Extractores. Aerobombas Se usan para bombear agua de pozos subterráneos Tipos de aerobombas: Molino multipala...

k.- NOMENCLATURA

Eh= Energía hidráulica

ρH_2O = densidad del agua (1000kg/m^3)

g = Constante de gravedad (9,81m/s^2)

Q = Caudal de diseño (m^3)

H = Altura de bobeo

Kwh = kilovatios hora

P_v= Potencia del viento

ρ_{aire}= Densidad del aire (1,2 Kg/m^3 a nivel del mar)

v = Velocidad del viento en m/s

A = Área del rotor en m^2

E_c = Energía cinética

ϕ = Flujo de aire a través de una superficie

P_d = Potencia disponible

P_a = Potencia aprovechable

C_p = Coeficiente de potencia

FC = Factor de capacidad

FGE = Factor de generación específica

S = Longitud de carrera

U = Velocidad tangencial de la punta de la pala

Vd = Velocidad de diseño

n_r = Velocidad de rotación del rotor

$\boldsymbol{i}$ **=** Relación de transmisión

λo = Velocidad especifica de la punta

D_p = Diámetro del pistón

η_v = Rendimiento volumétrico, comúnmente entre 0,7 y 0,97

$\boldsymbol{Q}$ = Gasto volumétrico (m^3/s)

D = Diámetro del rotor

FPE = Factor Patrón de Energía

$\boldsymbol{\eta}$ = Eficiencia total del sistema

P = Potencia requerida por el agua, W

p (v) = Probabilidad estadística que ocurre en una velocidad

c = Es el factor de escala (m/s), valor que suele ser próximo a la velocidad media.

k = Es el factor de forma que caracteriza la asimetría o sesgo de la función de probabilidad es adimensional.

$\boldsymbol{V}$ **=** Velocidad axial

V_1= Velocidad del viento a la entrada del rotor

V_2= Velocidad del viento a la salida del rotor

V = Velocidad incidente en el plano del rotor

F = Fuerza provocada por la corriente sobre el plano del rotor

P_1= Presión aguas arriba del rotor (p1= p2= p atm.)

P^+, P^- = Presión en el plano del rotor a barlovento y sotavento respectivamente.

l.- **ANEXOS:** Planos

UNIVERSIDAD NACIONAL DE LOJA

ÁREA DE LA ENERGÍA, LAS INDUSTRIAS Y LOS RECURSOS NATURALES NO RENOVABLES

CARRERA DE INGENIERÍA ELECTROMECÁNICA

PROYECTO DE TESIS

TÍTULO

"DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA AEROBOMBA TIPO MOLINO MULTIPALA AMERICANO PARA EL LABORATORIO DE ENERGÍAS RENOVABLES DEL A.E.I.R.N.N.R."

ALUMNO:

Elgo. Mario Ramiro Tinoco Córdova

LOJA - ECUADOR
2012

a.- TEMA

"Diseño y Construcción de una Aerobomba Tipo Molino Multipala Americano para el Laboratorio de Energías Renovables del A.E.I.R.N.N.R."

b.- PROBLEMÁTICA

b. 1. SITUACIÓN PROBLÉMICA.-

Las fuentes de energía primaria, son recursos formados durante muchos millones de años, que están almacenados en globo terrestre y que una vez consumidos por el hombre no vuelven a regenerarse, por lo cual tienden a su agotamiento progresivo (carbón, petróleo, gas natural, uranio, etc.). A estos recursos los conocemos como fuentes de energía no renovables. Esto a despertado la necesaria búsqueda de fuentes de energía no convencionales que permitan atender la gran demanda de energía de las sociedades humanas; debido a que cada vez el planeta está más poblado.

Actualmente son varias las razones por las que se presta una especial atención a las energías renovables y en particular a la energía eólica.

Por lo tanto se expone la siguiente situación problemática: Existe la necesidad de realizar un estudio del recurso eólico para diseñar sistemas de bombeo eficientes e incentivar el uso de energías renovables.

b. 2. PROBLEMA GENERAL DE INVESTIGACIÓN.-

Existe la necesidad de diseñar y construir un sistema de bombeo con una aerobomba Multipala, en función del recurso eólico disponible y realizar investigaciones, evaluaciones y valoraciones para determinar el grado de efectividad del mismo.

b. 3. DELIMITACIÓN

b. 3. 1. PROBLEMA ESPECÍFICO DE INVESTIGACIÓN.-

- Ausencia de un estudio meteorológico que permita caracterizar el recurso disponible para determinar el grado de efectividad de un sistema de aerobombeo.
- Ausencia de un sistema de bombeo utilizando una aerobomba Multipala.
- Ausencia de catálogos que permitan realizar la selección de este tipo de aerobombas.
- Falta de difusión de los trabajos de investigación que se realizan en la carrera de ingeniería en Electromecánica.

b. 3. 2. ESPACIO.-

Se tendrá como escenario de trabajo, un espacio debidamente seleccionado para la implementación de éste proyecto.

b. 3. 3. UNIDADES DE OBSERVACIÓN.-

- Energía del viento
- Aerobombas
- Componentes de un sistema de aerobombeo
- Estaciones meteorológicas
- Medios de difusión; prensa, internet, televisión y radio.

c.- JUSTIFICACIÓN.

c. 1. JUSTIFICACIÓN.-

En el estudio medioambiental de la energía eólica se procede a analizar los impactos más significativos de la misma y como pueden valorarse. Así mismo se ponen de manifiesto las ventajas medioambientales de su uso, ya que al ser una energía renovable constituye un vector energético compatible con el desarrollo sostenible de la sociedad.

En éste proyecto de Diseño y Construcción de la aerobomba, se presentan dos aspectos de interés en la utilización de la energía eólica: el económico y el medio ambiental. El primero de ellos comprende los análisis y métodos que permitan evaluar el coste económico de ésta tecnología y por lo tanto estudiar la viabilidad de su implantación frente a las ya existentes. El segundo estudia los aspectos relacionados con el impacto medioambiental que produce su uso.

La ausencia de un modelo de pruebas eólicas moderno y equipado con un sistema de adquisición de datos para evaluar perfiles y fuerzas de impacto de la velocidad del viento, nos incentiva a la realización del presente proyecto.

En el diseño curricular de la carrera de Ingeniería en Electromecánica, se debería considerar la enseñanza de estas nuevas técnicas de utilización de las energías alternativas; por lo que creemos que será una contribución importante para el mejoramiento del pensum de estudios.

Este trabajo de investigación se justifica por las limitaciones existentes en el AEIRNNR.
Estamos seguros que servirá para profesionales y estudiantes que se encuentren inmersos en el diseño, construcción y mantenimiento de éste tipo de aerobombas.

c. 2. VIABILIDAD.-

De forma similar a lo que se realiza en cualquier proyecto, antes de proceder a la implantación de un sistema eólico para mover una aerobomba, se debe llevar a cabo un estudio de viabilidad técnica y económica. El análisis de viabilidad técnica comprende básicamente:

- El estudio de emplazamientos.
- El análisis de vientos.
- La selección del número y el tipo de aerobomba.
- La evaluación de resultados.
- Otros aspectos (mantenimiento, fiabilidad, disponibilidad, etc.).

En el análisis de viabilidad económica distinguiremos dos tipos de proyectos:

- Producción de energía motriz para mover el aeromotor y compararlo con el otro tipo de energía eléctrica.
- Proyectos basados en la sustitución de la energía eléctrica tomada de la red, por la obtenida por un aeromotor eólico.

Este tipo de proyectos corresponde a aerobombas de mediana y pequeña potencia usadas para bombeo de agua en lugares aislados.

El análisis en este segundo caso se basa en el estudio del ahorro económico derivado de la sustitución de un determinado suministro energético, por la energía eólica.

Es factible la realización de éste proyecto, porque tenemos los medios materiales, conocimientos teóricos, recursos bibliográficos y financieros que se van a utilizar en la implementación de este sistema de bombeo, con la utilización de una aerobomba Multipala americana; además son de fácil adquisición en el medio donde se desarrollará, de igual manera cabe indicar que tiene relevancia social por cuanto se hará la difusión y socialización del mismo; por éstas razones el presente proyecto de tesis es viable y su ejecución será un aporte importante al desarrollo de la industria de la región sur del Ecuador.

d.- OBJETIVOS

d. 1. OBJETIVO GENERAL.

Calcular, diseñar y construir un sistema de bombeo en función del recurso eólico disponible, utilizando una aerobomba Multipala.

d. 2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.

- Recopilar información para caracterizar el comportamiento del recurso eólico para realizar el diseño de la aerobomba.
- Monitorear el recurso eólico en la zona de incidencia.
- Realizar pruebas experimentales con el sistema de bombeo desarrollado, a fin de optimizar su funcionamiento.
- Socializar el trabajo de investigación a lo interno y externo de la Universidad nacional de Loja

e. METODOLOGÍA

e. 1. MATRIZ DE CONSISTENCIA GENERAL.

PROBLEMA GENERAL DE INVESTIGACIÓN: Existe la necesidad de diseñar y construir un sistema de bombeo utilizando una aerobomba multipala, en función del recurso eólico disponible y realizar investigaciones, evaluaciones y valoraciones para determinar el grado de efectividad del mismo.			
TEMA	OBJETO DE INVESTIGACIÓN	OBJETO DE LA INVESTIGACIÓN	HIPOTESIS DE LA INVESTIGACIÓN
Diseño y construcción de un sistema de bombeo con aerobomba multipala para el Área de Agropecuaria y los Recursos Naturales Renovables.	Sistema de bombeo con una aerobomba multipala.	Calcular, diseñar y construir un sistema de bombeo en función del recurso eólico disponible, utilizando una aerobomba multipala para el Área de Agropecuaria y los Recursos Naturales Renovables.	La construcción de un sistema de bombeo con una aerobomba multipala aprovecharemos el recurso eólico ahorrando energía y solucionamos problemas de bombeo.

e. 2. DISEÑO METODOLÓGICO DEL PROYECTO DE LA INVESTIGACIÓN.

El proyecto empieza con la necesidad de implementar un sistema de aerobombeo en el Área de Agropecuaria y los Recursos Naturales Renovables de la U.N.L.

El proceso a seguir es el de buscar información en libros, internet, tesis, asesoramiento profesional, local y nacional; para posteriormente realizar el diseño y construcción de la aerobomba multipala.

Los resultados serán procesados a través de datos y luego utilizando la estadística descriptiva, se caracterizará los sistemas de análisis de la fuerza de impacto del viento en la zona de incidencia y en la aerobomba eólica.

Los datos experimentales que se obtengan serán procesados mediante la utilización de equipos de medición de potencial eólico.

La información recopilada se la utilizará en la estructuración del marco teórico, esencialmente para fundamentar y consolidar el proyecto de investigación.

Para el procesamiento de la información se recurrirá a programas de computación acordes con el tema.

Se elaboraran guías para realizar prácticas profesionales relevantes, se seleccionará y se sistematizará información permanentemente, para impartir clases prácticas a los estudiantes del área, utilizando guías propuestas en temas específicos.

e. 3. MATERIALES, MÉTODOS Y TÉCNICAS DE TRABAJO

e. 3. 1. MATERIALES

- Suministros de oficina
- Cámara fotográfica
- Herramientas
- Software Autocad 2007
- Software Microsoft Office Xp

- Herramientas gráficas
- Internet
- Materiales para la construcción de la obra civil

e. 3. 2. MÉTODOS

- Método experimental
- Método inductivo
- Método deductivo

e. 3. 3. TÉCNICAS DE INVESTIGACIÓN

- Técnica de la observación
- Técnica experimental
- Técnica de medición
- Técnica de investigación
- Entrevista
- Encuesta

PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN	TÉCNICA UTILIZADA
Poco interés en fomentar el uso de energías alternativas, especialmente la eólica, por falta de información y experimentación práctica, que permita comprender y determinar las fuerzas del viento que actúan en un sistema de aerobombeo.	Se aplicara la técnica de investigación bibliográfica.
	Información sobre las fuerzas que produce el viento en un sistema eólico para aerobombeo.
Aerobomba Multipala para suministro de agua para ser utilizada en sistemas de riego y otros.	Diseño de la aerobomba multipala aplicable en el área de Agropecuaria y Recursos Naturales Renovables.
	Observación de sistemas de aerobombeo construidos y visitas a sitios donde se encuentran implementados este tipo de proyectos.
Procesar la información para evaluar resultados y trazar las curvas características del sistema de aerobombeo.	Mediante la construcción y experimentación del sistema de aerobombeo utilizando una aerobomba multipala, se podrá llegar a resultados concretos y procesar la información y trazar curvas características.
	Zona de incidencia para puesta en marcha el sistema de aerobombeo para realizar las prácticas de impacto del viento.

f. CRONOGRAMA

ACTIVIDADES	ENERO				FEBRERO				MARZO				ABRIL				MAYO				JUNIO				JULIO				AGOSTO				SEPTIEMBRE			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
Elaboración del diseño del proyecto	X	X	X																																	
Presentación y aprobación del diseño del proyecto				X	X	X																														
Desarrollo del marco teórico							X	X	X	X																										
Presentación y aprobación de la formulación del proyecto											X	X	X	X																						
Medición de la velocidad, dirección y tipos de viento															X	X	X	X	X	X																
Diseño, calculo y construcción del sistema de aerobombeo																					X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X				
Presentación, sustentación y defensa de la tesis de grado																																	X	X	X	X

g. PRESUPUESTO Y FINANCIAMIENTO

Recopilación de información……..…….200, 00

Materiales de oficina……....150,00

Materiales parar la construcción de la aerobomba…….1050,00

Materiales de obra civil……...….700,00

Consultas bibliográficas……...150,00

Movilización….……...…….250,00

Gastos de impresión…….....……300,00

Imprevistos……...……200,00

TOTAL……..**3.000,00**

h. BIBLIOGRAFÍA

- Villarrubia, Miguel. Energía Eólica, Profesor titular de ingeniería de sistemas. Facultad de Física. Universidad de Barcelona – España.
- CEAC, Energías Alternativas y Medio Ambiente.
- Bibliotecas de la UNL.
- Internet

i. ANEXOS

j.1 MATRIZ DE CONSISTENCIA ESPECÍFICA

PROBLEMA ESPECÍFICO 1: Ausencia de un estudio meteorológico, que permita caracterizar el recurso disponible para determinar el grado de efectividad de un sistema de aerobombeo.			
OBJETIVO ESPECÍFICO	HIPÓTESIS ESPECÍFICA	UNIDAD DE OBSERVACIÓN	SISTEMA CATEGORIAL
Recopilar información para caracterizar el comportamiento del recurso eólico para realizar el diseño de la aerobomba.	Con el diseño y construcción de la aerobomba multipala y los materiales a utilizarse, se comprenderá de mejor manera su funcionamiento.	Fuerzas de impacto del viento, existentes para mover una aerobomba eólica.	- Potencia teórica y real alcanzada por las aerobombas. - Efectos del viento en las aerobombas eólicas.

OBJETIVO ESPECIFICO 2: Construir un sistema de bombeo, utilizando una aerobomba multipala americano.			
OBJETIVO ESPECÍFICO	HIPÓTESIS ESPECÍFICA	UNIDAD DE OBSERVACIÓN	SISTEMA CATEGORIAL
Construir un sistema de bombeo, utilizando una aerobomba multipala.	Construyendo un sistema de aerobombeo, utilizando el recurso eólico existente en el Área de Agropecuaria y los Recursos Naturales Renovables, podremos determinar la dirección y velocidad del viento en la zona de incidencia.	Sistema de bombeo de la aerobomba, válvulas de paso y de salida para suministro de agua, herramientas y materiales utilizados.	- Sistema de bombeo. - Herramientas y materiales utilizados. - Aerobomba. Tecnología de fabricación.

ROBLEMA ESPECÍFICO 3: Ausencia de catálogos que permitan realizar la selección de este tipo de aerobombas.			
OBJETIVO ESPECÍFICO	HIPÓTESIS ESPECÍFICA	UNIDAD DE OBSERVACIÓN	SISTEMA CATEGORIAL
Realizar pruebas experimentales con el sistema de bombeo desarrollado, a fin de optimizar su funcionamiento.	Construyendo un sistema de aerobombeo, utilizando el recurso eólico existente en el Área de Agropecuaria y los Recursos Naturales Renovables podremos determinar la dirección y velocidad del viento de la zona de incidencia.	Sistema de bombeo de la aerobomba, válvulas de paso y de salida para suministro de agua, herramientas y materiales utilizados.	- Sistema de bombeo. - Herramientas y materiales utilizados. - Aerobomba. Tecnología de fabricación.

PROBLEMA ESPECÍFICO 4: Falta de difusión de los trabajos de investigación que se realizan en la carrera de Ingeniería Electromecánica.			
OBJETIVO ESPECÍFICO	HIPÓTESIS ESPECÍFICA	UNIDAD DE OBSERVACIÓN	SISTEMA CATEGORIAL
Socializar el trabajo de investigación y práctico, a nivel interno de la Universidad Nacional de Loja y fuera de la misma.	Realizando una campaña de información y difusión adecuadas de los trabajos de investigación, que se ejecutan en la carrera de Ingeniería Electromecánica, se consigue que los estudiantes y el público en general conozcan la importancia de los mismos.	Medios de comunicación: - Prensa Escrita - Radio Difusión - Televisión - Revistas Informativas	- Técnicas de expresión oral - Exposición - Disertación

i. 2. MATRIZ DE OPERATIVIDAD DE OBJETIVOS ESPECÍFICOS

OBJETIVO ESPECIFICO 1: Recopilar información para caracterizar el comportamiento del recurso eólico para realizar el diseño de la aerobomba.						
ACTIVIDAD O TAREA	METODOLOGÍA	FECHA		RESPONSABLE	PRESUPUESTO	RESULTADOS ESPERADOS
		INICIO	FINAL			
Mediciones de la velocidad, dirección, humedad y tipos de viento.	Recopilación de información utilizando la estación meteorológica.	2010-01-10	2010-09-31	Tlgo. M. Ramiro Tinoco C.	$ 200,00	Un histograma eólico que permite determinar el tipo de aerobomba a implementar.

OBJETIVO ESPECIFICO: 2						
ACTIVIDAD O TAREA	METODOLOGÍA	FECHA		RESPONSABLE	PRESUPUESTO	RESULTADOS ESPERADOS
		INICIO	FINAL			
Cálculos para determinar el tipo de bomba.	Compilación de información concerniente al tema de aerobombas multipala, en textos, revistas, etc. Formulación matemática para la determinación de los parámetros requeridos.	2010-06-01	2010-08-01	Tlgo. M. Ramiro Tinoco C.	$ 1050,00	Reforzar los conocimientos acerca de los capítulos de hidráulica relacionados con el objeto de investigación.

OBJETIVO ESPECÍFICO 3: Realizar el estudio del sistema que permita obtener diferentes datos para trazar curvas características en función de la velocidad del viento, para seleccionar la aerobomba más adecuada.						
ACTIVIDAD O TAREA	METODOLOGÍA	FECHA		RESPONSABLE	PRESUPUESTO	RESULTADOS ESPERADOS
		INICIO	FINAL			
Construcción o implementación de la aerobomba.	Trabajo práctico	2010-09-15	2010-10-15	Tlgo. M. Ramiro Tinoco C.	$ 150,00	Funcionamiento y bombeo de agua utilizando una aerobomba multipala.

i. 3. MATRIZ DE CONTROL DE LOS RESULTADOS

N°	RESULTADOS	FECHA	FIRMA DIRECTOR TESIS
1.	Medición de la velocidad, dirección y tipos de vientos.		
2.	Cálculos para determinar el tipo de aerobomba.		
3.	Dimensionamiento de la aerobomba más adecuada		
4.	Implementación de la aerobomba multipala.		
5.	Cotización del precio de la aerobomba multipala.		
6.	Forjar un listado de los elementos que componen la instalación con sus especificaciones técnicas, cantidad y costes		
7.	Elaboración del artículo científico de la investigación		
8.	Obtención del documento escrito de la tesis para la presentación final		
9.	**Título de Ingeniero en Electromecánica**	Decisión de la comisión	

i. 4. ESQUEMA, DIAGRAMA DE PROCESO, PLANOS.