

Aerobomba para captación de aguas subterráneas. Aplicación de tecnología social de bajo coste en Mozambique

Alicia Corcuera Martínez

Grupo de Cooperación Sistemas de Agua y Saneamiento para el Desarrollo. ETSIDI. Universidad
Politécnica de Madrid
corcuera.alicia@gmail.com

Resumen

El acceso al agua es esencial para el desarrollo de una sociedad. La falta de disponibilidad y su baja calidad no sólo llevan asociados problemas de salud pública sino también problemas sociales, siendo un impedimento en el progreso de un país. De esta forma, el acceso a agua de calidad de una población no sólo debe entenderse como un derecho básico y fundamental de todo ser humano, sino también como uno de los principales pilares para el correcto desarrollo de una sociedad y de un país.

Mediante este artículo se pretende dar a conocer una tecnología utilizada en sistemas aislados, la aerobomba, capaz de resolver los problemas de suministro de pequeñas poblaciones con un bajo coste y un impacto social positivo. Este artículo se basa en lo aprendido mediante la realización del Proyecto Final del Máster de Energías Renovables y Medio Ambiente de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería y Diseño Industrial (ETSIDI) de la Universidad Politécnica de Madrid (UPM).

Palabras clave: Aerobomba, Cooperación para el desarrollo y Aguas subterráneas

Resumo

O acesso a água é essencial para o desenvolvimento de uma sociedade. A falta de disponibilidade e pouca qualidade estão associados não só a problemas de saúde pública, também com problemas sociais, sendo um impedimento para o progresso de um país. Assim, o acesso à água de qualidade de uma população não só deve ser entendido como um direito básico e fundamental de todo ser humano, mas também como um dos pilares para o sucesso de uma sociedade e de um país.

Este artigo se destina a fornecer uma tecnologia utilizada em sistemas singulares, o moinho de vento, capaz de resolver os problemas de abastecimento de pequenas populações com baixo custo e impacto social positivo. Este artigo é baseado nas lições aprendidas através da implementação do Projeto Final do Mestrado em Energias Renováveis e Meio Ambiente da Escola de Engenharia e Desenho Industrial (ETSIDI) da Universidade Politécnica de Madrid (UPM).

Palavras-chave: Moinho de vento, Desenvolvimento Humano e Águas subterrâneas

*DisTecD. Diseño y Tecnología para el Desarrollo
2014, 2, desde pág. 63 - hasta pág. 76
ISSN: 2386-8546*

1. El problema del acceso al agua en contextos de subdesarrollo

La Asamblea General de las Naciones Unidas reconoció el 28 de Julio de 2010 (*Resolución A/RES/64/292*), el derecho humano al agua y al saneamiento, reafirmando que un agua potable limpia y un saneamiento adecuado son esenciales para la realización de todos los derechos humanos. Asimismo, el Comité de Derechos Económicos, Sociales y Culturales adoptó la siguiente observación, (*El derecho al agua. 2002*): *El derecho humano al agua es indispensable para una vida humana digna.*

Sin embargo, la realidad actual es que unos 300 millones de personas en África carecen de acceso a agua potable y, al menos catorce países de dicho continente sufren un déficit permanente de agua. La mayoría de la población se enfrenta a situaciones de pobreza endémica, inseguridad alimentaria e infradesarrollo.

En la figura 1 se representa la cobertura de agua potable en el África subsahariana tanto en el ámbito urbano como en el rural.

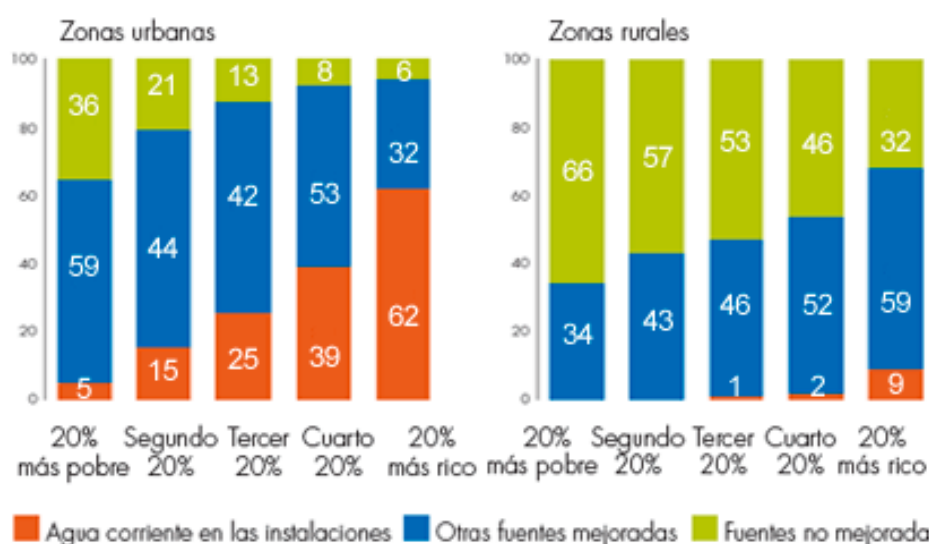


Figura 1. Cobertura de agua potable según quintiles de riqueza del África subsahariana.
Fuente: Informe sobre los Objetivos de Desarrollo del Milenio. 2012. ONU.

Un estudio realizado por la Organización Mundial de la Salud indica que dos de cada mil personas, tres cuartas partes de ellas menores de cinco años, sufren algún tipo de enfermedad relacionada con el consumo de agua contaminada o de mala calidad.

Este problema también repercute en el aspecto sociocultural ya que, los pozos de agua normalmente se encuentran bastante alejados teniendo que desplazarse una distancia media de 6 kilómetros. Esto influye indirectamente en el papel de la mujer en dichas sociedades, relegada normalmente a un segundo plano siendo la encargada de dicha tarea junto con los hijos. Por ende, la educación infantil se ve seriamente comprometida por el tratamiento prioritario de la recogida diaria de agua.

En el contexto económico, este problema provoca cuantiosas pérdidas como consecuencia de la disminución de la capacidad productiva de los adultos y, a la larga, condena a los países que lo sufren a permanecer en el subdesarrollo económico.

Por todo ello, el acceso al agua de todo ser humano debe de ser una prioridad a afrontar por parte de todos los organismos internacionales, a través de distintas tecnologías y proyectos de cooperación como el que aquí se presenta.

2. La aerobomba como solución tecnológica

En la actualidad, existen diferentes tecnologías destinadas a solventar la problemática del acceso a aguas subterráneas. Entre ellas podemos encontrar diferentes tipos de bombas manuales, muy extendidas por todo el territorio del continente africano, en especial en zonas rurales en las que no se dispone del acceso a la energía necesaria para su extracción. Entre ellas podemos destacar las bombas de émbolo, las bombas de cuerda o de mecate y las bombas rotativas.

La aerobomba, utiliza el recurso eólico del emplazamiento para proporcionar la energía suficiente para succionar el agua del pozo hasta un depósito de acumulación, siendo capaz de elevar el agua hasta una altura de 10 metros. Esto es muy importante a la hora de dimensionar la distribución del agua pudiéndose realizar, de esta forma, por gravedad.

La aeroturbina consta de un rotor compuesto por 12-24 palas de eje horizontal, con un diámetro entre 1,5 y 5 metros, que mueve una bomba de émbolo sumergida en el pozo. El caudal que es capaz de elevar este tipo de instalación depende de varios factores, y oscila entre 600 y 1500 l/h para un diámetro de rotor medio de 1,8 metros.

Un sistema de bombeo eólico mecánico se compone además del rotor de otros elementos que es necesario diseñar o seleccionar. Los elementos más importantes son: transmisión, bomba, torre y tanque de almacenamiento.

La transmisión de una aerobomba es el elemento que convierte el movimiento de rotación del rotor en un movimiento adecuado a la bomba que se va a instalar. Para una bomba de pistón, comúnmente empleada en los molinos tradicionales, la rotación horizontal del rotor se debe convertir en un movimiento alternativo vertical.

En la bomba de pistón (figura 2), éste es movido en forma oscilatoria vertical, por el vástago de la bomba. Cuando el pistón se mueve hacia abajo la válvula del pistón se abre permitiendo que el agua pase de la parte inferior a la superior del pistón. Cuando el pistón se mueve hacia arriba, la válvula del pistón se cierra y la válvula de pie abre. El agua contenida encima del pistón es impulsada hacia arriba a través del tubo de descarga mientras que al mismo tiempo se crea una succión debajo del pistón que hace que el agua penetre a través de

la válvula de pie. Este ciclo se repite periódicamente cada vez que el mecanismo de transmisión da una vuelta.

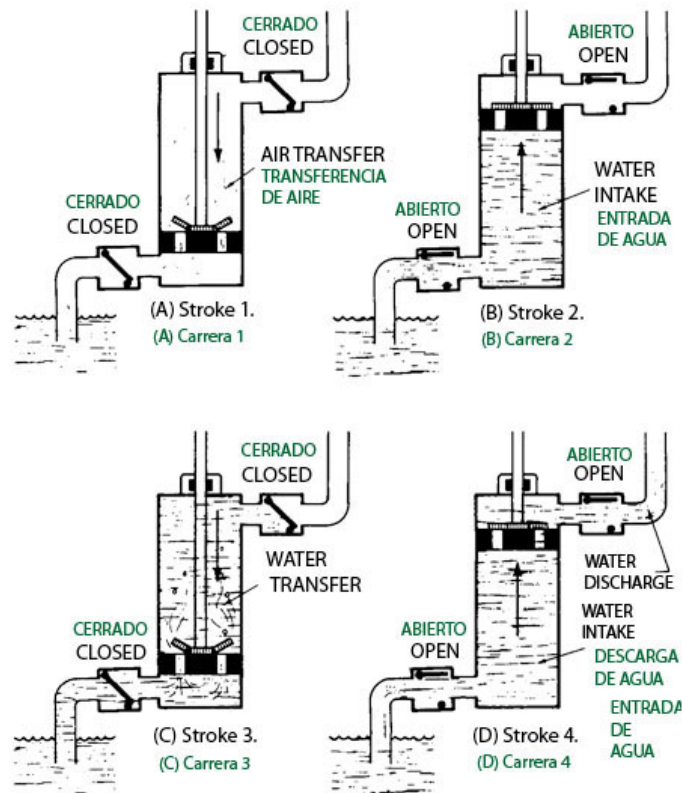


Figura 2. Esquema del funcionamiento de una bomba de pistón.
Fuente: Aerobomba para impulsión de agua en Mozambique. CORCUERA.A. 2014.

En cuanto a la torre, existen dos tipos: la torre tubular y la reticular de angulares, en los molinos de viento tradicionales se emplea esta segunda con base de cuatro patas.

La altura de las torres comercialmente disponibles se encuentra entre 8 y 20 metros. Por debajo de 10 metros el viento es altamente turbulento, debido al contacto con la superficie rugosa del terreno mientras que por encima de 20 metros la ganancia debido a mayor velocidad del viento no es suficiente para justificar el sobrecoste del molino.

El tamaño del tanque va a depender de la frecuencia de los períodos de calma en cada mes, de la duración del período de calma más largo y de la demanda diaria de agua.

Hay que tener en cuenta que, como inconveniente, el rotor necesita una velocidad del viento mínima para funcionar, en torno a los 3 m/s. Por esto, es muy importante realizar un estudio del recurso eólico en el emplazamiento, para dimensionar correctamente el rotor y lograr la viabilidad técnica de la instalación.

Las aerobombas tienen unos costes de instalación y mantenimiento bajos, pudiéndose realizar el cambio de piezas por los propios usuarios utilizando materiales locales. Por ello,

estas instalaciones son muy apropiadas en proyectos de cooperación ya que, en general, una vez puesta en funcionamiento no es necesario depender de una entidad externa para su mantenimiento.

Otro aspecto a tener en cuenta para garantizar la viabilidad del proyecto es la implicación de la población. El proyecto debe ser asimilado por la población y tomado como propio, para que trabajen en él y accedan a los beneficios que les puede reportar. Por lo tanto, es muy importante realizar campañas de sensibilización y la educación en la utilización responsable del agua. En este aspecto, en la sociedad africana las mujeres juegan un papel fundamental siendo generalmente las que se encarguen del correcto funcionamiento de la instalación.

3. Aplicación en la provincia de Cabo Delgado, Mozambique

La principal fuente de agua en Mozambique es el agua superficial, pero no constituye una fuente apta para el consumo ya que se encuentra contaminada. Debido a esto, el agua subterránea se utiliza a gran escala en varios centros urbanos de abastecimiento de agua potable. Se encuentran instalados a lo largo de todo el territorio pozos-bomba manuales y pozos poco profundos considerándose como la principal fuente de agua potable en las zonas rurales.

Las aerobombas ofrecen una tecnología de bajo coste adecuada para pequeñas instalaciones aisladas. En este caso, se ha estudiado su aplicación mediante un proyecto de bombeo y suministro de agua en la provincia de Cabo Delgado, en Mozambique. En dicho proyecto se ha estudiado la viabilidad técnica y social de la aerobomba como solución ante el problema del abastecimiento de agua en dicha región. Concretamente, se ha realizado en Catía, situada en el distrito de Montepuez, para una población de 300 habitantes.

Para dimensionar la instalación correctamente hay que hacer un estudio del recurso eólico así como hídrico de la zona. Aparte de esto, también hay que tener en cuenta el crecimiento de la población en los años futuros y estimar la demanda de agua que va a tener que satisfacer la aerobomba.

3.1 Estudio de los recursos hídricos y eólicos

Realizar un correcto estudio del recurso hídrico es esencial para asegurar la viabilidad medioambiental del proyecto, en este caso, el acuífero es el principal aspecto que debe protegerse, evitando su sobreexplotación, ya que entonces el proyecto dejaría de ser sostenible y, por lo tanto, viable. Además, se deben diseñar unos planes de uso que deben hacerse respetar para asegurar que el agua utilizada es sólo la necesaria para suplir la demanda diaria. En este sentido será muy importante la educación en el uso de los recursos hídricos ya que la población debe entender que el agua no es inagotable y que una sobreexplotación puede tener graves consecuencias.

Por ello, se ha realizado un estudio del recurso hídrico de la zona, para determinar la viabilidad técnica de esta instalación, teniendo en cuenta sólo las aguas subterráneas. Según el estudio realizado por el *Grupo de Cooperación de Sistemas de Agua y Saneamiento para el Desarrollo* de la UPM se sabe que en dicha zona existe un acuífero detrítico que supone el drenaje natural de la meseta de Montepuez hacia el oeste. El manto freático tiene una profundidad de entre 6 y 10 metros.

Teniendo los datos de partida, hay que estudiar si la capacidad de entrega de agua de éste acuífero es suficiente para satisfacer la demanda de agua de la población. En este caso, en los aforos realizados se han medido unos caudales en torno a los 1,5 l/s, encontrándose a una profundidad de 8 metros.

La evaluación del recurso eólico es otro de los puntos principales para desarrollar un proyecto de sistema aislado con energía eólica. En este tipo de instalaciones, normalmente el molino se va a colocar en las inmediaciones del punto de consumo. Esta limitación da lugar a que estos molinos funcionen en general en condiciones de viento desfavorables, por lo que un correcto dimensionado de la instalación es fundamental para la viabilidad técnica del proyecto en dicho emplazamiento.

De esta forma, se ha realizado un estudio del recurso eólico en la zona, mediante los datos obtenidos de las estaciones meteorológicas cercanas y los datos medidos in situ. Posteriormente, se realiza un estudio estadístico de los datos tomados, para poder proceder al dimensionado de la instalación (figura 3).

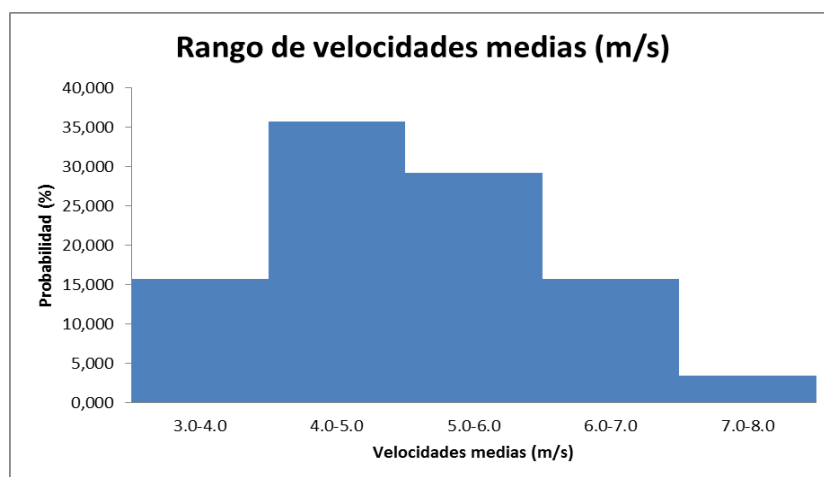


Figura 3. Histograma de rangos de velocidad media del viento.

Fuente: Aerobomba para impulsión de agua en Mozambique. CORCUERA.A. 2014.

3.2 Estudio del crecimiento de la población

Para poder estimar correctamente la demanda de agua que tiene que satisfacer la instalación, hay que tener en cuenta el crecimiento de la población en el período de funcionamiento de la aerobomba. Este período de tiempo, denominado período de diseño, se entiende como el tiempo en el cual se estima que la instalación por construir será eficiente, en

este caso, se estima un período de diseño de 15 años, en los que la aerobomba sea viable técnica y económicamente.

Como ya se ha dicho antes, la población a la que se quiere abastecer con esta instalación es de 300 personas, estimando un crecimiento de la población del 2%. En la tabla 1 se muestra el cálculo de la población futura por los 3 métodos principales.

| CALCULO DEL AUMENTO DE LA POBLACIÓN | | |
|-------------------------------------|---|-----------------------|
| Método | Expresión | Población futura |
| Aritmético o lineal | $N_{cn} = N_0(1 + r \cdot n_{años})$ | 390 personas |
| Geométrico | $N_{cn} = N_0(1 + r)^{n_{años}}$ | 403,76 ± 404 personas |
| Exponencial | $N_{cn} = N_0 \cdot e^{r \cdot n_{años}}$ | 404,95 ± 405 personas |

Tabla 1. Cálculo de la población futura.

Fuente: Aerobomba para impulsión de agua en Mozambique. CORCUERA.A. 2014.

Se ha escogido el método geométrico ya que es el más adecuado al tratarse de un período de tiempo medio-alto (15 años) obteniéndose una población estimada de 404 habitantes.

3.3 Determinación de la demanda de agua

El primer paso en el diseño de cualquier sistema hidráulico consiste en estimar el volumen de agua a bombear. La estimación debe ser hecha teniendo en cuenta el consumo de agua doméstico y otras necesidades tales como riego, abasto de agua para ganado y otros propósitos agrícolas y sociales si existieran.

En cuanto al consumo doméstico per cápita variará en dependencia con los servicios domésticos a satisfacer y con la estación del año. Como la población de estudio tiene una población inferior a 500 personas, se estima un consumo doméstico de 22 LPD en los meses de verano y 20 LPD en el resto del año.

El consumo de las necesidades sociales comprende los suministros de agua para escuelas, hospitales y otros usos sociales. En este caso, en la zona existen una escuela y un pequeño centro médico. El centro médico tiene una función más de dispensario médico que de clínica por lo que no suele tener personas ingresadas en él. Por ello, el consumo de agua es muy bajo. No se tienen datos suficientes de la capacidad de la escuela, por lo que se opta por aumentar la demanda total de agua en 3 LPD (tabla 2).

En este proyecto se tiene que tener en cuenta el abastecimiento de agua para abrevaderos de animales domésticos, contando con 20 vacas y 40 ovejas aproximadamente, con un consumo de 20 y 5 LCD respectivamente. Con ello, tenemos una demanda de agua estimada de 600 LD para usos ganaderos.

No se va a tener en cuenta los posibles cultivos de la zona para el diseño de la instalación ya que se disponen de otras fuentes de agua que pueden suplir esta demanda.

| CÁLCULO DE LA DEMANDA DE AGUA | | | | |
|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|---------------------------|-------|
| Mes | Demanda uso doméstico (l/día) | Demanda usos sociales (l/día) | Demanda ganadería (l/día) | Total |
| ENERO | 8100 | 1215 | 600 | 9915 |
| FEBRERO | 8100 | 1215 | 600 | 9915 |
| MARZO | 8100 | 1215 | 600 | 9915 |
| ABRIL | 8100 | 1215 | 600 | 9915 |
| MAYO | 8910 | 1215 | 600 | 10725 |
| JUNIO | 8910 | 1215 | 600 | 10725 |
| JULIO | 8910 | 1215 | 600 | 10725 |
| AGOSTO | 8910 | 1215 | 600 | 10725 |
| SEPTIEMBRE | 8910 | 1215 | 600 | 10725 |
| OCTUBRE | 8100 | 1215 | 600 | 9915 |
| NOVIEMBRE | 8100 | 1215 | 600 | 9915 |
| DICIEMBRE | 8100 | 1215 | 600 | 9915 |

Tabla 2. Demanda de agua por meses.

Fuente: Aerobomba para impulsión de agua en Mozambique. CORCUERA.A. 2014.

Se va a dimensionar la instalación para los meses de mayor demanda de agua, en este caso los meses de verano en los que la demanda asciende a 10725 l/día, 10,725 m³/día.

3.4 Dimensionado de la instalación de impulsión

A continuación, se calcula el volumen por hora de bombeo que se necesita cada mes, teniendo en cuenta un funcionamiento de la aerobomba entre 6 y 14 horas diarias. En este caso se va a escoger un funcionamiento de 6 horas diarias, ya que estas aerobombas no funcionan con velocidades del viento por debajo de 3,00 m/s. El caudal máximo que va a circular por la tubería es:

$$Q = \frac{10725}{6} = 1787,5 \cong 1800 \text{ l/h} \cong 0,5 \text{ l/s}$$

Considerando una velocidad de 1 m/s, podemos obtener el diámetro exterior de la tubería mediante la siguiente fórmula:

$$D = \sqrt{\frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot V}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,5 \cdot 10^{-3}}{\pi \cdot 1}} = 0,02523\text{m} = 25,23 \text{ mm} \approx 26 \text{ mm}$$

Aplicando un coeficiente de seguridad para evitar que se produzcan sobrepresiones en el interior de la tubería de 1,2.

$$D = 26 \cdot 1,2 = 31,2 \text{ mm} \approx 32 \text{ mm}$$

Se puede calcular la potencia media mensual disponible del viento a partir de la velocidad media mensual del viento calculada anteriormente, la densidad del aire del sitio y el factor patrón de energía (FPE) de acuerdo a la siguiente fórmula:

$$\frac{P_d}{A} = \frac{1}{2} \cdot \rho_{\text{aire}} \cdot v_z^3 \cdot FPE$$

Una forma de hallar el FPE es en función del factor de forma k. En este caso k = 2,0, por lo que FPE = 1,91.

El producto volumen carga (PVC) se expresa en m³m, que es una medida de la energía requerida para el bombeo. Para el cálculo de este parámetro se tiene que tener en cuenta el volumen de agua según los consumos calculados previamente y la carga de bombeo que incluye la carga estática más las pérdidas en las tuberías para las condiciones del lugar.

La carga total de bombeo es la suma de cuatro alturas:

- Nivel estático del manto freático: es la distancia desde el suelo hasta el nivel del agua en el pozo cuando la bomba no está trabajando.
- Descenso del nivel de agua: esta es la distancia entre el nivel estático del manto y el nivel del agua cuando la bomba está trabajando.
- Altura del agua en el tanque.
- Pérdidas hidráulicas en las tuberías.

Se va a hacer una estimación, considerando el descenso del manto y las pérdidas hidráulicas como el 10% de la suma de la altura estática y la altura del tanque. En la tabla 3, se muestran las pérdidas de carga y el Producto Volumen Carga para cada mes del año.

| REQUERIMIENTO TOTAL PARA EL BOMBEO DE AGUA | | | | | |
|--|-------------------------------------|------------------------------|---|---------------------------|-------------------------|
| Mes | Demanda total (m ³ /día) | Carga estática de bombeo (m) | Descenso del manto + p. hidráulicas (m) | Carga total de bombeo (m) | PVC (m ³ /m) |
| ENERO | 9,915 | 12,00 | 1,20 | 13,20 | 130,88 |
| FEBRERO | 9,915 | 12,00 | 1,20 | 13,20 | 130,88 |
| MARZO | 9,915 | 12,00 | 1,20 | 13,20 | 130,88 |
| ABRIL | 9,915 | 12,00 | 1,20 | 13,20 | 130,88 |
| MAYO | 10,725 | 12,00 | 1,20 | 13,20 | 141,57 |
| JUNIO | 10,725 | 12,00 | 1,20 | 13,20 | 141,57 |
| JULIO | 10,725 | 12,00 | 1,20 | 13,20 | 141,57 |
| AGOSTO | 10,725 | 12,00 | 1,20 | 13,20 | 141,57 |
| SEPTIEMBRE | 9,915 | 12,00 | 1,20 | 13,20 | 130,88 |
| OCTUBRE | 9,915 | 12,00 | 1,20 | 13,20 | 130,88 |
| NOVIEMBRE | 9,915 | 12,00 | 1,20 | 13,20 | 130,88 |
| DICIEMBRE | 9,915 | 12,00 | 1,20 | 13,20 | 130,88 |

Tabla 3. Requerimiento total para el bombeo de agua.

Fuente: Aerobomba para impulsión de agua en Mozambique. CORCUERA.A. 2014.

A continuación, se extrapola la velocidad del viento de los 10 metros de los datos tomados en la estación meteorológica a los 9 metros que va a tener la aerobomba que se va a instalar. Dicha extrapolación se realiza mediante la siguiente ecuación:

$$v_2 = v_1 \cdot \left(\frac{z_2}{z_1}\right)^\alpha$$

El factor de cortadura, α , varía con la hora del día, la estación, el tipo de terreno, la velocidad del viento y la estabilidad atmosférica. Se puede calcular en función de la rugosidad del terreno mediante:

$$\alpha = \frac{1}{\ln\left(\frac{15,25}{z_n}\right)}$$

Se va a tomar una rugosidad del suelo $z_0 = 0,01$, con lo que el factor de cortadura $\alpha = 0,13$.

En la tabla 4, se presentan los datos del Producto Volumen Carga y la potencia media mensual disponible para cada mes de estudio. Tomando la densidad del aire como $1,2 \text{ kg/m}^3$ y FPE como 1,91 obtenido anteriormente.

| POTENCIA DISPONIBLE | | | | | |
|---------------------|------------------|--|---|----------------------------------|--|
| Mes | PVC (m3m/día) | Velocidad del viento en anemómetro (m/s) | Velocidad del viento a altura de la torre (m/s) | Potencia disponible (W/m2) | Potencia disponible/PVC (W/m2/m3m) |
| ENERO | 130,88 | 5,478 | 5,403 | 6,192 | 0,0473 |
| FEBRERO | 130,88 | 4,671 | 4,608 | 5,280 | 0,0403 |
| MARZO | 130,88 | 5,003 | 4,935 | 5,656 | 0,0432 |
| ABRIL | 130,88 | 4,808 | 4,743 | 5,435 | 0,0415 |
| MAYO | 141,57 | 4,687 | 4,624 | 5,299 | 0,0374 |
| JUNIO | 141,57 | 4,519 | 4,457 | 5,108 | 0,0361 |
| JULIO | 141,57 | 5,131 | 5,061 | 5,800 | 0,0410 |
| AGOSTO | 141,57 | 5,081 | 5,012 | 5,743 | 0,0406 |
| SEPTIEMBRE | 130,88 | 5,251 | 5,180 | 5,936 | 0,0454 |
| OCTUBRE | 130,88 | 5,332 | 5,260 | 6,027 | 0,0461 |
| NOVIEMBRE | 130,88 | 5,473 | 5,399 | 6,187 | 0,0473 |
| DICIEMBRE | 130,88 | 5,202 | 5,131 | 5,880 | 0,0449 |

Tabla 4. Potencia del viento disponible por meses.

Fuente: Aerobomba para impulsión de agua en Mozambique. CORCUERA.A. 2014.

Ahora ya se puede determinar la velocidad del viento en el mes de diseño. Normalmente, como mes de diseño se escoge el mes en el que la razón entre la potencia disponible del viento y el producto volumen carga alcanza el valor mínimo, ese mes es Junio, asegurando el suministro durante todo el año.

3.5 Dimensionado de la instalación de impulsión

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

$$P = \rho_{\text{agua}} \cdot g \cdot H \cdot Q$$

La potencia eólica aprovechable se determina con la ecuación:

$$P_{\alpha} = \frac{1}{2} \cdot \rho_{\text{aire}} \cdot v^3 \cdot FPE \cdot A \cdot \eta$$

Igualando la potencia requerida para bombear el agua con la potencia que debe entregar el molino de viento y despejando el diámetro del rotor, D , se obtiene:

$$D = \sqrt{\frac{C \cdot H \cdot Q}{v^3 \cdot FPE}} = \sqrt{\frac{3,01 \cdot 13,20 \cdot 10,725}{4,457^3 \cdot 1,91}} = 1,58 \text{ m}$$

De esta forma, el rotor tiene que tener un diámetro de 1,58 metros. Comercialmente, existen molinos de viento multipala entre 1 y 5 metros de diámetro de rotor, en este caso vamos a escoger uno de la marca Bornay de 1,83 metros, 6 pies.

Para dimensionar la bomba, primero hay que calcular el diámetro del pistón, D_p y la carrera, S . Pero, antes de poder calcular estas dos dimensiones principales es necesario determinar el número de ciclos por minuto, n .

Para la determinación del número de ciclos por minuto del pistón, es necesario conocer la velocidad de rotación del rotor, n_r , y la relación de transmisión de la caja reductora.

La velocidad de rotación del rotor depende del diseño aerodinámico de éste, es decir, del tipo de rotor y del número de palas. La velocidad tangencial de la punta de la pala es:

$$U = \pi \cdot d \cdot \frac{n_r}{60}$$

Tomando como base esta velocidad y la velocidad del viento, v , se define un factor adimensional, λ_o :

$$\lambda_o = \frac{U}{v}$$

En la siguiente figura se representa la relación entre el coeficiente C_p y λ_o para los diferentes tipos de rotores. Para cada tipo de rotor existe un valor de C_p máximo, con su correspondiente valor de λ_o .

En los rotores multipala, C_p se encuentra entre 0,3 y 0,35 para un valor de $\lambda_d = 1$ (figura 4).

Una vez obtenida la velocidad específica de diseño podemos calcular la velocidad de rotación del rotor, n_r , con el diámetro de rotor, que en este caso es de 1,83 metros:

$$n_r = \frac{60 \cdot \lambda_d \cdot v_d}{\pi \cdot D} = \frac{60 \cdot 1 \cdot 6,68}{\pi \cdot 1,83} = 69,72 \text{ rpm}$$

La velocidad de diseño se define como la velocidad para la cual se alcanza el C_p máximo. Los valores recomendables de la velocidad de diseño están entre 1,5-2,0 veces la velocidad del viento en el mes de diseño. Siendo la velocidad del mes de diseño de 4,457 m/s, se tiene que la velocidad de diseño es de 6,68 m/s.

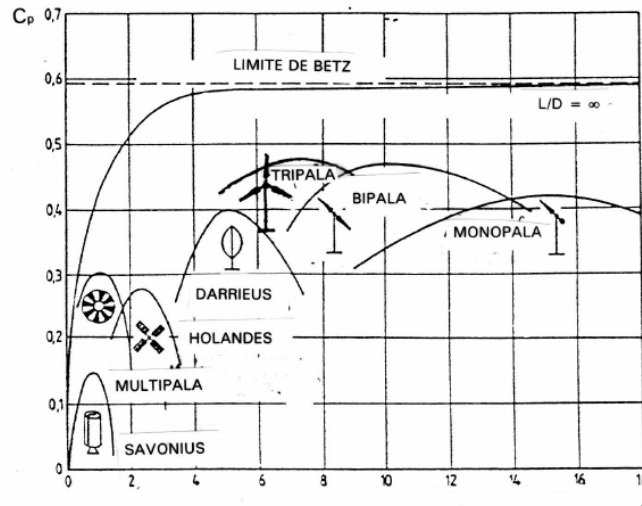


Figura 4. Relación de C_p y λ_o para diferentes números de palas.
Fuente: Aerobomba para impulsión de agua en Mozambique. CORCUERA.A. 2014.

Conocida la velocidad de rotación del rotor, los ciclos por minuto, n , del pistón se calculan mediante el valor de la relación de transmisión, i :

$$n = \frac{n_r}{i} = \frac{69,72}{3,29} = 21,19 \cong 22 \text{ golpes por minuto}$$

Ahora ya se puede calcular las dimensiones del pistón y la carrera. Igualando la potencia requerida para el bombeo con la entregada por la máquina y sustituyendo el gasto entregado por la bomba de pistón, se obtiene la siguiente ecuación:

$$S \cdot D_p^2 = \frac{30 \cdot \rho_{\text{aire}} \cdot v^3 \cdot FPE \cdot \eta \cdot D^2}{\rho_{\text{agua}} \cdot n \cdot \eta_v \cdot H \cdot g} = \frac{30 \cdot 1,2 \cdot 4,457^3 \cdot 1,91 \cdot 0,08 \cdot 1,83^2}{1000 \cdot 22 \cdot 0,9 \cdot 13,20 \cdot 9,81} = 636132,82 \text{ mm}^3$$

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

En este caso, se escoge una carrera larga para la instalación y para un diámetro de 6 pies, la más adecuada es de 5 pulgadas, 127 mm. Según esto, y teniendo en cuenta la ecuación anterior, el diámetro del pistón tiene que ser de 70,774 mm para que la bomba esté correctamente dimensionada.

3.6 Comprobación del gasto entregado por el sistema diseñado

Una vez que se han seleccionado todos los componentes de la instalación, se puede verificar si este entrega la cantidad de agua que se exige para cada mes. Para determinar el gasto que entrega el sistema diseñado diariamente se utiliza la siguiente ecuación:

$$Q = \frac{3,6 \cdot 24 \cdot \frac{\pi}{4} \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho_{\text{aire}} \cdot v^3 \cdot FPE \cdot \eta \cdot D^2}{H \cdot g}$$

| GASTO ENTREGADO POR EL SISTEMA DE BOMBEO DISEÑADO | | | | | |
|---|------------------|------------------------------|---|--------------------------|--------------------------------------|
| Mes | Demanda (m3/día) | Carga estática de bombeo (m) | Velocidad del viento a altura de la torre (m/s) | Gasto entregado (m3/día) | Diferencia entre los gastos (m3/día) |
| ENERO | 9,915 | 13,20 | 5,403 | 11,909 | 1,9941 |
| FEBRERO | 9,915 | 13,20 | 4,608 | 11,909 | 1,9941 |
| MARZO | 9,915 | 13,20 | 4,935 | 11,909 | 1,9941 |
| ABRIL | 9,915 | 13,20 | 4,743 | 11,909 | 1,9941 |
| MAYO | 10,725 | 13,20 | 4,624 | 11,909 | 1,1841 |
| JUNIO | 10,725 | 13,20 | 4,457 | 11,909 | 1,1841 |
| JULIO | 10,725 | 13,20 | 5,061 | 11,909 | 1,1841 |
| AGOSTO | 10,725 | 13,20 | 5,012 | 11,909 | 1,1841 |
| SEPTIEMBRE | 9,915 | 13,20 | 5,180 | 11,909 | 1,9941 |
| OCTUBRE | 9,915 | 13,20 | 5,260 | 11,909 | 1,9941 |
| NOVIEMBRE | 9,915 | 13,20 | 5,399 | 11,909 | 1,9941 |
| DICIEMBRE | 9,915 | 13,20 | 5,131 | 11,909 | 1,9941 |

Tabla 5. Caudal entregado por la instalación en los diferentes meses.
Fuente: Aerobomba para impulsión de agua en Mozambique. CORCUERA.A. 2014.

En la tabla anterior, se observa que la instalación diseñada cumple con la demanda de agua en todos los meses del año.

En la Figura 5, se puede ver un esquema de la instalación de la aerobomba ya definida para la instalación.

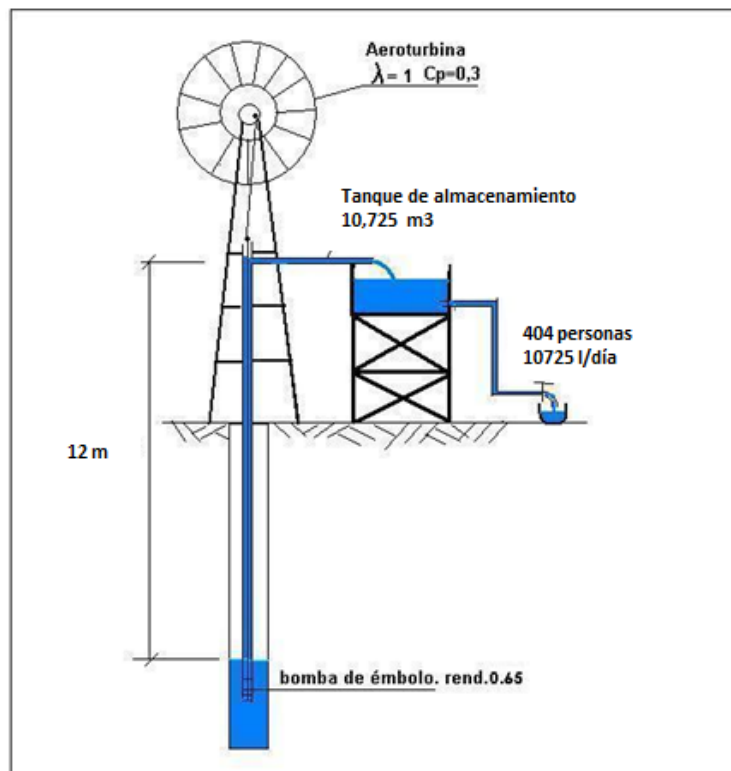


Figura 5. Esquema de la aerobomba definida.
Fuente: Aerobomba para impulsión de agua en Mozambique. CORCUERA.A. 2014.

4. Conclusiones

El desarrollo de nuevas tecnologías, destinadas a proyectos de cooperación es muy importante si se quiere avanzar en el contexto de los derechos humanos en países en subdesarrollo. De esta forma, la aparición de nuevas instalaciones, como la aerobomba, ofrece un complemento a las bombas manuales ya conocidas, abarcando un gran espectro de posibilidades en todo tipo de proyectos y emplazamientos.

Su instalación no debe considerarse alternativa a dichas bombas manuales existentes en numerosas localidades rurales, sino que debe tratarse como un apoyo para lograr el abastecimiento de todas las necesidades hídricas de una población.

La aerobomba es una solución a dicha problemática de bajo coste que, además de no tener impacto medioambiental, sí conlleva un impacto social positivo, ya que posibilita el autoabastecimiento y la independencia de pequeñas poblaciones rurales. Dotándoles de los conocimientos del funcionamiento de dichas tecnologías y, teniendo en cuenta el bajo coste de los materiales, fomentamos el posible desarrollo de futuras instalaciones, generando con ello un impacto económico positivo en el mercado local.

Por todo ello, se debe seguir avanzando en este tipo de tecnologías sociales teniendo en cuenta que queda mucho camino por recorrer.

5. Referencias

CORCUERA MARTÍNEZ, A. (2014). *Aerobomba para impulsión de agua en Mozambique*. Escuela Técnica Superior de Ingeniería y Diseño Industrial. Universidad Politécnica de Madrid. Madrid, España.

MANCEBO PIQUERAS, J.A. (2012). *Hidráulica aplicada a proyectos de desarrollo. Elementos de Ingeniería hidráulica*. Escuela Técnica Superior de Ingeniería y Diseño Industrial. Universidad Politécnica de Madrid. Madrid, España.

Organización de las Naciones Unidas, ONU. (2012). *Informe 2012 sobre los Objetivos de Desarrollo del Milenio*. Nueva York, Estados Unidos de América.

Resolución A/RES/64/292. Asamblea General de las Naciones Unidas. (2010). Nueva York, Estados Unidos de América.

El derecho al agua. Comité de Naciones Unidas de Derechos Económicos, Sociales y Culturales. (2002). Nueva York, Estados Unidos de América.

Desarrollo tecnológico de sistemas aislados con energía eólica. Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas, CIEMAT. (2002). Madrid, España.

Informe sobre Desarrollo Humano 2006. Más allá de la escasez: Poder, pobreza y la crisis mundial del agua. Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo, PNUD. (2006). Nueva York, Estados Unidos de América.