

PAPELES DE ESTUDIO ACERCA DEL DESARROLLO HUMANO



Módulo 1 LA URGENCIA DEL AGUA

**Estudio de tecnologías apropiadas en agua
Impulsiones convencionales y bombas manuales**

**José Antonio Mancebo Piqueras^(*)
Madrid, febrero-2013**

^(*) Dr. Ingeniero Industrial.
Deptº de Ingeniería Mecánica y Construcción (UPM)
Centro de Innovación en Tecnologías para el Desarrollo (UPM)

TECNOLOGÍA HIDRÁULICA. BOMBEO.....	3
1. CONTEXTO: ACCESO UNIVERSAL A SERVICIOS BÁSICOS. AGUA Y SANEAMIENTO	3
2. ALGUNAS DEFINICIONES Y CONCEPTOS EN INGENIERÍA DE BOMBAS HIDRÁULICAS.....	4
3. TIPOLOGÍA DE BOMBAS HIDRÁULICAS, COMO TECNOLOGÍA APROPIADA PARA EL DESARROLLO.....	5
4. ALGUNOS ASPECTOS A CUIDAR EN EL PROYECTO DE IMPULSIÓN.	7
5. EJEMPLO DE PROYECTO DE ABASTECIMIENTO CON IMPULSIÓN.....	11
6. BOMBAS MANUALES.....	14
7. EL ARIETE HIDRÁULICO COMO CASO SINGULAR DE IMPULSIÓN CON MINIHIDRÁULICA.	22
8. AEROTURBINAS PARA BOMBEO MECANICO DIRECTO. MOLINO MULTIPALA.....	24
9. REFERENCIAS.	27

Foto de portada: habitantes de Montepuez, Mozambique, tomando agua en un pozo en zona urbana. J.A. Mancebo, 2009

TECNOLOGÍA HIDRÁULICA. BOMBEO

1. Contexto: Acceso Universal a Servicios Básicos. Agua y saneamiento

A menudo se publican estudios sobre la situación del acceso al agua y saneamiento en países en desarrollo, cumplimiento de Objetivos de Desarrollo del Milenio, etc. Los datos globales son, entre otros, que unos 1000 millones de personas carecen de acceso al agua (considerando acceso a fuentes de agua segura y de calidad), que unos 2400 millones no tienen acceso a sistemas de saneamiento, etc. Si partiendo de estos estudios, de dudosa e imprecisa cuantificación, se detectan enormes carencias, la experiencia in situ permite captar un panorama todavía más desolador, especialmente en cuanto nos alejamos del centro de las ciudades principales. Así por ejemplo la realidad del acceso a servicios básicos en general, y al agua potable en particular, en África subsahariana rural, es de carencia generalizada y, además, con grandes problemas de calidad. En general, apenas unas pocas personas cuentan con acceso a estos servicios. Si al mismo tiempo observamos los sistemas de energía disponibles, anotamos una estrecha relación entre ambos factores,: por ejemplo, el deficiente, o inexistente, suministro de la energía eléctrica se corresponde con la carencia de agua en las mismas poblaciones. Y, aunque se trata de un problema complejo, ello es así sencillamente porque a estos lugares no llega ninguna red de transporte de electricidad, ni se genera localmente esa energía, salvo casos contados para usos comunes, resueltos en general con grupos electrógenos, de gran impacto ambiental y económico, y raramente con energías renovables, como módulos fotovoltaicos o generadores eólicos.

El desarrollo de las energías renovables, tan necesario a veces en los sistemas de impulsión, se encuentra además con numerosos problemas, como por ejemplo la escasez de recursos hídricos y eólicos con suficiente potencial, carencia de acceso a tecnologías apropiadas, y, sobre todo, dificultades en materia de garantía de sostenibilidad.

En estos contextos, el estado del acceso a la energía que se observa es de práctica inexistencia y por tanto las intervenciones de desarrollo parten de esa base a la hora de formular sus proyectos. En buena parte las bombas manuales intentan dar una respuesta viable a estos problemas.

2. Algunas definiciones y conceptos en ingeniería de bombas hidráulicas.

Los sistemas utilizados en el proyecto de transferencia de energía hidráulica precisan de la aplicación de las ecuaciones básicas de mecánica de fluidos y máquinas hidráulicas:

- a) Continuidad. De ella obtendremos, para los regímenes permanentes: velocidades, caudales y secciones de paso en conducciones.

$$\int_A \rho \cdot \vec{v} \cdot \vec{n} \cdot dA = 0, \text{ o bien } Q = v \cdot A = cte$$

- b) Conservación de cantidad de movimiento y de energía. Nos permitirán conocer fuerzas actuantes y pérdidas de carga.

$$\int_A \rho \cdot (\vec{v} \cdot \vec{n}) \cdot \vec{v} \cdot dA + \text{Peso} + \text{fuerzas de Presión} + \text{fuerzas por aceleración local} = 0$$

- c) Conservación del momento cinético. Ofrece el par motor de las máquinas hidráulicas (grupo de turbomáquinas) y la potencia capturada por una máquina de una corriente de fluido (turbinas) y cedida a la corriente (bombas).

$$P_m = \int_{A1} \rho \cdot (\vec{v}_1 \times \vec{r}_1) \cdot v_1 \cdot dA - \int_{A2} \rho \cdot (\vec{v}_2 \times \vec{r}_2) \cdot v_2 \cdot dA = \rho \cdot Q \cdot (r_1 v_1 \cos \alpha_1 - r_2 v_2 \cos \alpha_2) \cdot \vec{e}_z$$

- d) Principio de desplazamiento positivo, base del funcionamiento de las bombas de émbolo

Una máquina hidráulica generadora (bomba) es aquella que, aprovechando la energía de accionamiento exterior, incrementa el contenido energético de un flujo. Como es conocido, en un punto cualquiera del sistema fluido, este “contenido específico” de energía puede expresarse mediante la conocida ecuación de Bernoulli:

$$Z + \frac{P}{\gamma} + \frac{V^2}{2g} = H$$

Donde H: altura total o energía específica en m.c.l.

Z: cota geométrica

P: presión

γ : peso específico

v : velocidad

g : aceleración de la gravedad

En el interior de la bomba el salto de energía entre la brida de impulsión (i) y la de entrada (e) es la altura manométrica (H_m). En esencia es la altura útil de la bomba:

$$H_m \equiv \left(Z_i + \frac{P_i}{\gamma} + \frac{V_i^2}{2g} \right) - \left(Z_e + \frac{P_e}{\gamma} + \frac{V_e^2}{2g} \right)$$

Aunque también puede expresarse la altura manométrica en función de los parámetros que definen la instalación a la que se conecta la bomba: altura de elevación (H_{elev}), pérdida de carga en las conducciones (ΔH_{perd} , se adjunta programa ase95 para el cálculo de pérdidas en tuberías de PE, se recomienda utilizar la fórmula de Darcy-Weisbach por su comodidad), presión residual o bien diferencia de presiones de captación y descarga ($(P_d - P_a) / \gamma$, poco frecuente en proyectos de agua en cooperación, energía cinética en la descarga ($V^2/2g$) etc.:

$$H_m = H_{elev} + \frac{P_d - P_a}{\gamma} + \Delta H_{perd} + \frac{V^2}{2g}$$

La potencia de accionamiento (P), en watios, necesaria para obtener esa altura (H_m) en la bomba, con caudal (Q), rendimiento (η) y peso específico del fluido (γ) es:

$$P = \frac{\gamma \cdot Q \cdot H_m}{\eta}$$

Como ejemplo una bomba que tiene un rendimiento global del 60 % con un caudal de 3 l/s y debe dar una altura de 65 m, necesitará una potencia de accionamiento de:

$$P = \frac{9810 \cdot 0,003 \cdot 65}{0,6} = 3188 \text{ W}$$

Sin embargo a partir de aquí se plantea un problema de difícil solución: el problema energético. Lo más frecuente es que no haya corriente eléctrica en red, y, cuando la hay, a menudo es de pésima calidad en cuanto a tiempo en servicio, voltaje, frecuencia, etc. Si a lo anterior añadimos otros factores como la viabilidad económica (fundamentalmente costes asociados al suministro y mantenimiento de sistemas complejos), se comprende que con frecuencia es imprescindible recurrir a sistemas alejados de los convencionales.

3. Tipología de bombas hidráulicas, como tecnología apropiada para el desarrollo.

Todas las bombas constan de los tres elementos básicos:

- El motor o sistema de accionamiento, que proporciona la energía mecánica necesaria para el bombeo;
- La transmisión mecánica, que convierte la energía motriz en energía hidráulica en el rodete o en el émbolo;
- La conducción adecuada del fluido confinado con el fin de impulsarlo.

Le elección de un sistema de bombeo se debe hacer teniendo en cuenta no sólo las limitaciones técnicas (tipo de bomba, energía, pérdida de carga, caudal) sino también las limitaciones que impone el contexto socio-económico (sistema de bombeo apropiado,

disponibilidad de piezas de repuesto, facilidad de mantenimiento). Es preciso por tanto tener presente que la bomba es una parte más del sistema conjunto de abastecimiento de agua, que debe integrarse en él, intercalado en el punto donde es útil y que debe responder con sus características a las prestaciones que se le requieren, adaptándose además, dentro de ciertos límites, a las posibles variaciones de servicio.

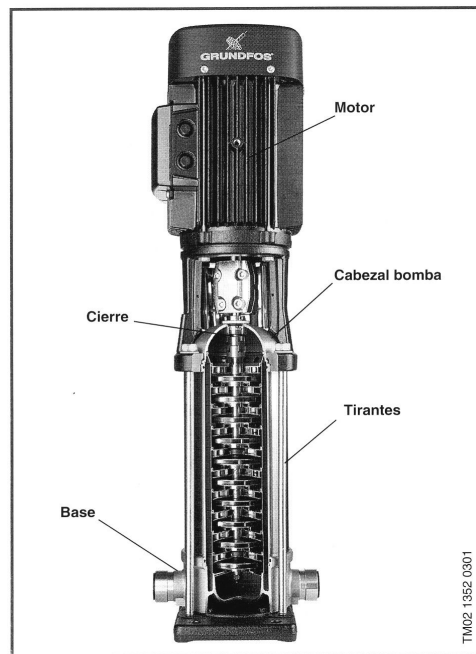


Figura 1 Bomba centrífuga multietapa seccionada

Tabla 1 Principales tipos de bombas hidráulicas

TIPO DE BOMBA	APLICACIONES	BASE TECNOLÓGICA- ALGUNOS TIPOS
Manuales	Pozos manuales y encamisados Impulsiones y suministro limitados. Caudal entre 6 y 20 l/min Altura de impulsión: en general hasta el nivel del suelo, salvo excepciones	De émbolo en aspiración (limitación a 7,5 m) De émbolo sumergido: India Mark, Nira, Tanira, Afridev De mecate. Cuerda con pistones deslizantes. BM-1 y BM-2 Se construyen principalmente en países en desarrollo
Accionamiento mecánico (energía eléctrica o con motor alternativo)	Todo tipo de impulsiones.	Generalmente centrífugas de una o varias etapas. También volumétricas (de tornillo helicoidal).
Accionamiento mecánico-eólico	Muy similares a las bombas manuales	Captan energía cinética del viento Aerobombas
Ariete Hidráulico	Caudal escaso y alturas considerables, hasta 100 m	Aprovechan energía disipada en golpe de ariete.

Atendiendo al principio de funcionamiento, existen dos tipos principales de bombas: las rotodinámicas -centrífugas, basadas en el principio de Euler o conservación del momento cinético- y las volumétricas, basadas en el principio de desplazamiento positivo.

Para el suministro de agua potable, las bombas volumétricas más utilizadas son las manuales, sin menospreciar a las aerobombas.

Existe una gran variedad de bombas manuales, debido en parte a que continuamente se perfeccionan las disponibles, principalmente por innovaciones efectuadas en países en desarrollo (India, Nicaragua, etc.). No obstante las más conocidas en el ámbito de la cooperación son las de mecate, las de émbolo aspirante o sumergido, unidas a las de ariete (en realidad ésta no es de accionamiento manual).

4. Algunos aspectos a cuidar en el proyecto de impulsión.

Altura de aspiración

Cuando el eje de la bomba se sitúa a cota superior al nivel del depósito de captación, es preciso considerar una altura máxima de aspiración teórica (h_s) de 10,3 m (o la altura de presión atmosférica local) que se ve reducida por las pérdidas en la tubería de aspiración (incluyendo los accesorios y las pérdidas entre la brida de entrada y el rodete) ($\Delta H_{\text{pérd. asp}}$), altura de la presión de vapor (P_v/γ):

$$h_s < \frac{P_a}{\gamma} - (\Delta H_{\text{pérd. asp}} + \frac{V_e^2}{2g} + \frac{P_v}{\gamma})$$

Ahora bien si se considera la altura neta positiva en la aspiración, dada por el fabricante (NPSH):

$$h_s < \frac{P_a}{\gamma} - (\Delta H_{\text{pérd. asp}} + \frac{P_v}{\gamma} + NPSH)$$

Esta altura de aspiración, válida para bombas centrífugas y manuales de émbolo aspirantes, no debe sobrepasar los 7,5 m. Cuando se produce un descenso del nivel freático en el terreno y cae el nivel dinámico en un pozo, se corre el riesgo de rebasar la altura máxima y por tanto la bomba puede trabajar en cavitación. La cavitación afecta gravemente al funcionamiento de la bomba, provoca ruidos y vibraciones, reduce el caudal y la altura, y , con el tiempo, acaba por destruir parte del rodete por simple arranque de material

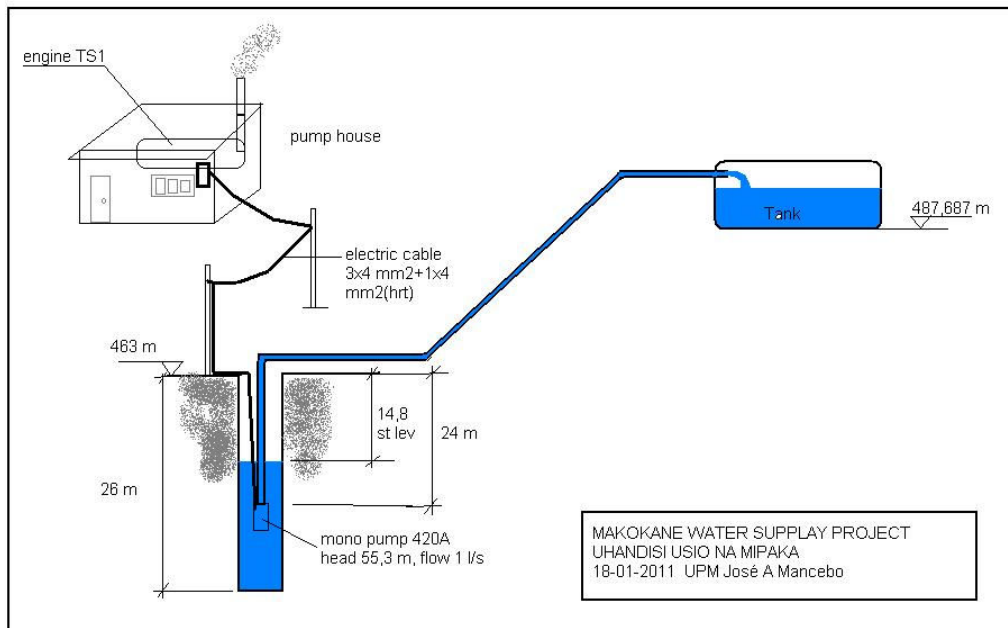


Figura 2. Esquema de impulsión. Same, Tanzania

Curvas características de la bomba

Las curvas características de una bomba nos ofrecen un valiosa información acerca del comportamiento de las principales variables de su funcionamiento: altura manométrica, rendimiento, caudal, NPSH, etc., como se muestra en la siguiente figura:

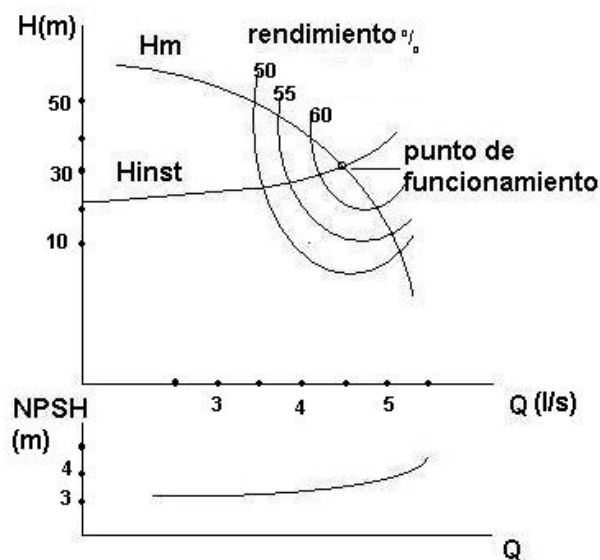


Figura 1 Curvas características de una bomba centrífuga y curva resistente

Accionamiento de la bomba

Accionamiento con moto bomba:

El accionamiento se realiza mediante un motor térmico (transmisión coaxial o por correa) con la bomba. Es un sistema económico, válido para pequeñas comunidades, por debajo de 50 m³/día.



Figura 3 Moto-bomba accionada por correas en Mbuga Nyekundu (Mangola, Tanzania, J.A.Mancebo 2007)



Figura 4 Detalle de transmisión por correa (bomba de Fig.3, J.A.Mancebo 2007)

Si la bomba y el motor con coaxiales y comparten la bancada, el motor debe equilibrarse dinámicamente. Si no es así se producen averías como se observa en (Fig.5)



Figura 5 Moto-bomba con averías mecánicas (Barazani, Tanzania, J.A.Mancebo2007)

Motor eléctrico. Cuando no se dispone de red de energía eléctrica se precisa instalar un grupo electrógeno, (Fig. 6 Diesel generator,), de potencia 2-3 veces la del motor eléctrico.

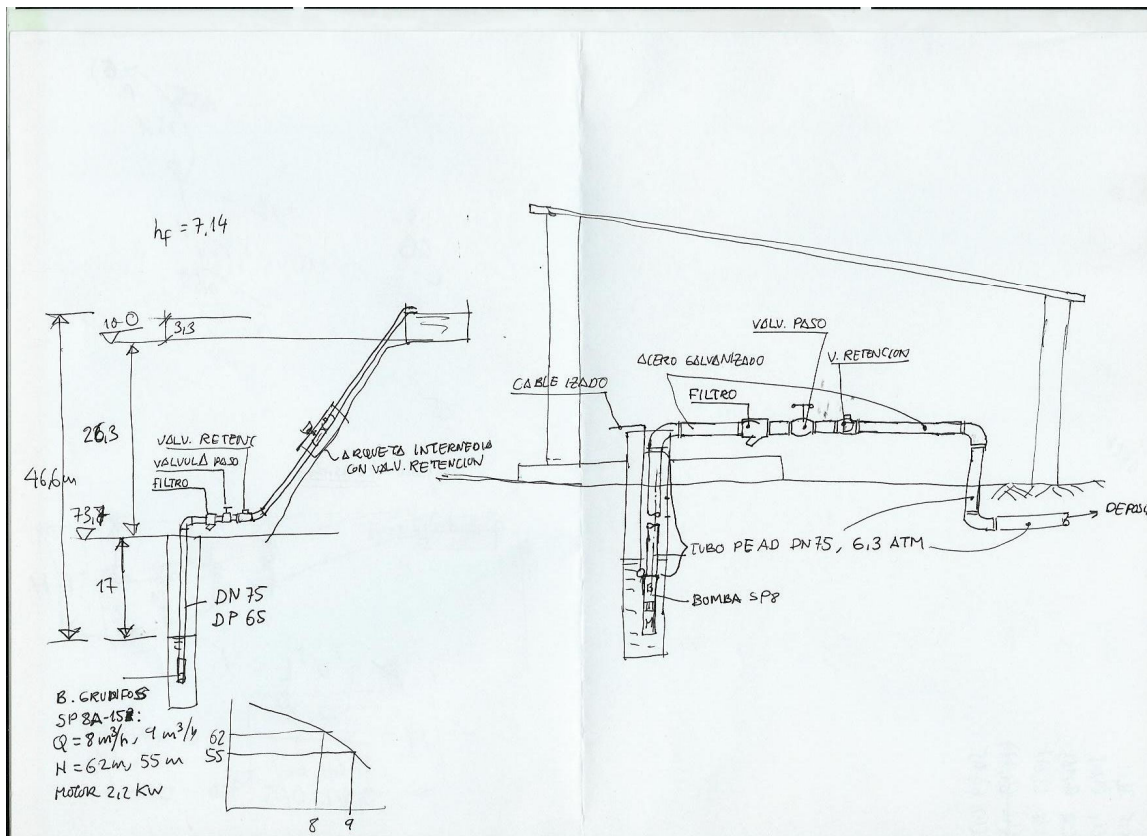


Figura 6. Diseño de impulsión para Gorfam, Tanzania, 2006

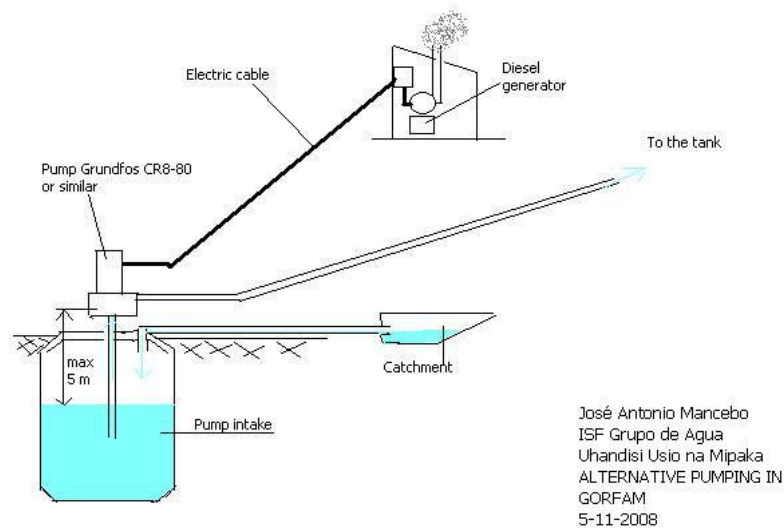


Figura 7 Sistema de bombeo en Gorfam (Mangola, Tanzania, 2008)



Figura 8 Generador diesel para alimentación a bomba sumergida (Gorfam, Tanzania, J.A.Mancebo 2007)

5. Ejemplo de proyecto de abastecimiento con impulsión.

Se expone a continuación el proyecto de abastecimiento a una población (Jobaj, Tanzania)

Jobaj water supply

Jobaj consists on 4 kitongojis, where there are 2.449 inhabitants, living in 543 households. The coordinates (UTM and elevation) of these households were collected by ISF volunteers during other visits in 2005. In Jobaj there are primary and now a secondary schools which is going to be opened in 2008. There is also a prison. The current water supply system just consists of one hand pump (like the Kambi Ya Simba one), placed in a borehole close to the “shambas” (gardens), as is shown in enclosed drafts. The pump yield is high (about 30 l/min). Besides, there is and old borehole very close to this (which is explained below) and there are also several useless boreholes. This only distribution point is not enough for all the Jobaj’s inhabitants, so a lot of them fetch water from the Mbuga Nyekundu system or directly from the irrigation channel. And all of them have a serious water problem. During the visit were collected people’s desires of an improved water supply system. All this was reflected in a letter which was given to the ISF volunteers.

Besides of this water demand, hard poverty cases were also found. It is thought that a new water supply system, based in either of the boreholes, can be built. As it has been noted, a possible extension of the Mbuga Nyekundu current system only would consist of two DPs, on the lower Jobaj lands. Owing to this, as follow in this report, and after a detailed analysis of the current system, a new water system is suggested. This suggestion has been agreed by the ISF local technician, the volunteers and the Jobaj community.

The Jobaj project

In the project documents it shown that certainly an only water supply system for Mbuga Nyekundu and Jobaj was projected.

In fact, there is one survey ordered to WEGS (a Tanzanian consultant engineers company) which suggested two different solutions for the Jobaj – Mbuga Nyekundu water supply system.

However, and after the Barai river flood, which occurred in 2004, this solution was rejected, because pipelines needed to cross the river and the project was going to be very expensive. Besides this solution only supplied the lower parts of Mbuga Nyekundu and Jobaj.

Owing to this a Mbuga Nyekundu water supply system was implemented but not the Jobaj's one. There, a hand pump in a new borehole, was put. But this only DP is clearly insufficient for Jobaj people.

5.4 Suggested solution

The suggested solution consists on one borehole (the old drilling), one impulsion, one storage water tank and a network which has 16 domestic points (DPs).

Calculate estimations

In this chapter are shown the calculate estimations made in order to design the water supply system for Jobaj. However calculations won't be completely defined after more accurate surveys.

Water demand Population in 2007: 2449 habitants. Growing rate 2 %

Population in 2022 ≈ 3300 habitants

Diary Water assignment 15 Liters per habitant

Total diary Water Demand $D = 49500 \text{ LPD} \approx 50.0 \text{ m}^3/\text{day}$

Pumping Hours 4 h / day. Pumping flow $12.5 \text{ m}^3 / \text{h}$

Water system

Water tank, Elevation 1125 m, Diameter (internal) 5.5 m, High (effective) 2.1 m

Volume 50 m^3 (Total diary water demand)

Borehole. Elevation 1055 m, Water table (depth) 14 m

Impulsion. Pipeline, PE pipe, Length: $\approx 2700 \text{ m}$, Diameter $3 \frac{1}{2} \text{ ''}$

Water velocity 0.78 m/s , Pipeline headloss $\approx 23 \text{ m}$

Pump system

According to these data, the necessary pumping head is about 110 m.

$H = (1125 - 1055 + 14) + 23 = 106 \text{ m}$

The commercial pump suggested, because is clearly known as reliable model and because it can be found in Arusha, is the submersible multy-stage Grundfos pump SP 17 (with 13 stages). Another possibility could be the SP 14A (with 25 stages). The efficiency of these pumps is about 65 – 70 % and this trade mark offers certainty.

In both of them the working point is about 120 m and $14 \text{ m}^3/\text{h}$.

But this will be known when the true data (elevations, lengths, etc) were obtained.

Electricity generator system. The energy required to pump this amount of water is about 5,8 kW (in 4 hours).

This energy can be supplied either by a diesel generator or by a solar panels.

In the first case would be an AC diesel generator similar to the Gorfán's one: 3 phases x 400 V, with 20 kVA power.

In the second case would be necessary at least a 40 m^2 solar panel surface.

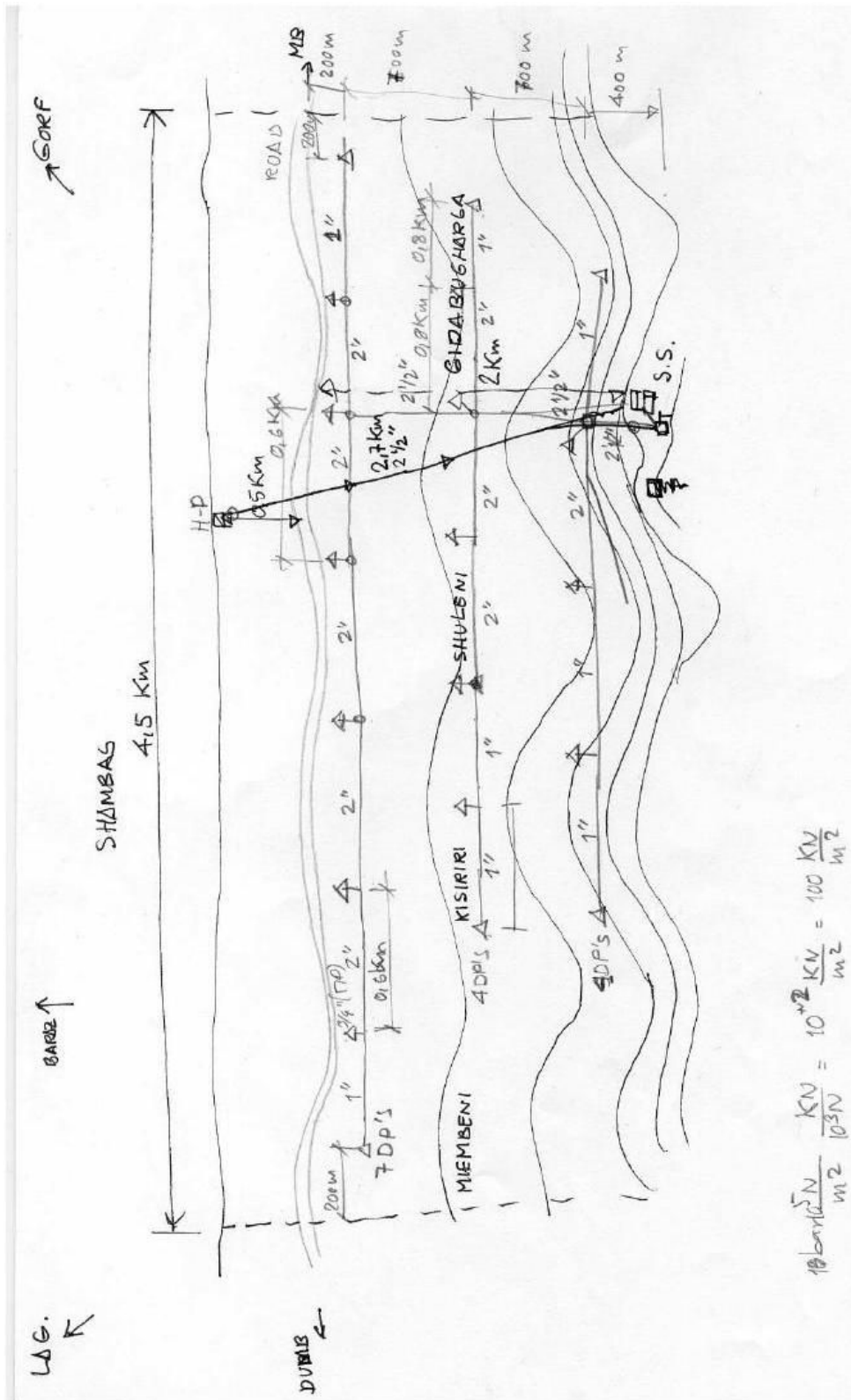


Figura 9 Planteamiento para el proyecto de abastecimiento a Jobaj

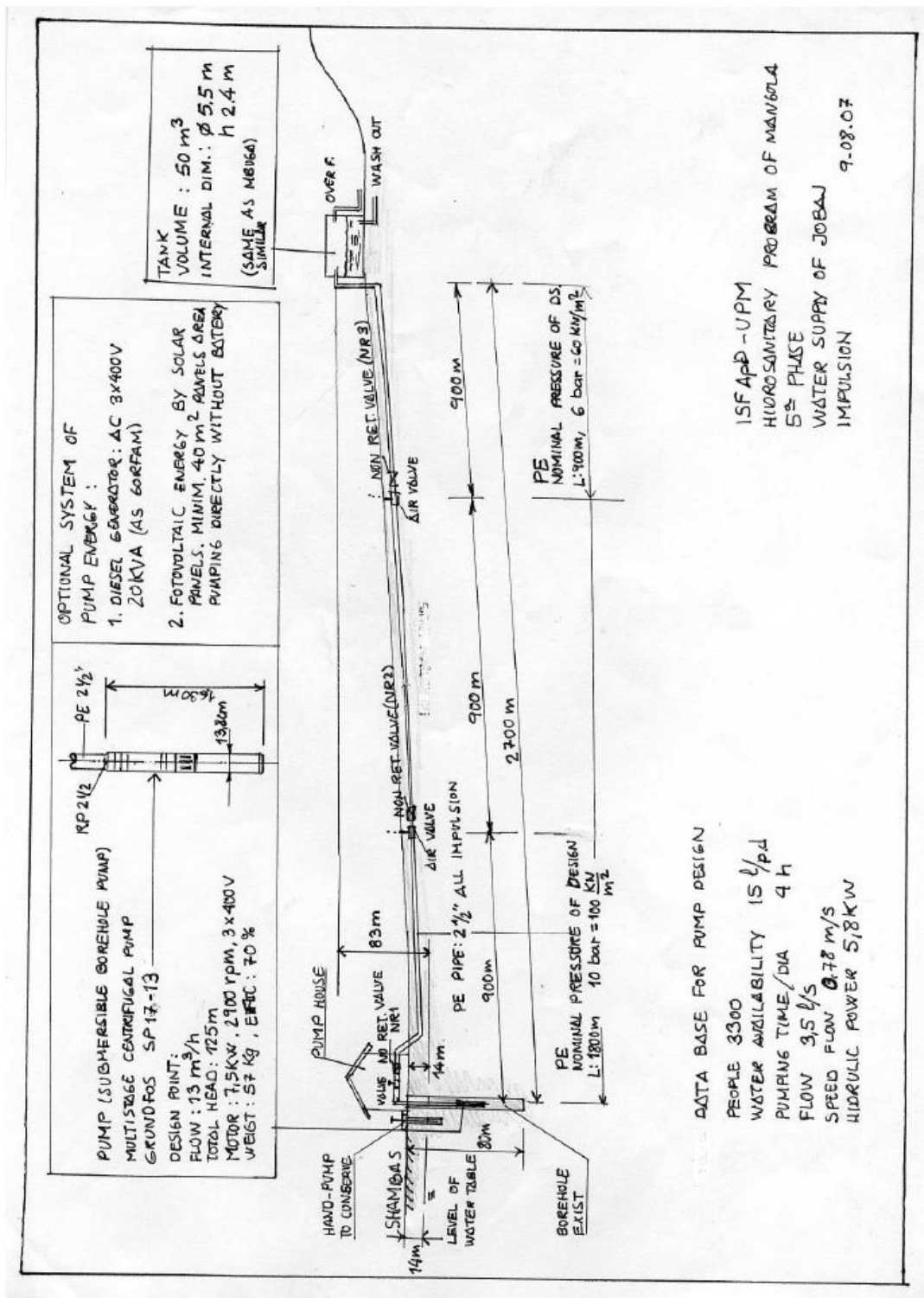


Figura 10 Sistema de impulsión del proyecto de Jobaj

6. Bombas manuales.

A pesar de las innegables ventajas que presentan las bombas antes descritas, en multitud de ocasiones no es la tecnología más apropiada, sobre todo porque hablamos de comunidades donde, por ejemplo, existe un pozo, normalmente excavado a mano, sin

acceso a energías convencionales. En estos casos una bomba manual puede ser la opción más viable, plantea muchos menos problemas de mantenimiento y, además, en general es una tecnología conocida por los beneficiarios. En definitiva, si se aborda la sostenibilidad desde todos sus ángulos, las bombas manuales, y otras basadas en energías renovables, obtienen una elevada calificación.

Principales tipos de bombas manuales

Las bombas manuales se clasifican de acuerdo con la profundidad de la instalación (Tabla 2): las bombas aspirantes se usan para niveles dinámicos inferiores a 7 m; las bombas impelentes son para profundidades del agua mayores a 7 m. Las bombas adaptadas a profundidades mayores (> 35 m), bombas de mecate, de émbolo, etc. también tienen la posibilidad de impulsar agua a tanques elevados, con ligeras modificaciones (se requiere entonces el sellado del cabezal de la bomba).

El caudal de funcionamiento de las bombas manuales varía en función de la profundidad de instalación y el tipo de bomba. Por ejemplo: (mediciones en campo por el autor en Mangola, Tanzania, 2005 y 2007):

- Bomba Afridev instalada a 30 m: 690 l/h;
- Bomba de aspiración a 6 m: 1000 a 1200 l/h;
- Bombas Tanira impelente a 18 m: 1600-1872 l/h.

Los fabricantes proporcionan los caudales medios, que dependen de la velocidad de bombeo (impulsiones por minuto):

Tabla 2 Rango de funcionamiento de las bombas manuales (fuente: *Water, sanitation and hygiene for population at risk, ACH 2005*)

10 m	20 m	30 m	40 m	50 m	60 m	70 m	80 m	90 m	100 m
..... Tara									
.Vergnet HPV30..									
..... India Mark 2									
..... Aqua/Afridev									
..... Kardia									
..... Vergnet HPV 60									
..... Volonta.....									
..... Monolift									
..... Vergnet HPV 100(*).....									

(*): 2 personas bombeando

A las anteriores debe añadirse la bomba de mecate con profundidades hasta 50 m
A continuación se exponen las principales características de algunas de las bombas manuales:

Bombas Kardia K65 y K50 (para grandes profundidades).	
Fabricante	Preussag AG
Cabezal y mango de la bomba	Acero galvanizado
Varilla de conexión, columna	acero inoxidable atornillado y tubos de PVC

Cuerpo de la bomba	Acero inoxidable
Pistón, cilindro	PVC
Diámetro externo	K 65: 70 mm; K 50: 50 mm
Peso total (25 m)	110 kg
Precio	2400 euros ex-works (45 m)
Funcionamiento (40 impulsos/min)	K 65: 1 m ³ /h at 30 m; K 50 672 l/h at 45 m
Ventajas	Excelente resistencia a la corrosión. Fácil instalación (PVC atornillado) Buena calidad en la fabricación
Desventajas	Se aflojan con frecuencia los cojinetes del mango

Bombas India Mark II.	
Fabricantes	Local, o francés (Soverna)
Cabezal de bomba	Acero galvanizado
Varilla de conexión, columna	Acero galvanizado
Cuerpo de la bomba	Varía según fabricante: acero inoxidable (Mali) o acero galvanizado (India)
Peso total	120 kg para 25 m
Precio	600 – 750 euros (25 m)
Funcionamiento (40 impulsos/min)	700 l/h a 25 m
Ventajas	subvencionado por UNICEF, bajos coste de compra
Desventajas	problemas con la cadena de transmisión Se recomienda un trípode para la instalación (bomba de gran peso)

Bombas Aquadev y Afridev.	
Fabricantes	Bombas Aquadev-Mono (Inglaterra), o local (Kenya, Mozambique)
Cabezal de bomba	acero inoxidable microsoldado
Varilla de conexión, columna	acero y PVC
Cuerpo de bomba	PVC
Pistón	material sintético
Peso total	100 kg para 25 m
Precio aproximado	750 euros ex-works (25 m)
Funcionamiento (40 golpes/min)	1.3 m ³ /h
Ventajas	buena calidad de fabricación en Aquadev Pistón y válvula de aspiración totalmente desmontables sin quitar la tubería de salida de PVC
Desventajas	La columna de PVC está pegada con cola, lo que hace difícil desmontarla Baja calidad del PVC, dependiendo del fabricante (Afridev) La abrazadera para la varilla de conexión Afridev no es fiable

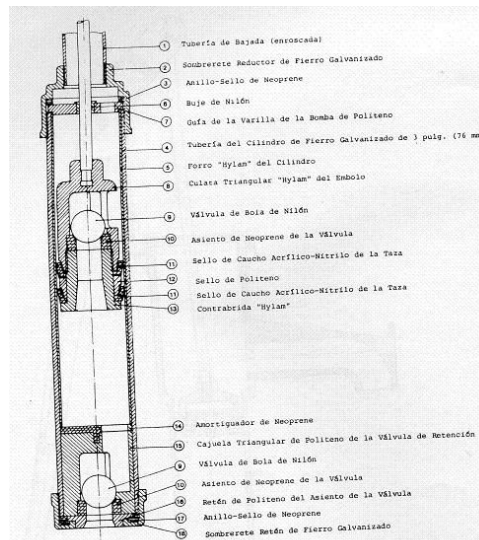


Figura 11 Cuerpo-cilindro de bomba de émbolo sumergida



Figura 12 Bomba manual de émbolo sumergido en Kambi ya Simba (Mangola, Tanzania, J.A.Mancebo 2005)



Figura 13 Bomba Afridev de émbolo sumergido en Hydesh (Mangola, Tanzania, J.A.Mancebo 2007)

Bomba aspirante

La bomba de pistón de aspiración se fabrica en numerosos países. La simplicidad de su diseño y su facilidad de fabricación hacen de ella una bomba muy barata (US\$ 300), pero sufre roturas frecuentes (el cuerpo de la bomba es de fundición) por su baja calidad. La calidad de la fabricación depende del país (Bangladesh, Vietnam, Birmania). Se puede usar hasta profundidades de 7 a 8 m, con la instalación de una válvula de pie (aspiración) suplementaria, ya que la válvula en el cilindro es normalmente de mala calidad. Para evitar el hundimiento de los pernos en la base se necesita un pedestal de acero donde se atornillan los pernos del cuerpo de la bomba. Esta bomba admite algunas mejoras, pero sobre todo debería de sustituirse el cuerpo de fundición por otro de tubo estructural. La bomba necesita ser cebada como paso previo a la impulsión.

El principio de funcionamiento se basa en la succión que el pistón ejerce sobre toda la columna hasta la superficie del agua en el pozo, en su carrera ascendente. Después, al descender, el agua que ha rebasado la válvula antirretorno inferior, se eleva hasta el canal de salida

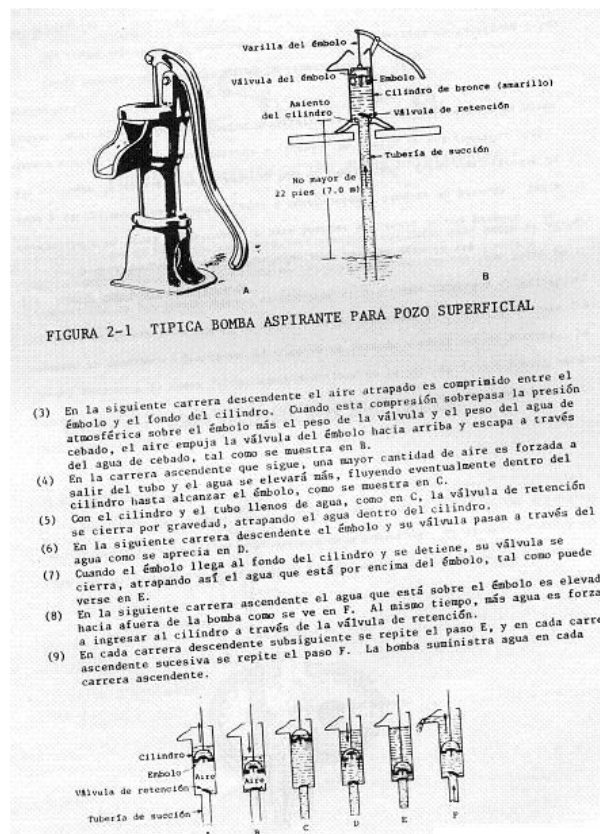


Figura 14 Funcionamiento de una bomba manual de émbolo aspirante

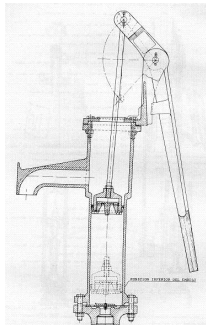


Figura 15 Cuerpo de bomba aspirante

Bomba de mecate

La bomba de mecate es un ingenio que se ha perfeccionado notablemente en los últimos años. La bomba se basa en un diseño antiguo que fue refinado durante los 80 y los 90. En su forma actual, la bomba de mecate de Nicaragua ha despertado un amplio interés en Centroamérica debido a su bajo costo (unos 180-200 USD, 2008), su eficiencia, su durabilidad y sus reducidas necesidades de mantenimiento. Este interés también se ha despertado en organismos internacionales y ONGs. Ha demostrado ser adecuada para usarla a nivel tanto comunitario como familiar, y funciona tan eficazmente como otras bombas manuales, como por ejemplo la Afridev y la India Mark II, llegando en la actualidad a extraer agua de profundidades subterráneas de hasta 50 metros.

Sus antecedentes son muy antiguos en China, aunque un modelo holandés, también relativamente antiguo, puede considerarse el precursor de esta bomba. Sin embargo, la Bomba de Mecate o bomba rotativa, como existe ahora, es una invención nicaragüense. Los primeros ensayos serios y el impulso necesario se lo dio un holandés llamado Jan, con la ayuda de un grupo de campesinos del Norte del país. Su principio de funcionamiento consiste en hacer pasar una cuerda con tapones de plástico intercalados por un tubo vertical sumergido en su parte inferior y libre en la superior. El agua ocupa el volumen entre los tapones y es elevada por el movimiento continuo de la cuerda mediante una rueda accionada manualmente. El impacto del trabajo de Jan en la proyección de la capacidad tecnológica relacionada con el agua en Nicaragua y fuera de Nicaragua fue muy amplio, llevando a cabo desarrollos tecnológicos además de Nicaragua, en Guatemala, El Salvador, Honduras, Haití, Perú y Cuba en América y Zimbabwe en África. La Bomba de Mecate, tiene varias ventajas e inconvenientes. Dado que el objetivo del trabajo es transferir la tecnología de la bomba a comunidades de bajos ingresos, situadas en zonas rurales, centraremos la discusión desde el punto de vista de la adaptación a dichas comunidades.

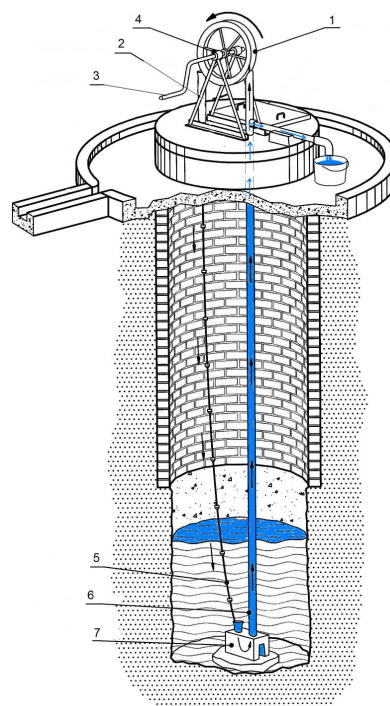


Figura 16 Bomba de mecate, tipo BM-I

Ventajas:

- Todos los componentes de la bomba de mecate se encuentran o fabrican fácilmente: cuerda, neumáticos usados, material para la estructura, tubo de plástico y pistones.
- Con un soldador, una sierra de metales, adhesivo para tuberías y poco más se puede montar o fabricar gracias a su sencillez de diseño.
- Su diseño sencillo permite repararla sin conocimientos muy amplios en la bomba.
- Tiene un rendimiento muy elevado igual o mayor que bombas manuales más caras.
- Puede trabajar a profundidades de hasta 50 m, lo que es más que suficiente.
- Al ser manual la bomba es ideal para las zonas rurales, sin acceso a energías convencionales

Inconvenientes:

- Requiere un mantenimiento constante si se quiere alargar su vida útil a más de 10 años.
- Como máximo puede dar servicio a un total de 130 a 150 personas.

Modelo sobreelevado, BM-II

El modelo sobreelevado es el que está despertando un mayor interés porque se ajusta a las necesidades de un proyecto donde se precise acumulación elevada de agua que ofrezca una mínima presión de servicio en una red modesta. La bomba de la (Fig.18) elevaba el agua desde 16 m, contando los 4 metros de sobreelevación, y llena un depósito de 2000 l en una hora. Prácticamente exacto a lo que se necesita. Este modelo se diferencia con el convencional en que eleva el agua por encima del nivel de la superficie. Utilizando una estructura y colocando en ella una segunda polea por encima de la salida.

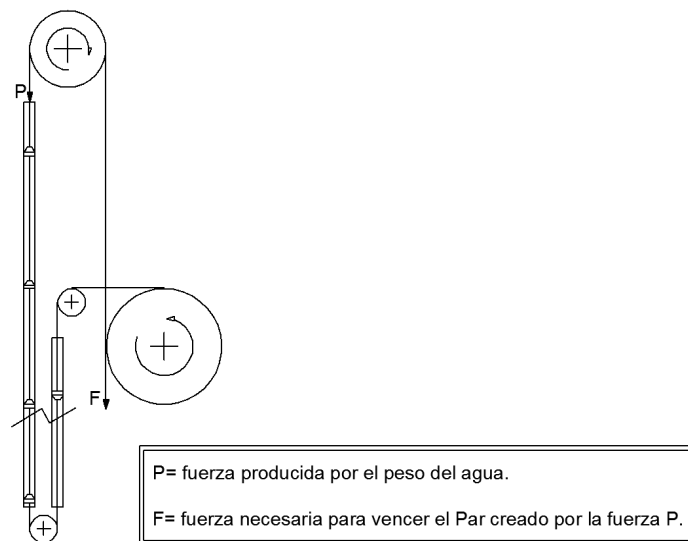


Figura 17 Esquema de funcionamiento de la bomba BM-II

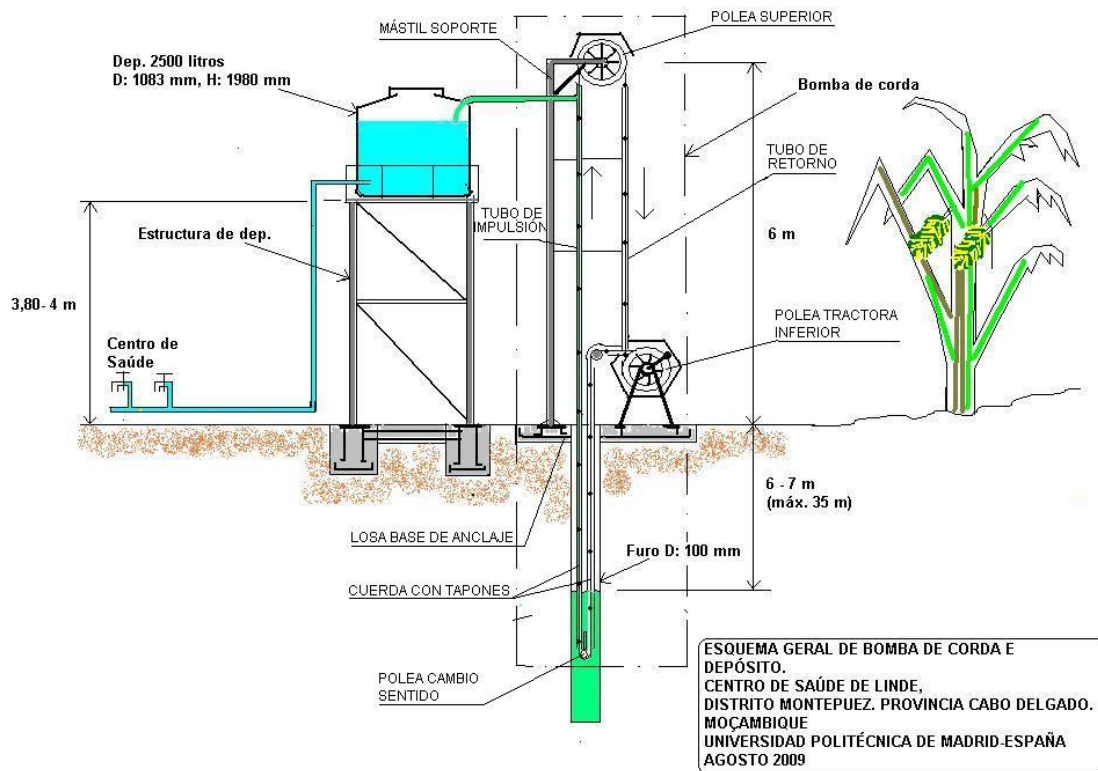


Figura 18. Esquema general de una bomba tipo BM-II instalada en Mozambique

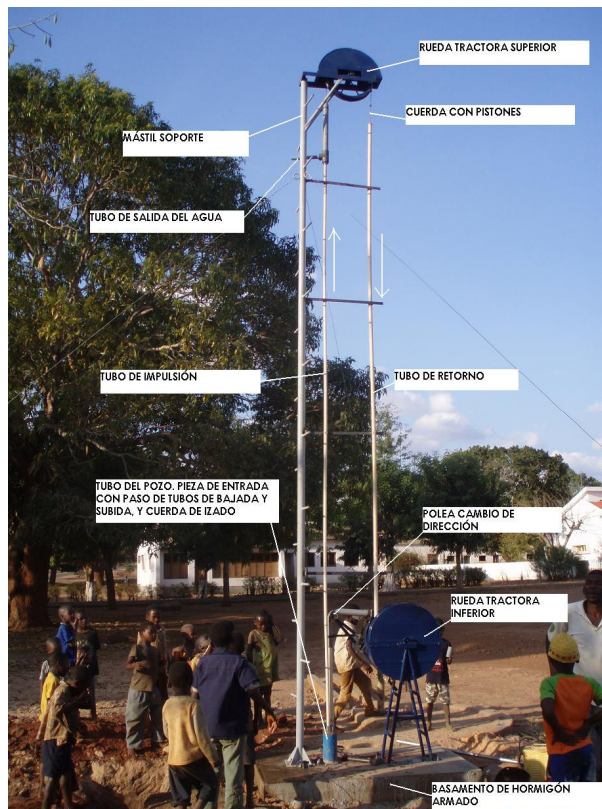


Figura 19 Bomba sobreelevada en Mozambique (G.Rebassa 2009)

7. El Ariete Hidráulico como caso singular de impulsión con minihidráulica.

a) Consideraciones previas acerca del golpe de ariete.

Cuando en una conducción se producen maniobras de cierre y apertura con una determinada rapidez, se produce una sobrepresión –golpe de ariete– que puede aprovecharse para realizar impulsiones sin aporte energético mecánico exterior. La conversión del incremento de presión en energía potencial de posición significa la elevación del líquido hasta alturas considerables, si bien con caudales reducidos.

Mediante la fórmula de Michaud para maniobras lentas, obtenemos una altura de elevación por golpe de ariete (H), que aplicada a un ejemplo sencillo nos ofrece resultados como los siguientes:

$$H = \frac{2 \cdot L \cdot V}{g \cdot T}$$

Aplicación:

L : longitud de tubería: 50 m

V : velocidad del agua en régimen estacionario: 4 m/s

g : aceleración de la gravedad: 9,81 m/s²

T : tiempo de duración de la maniobra: 1 s

$$H = 40 \text{ m}$$

b) Descripción general de la bomba de ariete. Aplicaciones

El agua aumenta de velocidad en una conducción de alimentación hasta que cierra una válvula pulsante y a la vez abre otra válvula antirretorno que deja pasar el agua a un depósito hasta que se equilibran las presiones en la cámara de llegada, y se abre la válvula pulsante dejando salir el agua al exterior, hasta que se inicie otro nuevo ciclo. El depósito se encarga de mantener una presión y caudal constante en la tubería de salida a la impulsión.

Por tanto para que el ariete funcione necesita de los siguientes apoyos hidráulicos:

- agua en cantidad suficiente (de 30 a 900 l/min)
- un mínimo desnivel entre la toma y la bomba (50 cm)

El ariete trabaja entre 60 y 90 golpes por minuto y puede alcanzar alturas de elevación de hasta 150 m. Una formulación sencilla para determinar el caudal impulsado (q: l/min) hasta una altura (H: m) utilizando para ello un desnivel de (h: m) y un caudal de alimentación (Q: l/min)

$$q = \frac{2 \cdot Q \cdot h}{3 \cdot H}$$

Como ejemplo de lo anterior podemos citar el caso de la impulsión de Barazani (Tanzania) en la que se tienen una conducción de alimentación mediante una tubería de 80 mm de diámetro de paso con un caudal de 250 l/min (Q), un desnivel de 2 m (h), y una elevación de 50 m. Aplicando la fórmula anterior obtenemos:

$$Q = 6,66 \text{ l/min} = 9500 \text{ l/día}$$

En realidad nunca se pasó de 6500 l día, y eso significaba una dotación de 0,81 litros de agua cada día por habitante de la población.

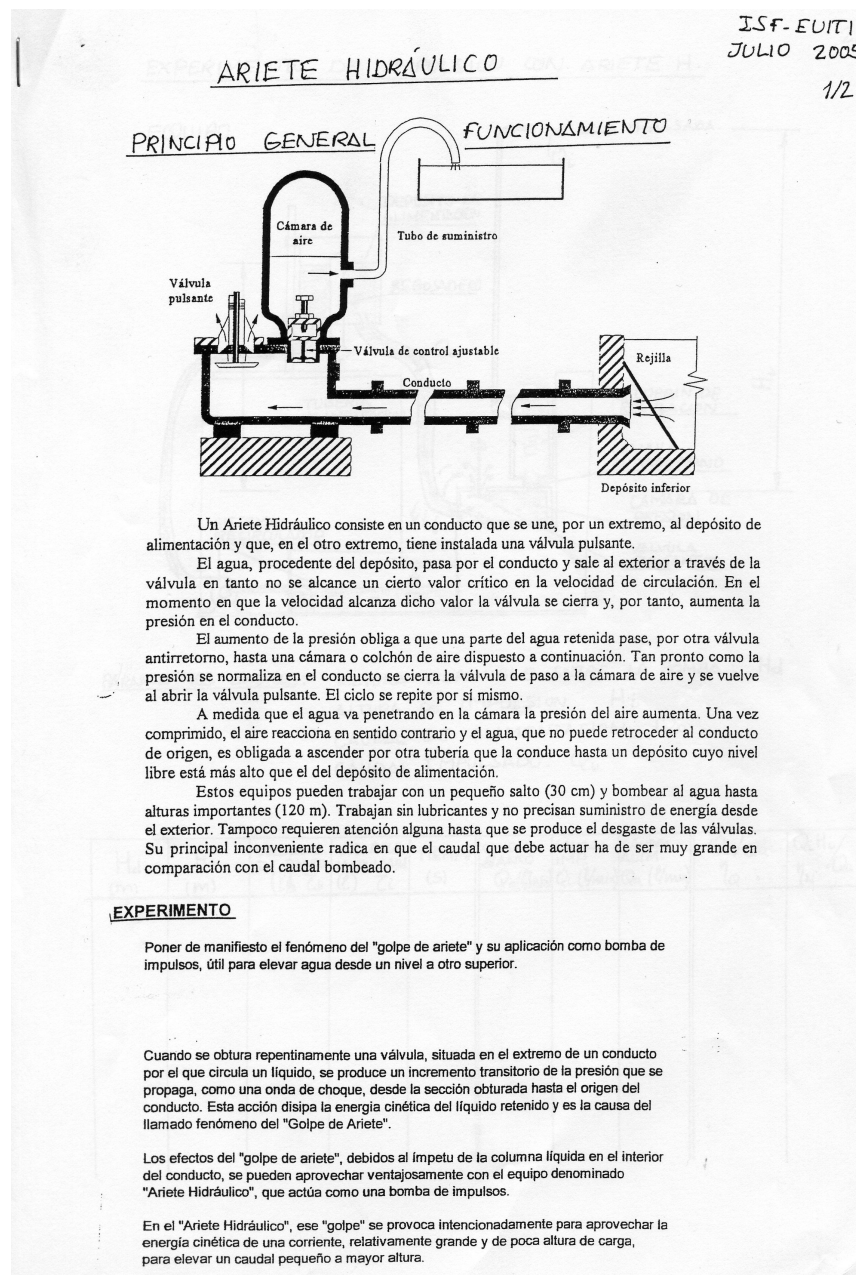


Figura 20 Ariete hidráulico



Figura 21 bomba de ariete desmontada (Barazani, Tanzania, J.A.Mancebo 2007)



Figura 22 Tubería de alimentación a la bomba de ariete. (Barazani, Tanzania, M.onzález 2005)

8. Aeroturbinas para bombeo mecánico directo. Molino multipala.

El molino multipala –también llamado Molino de Viento Americano- apareció a finales del XIX en EEUU y, con algunas décadas de sequía, ha seguido desarrollándose hasta la actualidad. En España existen varios fabricantes, ubicados en Alicante, Tarragona y Badajoz, entre otros. Esta aeroturbina captura la potencia del viento con un rotor compuesto por 12-24 palas, de eje horizontal, que, una vez convertido el movimiento circulara en alternativo, mueve una bomba de émbolo sumergida en el agua del pozo o depósito de captación. La transmisión de la potencia en el eje del rotor precisa de una caja reductora de engranajes y, no obstante, el arranque de la máquina es dificultoso con velocidades del aire reducidas (inferiores a 3 m/s). Por este motivo se hace necesario el avance en sistemas que reduzcan el par resistente de arranque.

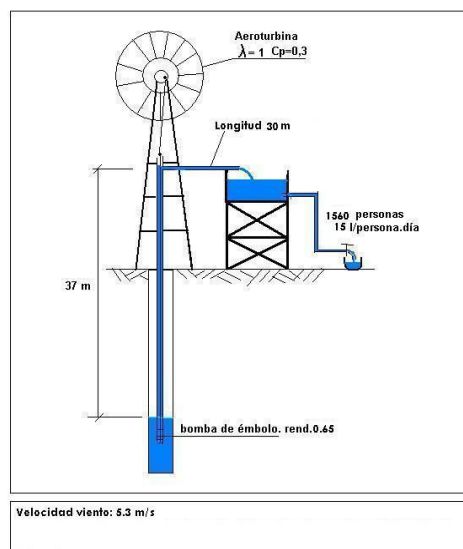


Figura 23. Esquema de aerobomba

El diámetro del rotor está entre 1,5 y 5 m en general, aunque puede elevarse hasta 8 m-10 m. Sus necesidades de mantenimiento son escasas y los repuestos son en general baratos, y en algunos casos pueden fabricarse por los usuarios (palas, cuerdas, aros del rotor, barras de transmisión, etc).

El caudal que es capaz de elevar depende de varios factores, y oscila, para un diámetro de rotor medio de 1,8 m, entre 600 y 1500 l/h.



Figura 24 Aerobomba en Mangola (Tanzania, J.A.Mancebo 2005)



Figura 25 Aerobomba en zona inundable. Tanzania 2005

Sin embargo presentan también algunos inconvenientes:

- El polvo y la arena afectan a los mecanismos de transmisión,
- Las velocidades elevadas del viento son causa de numerosas averías.

- Necesita de una estructura espacial que eleve el rotor en zonas donde la existencia de viento es a veces insuficiente. El molino debe situarse sobre la vertical del pozo.
- El coeficiente de potencia (C_p) es bastante menor que el límite de Betz y apenas alcanza un valor de 0,3 cuando la velocidad en punta de pala igual a la velocidad del viento ($\lambda = 1$). La eficiencia, definida como la relación entre la energía neta producida y la energía disponible en el viento es reducida (5 % aproximadamente)

La velocidad de giro es elevada (40-70 r/min) a pesar de que la velocidad en punta de pala es pequeña por tener un diámetro también pequeño, así un rotor de 2 m de diámetro, con un viento de 5 m/s y $\lambda=1$, girará a 57,3 r/min.

Proyecto de bombeo eólico

El proyecto de una instalación de bombeo eólico con aerobomba tiene en principio las mismas fases que cualquier otra impulsión en el marco de la cooperación:

- 1- Cálculo de necesidades hídricas. Principalmente determinación del caudal (Q) a suministrar.
- 2- Altura de bombeo. Considerando la altura del depósito. Pérdidas de carga en las tuberías con una velocidad de 0,7-0,8 m/s, conociendo el material de la tubería. Se puede calcular con tablas de pérdida por unidad de longitud o bien utilizando alguna de las fórmulas usuales, por ejemplo la de Darcy-Weisbach. A estas pérdidas se sumarán las que se produzcan en las singularidades: codos, válvulas, estrechamientos, etc. La suma será la altura total (H_T).
- 3- Potencia de la bomba (P_B):

$$P_B = \gamma \cdot Q \cdot H_T$$

- 4- Energía que dará la aerobomba (E_B) en un tiempo (T) de horas al mes o al año:

$$E_B = P_B \cdot T$$

En la práctica, se tendrá en cuenta tanto la irregularidad del viento como el rendimiento del acoplamiento bomba-aeromotor. Por ello se aplicará a la energía de bombeo (P_B) un coeficiente de 2-3 para obtener la energía útil (e_u) mensual o anual.

También puede calcularse la energía considerando que la potencia útil es:

$$P_u = \frac{P_B}{\eta_T}$$

Con un rendimiento total η_T de 0,7-0,8 para bombas de émbolo

- 5- Diámetro del rotor.

Como la potencia en el eje del rotor (P_r) es:

$$P_r = P_v \cdot C_p$$

Teniendo en cuenta la potencia del viento

$$P_v = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot V^3$$

Donde

ρ : densidad del viento, 1,25 kg/m³

A: área barrida por el rotor: $\pi D^2/4$ (m²), D: diámetro del rotor (m)

V: velocidad del viento incidente (m/s)

Considerando $C_p = 0,3$, se obtiene la potencia del rotor como

$$P_r = 0,15 \cdot D^2 V^3$$

De donde se puede deducir el diámetro D, haciendo

$$P_r = P_u$$

$$D = \sqrt{\frac{P_u}{0,15 \cdot V^3}}$$

6- Velocidad de giro del rotor.

Tomando un rendimiento máximo para $\lambda=0,75$,

$$\lambda = \frac{\pi \cdot n \cdot D}{60 \cdot V}$$

Tendremos una velocidad de giro (n):

$$n = 14,3 \frac{V}{D}$$

Es necesario tener en cuenta que las bombas más efectivas y seguras son las de émbolo de simple efecto que exigen movimientos lentos del pistón. Para este tipo de bomba el rotor del aeromotor debe ser lento.

9. Referencias.

- *Bombas de mano*. Centro Internacional de Referencia para Abastecimiento Público de Agua. CEPIS, Lima, Perú, 1978.
- *Bomba de mecate Sobreelevada BM-II*. Mancebo, J.A. y Rebassa, G. ISF ApD 2010.
- *Elegir bien la tecnología para alcanzar los objetivos del milenio en abastecimiento de agua*. Henk Holstlag. Fundación Práctica, Países Bajos, 2004.
- *Rope Pump Manual, Ethiopia. Hand well and Borehole model*. Practica Foundation, march 2006.
- *Tecnologías apropiadas para cumplir el Derecho Humano al agua: las bombas manuales*. Mancebo, J.A., Jiménez, A. Tiempo de Paz N° 98, 2010
- *Water, sanitation and hygiene for populations at risk*. Action Contre la Faim. Hermann, Éditeur des Ciencias et des Arts, France, 2005.