



UNIDAD DE PLANEACIÓN MINERO ENERGÉTICA

**FORMULACION DE UN PROGRAMA BASICO DE
NORMALIZACIÓN PARA APLICACIONES DE
ENERGIAS ALTERNATIVAS Y DIFUSION**

Documento ANC-0603-14-01

**GUÍA PARA LA UTILIZACIÓN DE LA ENERGÍA
EÓLICA PARA BOMBEO DE AGUA**

Versión 01

Unión Temporal ICONTEC - AENE



Bogotá, Febrero de 2003

TABLA DE CONTENIDO

PRIMERA PARTE : ASPECTOS TECNICOS GUIA PARA LA UTILIZACION DE LA ENERGIA EOLICA PARA BOMBEO DE AGUA.....	3
1. OBJETO.....	3
2. REFERENCIAS NORMATIVAS	3
3. DEFINICIONES Y TERMINOLOGIA	3
4. INTRODUCCIÓN A LA UTILIZACION DE LA ENERGÍA EOLICA EN APLICACIONES DE BOMBEO DE AGUA.....	4
4.1 HISTORIA DEL USO DE LAS AEROBOMBAS	5
5. DESCRIPCION TECNICA DE LA TECNOLOGÍA	7
5.1 TIPOS DE BOMBAS	9
5.2 COMPONENTES	11
5.2.1 ROTOR	11
5.2.2 TRANSMISIÓN	13
5.2.3 SISTEMA DE SEGURIDAD.....	14
5.2.4 TORRE	15
6. REQUERIMIENTOS DE ENERGIA Y NECESIDADES DE BOMBEO	16
7. EL RECURSO EOLICO.....	20
7.1 EVALUACION DEL SITIO DE INSTALACION	22
8. APLICACIONES TIPICAS QUE UTILIZAN BOMBEO DE AGUA	26
8.1 VIABILIDAD DE LA UTILIZACION DE ENERGIA EOLICA PARA BOMBEO	27
8.2 CARACTERISTICAS IMPORTANTES A CONSIDERAR (PARÁMETROS).....	28
8.3 LA AEROBOMBA MAS UTILIZADA	29
8.3.1 ASPECTOS TÉCNICOS DE USO DEL AEROBOMBAS.....	30
8.4 COMPATIBILIZACION ENTRE BOMBA Y EL SISTEMA GENERAL	31
8.5 ALMACENAMIENTO DE AGUA Y DISTRIBUCIÓN	32
SEGUNDA PARTE: SELECCIÓN Y DISEÑO	34
1. CÓMO SELECCIONAR EL SISTEMA.....	34
2. DIMENSIONAMIENTO DEL SISTEMA	35
3. ASPECTOS ECONOMICOS	38
TERCERA PARTE: INSTALACIÓN, OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO	39
1. OBRA CIVIL	40
2. LEVANTAMIENTO	41
3. INSTALACIÓN DE LA BOMBA	43
4. MANTENIMIENTO	43
5. BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS PARA CONSULTA.....	45

ANEXO A (INFORMATIVO).....	47
----------------------------	----

LISTA DE TABLAS

Tabla 1 Estimativo de Limites de capacidad hidráulica de Aerobombas Comerciales	19
Tabla 2 Relaciones Generales entre Viabilidad y Velocidad de Viento para su uso como fuente de energía	26

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Molino Multipala Americano	6
Figura 2 Configuración típica de aerobombado directo (Tomado de: Gipe, P. Wind Power for Home & Business, 1993)	8
Figura 3 Instalaciones típicas de aerobombado directo	8
Figura 4 Rotor multipala americano de Alta solidez	12
Figura 5 Caja reductora de velocidad en aerobomba (Tomado del Manual: Assembly Instructions, Dempster Industries, Inc., Nebraska, 1980).....	13
Figura 6 Sistema de seguridad y orientación con cola trasera	15
Figura 7 Torre de aerobomba CWD2740.....	16
Figura 8 Arbol torcido por influencia permanente del viento.....	23
Figura 9 Instalaciones típicas de tanque de almacenamiento de agua con aerobombas (Tomado del Catalogo de Southern Cross International, 1990)33	
Figura 10 Tipos de Levantamiento de aerobombas	42

PRIMERA PARTE : ASPECTOS TECNICOS GUIA PARA LA UTILIZACION DE LA ENERGIA EOLICA PARA BOMBEO DE AGUA

1. OBJETO

Esta Guía ha sido preparada con el objeto de PROVEER CON UNA FUENTE DE INFORMACIÓN de referencia para aquellas personas interesadas en utilizar la energía eólica para bombeo de agua.

2. REFERENCIAS NORMATIVAS

WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION. (1981). Meteorological Aspects of the Utilization of Wind as an Energy Source. WMO, Ginebra, Suiza. Technical Note 175.

3. DEFINICIONES Y TERMINOLOGIA

- 3.1 **Aerobomba:** Equipo de bombeo de agua accionado por la energía del viento
- 3.2 **Altura de Bombeo (H):** Diferencia de nivel en la superficie libre del agua de la fuente de agua y el nivel de descarga
- 3.3 **Anemómetro:** Instrumento mecánico para medir la velocidad del viento
- 3.4 **Anualidad:** Valor promedio anual del costo de capital
- 3.5 **Bomba de doble efecto:** Bomba de agua de desplazamiento positivo cuya acción de bombeo ocurre, tanto en el desplazamiento de subida como de bajada por la acción del vástago.
- 3.6 **Bomba Reciprocante de Acción simple:** Bomba de agua de desplazamiento positivo provista de pistón que por la acción alternante solo bombea liquido en el movimiento de ascenso del vástago. Se dimensiona técnicamente por el diámetro del pistón y la longitud de la carrera (S) del vástago
- 3.7 **Disponibilidad de la aerobomba:** Fracción del tiempo en la cual una aerobomba esta bombeando agua de manera efectiva
- 3.8 **Eficiencia Volumétrica de una bomba ($\eta_{\text{volumétrica}}$):** Relación entre la cantidad real de agua entregada por una bomba y el volumen teórico barrido por acción del desplazamiento de un pistón
- 3.9 **Energía Hidráulica:** Cantidad neta de agua bombeada desde una altura de bombeo en un periodo de tiempo dado

- 3.10 Rotor eólico:** Dispositivo basado en palas aerodinámicas que accionado por el viento que incide sobre el, convierte su energía en energía rotacional mecánica
- 3.11 Velocidad Especifica (λ):** Relación entre la velocidad de la punta de las palas del rotor eólico y la velocidad de viento incidente
- 3.12 Velocidad Especifica de Diseño (λ_d):** velocidad especifica en la cual el rotor eólico entrega su máxima potencia
- 3.13 Velocidad Promedio Anual de Viento:** El valor de la velocidad resultante de calcular el promedio horario anual medido por un anemómetro.
- 3.14 Velocidad de Viento de Arranque:** Velocidad de viento en la cual la aerobomba comienza a bombear agua continuamente
- 3.15 Velocidad de Viento de Diseño:** Velocidad del viento en la cual la aerobomba opera a su máxima eficiencia de conversión de energía.
- 3.16 Velocidad del Rotor (N):** Velocidad rotacional del rotor eólico medido en revoluciones por segundo (rps)

4. INTRODUCCIÓN A LA UTILIZACION DE LA ENERGÍA EOLICA EN APLICACIONES DE BOMBEO DE AGUA

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 el 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 (o mejor conocidos como aerobombas) son utilizados para una variedad de aplicaciones como en 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 vera más adelante.

Esencialmente, una instalación de aerobombeo consiste de: rotor, torre, un sistema de transmisión 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 del diámetro del rotor, y dependiendo de la altura de bombeo (cabeza hidráulica) y de las velocidades promedios del viento, la potencia hidráulica promedio puede estar entre unos cuantos vatios hasta cerca de 1 kW.

Para demandas hidráulicas mayores se pueden utilizar sistemas eólicos-eléctricos de bombeo, los cuales permiten generar electricidad y a través de una transmisión eléctrica se maneja un motor eléctrico con su respectiva bomba. En el mercado internacional se encuentran disponibles estos sistemas para aplicaciones típicas con demandas hasta de 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, Kenia, 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 años 70, Colombia ha tenido un desarrollo tecnológico en la industria de aerobombeo interesante, sobretodo con diseños de aerobombas del tipo liviano de muy pocas palas, para aplicaciones de bombeo de medianas y bajas alturas y equipos para bajas velocidades de viento (Ver Anexo A).

4.1 HISTORIA DEL USO DE LAS AEROBOMBAS

Los sistemas mecánicos de aerobombeo como se conocen en la actualidad (ver Figura 1)



Figura 1 Molino Multipala Americano

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 múltiples 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 máquinas 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 máquinas 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. (Pinilla, 1985).

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 Colombia, aerobombas del estilo americano se introdujeron para uso agrícola en los años 20. Entre los años 1940 y 1980 se estima que se importaron cerca de 3,000 aerobombas a través de la Caja Agraria, aparte de algunos otros tantos equipos importados por otras entidades comerciales privadas. La mayoría de las aerobombas eran importadas de las compañías de Estados Unidos, Argentina, Australia y Sudáfrica y fueron utilizadas primordialmente para suministro de agua para ganado, irrigación y uso domestico. Muchas de estas maquinas fueron instaladas en la Sabana de Bogota y en cercanías de algunas otras ciudades colombianas, que al tener acceso a la red eléctrica entraron en desuso y en muchos casos solo sirven como elementos decorativos del paisaje. Algunos otros equipos fueron instalados en la Guajira colombiana, que con el transcurrir de los años, con el ambiente altamente corrosivo y salino de la región y la falta de mantenimiento; la mayoría de ellos se encuentran fuera de operación. Los indígenas wayu llaman estos equipos como los “*Chicago*”, por su procedencia. La inoperancia de estos equipos han dado mala imagen a esta tecnología energética para el suministro de agua.

5. DESCRIPCION TECNICA 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 practicas, 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 2). 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 de realiza lateralmente. Figura 3 resume estos tipos de instalaciones.

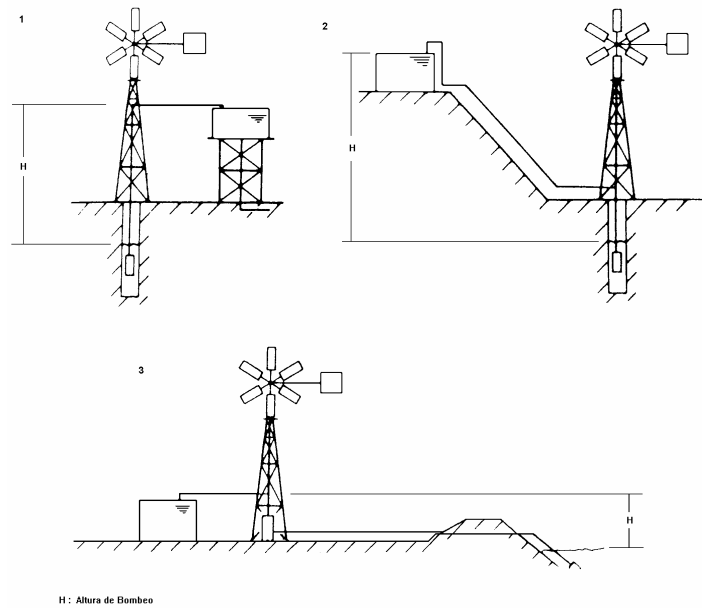


Figura 2 Configuración típica de aerobombeo directo
(Tomado de: Gipe, P. Wind Power for Home & Business, 1993)

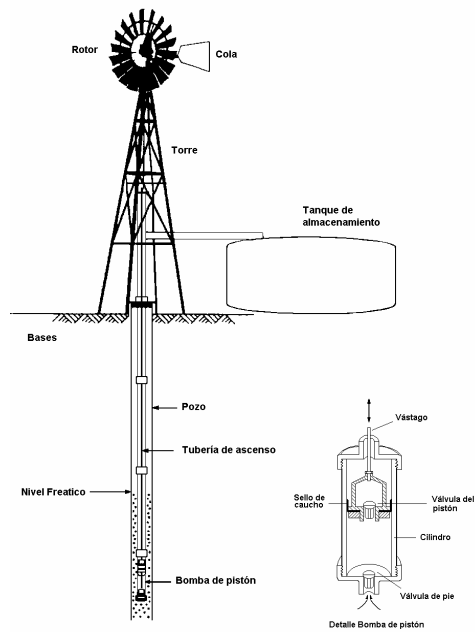


Figura 3 Instalaciones típicas de aerobombeo directo

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 la cual se incluyen transmisiones de movimiento de diversas formas. Por lo tanto cada solución determina el tipo de bomba hidráulica que se puede utilizar.

5.1 TIPOS DE BOMBAS

Dentro de la hidromaquinaria, 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 liquido 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 rotodinámicas y Bombas de desplazamiento positivo.

Las bombas rotodinámicas radican 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 rotodinámicas 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 rotodinámicas 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. (Burton & Loboguerrero, 1999).

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 tipo de soluciones confiables, sin embargo algunas de ellas requieren mayor desarrollo e investigación, al igual que otro tipo de esquemas no mencionadas 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:** Este esquema consiste 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 aerobombeo en los años setentas utilizaron rotores eólicos de eje vertical (esto es: Rotor Savonius). Estos intentos no han guiado a soluciones de bombeo practicas

debido a las bajas eficiencias de conversión de energía y aerobombas excesivamente pesadas, con costos de bombeo muy altos.

5.2 COMPONENTES

Las componentes principales de un sistema de aerobombeo son: 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 esta provisto con un sistema de seguridad para evitar operación de la aerobomba en condiciones de extremas de velocidad de viento, para su protección. 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 menciono 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.

5.2.1 ROTOR

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 rotor multipala americano pueden llegar a tener 12, 18, 24 ó aún 36 palas (ver Figura 4). Estos rotores se conocen técnicamente como rotor eólico de alta solidez, baja velocidad y alto momento par en el eje.



Figura 4 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.

A manera de ejemplo, si a un rotor eólico le incide un viento de 5 m/s, la velocidad periférica de la punta de las aspas para un rotor de alta solidez puede llegar a ser cerca de 7 a 8 m/s. Un rotor eólico con solidez intermedia tendrá una velocidad periférica cercana a los 15 m/s. Si en este ejemplo se considera un rotor de 3 metros de diámetro querrá decir que el equipo de alta solidez gira a 50 rpm contra 100 rpm para el equipo de más baja solidez. A mayores velocidades de viento más alta será la velocidad de giro.

En efecto, para una velocidad de viento dada, rotores de menor diámetro (entre 2 y 4 metros) giraran a más alta velocidad rotacional que un rotor con mayor diámetro (sea más de 5 metros). Las altas velocidades inducidas en la transmisión operando una bomba de pistón resultarían en elevados niveles de carga y esfuerzo que la construcción del equipo (torre, transmisión y vástago) no podrá resistir. Por ello es necesario proveer la transmisión con un reductor de velocidad en el cual con varias vueltas del rotor produzca un ciclo de bombeo. 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.

Nuevos desarrollos de aerobombas de baja solidez sin necesidad de caja reductora de velocidades para la acción de bombeo, incluye elementos adicionales como elementos flexibles en la transmisión, diseño adecuado de las tuberías de ascenso y adecuados sistemas de seguridad para evitar altas velocidades de pulsación de las bombas.

5.2.2 TRANSMISIÓN

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 disperejas en el mecanismo de biela manivela (ver Figura 5). La reducción de velocidad típica es de 3 a 1 y el conjunto viene sumergido en un baño de aceite para la adecuada lubricación.

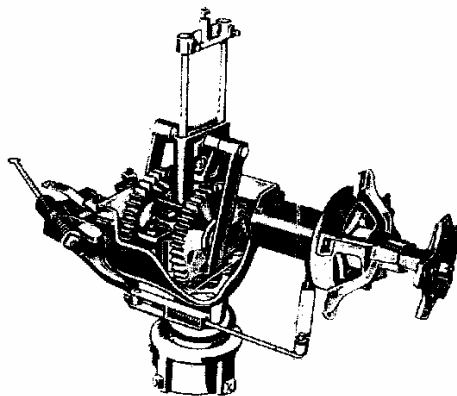


Figura 5 Caja reductora de velocidad en aerobomba (Tomado del Manual: Assembly Instructions, Dempster Industries, Inc., Nebraska, 1980)

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 proteger la bomba de eventuales daños que pueden ocurrir.

5.2.3 SISTEMA DE SEGURIDAD

Los rotores eólicos deben tener la capacidad de girar para encarar el viento en caso de que este cambie 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 necesarias 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, 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 desorienta para limitar la velocidad de excitación de la bomba y reducir, así, las fuerzas y cargas inducidas en todo el sistema.

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/hr) y detienen completamente el rotor y lo sacan de operación a velocidades cercanas a los 15 m/s (50 km/hr). 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 6 ilustra el mecanismo de seguridad simplificado de las aerobombas convencionales multipala americano

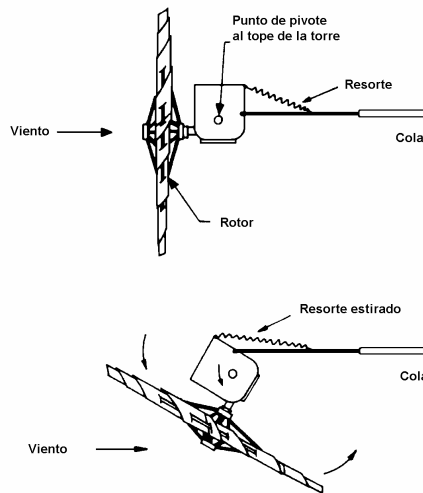


Figura 6 Sistema de seguridad y orientación con cola trasera

5.2.4 TORRE

Generalmente las aerobombas utilizan torres conocidas como autoportantes, 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 7 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.



Figura 7 Torre de aerobomba CWD2740

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.

6. REQUERIMIENTOS DE ENERGIA 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 específica. 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 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 calculo 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 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.

Conocida la cantidad necesaria de agua en un periodo de tiempo (Q en m^3) y la altura de bombeo incluidas las pérdidas hidráulicas en el sistema (H en m). La demanda total de energía hidráulica podrá ser expresada en m^4 ($m^3 \cdot m$) a través de:

$$E_h = \rho g Q H = 1000 \times 9.81 \times Q \times H$$

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

Donde E_h = Energía Hidráulica requerida en Julios
 ρ = densidad del agua (=1000 kg/m^3)
 g = Constante de gravedad (= 9.81 m/s^2)

Ejemplo:

Si se dispone de: $E_h = 3.6 \text{ MJ} = 1 \text{ kWh}$ esto corresponderá a 367 $m^3 \cdot m$.

Lo cual se puede interpretar que si la altura de bombeo es de 10 metros, la cantidad correspondiente de agua bombeada será de 36.7 m^3 en un periodo de tiempo dado.

En una sección anterior se mencionó que las aerobombas comerciales de tamaños entre 1 y 8 metros de diámetro, puede representar una potencia hidráulica promedio entre unos 10 vatios para equipos pequeños hasta 1000 vatios (1 kW) para equipos grandes. Debe anotarse que estos valores dependen fuertemente de las condiciones del régimen de viento donde se encuentre la instalación.

Esto quiere decir que se pueden estimar las fronteras de la capacidad hidráulica de las aerobombas, en general, y pueden ser resumidas en la Tabla 1

Tabla 1 Estimativo de Limites de capacidad hidráulica de Aerobombas Comerciales

Tipo de Aerobomba y Régimen de viento	Energía Hidráulica anual en kWh/año	Energía Hidráulica anual en m ⁴ /año	Energía Hidráulica diaria en m ⁴ /día
Diámetro: 2 metros Velocidad Anual Promedio Baja	50	18,500	51
Diámetro: 8 metros Velocidad Anual Promedio Alta	9,000	3,300,000	9,200

Lo contenido en la Tabla 1 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.

Ejemplo 1 de uso de Tabla 1

Una Aerobomba de 2 m de diámetro se desea instalar en un régimen de vientos bajos cuya velocidad de viento promedio en un día es de 3.5 m/s. La fuente de agua es un pozo de agua cuyo nivel freático se encuentra a 5 metros de profundidad y se desea llevar el agua a un tanque de almacenamiento con 5 metros de altura adicional.

Según la tabla este equipo puede suministrar 51 m⁴/día y para la altura de bombeo de 10 metros, la aerobomba puede entregar cerca de 5 m³ diarios (5000 litros) de agua, lo suficiente para el abastecimiento de agua para 100 reces de ganado vacuno.

Ejemplo 2 de uso de Tabla 1

Una aerobomba de 8 metros de diámetros se desea instalar en un régimen fuerte de vientos cuya velocidad promedio en un día es de 7.5 m/s. La fuente de agua es un pozo de agua cuyo nivel de agua se encuentra a 30 metros de profundidad.

Según la tabla este equipo puede suministrar 9,200 m⁴/día, que para la altura de bombeo de 30 metros, la aerobomba puede suministrar cerca de 300 m³ 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.

7. EL RECURSO EOLICO

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. 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 una área A perpendicular a V , es:

$$P_{\text{viento}} = \frac{1}{2}\rho V^3 A \text{ (w: vatios)}$$

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

Velocidad del viento: La potencia eólica disponible es proporcional al cubo de la velocidad del viento. Un incremento de velocidad de viento en 1 m/s, por ejemplo de 5 a 6 m/s, representa un aumento sustancial en potencia: $5^3 = 125$ contra $6^3 = 216$ (73 % de incremento).

Así mismo si la velocidad del viento se duplica, la potencia disponible se incrementa en ocho veces. Es por esto, que lugares con altos niveles de velocidad de viento son preferidos para la evaluación sistemática del recurso, así como para el emplazamiento no solo de aerobombas sino también aerogeneradores de gran tamaño para el suministro de energía eléctrica.

Características del Viento: Mientras los patrones globales de circulación determinan el régimen de vientos predominante sobre un país o región; las características topográficas locales (esto es, formaciones geográficas, vegetación, montañas, valles, etc) pueden marcar una gran diferencia entre un recurso eólico adecuado o inadecuado para su utilización como alternativa energética. Por ejemplo, el viento se acelera al soplar hacia arriba de una colina o montaña; o a través de un valle. También en regiones costeras se experimentan corrientes de viento cuyo patrón varía a lo largo del día (variaciones diurnas).

Aparte de las características topográficas, las obstrucciones en la superficie terrestre afectan la calidad del recurso eólico en una zona. El viento en la atmósfera fluye libre pero su intensidad se ve disminuida y fluye de manera turbulenta al circundar la superficie terrestre y al encontrar a su paso obstáculos, como árboles, construcciones, etc. El nivel de turbulencia adquirido por una corriente de aire disminuirá considerablemente la potencia disponible en el viento, al

tiempo que esta turbulencia será proporcional a los tamaños asociados con los obstáculos físicos (Efecto de Capa limite). Una topografía plana, sin obstrucciones, como una pradera o la superficie del océano causará un nivel de turbulencia menor. En contraste, terrenos rugosos con obstáculos (bosques, zonas aledañas a ciudades, etc) hacen que el viento presente condiciones de extrema turbulencia y generalmente el recurso eólico es pobre. Para poder utilizar esta fuente de energía, en estas circunstancias, implicaría usar torres de las aerobombas más altas para poder extraer energía de una corriente de viento menos turbulenta.

Dado que la velocidad del viento es un factor de primordial importancia, es necesario mencionar que la velocidad del viento se incrementa al ascender a una mayor altura sobre la superficie. El cambio de velocidad con la altura varía de lugar en lugar. En un terreno plano, la velocidad de viento se incrementa en un 10 % al duplicar la altura. Por ejemplo, al tener una velocidad de viento de 5 m/s a la altura de medición meteorológica estándar de 10 metros, la velocidad será de 5,5 m/s a una altura de 20 metros desde la superficie, por lo tanto el nivel de potencia eólica disponible (a 20 metros) se aumenta en un 33 %.

Como se mencionó en párrafos anteriores, ya que la energía eólica es consecuencia de la radiación solar, se encuentra que el patrón de comportamiento de la distribución del viento, comúnmente, presenta variaciones diurnas con una correspondencia marcada a los niveles de variación de radiación solar, en la misma escala de tiempo. En una escala de tiempo mayor, es decir variación mensual o estacional, los niveles de variación del régimen de viento están influenciados por los patrones globales de circulación, los cuales se repiten anualmente. Es por esto que en un lugar seleccionado al evaluar su recurso se encuentren patrones repetitivos de variación de la velocidad de viento en todas las escalas de tiempo. Este fenómeno permite evaluar el recurso eólico adecuadamente, con un mínimo de un año de mediciones de velocidad de viento. Con esta información se puede conocer con un cierto nivel de confiabilidad, el recurso eólico, su correspondiente nivel de energía disponible y su variabilidad a lo largo del año.

Por otra parte, una fuente natural de información son los registros de viento realizados por el IDEAM (antiguo HIMAT), pero esta información debe ser estudiada con extremo cuidado. Muchas veces, el servicio meteorológico recauda información eólica en medio de las poblaciones con sistemas anticuados (descalibrados) y mal localizados con respecto al viento. Es por esto, que existe la tendencia a pensar que el recurso eólico es muy bajo en muchas zonas, particularmente zonas rurales, debido a la no existencia de registros ó a una mala medición del recurso como una fuente energética. Así pues, al estudiar los registros meteorológicos, es típico encontrar en el mejor de los casos, en la mayoría de las estaciones, promedios anuales de velocidad de viento entre 2 y 3 m/s y los cuales quizás no corresponden a la condición real de viento en la región, ya que la colocación de la estación meteorológica y/o el tipo de registradores no son los más adecuados para medir el recurso eólico. En consecuencia, no se puede planificar ningún tipo de proyecto eólico con base a esta información histórica, a menos que se verifique su precisión, la cual generalmente, es una dificultad adicional.

Sin embargo en la actualidad existe información a gran escala y modelos computacionales que permiten evaluar el recurso eólico, ya que al localizar anemómetros para la medición del recurso, el cubrimiento de grandes áreas es impracticable; así, estos modelos permiten estimar el comportamiento del régimen de vientos en regiones amplias con resultados confiables. Estos modelos requieren de información topográfica, parámetros meteorológicos en relación con el microclima de la región de estudio, etc para predecir adecuadamente el patrón de vientos y su intensidad.

7.1 EVALUACION DEL SITIO DE INSTALACION

Determinar el potencial energético eólico de una zona, es una labor que requiere tiempo además de recursos económicos para realizarse adecuadamente. Como se menciona en una sección anterior, es necesario coleccionar datos meteorológicos por lo menos durante un año, si se desea realizar una prospección con cierto grado de certidumbre. A diferencia de la evaluación del recurso solar, donde se pueden cubrir mayores áreas con la evaluación de sus parámetros meteorológicos asociados; el recurso eólico, por su propia naturaleza, tiene un comportamiento específico en el lugar y presenta variaciones espaciales substanciales. Esto quiere decir que al realizar mediciones puntuales en un sitio, las magnitudes de la velocidad de viento y su dirección, a una distancia de 100 metros, son diferentes, sin embargo puede existir una correlación entre sus magnitudes y su comportamiento, en general.

La adecuada determinación de la variación del recurso eólico en un año permite seleccionar el tamaño adecuado de la aerobomba para un requerimiento dado de energía. Al mismo tiempo, al conocerse los períodos largos de calma, se identificará la necesidad de almacenamiento de agua durante varios días, o en su defecto la necesidad de instalar un sistema alterno de generación como un sistema fotovoltaico o una motobomba para el suministro constante de agua. Así pues, la estrategia que se utilice para evaluar el recurso estará acorde con las necesidades energéticas del lugar, ya que al requerirse entrega de energía para una población pequeña, el nivel de sofisticación de la evaluación será mayor, al compararse con la necesidad de entregar energía a pequeños consumidores individuales. Esto se traduce que para instalar sistemas de aerobombeo, un estimativo cercano a la velocidad promedio anual de viento en el lugar será suficiente y menos costosa que un programa detallado de evaluación.

Estimaciones del recurso eólico se basan en algunas estrategias útiles como son: Colección de información de manera empírica, anemómetros totalizadores, por factores de correlación, instalación de pequeños SCEE o por adquisición de datos en tiempo real.

Información Empírica: Esta información se recoge en base a visitas realizadas al lugar, donde las condiciones de topografía, de vegetación y el conocimiento de los habitantes de la región aportan valiosa información en la identificación de lugares con altos niveles de velocidad de viento. Por ejemplo, la constante incidencia del

viento en los árboles a lo largo del tiempo, o sobre la vegetación, hacen que estos crezcan inclinados en la dirección predilecta del viento (Ver Figura 8).



Figura 8 Arbol torcido por influencia permanente del viento

Análogamente, la presencia de algunos molinos de viento instalados de años atrás, dan un verdadero indicio de que el lugar presenta un régimen adecuado de viento, para profundizar en su evaluación. Es claro que la información empírica, así recogida, no permite conocer un valor aproximado de velocidad promedio anual del viento, pero si permite prospectar sitios para futura evaluación del recurso.

Se han realizado varios intentos de relacionar las condiciones de inclinación de los árboles y la vegetación con valores aproximados de la intensidad del viento, pero esto no puede reemplazar una apropiada medición del recurso eólico.

Otra fuente de información es la recogida por el servicio de meteorología en sus estaciones, donde solo se puede identificar unas características generales de la región y sus lugares aledaños pero esta información será más de naturaleza cualitativa y no cuantitativa.

Realizar una compra e instalación de una aerobomba basado estrictamente en esta información empírica no es el mejor enfoque, pudiéndose presentar resultados poco favorables no solo desde el punto de vista de suministro de agua sino de la mala imagen de esta fuente energética por una instalación inapropiada.

Anemómetros Totalizadores: Una manera efectiva de determinar los valores promedios globales del comportamiento del viento es por medio de la instalación de anemómetros totalizadores. Estos elementos son anemómetros de cazoletas (como los que se observan en los aeropuertos) con odómetro que al ser accionados por el viento miden la distancia de viento que ha pasado a través del instrumento. Al estar conectado al odómetro (medidor de revoluciones) se podrá entonces establecer para un período dado de tiempo, el número de metros o kilómetros de viento que han pasado. Esta relación entre la distancia y el tiempo de medida permite entonces conocer la velocidad promedio del viento. La dificultad de este sistema radica en que el anemómetro deberá estar localizado en un lugar donde las condiciones sean limpias, con muy pocos obstáculos alrededor; y el anemómetro deberá estar mínimo

a 10 metros de altura. Así pues al realizarse la lectura, el visualizador del odómetro deberá estar localizado muy cerca de la superficie, ya que las torres para la instalación de anemómetro, por lo general, no son lo suficientemente robustas para sostener el peso de una persona que ascienda para realizar las lecturas.

Con la recopilación de esta información totalizada y con promedios de velocidad de viento, se caracteriza formalmente el régimen de vientos presente en un lugar, identificándose con gran certeza las variaciones tanto diurnas como mensuales o estacionales.

Método de Correlación: Este todo de estimación permite combinar mediciones realizadas en un lugar específico con anemómetros totalizadores, con datos publicados y suministrados por el servicio de meteorología en estaciones aledañas al lugar. Con esta información se pueden producir factores de correlación a través de comparar los valores promedios deducidos de los anemómetros totalizadores con los datos publicados por el servicio de meteorología. Si se da una buena correlación, por ejemplo, con promedios mensuales de viento, y se tienen varios años de medida meteorológica, se aproximará mucho más a una estimación real del régimen de viento en el lugar. También se podrá utilizar una función de peso cuando la correlación no es tan directa, al comparar mes a mes, así que los valores obtenidos permitan tener mayor certidumbre en la toma de decisión de una instalación eólica.

Adquisición de Datos en Tiempo Real: Este método de evaluación es el más confiable y al mismo tiempo costoso para análisis del recurso. La oferta de equipos de adquisición de datos (data loggers) es cada vez mayor, y fundamentalmente consiste de un pequeño computador que registra y almacena la información de manera permanente, dependiendo de la necesidad del usuario, así que se pueden registrar promedios meteorológicos desde el rango de segundos hasta horas en las variables correspondientes. Entre más precisa, (promedio en tiempo menor y registros de memoria extendida) hacen que el equipo sea más costoso. La mayoría de los equipos de adquisición de datos comercial vienen provistos con procesadores de memoria que son removibles e intercambiables con capacidad de acumulación de información hasta de dos meses continuos de registro. Algunos equipos, por otro lado, permiten extraer la información a través de telefonía celular desde la oficina hasta el lugar donde se está realizando la evaluación del recurso. Como tal, los resultados de una evaluación con esta metodología garantiza un preciso dimensionamiento del sistema de aerobombeo para suministro de agua.

Cuando se tiene información confiable sobre el régimen de viento en un lugar, ésta deberá ser analizada adecuadamente, para ser combinada con las características del sistema de aerobombeo; pudiéndose estimar, entonces, la cantidad de agua que puede suministrar el equipo eólico en el lugar seleccionado. La confiabilidad de los resultados de estimación de energía reside en la cantidad y calidad de los datos asociados al régimen de vientos, como se menciona en párrafos anteriores.

La Tabla 2 (Power Guide, 1994) indica las posibilidades de uso de la energía eólica, con base a valores promedios de velocidad de viento anual.

Tabla 2 Relaciones Generales entre Viabilidad y Velocidad de Viento para su uso como fuente de energía

Promedio Anual de Velocidad de viento 10 metros de altura	Posibilidad de Uso de Energía Eólica
Menor a 3 m/s	Usualmente no es viable, a menos que existan circunstancias especiales para una mejor evaluación
3 - 4 m/s	Puede ser una buena opción para equipos de aerobombeo, poco viable para aerogeneración eléctrica
4 - 5 m/s	Aerobombas son competitivas económicamente a los equipos Diesel, bombeo aero-eléctrico es viable
Más de 5 m/s	Viable para aerobombeo y aerogeneración eléctrica.
Más de 6 m/s	Viable para aerobombeo, aerogeneración con sistemas autónomos y para sistemas conectados a la red eléctrica.

Debe existir claridad de que esta tabla es una indicación de rápida referencia y no pretende ser completamente concluyente. Como se mencionó anteriormente, dado que el viento es consecuencia de la energía solar, su comportamiento puede tener una marcada relación con la radiación solar, logrando obtener velocidades de viento altas durante el día y presentar períodos de calma durante la noche, como tal esto implica registros promedios de velocidad de viento bajos y por lo tanto se deberá tener cuidado en su evaluación. Similarmente, si los valores promedios se basan en datos suministrados por el servicio meteorológico, se deberá realizar una visita a la estación para conocer la colocación de los registradores del viento y determinar así su nivel de exposición al régimen de vientos. Otro factor a tener en cuenta, es el estudiar cuidadosamente las variaciones estacionales del viento, ya que períodos largos de calma produce promedios anuales de velocidad bajos, pero no implica que el recurso eólico se deba desechar rotundamente.

Vale la pena aclarar que en la tabla se hace referencia al valor promedio anual de velocidad de viento a 10 metros de altura sobre la superficie y cuando se esta pensando en instalaciones de aerobombas a mayor altura se tendrá que corregir la velocidad de viento promedio a la altura de la torre del equipo.

8. APLICACIONES TÍPICAS QUE UTILIZAN BOMBEO DE AGUA

Sistemas de aerobombeo se han utilizado para una variedad de aplicaciones. Como se ha mencionado, entre las más comunes están:

- Abastecimiento de agua limpia para uso domestico

- Suministro de agua para ganadería
- Irrigación
- Drenaje
- Movimiento de agua en granjas piscícolas

Vale la pena mencionar que en algunas ocasiones los equipos de aerobombeo se utilizan para el suministro de agua rural para pequeñas comunidades. La demanda típica de una población de 500 habitantes puede ser del orden de 20 m³ por día, la cual generalmente no cambia a lo largo del año. Para una condición de bombeo con unos 20 metros de altura hidráulica, el requerimiento energética será de 400 m⁴ o cerca de 1 kWh_{hid} por día.

El costo de suministro de agua rural para uso domestico puede ser US\$ 1.-/m³, y en zonas áridas, el costo de suministro puede ser bastante más alto. En sistemas de suministro de agua rural es normal contar con tanques de almacenamiento, aún cuando el sistema es operado por motobombas a gasolina o diesel, debido a los riesgos de falta de suministro de combustible, robo de accesorios, o daños en el sistema.

En sistemas de irrigación generalmente la demanda por agua es estacional. La demanda en la época pico del año puede exceder entre 3 a 5 veces la demanda promedio al año. En general el costo unitario de suministro de agua para sistemas de irrigación puede estar por debajo de US\$ 0.10/m³. Esto impone restricciones en lo que respecta a utilizar pequeños sistemas de irrigación con cualquier fuente de suministro de energía, para grandes profundidades del acuífero; los cuales resultan muy costosos para bajos niveles de consumo o irrigación a pequeña escala. Si se utilizan aerobombas en sistemas de irrigación generalmente estos deben contar con un tanque de almacenamiento de agua (van Meel & Smulders, 1989).

8.1 VIABILIDAD DE LA UTILIZACION DE ENERGIA EOLICA PARA BOMBEO

Asumiendo que se dispone de las diversas opciones para el bombeo de agua (como aerobombas, bombas fotovoltaicas, motobombas y aún bombas de mano), la pregunta siempre será: ¿Cuál de las alternativas de suministro de agua es la más confiable y de más bajo costo?.

La respuesta acertada a esta pregunta depende de diversos parámetros que varían de lugar en lugar debido a la variación de la potencia eólica, además de otros factores como pueden ser los costos de importación, costos de combustibles, disponibilidad de la tecnología, costos laborales, subsidios, etc.

Para la determinación de la viabilidad técnica del uso de aerobombas es importante entonces conocer:

- Promedio diario de energía hidráulica requerida para cada mes del año, expresada como m⁴/día.
- Velocidad de viento promedio a lo largo del año (mes a mes)
- Identificar el mes crítico – mes en el cual la demanda energía hidráulica es la más alta, su comparación con el potencial de viento disponible para dicho

mes. Esta comparación permite identificar el mes crítico o de diseño para la selección de equipos. Por ejemplo, para abastecimiento de agua limpia para uso doméstico, en el cual generalmente la demanda de energía es relativamente constante, el mes crítico será aquel donde la velocidad promedio mensual sea la más baja. Adicionalmente si se requiere dotar el sistema con un tanque de almacenamiento de agua, se deberá determinar el periodo en días, más largo en el cual la velocidad del viento es muy baja para accionar la aerobomba.

En la Tabla 1, se delimita el rango de aerobombas individuales para el suministro de agua; en el rango inferior cuando el requerimiento de agua es menor a, por ejemplo, 40 m⁴/día (ó 0.1 kWh/día), posiblemente una bomba de mano sea la mejor alternativa; y en el rango superior, por encima de los 10,000 m⁴/día (ó 30 kWh/día) la mejor alternativa puede ser un sistema de bombeo eolo-eléctrico ó un sistema de bombeo con combustible fósil; a menos que la instalación de varias aerobombas individuales amerite una solución viable para el abastecimiento de agua.

8.2 CARACTERÍSTICAS IMPORTANTES A CONSIDERAR (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-costos 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 m⁴/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 esta 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 (Pinilla, 1985).

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.

La siguiente sección describe en detalle, aspectos técnicos importantes y parámetros que determinan la mejor selección de una aerobomba para una aplicación específica.

8.3 LA AEROBOMBA MAS UTILIZADA

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. Es usual observar equipos instalados a mediados de siglo XX, todavía operando después de 50 años de uso, claro eso si, 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.

8.3.1 ASPECTOS TÉCNICOS DE USO DEL 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 esta varía con la altura sobre el nivel del mar. Para una misma velocidad de viento, la potencia eólica disponible en la Sabana de Bogotá es el 75% de aquella disponible al nivel del mar.
- ✓ El momento par (mal 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 varía con el cubo de la velocidad del viento.
- ✓ La potencia extraída por el rotor varía con el cuadrado de su diámetro.
- ✓ Debido a la alta solidez de las aerobombas, la velocidad específica 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 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 menores 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 varia con la raíz cuadrada de la altura de bombeo
- ✓ La velocidad de arranque de la aerobomba varia linealmente con el diámetro del pistón de la bomba
- ✓ La cantidad de agua bombeada en cada carrera (ó pistonada) varia con el cuadrado del diámetro del pistón

Estos principios técnicos deben estar siempre presentes en la lectura de catálogos comerciales de fabricantes de aerobombas, sobretodo en lo que respecta a la 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.

Mas adelante se entregan unas relaciones que permiten cuantificar mejor los detalles técnicos aquí explicados.

8.4 COMPATIBILIZACION 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 minutos. Rotores más grandes pueden transmitir el movimiento directamente ya que estos rotores giran mas 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.

A manera de ejemplo, esto quiere decir que si una aerobomba esta bombeando agua a una altura de bombeo de 25 metros, por ejemplo, el vástago de transmisión y la cámara pueden llegar a alcanzar picos de presión y fuerza equivalentes a como si estuviera bombeando con cabeza de bombeo de 120 metros o más. (Smulders, Pinilla & Burton, 1995).

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 a máximo 60 ciclos por minuto.

Algunas soluciones se han tratado para permitir mayores velocidades de excitación de las bombas reciprocantes, sobretodo cuando se desean acoplar con nuevos diseños de rotores más livianos y mas 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.

Otro fenómeno que se puede presentar en los sistemas de aerobombeo, sobretodo en instalaciones con tuberías de conducción muy largas, es el llamado golpe de ariete. Este puede ocurrir cuando en la acción de bombeo a la bomba le entra aire de manera intermitente, como puede ser cuando el pozo de donde se extrae el agua no se recupera a la velocidad de extracción de la bomba. Estos paquetes de aire se expande y se comprimen en el interior de la tubería; y si el movimiento cíclico del colchón de aire y la masa de agua (que inherentemente presenta una frecuencia natural) llega a coincidir con la frecuencia de excitación de la bomba los daños pueden ser dramáticos.

Por estos fenómenos se deben instalar en el vástago un elemento débil a manera de un fusible mecánico que al fallar protege todo el conjunto de aerobomba de posibles daños catastróficos.

8.5 ALMACENAMIENTO DE AGUA Y DISTRIBUCIÓN

Una parte importante de un sistema de bombeo es el almacenamiento de agua y su distribución. La Figura 9 ilustra algunos esquemas de almacenamiento utilizados en sistema de aerobombeo.

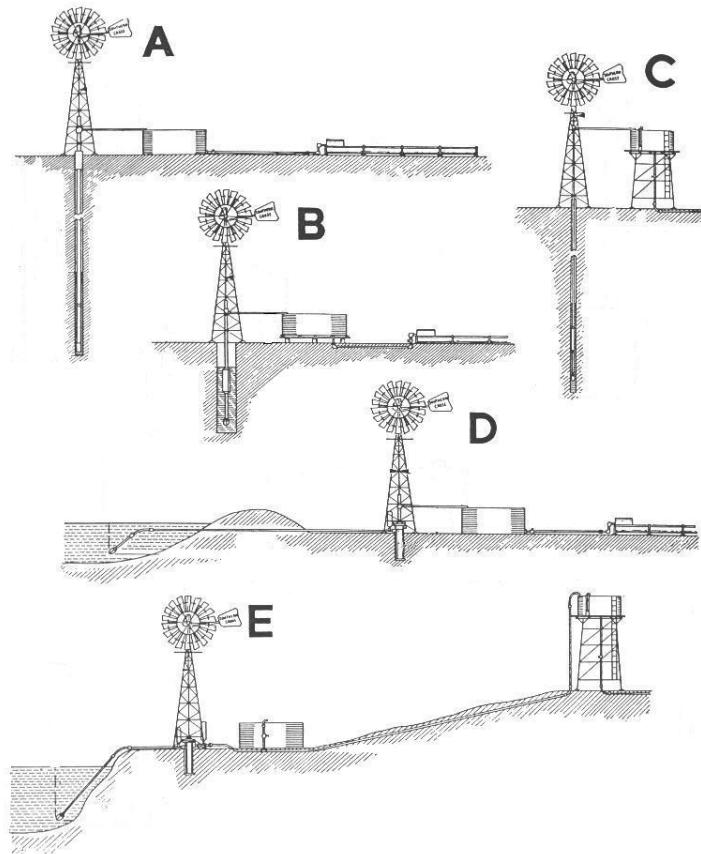


Figura 9 Instalaciones típicas de tanque de almacenamiento de agua con aerobombas
(Tomado del Catalogo de Southern Cross International, 1990)

Generalmente el tanque de almacenamiento regulariza el suministro de agua. La aerobomba entrega el fluido de manera variable 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 circunstancias locales y de la aplicación. Mano de obra y materiales locales definirán el costo del tanque y la manera en que este 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 9– instalación C y E).

En la actualidad se consiguen en el mercado, tanques de polietileno con un costo cercano a US\$ 80/m³ ó tanques de concreto reforzado con acero a un costo de casi el doble (US\$ 180/m³).

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.

SEGUNDA PARTE: SELECCIÓN Y DISEÑO

1. CÓMO SELECCIONAR EL SISTEMA

A lo largo del presente documento se han dado pautas generales para la decisión de uso de aerobombas para el suministro de agua en sus diversas aplicaciones. Es claro que la respuesta a la pregunta planteada de cómo seleccionar el sistema de aerobombeo deberá tener en cuenta los aspectos técnicos y económicos. En el

mercado colombiano 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 (por ejemplo la Costa Atlántica, Santanderes, etc.). 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 ha presentado ocasiones en los cuales alguno de estos equipos se instalan en lugar con vientos altos y días después de la instalación ellos 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 optimas para estas aplicaciones. Claro esta que para condiciones de bajo régimen de viento y bajas alturas de bombeo estas maquinas 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 esta 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 maquinas, que contienen muchos años de experiencia practica en este campo.

2. DIMENSIONAMIENTO DEL SISTEMA

Esta sección pretende suministrar las herramientas básicas para un adecuado dimensionamiento de un sistema de aerobombeo, en todos sus componentes, esto con el fin de poder elegir la mejor solución comercial posible que responda a una aplicación dada.

Se ha utilizado de tiempo atrás, una relación empírica sencilla para dimensionar equipos de aerobombeo y la cual permite aproximarse a un estimativo de la entrega promedio de potencia y, por ende, energía hidráulica durante un periodo dado de tiempo. Esta relación es:

$$\bar{P} = 0.1 A V^3$$

donde \bar{P} : Potencia eólica promedio durante el periodo de estimación
A: Area del Rotor y
V: Velocidad Promedio del viento en el periodo de estimación

Esta relación que tiene una sustentación teórica sólida (Pinilla, Burton & Dunn, 1984), permite ampliar su espectro de aplicación para condiciones prácticas de selección de equipos. En el documento de la referencia se demuestra además que el coeficiente puede variar entre 0.5 y 1.5 bajo condiciones especiales del aerobombeo y diversos regímenes de viento.

EJEMPLO DE APLICACION

Si se cuenta con una aerobomba de 3 metros de diámetro y se desea instalar en un lugar donde el promedio anual de la velocidad de viento es 4 m/s, se estima entonces que la energía hidráulica anual que suministra la aerobomba es aproximadamente:

$$E_{hid} = 0,1 * \frac{\pi}{4} D^2 * V^3 * 8,760 \frac{horas}{año} = 0,1 * \frac{\pi}{4} 3^2 * 4^3 * 8,760 = 396,292 Wh / año$$

Esto equivale a 396 kWh por año que representa 1.1 kWh por día, o más bien una capacidad de entrega hidráulica de 400 m⁴ por día (Ver sección 7).

Para corroborar este estimativo, se puede comparar con información suministrada por un fabricante que indica que bajo condiciones de tamaño de rotor y velocidad de viento iguales, su equipo multipala provee una capacidad de 15.54 m³ al día con una altura de bombeo de 25 metros (Southern Cross Industries, 1990). Esto equivale a (=25x15.54) 388.5 m⁴ por día.

Claramente cuando las aplicaciones imponen mayor altura de bombeo es previsible que esta relación sencilla tienda a sobrestimar la entrega de energía hidráulica, igualmente si la altura de bombeo es baja, esta relación subestima la entrega de energía.

Para continuar con el ejemplo de aplicación, el siguiente paso a seguir es determinar el tamaño de bomba reciprocante y su correspondiente recorrido de carrera que se ajuste a la cantidad de energía hidráulica disponible. Un enfoque es elegir la velocidad de viento en la cual la bomba opera en su más alta eficiencia. Esta velocidad generalmente es elegida como el 60% de la velocidad promedio anual del viento (Lysen, 1983), esta elección permite optimizar la disponibilidad de la aerobomba, esto es que bombee durante el mayor número de horas al año. Igualmente esto determina la posible velocidad de arranque de la aerobomba que usualmente se elige muy cercana a la velocidad promedio anual de viento.

Para la condición de diseño óptimo se tendrá que la aerobomba operará en su condición de máxima extracción de potencia eólica la cual corresponde al 30% de la potencia eólica disponible y es transformada en potencia hidráulica útil.

CALCULO DEL VOLUMEN Y TAMAÑO DE BOMBA

Para la condición de diseño óptimo, se cumple que:

$$\eta_{\max} * \frac{1}{2} \rho V_{\text{diseño}}^3 A_{\text{rotor}} = \rho_{\text{agua}} * g * H * Q$$

El caudal esta determinado entonces por el volumen de agua bombeado en cada golpe de carrera por recorrido de carrera y la velocidad de transmisión del movimiento. En este ejemplo el equipo eólico, por ser de tamaño menor a los 5 metros de diámetro, debe tener una transmisión con reductor de velocidad que por lo general es de 1:3. La aerobomba a elegir es entonces del tipo multipala americano.

Así pues el caudal de diseño resulta ser:

$$Q = A_{\text{bomba}} * S * N * \eta_{\text{volumetrica}}$$

donde N es la cantidad de ciclos de carrera por segundo el cual, a su vez, estará determinado por la velocidad específica del equipo, la velocidad de viento de diseño y la eficiencia volumétrica de la bomba ($\eta_{\text{volumétrica}}$) que representa la capacidad real de bombeo que en bombas reciprocantes puede estar cercana al 90%. Así pues:

$$\lambda_{\text{diseño}} = \frac{\pi(i * N)D}{V_{\text{diseño}}} \text{ con } i \text{ corresponde a la relación de reducción de velocidad.}$$

En consecuencia para la condición de diseño y aplicando las relaciones, la ecuación de diseño se puede expresar como:

$$\eta_{\max} * \rho V_{\text{diseño}}^2 A_{\text{rotor}} \pi \frac{D}{2} = \rho_{\text{agua}} * g * H * A_{\text{bomba}} * S * \eta_{\text{volumetrica}} * \frac{\lambda_{\text{diseño}}}{i}$$

Al aplicar los valores del ejemplo, el volumen barrido por la bomba debe ser:

$$A_{\text{bomba}} * S = 9.473 * 10^{-4} \text{ m}^3.$$

Si la longitud de carrera se elige $S = 0.16$ m resulta un diámetro del pistón de la bomba de 87 mm.

Para efectos comparativos una aerobomba comercial para esta aplicación específica sugiere una bomba de 90 mm de diámetro, un recorrido de carrera de 165 mm y una relación de reducción de velocidad de 1:2.6.

El método ejemplificado en los párrafos anteriores es adecuado para dimensionar los componentes esenciales de una aerobomba para su adecuada selección. Para dimensionar aerobombas generalmente se cuenta con la ayuda de catálogos comerciales, sin embargo con la ayuda del procedimiento descrito, y el cual es confiable, la elección de equipos será más acertada.

DIMENSION DEL TANQUE DE ALMACENAMIENTO

En caso de requerirse un tanque de almacenamiento de agua, se ha indicado en secciones anteriores, que el volumen de un tanque se elige entre $\frac{1}{2}$ día y 2 días, dependiendo de la aplicación. En este ejemplo el volumen del tanque podría ser entre 8 y 30 metros cúbicos de volumen.

Vale la pena mencionar que en este ejemplo es previsible esperar que la aerobomba realice bombeo efectivo entre 8 y 12 horas al día y que a lo largo del año se presenten periodos continuos de calma (viento nulo) de no más de dos días continuos. A menos que, durante el año existan meses con velocidad de viento muy baja, entonces el periodo de no-bombeo puede extenderse por varios días.

3. ASPECTOS ECONOMICOS

Una instalación eólica para bombeo de agua suele requerir una alta inversión de capital inicial. Para ello se suministra en esta sección unos valores típicos de costos de equipo y elementos para cuantificar una inversión.

Con relación a los sistemas de aerobombeo se utilizan costos típicos específicos como son:

AEROBOMBAS: se cuantifica su costo con relación al área del rotor, es por esto que para aerobombas robustas de gran peso como los equipos multipala americano, el costo típico internacional oscila entre US\$ 350/m² y US\$ 450/ m² de área de rotor. Este monto incluye la torre típica de 10 metros de altura, la bomba y el sistema de transmisión.

Para aerobombas de fabricación con tecnología mas sencilla, esto es equipos de mediana solidez y livianos el valor por metro cuadrado se estima entre US\$ 150 y US\$250.

INSTALACIÓN, OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO: Generalmente se estima que los costos de instalación corresponden a un 7% del costo de la aerobomba. Igualmente los costos de operación y mantenimiento anual se estiman entre un 3 y 5% del costo de compra de la aerobomba.(Power Guide, 1984).

TANQUES DE ALMACENAMIENTO: Los costos de tanques dependen bastante de la tecnología local disponible. En la actualidad se consiguen en el mercado, tanques de polietileno con un costo cercano a US\$ 80/m³ ó tanques de concreto reforzado con acero a un costo de casi el doble (US\$ 180/m³). Si el tanque requiere de alguna torre de elevación los costos se aumentan dependiendo del volumen y la altura de la estructura necesaria para sostenerlo.

PERFORACIÓN DE POZOS: Los costos de perforación varían considerablemente dependiendo del tipo de técnica utilizada para su perforación. Se pueden tener aljibes perforados a mano en los cuales su costo esta alrededor de US\$80 por

metro perforado ó pozos perforados con tecnología más avanzadas y equipos sofisticados, los cuales incluyen el revestimiento y filtros pueden tener costos hasta de US\$ 250 por metro de profundidad del pozo. Perforación de pozos con más alta tecnología y revestimiento con anillos de concreto pueden alcanzar costos excesivamente más altos.

EJEMPLO DE APLICACIÓN

Continuándose el ejemplo de la sección anterior y con base a la información de costos podemos cuantificar cuánto puede ser la inversión para el equipo de 3 metros de diámetro.

Aerobomba: Su costo será de $7 \text{ m}^2 \times \text{US\$ } 450/\text{m}^2 =$ US\$ 3,150

Instalación: $\text{US\$ } 3,150 \times 7\% =$ US\$ 220

Operación y Mantenimiento (O & M) por año: $\text{US\$ } 3,150 \times 5\% =$ US\$ 170

Tanque de Almacenamiento (10 m^3) = $8 \text{ m}^3 \times \text{US\$ } 125/\text{m}^3 =$ US\$ 1,250

COSTO (aprox): US\$ 4,620 excluye O & M

Utilizando el análisis de ciclo de vida se puede determinar un valor de la anual que para una tasa de interés de un 10% y una vida útil estimada del sistema de 20 años, el costo anual sería de aproximadamente US\$ 710 incluyendo operación y mantenimiento. Teniendo en cuenta que la cantidad promedio de agua bombeada, para la altura de 25 metros, es de $15.54 \text{ m}^3/\text{día}$ o más bien cerca de $5,670 \text{ m}^3/\text{año}$. En consecuencia, el costo estimado por metro cúbico de agua bombeada será aproximadamente de US\$ 0.12.

Este costo por metro cúbico de agua es competitivo con alternativas típicas como bombeo con motobombas con combustibles fósiles.

TERCERA PARTE: INSTALACIÓN, OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO

Un elemento esencial para la adecuada utilización de aerobombas consiste en el emplazamiento del equipo. Vale la pena insistir en la necesidad de seleccionar el lugar de instalación de la aerobomba, en aquel sitio donde se encuentre libre de obstáculos, como edificaciones o árboles de gran altura, ya que de esto depende obtener mejores resultados y una operación óptima del sistema. Adicionalmente, es además recomendable instalar los equipos cercanos al lugar de consumo, para evitar y disminuir pérdidas hidráulicas.

Una vez seleccionado el equipo, de acuerdo a las necesidades y al régimen de vientos del lugar, se procede a realizar un estudio entre los diferentes tipos de instalación.

En sistemas de aerobombeo, las instalaciones pueden ser (ver Figura 9):

- * con una bomba en la superficie ó en el fondo del pozo
- * sobre un pozo excavado a mano ó un pozo perforado y de diámetro menor a 8 pulgadas.
- * con la tubería de descarga a nivel del piso ó a un tanque de almacenamiento a determinada altura sobre el piso.

Con el fin de establecer la cantidad de material, el tipo de equipo a utilizar, el personal requerido, etc., es conveniente dentro de la evaluación sobre el uso de la aerobomba:

- * la distancia y diferencia de altura al tanque de almacenamiento.
- * la disposición de la instalación y su operación futura para evitar instalaciones complejas y con muchos accesorios ó por sitios de difícil acceso.
- * el tipo de suelo y facilidad para ejecutar la obra civil de cimentación
- * la necesidad de realizar un brocal o revestimiento del pozo
- * disposición de la tubería o línea de salida
- * facilidad de vías de acceso

1. OBRA CIVIL

Antes que la instalación se ejecute, la obra civil debe ser realizada completamente. Esta obra consiste de las cimentaciones en concreto para el anclaje de la torre y del tanque de almacenamiento. Las especificaciones para esta obra generalmente vienen descritas en los manuales de instalaciones pero se debe tener cuidado porque algunas diferencias pueden existir de acuerdo al tipo de terreno y al tamaño del pozo. Especial atención se debe prestar a la alineación. La cimentación debe ser hecha de tal forma que la torre quede perfectamente vertical y, en el caso de un molino de bombeo sobre un pozo de poco diámetro, centrado alrededor de este.

Un método común para centrar la torre es el siguiente: para la ubicación de las cimentaciones en necesario armar completamente el primer tramo de la torre; con una cuerda se "trazan" las diagonales del cuadrado que forma la base de la torre, de tal forma que la intersección de estas diagonales determine el centro exacto. Una vez determinado este centro, se ubica la torre sobre el pozo y si es necesario con una plomada se va alineando hasta hacer que coincida los centros de la torre y el pozo. Se debe tener cuidado, antes de hacer las cimentaciones, verificar que los lados de la torre estén perfectamente nivelados en los cuatro costados, lo que garantizará que la torre quede vertical

Se debe tener en cuenta además que:

- ** la torre soportará todo el empuje del viento sobre el molino y el viento por ráfagas, dependiendo del lugar puede llegar, a 20 o 25 m/s., por lo que de la buena calidad y ubicación de la cimentación depende la vida del molino y su eficiencia en la extracción de agua.
- ** de la buena ubicación de los anclajes depende que la torre quede vertical y opere eficientemente.
- ** la profundidad de este anclaje está determinada por el tipo de cargas que recibirá la torre. En los manuales generalmente están especificadas este tipo de dimensiones, pero una recomendación inicial es que cualquier anclaje requiere de por lo menos 0.5 m. de profundidad.

2. LEVANTAMIENTO

La instalación de la torre es un trabajo especializado. El procedimiento puede diferir de un molino a otro dependiendo de las condiciones del terreno, la facilidad de acceso o maniobra de los equipos, etc..

Dos tipos principales de procedimientos de instalación se pueden encontrar (ver Figura 9):

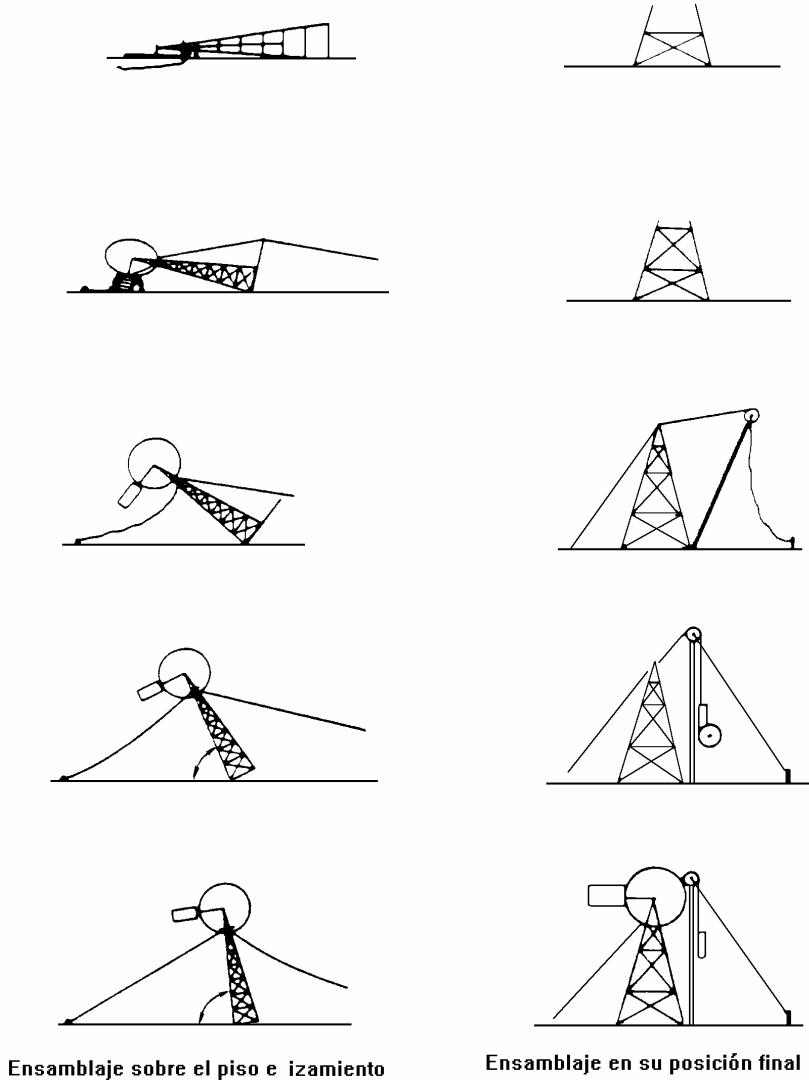


Figura 10 Tipos de Levantamiento de aerobombas

- ** ensamblaje del molino mientras la torre esta sobre el piso y después es elevada a posición vertical.
- ** ensamblaje de la torre en su posición final, trabajando desde el nivel del piso hacia arriba y luego elevando el cabezote, el rotor, y las demás partes con la ayuda de un polipasto.

El primer tipo de levantamiento requiere de 3 o 4 personas cuando el molino ensamblado no es demasiado pesado, de tal forma que con la ayuda de cuerdas, logren levantar el molino. Si es muy pesado, es necesario hacer el izamiento con la ayuda de un tractor u otro vehículo, utilizando preferiblemente cuerdas de acero y

un pivote en la base para lograr que la cuerda pase lo mas alto posible (ver Figura 10) en los instantes iniciales del levantamiento.

Una vez instalado se debe prestar especial atención a proteger el molino contra la corrosión. En un medio ambiente corrosivo (sal o arena) todas las partes metálicas deberán ser tratadas con una o dos capas de pintura anticorrosiva y una capa de pintura de recubrimiento. Después de la instalación todos los daños en la pintura deberán ser reparados. Aún en torres de acero galvanizado se puede necesitar pintarlas si están en un ambiente corrosivo. Es una excelente practica, proteger con grasa todos los tornillos y tuercas una vez instalados; esto facilitara el posterior desmontaje ya que evita la oxidación.

Durante la instalación, se debe tener mucha atención con la seguridad. Como protección contra la eventual caída de objetos como tornillos, tuercas o llaves todas las personas que trabajen en la obra deberán usar cascos de seguridad. Las personas que trabajen sobre la torre **siempre** deberán usar cinturones de seguridad, y cuando se estén izando partes pesadas, o cuando se este izando la torre, nadie deberá estar directamente bajo ellas.

3. INSTALACIÓN DE LA BOMBA

La instalación de una bomba trabajando en succión es simple. La bomba debe tener un buen sitio de apoyo sobre la torre o sobre un cimiento en la base del molino. La tubería de succión no podrá sobrepasar los seis ó máximo siete metros ya que de otra forma la bomba no funcionará.

La instalación de una bomba de pozo profundo requiere una considerable cantidad de trabajo, dependiendo de la profundidad. La torre de la aerobomba es normalmente usada como apoyo para el izamiento de la tubería y el vástago. Un primer tramo de tubería y vástago son ensamblados juntos sobre la bomba y luego se bajan hasta dejar el extremo en la boca del pozo firmemente asegurado. Se agregaran tramos adicionales hasta lograr la profundidad deseada. En las uniones de la tubería algún tipo de material sellante debe ser utilizado. En las uniones del vástago se deberá aplicar grasa.

La conexión del vástago a la transmisión se debe hacer con mucho cuidado y exactitud, de tal modo que el pistón no golpee la parte superior o inferior del cilindro durante la carrera de bombeo.

Dependiendo del tipo de instalación se puede requerir una válvula de cheque y/o un sello en el vástago. Nunca se debe colocar una válvula de paso directamente en la línea de salida ya que puede causar serios daños a la bomba o a la transmisión de la aerobomba.

4. MANTENIMIENTO

Cualquier máquina requiere de un mantenimiento adecuado para operar de una manera eficiente y tener la vida útil para la cual fue diseñado.

Un equipo básico de herramientas para hacer el mantenimiento de una aerobomba es el siguiente: plomada e hilo, llave para tubos de hasta 2½ pulgadas, juego de 6 o más llaves fijas, hombresolo, marco para segueta y hojas de segueta, grasera, nivel, alicata, destornilladores, flexómetro.

Un mantenimiento simple que puede realizar fácilmente cualquier persona incluye:

- * engrasar o aceitar las partes móviles
- * ajustar el sello prensaestopas en caso de que lo tenga.
- * Limpiar la estructura, especialmente si esta en un ambiente fuertemente corrosivo.

Un mantenimiento más especializado requiere de personal mecánico calificado. Las tareas que generalmente debe realizar son:

- ** cambiar el aceite de la caja de cambios, típicamente cada año.
- ** Inspeccionar los tornillos y su ajuste, también cada año, aunque es preferible hacerlo en un lapso más corto cuando está recién instalado.
- ** reparación de vástagos rotos o de los pasadores de seguridad que tienen algunos molinos para evitar que sobrecargas lleguen a afectar la transmisión.
- ** reemplazo de los sellos de cuero. Los sellos tienen una duración variable, dependiendo de la calidad del agua básicamente. Algunos necesitan ser reemplazados cada seis meses y otros cada dos años. Un examen cada seis meses, luego de instalado permitirá descubrir el tiempo de vida de los sellos y con esto programar el mantenimiento.
- ** puede ser necesario limpiar y pintar la torre cada uno o dos años de acuerdo al medio ambiente.
- ** después de 5 a 10 años es necesario hacer un diagnóstico completo del estado del equipo, en especial de las partes en desgaste como rodamientos, etc.
- ** si la aerobomba está ubicado en una zona con tormentas se debe considerar como mantenimiento del molino el desorientarlo antes de que estas ocurran para evitar daños.
- ** si el pozo es excavado a mano es conveniente mantenerlo tapado para evitar su contaminación y evitar accidentes

5. BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS PARA CONSULTA

- Burton, J., Smulders, P., & Pinilla, A. International Scientific Cooperation: Lift Pump Riser/Rod Innovation, 2R-Pump. Final Report, Project sponsored by the Commission of European Communities, DG XII, Contract No C11* - CT94 - 0047, November 1996.
- Cádiz Deleito, J. & Cabrero, J. La Energía Eólica Tecnología e Historia. Editorial Blume, Madrid, España.
- Fraenkel, P. (1986). Water Pumping Devices: A handbook for users and choosers. IT Publications, Londres.
- Fraenkel, P. et al.(1993). Wind pumps: A guide for development workers. IT Publications, Londres.
- Gipe, P. (1993). Wind Power for Home & Business: Renewable Energy for the 1990s and Beyond. A Real Goods independent Living Book, Vermont, USA.
- Hurley, P. (1994). Economic Aspects of Wind Energy Technology. Central American Wind Energy Seminar, R. Lynette & Associates, San José, Costa Rica, Abril
- Ignacio, J. & Urquia Lus. Energía Hidráulica y Eólica. Pamiela, Pamplona, España
- Hulscher, W. & Fraenkel, P. ed. (1994). The Power Guide: An international catalogue of small-scale energy equipment. Intermediate Technology Publications. London, England.
- Lysen,E.(1983). Introduction to Wind Energy. CWD Publications, May, TOOL
- Pinilla, A.E. (1985), Wind Powered Pumping System for Colombia. Ph.D. Thesis, Reading, Inglaterra, Abril
- Pinilla, A.E. (1987), Country Study on Colombia - Preparatory Phase - Global Wind pump Evaluation Programme (GWEP). World Bank and United Nations Development Programme. Contract 3349, May. Haskoning Royal Dutch consulting Engineers and Architects, Nijmegen, The Netherlands.
- Pinilla, A.E., Burton, J.D. & Dunn, P.(1984) Wind Energy to Water Pumped: Conversion Efficiency Limits using single-acting lift pumps. Wind Energy Conversion 1984, Ed. P. Musgrove, Cambridge University Press, pp 334-345, Cambridge, UK.
- Pinilla, A.E. & Mateus, L. (1991) Comparative Field Tests Results of two Colombian Wind pumps. Wind Energy Technology and Implementation, Proceedings of Amsterdam EWEC'91, Part I, Elsevier, Octubre, Amsterdam, Holanda, Páginas 682 - 686.

- Pinilla, A.E. Global Wind pump Evaluation Programme Country Study of Colombia, Wind Energy Technology and Implementation, Proceeding of Amsterdam EWEC'91, Part I, Elsevier, Octubre, Amsterdam, Holanda, Paginas 871-75.
- Pinilla, A & Mateus, L. (1983). Estación de Pruebas de Aerobombas, Sexto Congreso de la Asociación Latinoamericana de Energía Solar, La Plata Argentina, Diciembre de 1993
- Pinilla, A & Romero, L. Bombeo Remoto Neumático con Aerobombas, Sexto Congreso de la Asociación Latinoamericana de Energía Solar, La Plata Argentina, Diciembre de 1993
- Pinilla, A. Programa de Investigación en la Aplicación de Equipos dinámicos, de Flujo Inercial y Eléctricos en Bombeo Directo y Remoto con Molinos de viento. Informe Final, Contrato Rc 141 CO 1204-06-038-90, Convenio Colciencias-CIFI, Universidad de Los Andes, Bogotá, 1994.
- Pinilla, A. (1997). Manual de Aplicación de la Energía Eólica, Ministerio de Minas y Energía, Instituto de Asuntos Nucleares y Energías Alternativas - UniAndes, Bogotá, Julio, ISBN 958-96121-5-6
- Smulders, P., Burton, J. & Pinilla, A. International Scientific Cooperation: Development of a 3S Pump. Final Report, Project sponsored by the Commission of European Communities, DG XII, August 1995.
- Twidell, J. (ed)(1987). A Guide to Small Wind Energy Conversion Systems. Cambridge University Press.
- Van Meel, J. & Smulders, P. (1989). Wind Pumping: A Handbook. World Bank Paper 101, Industry and Energy Series, Washington, USA.
- Veldkamp, D. (1989). Recommended Practices for Testing Water-Pumping Windmills, World Bank Technical Paper Number 100, Industry and Energy Series.

ANEXO A (INFORMATIVO)

Desde finales de los años 70, Colombia ha tenido un desarrollo tecnológico en la industria de aerobombeo interesante. Desde mediados de los años 70, el Centro Las Gaviotas con apoyo técnico de la Universidad de Los Andes y después de una intensa labor de Investigación y Desarrollo saca al mercado el conocido Molino de Viento Tropical de Doble Efecto "Gaviotas" (MV2E) (Ver figura A1). Vale la pena mencionar que el patrocinio de este desarrollo fue suministrado por el Programa de Las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD).



La aerobomba Gaviotas es un equipo de segunda generación, por su diseño de bajo peso, bajo costo y de fácil manufactura, con un rotor de 2.05 metros de diámetro a sotavento, torre tubular soportada por cables y provisto de una bomba de doble acción. Por su diseño para operar en condiciones de trópico, lo cual

implica vientos de baja intensidad, este equipo fue concebido sin cola ni mecanismo de seguridad, haciendo de este diseño un diseño bastante novedoso. Las tuberías de la aerobombas Gaviotas son todas de PVC y el vástago actuador de la bomba es el mismo tubo de descarga de agua. El equipo empieza a bombear agua en vientos de 2 m/s. Este equipo se ha instalado en lugares con régimen de viento fuerte, con resultados negativos, debido a que su diseño es para regímenes de viento de baja intensidad. En el año 1989, el Centro Las Gaviotas desarrolló una aerobomba, mas robusta, para suplir las necesidades de la Guajira, región en la cual el régimen de vientos es alto, sin embargo los resultados de este equipo no fueron exitosos.

Con un concepto de diseño similar a la aerobomba Gaviotas, en el año 1979 aparece en el mercado colombiano el Molino de Viento "El Gavilán". Esta aerobomba esta ilustrada en la figura N° A2. El sistema venia provisto de un rotor de 1.9 metros de diámetro con seis aspas de diseño aerodinámico fabricada en poliestireno expandido (ICOPOR). La bomba era accionada por medio de un cable metálico, realizando la acción de bombeo en el desplazamiento hacia arriba y el pistón era halado hacia abajo, por la acción de un resorte. De acuerdo al fabricante entre septiembre de 1979 hasta el cierre de la empresa, en diciembre de 1982, fueron vendidos 132 aerobombas Gavilán (Pinilla, 1985).



Figura N° A2 – Molino de Viento Gavilán

El fabricante suministraba la cabeza del rotor, la bomba y los accesorios para ensamblaje, permitiendo al usuario construir su propia torre, la cual generalmente era construida en madera. La simplicidad del sistema Gavilan permitía que el usuario de la aerobomba pudiera instalar el equipo, a muy bajo costo, permitiéndole desarrollar sus habilidades técnicas y facilitando al usuario, la familiaridad necesaria para futuras labores de mantenimiento.

Debido a la similitud en tamaño y capacidad de bombeo entre las aerobombas Gaviotas y Gavilán, el Gavilán era vendido al 50% del Costo del Gaviotas, donde la diferencia entre uno y otro radicaba en el costo de la torre.

En 1984 emerge otro fabricante de aerobombas, Industrias JOBBER. La empresa, fundada por los hermanos Jorge y Bernardo Castro, desarrolló el Molino de Viento "Jobber" (figura N° A3), el cual consiste de un rotor de 10 palas con 2.5 metros de diámetro. El equipo es ofrecido con torres a tres diferentes altura (6, 9 y 12 metros) y su capacidad de bombeo permite instalaciones hasta 40 metros de cabeza hidráulica, con una profundidad del pozo máxima de 20 metros. La bomba es reciprocante de acción directa, provista con un par de resortes colocados en el vástago, para facilitar la acción de arranque de bombeo en vientos de baja intensidad. Desde su inicio de actividades, Industrias Jobber ha podido vender más de 500 aerobombas en el mercado colombiano y venezolano. Los últimos desarrollos realizados en el molino Jobber comprende la inclusión de un reductor de velocidad en la transmisión del movimiento, un rotor de mayor diámetro con mayor número de palas y una torre más robusta para incursionar en aplicaciones de bombeo de agua en la Guajira, región en la cual la intensidad del viento es alta.



Figura N° A3 – Molino de Viento JOBER

Desde los años 60, Industrias Indusierra, en Bogotá, inicio la manufactura y oferta comercial de aerobombas semejantes al molino multipala americano. Las aerobombas “Indusierra” se ofrecen en diversos tamaños entre 1.2 metros hasta 4.8 metros de diámetro del rotor, los cuales pueden tener entre 24 y 12 palas. El equipo más grande puede bombear agua de pozos hasta 50 metros de profundidad. La aerobomba también puede ser suministrada con torres hasta de 21 metros de altura sobre la superficie del terreno donde se instale. Industrias Indusierra también provee servicios de mantenimiento para aerobombas de cualquier tipo.