

MODELIZACIÓN DE BOMBAS MANUALES PARA EL ABASTECIMIENTO DE AGUA

LT3: Investigación y compromiso social.

Ulpiano Ruiz-Rivas¹, Lucía Blanco Cano², Antonio Soria Verdugo³ y Mónica Chinchilla Sánchez⁴

(1) Grupo de Tecnologías Apropriadas, Escuela Politécnica Superior, Universidad Carlos III de Madrid. ulpiano@ing.uc3m.es

(2) Grupo de Tecnologías Apropriadas, Escuela Politécnica Superior, Universidad Carlos III de Madrid. lbcano@ing.uc3m.es

(3) Grupo de Tecnologías Apropriadas, Escuela Politécnica Superior, Universidad Carlos III de Madrid. asoria@ing.uc3m.es

(4) Grupo de Tecnologías Apropriadas, Escuela Politécnica Superior, Universidad Carlos III de Madrid. mchin@ing.uc3m.es

RESUMEN

Las bombas manuales han experimentado un importante desarrollo tecnológico en los últimos veinte años, fruto del apoyo a su sistematización y expansión por parte de organismos como el Banco Mundial y el PNUD. Sin embargo, faltan estudios que caractericen su funcionamiento, salvo aquellos realizados por los propios constructores o las caracterizaciones de campo realizadas dentro de cada proyecto en que intervienen.

En este artículo se realiza un estudio crítico del campo de acción, las características fundamentales, ventajas, inconvenientes y limitaciones de las bombas manuales, centrándonos en un modelo común actualmente: la bomba de mecate (y su modificación mediante el empleo de una bicicleta), bomba de dominio público propuesta por las instituciones internacionales. El trabajo incluye, como partes principales, una evaluación del rango de funcionamiento de las bombas manuales a partir de las características del esfuerzo humano, la modelización del funcionamiento de la bomba de mecate y su comparación con resultados experimentales propios y ajenos, y una revisión comparativa de las alternativas existentes dentro de dicho rango (sistemas eólicos o fotovoltaicos).

Palabras clave: Energía humana, bombas manuales, bomba de mecate, abastecimiento de agua, bombeo, abastecimiento rural.

INTRODUCCIÓN

La energía humana o animal, tradicionalmente denominada energía de sangre, es una fuente de energía renovable de uso frecuente y sorprendentemente poco investigada. Los sistemas tradicionales de energía no suelen estudiarse en profundidad en revistas científicas, pero cubren, según *PNUD (2004)* aproximadamente un 10% de las necesidades de abastecimiento a nivel global, casi el 20% si se contabilizan sólo los países en vías de desarrollo y hasta el 80% o más en algunos países específicos. Los sistemas de propulsión humana o animal sufren un doble olvido y aparentemente, no se incluyen en estas cifras, contabilizándose básicamente la biomasa tradicional. *Fuller y Aye (2012)*, basándose en un estudio sobre una comunidad agrícola en el sur de India, estiman la contribución de los sistemas de sangre como un 15% de la de la biomasa tradicional, suponiendo la energía humana 2/3 y la animal 1/3 de dicho porcentaje. A partir de estos datos estiman que la contribución de la energía humana al abastecimiento a escala global dobla la de la eólica y es aproximadamente el 13% de la hidráulica. Estos números (en el rango del 0,5-1% de la demanda mundial) justifican un esfuerzo colectivo para el estudio detallado, sistemático y a nivel global de la energía humana y de las tecnologías que permiten su uso. En este sentido, el trabajo de *Fuller y Aye (2012)*, proponiendo que la energía humana y animal sea considerada a todos los efectos dentro de las energías renovables, es una llamada de atención y un primer paso en esta línea.

El presente artículo se centra en el estudio de la aplicación de la energía humana específicamente para el bombeo de agua a baja profundidad y en pequeñas cantidades. Las bombas manuales son una herramienta fundamental para garantizar el abastecimiento de agua potable en comunidades aisladas, cumpliendo una función básica dentro de la estrategia VLOM (Colin 1999), que intenta garantizar que la operación y el mantenimiento de los equipos se realicen dentro de la propia comunidad.

El uso y desarrollo de las bombas manuales tuvo un fuerte impulso durante la década de los 80, denominada por la ONU Década Internacional para el Abastecimiento de Agua Potable y el Saneamiento (IDWSSD por sus siglas en inglés). En esos años se desarrolló un intenso trabajo de selección y mejora técnica de modelos de bombas manuales de dominio público a través del RWSN (www.rural-water-supply.net). El instituto suizo SKAT (www.skat.ch) ha producido desde entonces manuales de instalación, uso y mantenimiento de los modelos de bombas manuales de dominio público desarrollados, así como las especificaciones técnicas detalladas de los mismos. Otros organismos centrados en el estudio de las bombas manuales incluyen el centro de recursos para el agua, el saneamiento y la salud medioambiental WELL (www.lboro.ac.uk/well), la corporación Practical Action (practicalaction.org, antes Intermediate Technology) o la Comunidad de Agua, Saneamiento e Higiene (www.watersanitationhygiene.org). Actualmente nos encontramos dentro del denominado Decenio Internacional para la Acción «El agua, fuente de vida» 2005-2015 promovido por la ONU. Las acciones vinculadas al abastecimiento de agua se integran además dentro de la meta 10 del Objetivo 7 de los Objetivos del Milenio, que persigue “reducir a la mitad el porcentaje de la población mundial sin acceso seguro al agua potable”.

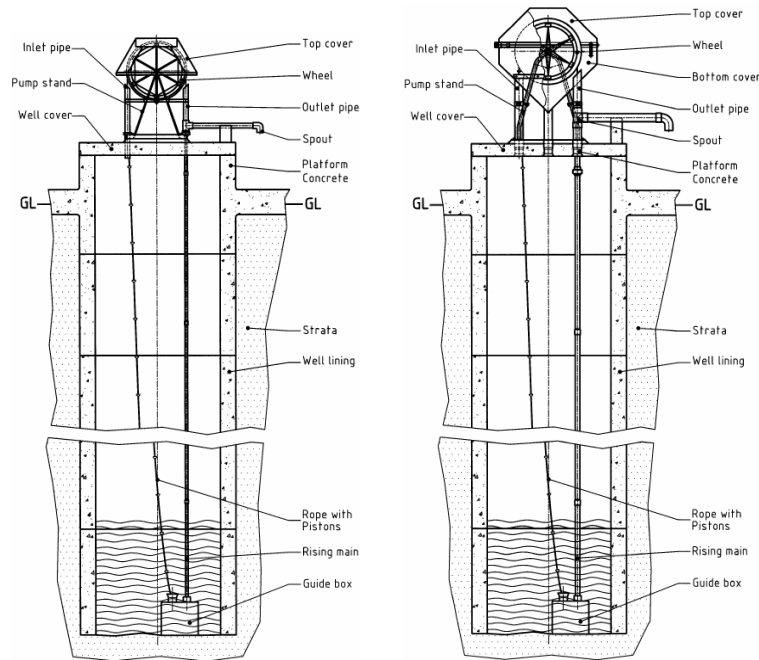
A través de todas estas acciones, se han desarrollado una docena larga de bombas manuales de dominio público. *Baumann y Erpf (2005)* proponen una buena introducción a las mismas. Los diversos tipos de bombas se pueden separar en dos grandes grupos en función de su mecanismo de bombeo: bombas de pistón o alternativas, bombas gravimétricas o de arrastre. Existen también algunos sistemas de bombeo más especiales, como las bombas de diafragma o de cavidad progresiva. Las bombas de pistón son sin duda las más habituales, e incluyen tres subgrupos: las bombas de succión (No. 6), las bombas de acción directa (Malda, Tara, el modelo comercial Nira), y las bombas de palanca para pozo profundo (India Mark, U3M, Afridev, Bush, etc.). Las bombas gravimétricas son bombas de arrastre que utilizan una cuerda (mecate) y pistones (diseños Nicaragua y Madagascar). Las bombas de diafragma (Vergnet, etc.) o de cavidad progresiva utilizan estos sistemas en lugar de pistones y trabajan en rangos intermedios entre las de acción directa y de palanca, aunque estos mecanismos suelen ser utilizados más comúnmente en bombas motorizadas.

En el presente trabajo nos vamos a centrar en la bomba de mecate, incluyendo su desarrollo, la bomba de mecate accionada por una bicicleta (por ejemplo, Mancebo y Rebassa 2012). Actualmente hay dos modelos estándar de bombas de mecate de dominio público: el modelo Nicaragua y el modelo Madagascar. Un esquema de ambos modelos puede verse en la Figura 1. El concepto fundamental es el mismo. El sistema precisa de una cuerda, unos pistones dispuestos a lo largo de la misma, una tubería y una rueda. Mediante la acción de una manivela (o el plato-piñón de una bicicleta) se hace girar la rueda y solidaria a ella, la cuerda provista de pistones se mueve a lo largo del sistema. Al entrar un pistón en el tubo, arrastra la masa de agua que hay entre dicho pistón y el pistón inmediato superior, que sube por la tubería, alcanza la T de descarga y sale por el tubo dispensador. El sistema precisa de una caja guía colocada en la base del pozo, que alinea la cuerda con el tubo y permite la entrada de los pistones.

Los dos modelos son muy similares. Ambos funcionan, según especificación, hasta 30-40 metros. Las ruedas son de construcción similar y bastante compleja (requiere un banco de trabajo para centrarla). La interfase rueda-cuerda se hace en ambos casos con la cubierta de una rueda de camión. En sustitución se pueden utilizar ruedas estándar de ciclomotor. La caja guía es también similar, aunque como eje de giro se usa una botella de cristal en el modelo de Madagascar y una pieza cerámica en el modelo de Nicaragua. Otros mecanismos similares en ambos diseños son el freno antirretorno, la manivela, los pistones. Sí hay diferencias en el uso de cojinetes, de hierro en la de Nicaragua y de madera en la de Madagascar. La estructura soporte y de protección frente al ambiente es también diferente, como muestra la Figura 1, y junto a la rueda es la parte de mecanización más compleja del equipo.

Los puntos importantes de diseño, en función de la profundidad del pozo, son los radios de rueda y manivela, el diámetro del tubo, el tipo de pistón y la distancia entre pistones. La elección del pistón, y su

estanqueidad al circular por el interior de la tubería, define las pérdidas de caudal y las pérdidas por rozamiento, dos parámetros antagónicos que evolucionan con el tiempo y el progresivo desgaste de los pistones. Un parámetro importante de control de la instalación, ya en funcionamiento, es la tensión de la cuerda.



Modelo Nicaragua

Modelo Madagascar

Figura 1.- Esquema de las bombas de mecate de dominio público (*Baumann y Erpf 2005*)

El rendimiento de las bombas manuales estandarizadas y de dominio público es un tema general de discusión. *Baumann (2000)* presenta datos de caudal para una potencia de accionamiento de 75W, lo que da los rendimientos para cada sistema que aparecen, en función de la altura de bombeo, en la Tabla 1. Los resultados óptimos para cada equipo se mueven entre el 65 y el 85%, con resultados claramente inferiores al moverse en los límites inferiores del rango de funcionamiento. El rendimiento medio está en el 60-65%.

Tabla 1.- Rendimiento esperado de bombas manuales (a partir de *Baumann 2000*)

m	No 6	Jibon	Malda Nira Tara	Mecate	Vergnet	U3M	Afridev	Bush	India Mark II/III	Volanta
5	82%	54%	64%							
10		65%	65%	51%	36%	44%	51%	51%	65%	
15		65%	65%	60%	49%	54%	60%	60%	71%	
20					54%	58%	65%		73%	73%
25								73%	82%	
30				76%	71%	65%	76%	76%	87%	
40										73%
60										54%
80										44%

OBJETIVOS

El primer objetivo del trabajo es presentar una revisión crítica de los estudios sobre potencia humana disponible para sistemas de propulsión humana. A partir de dichos datos, se pretende definir el rango de funcionamiento de los sistemas de bombas manuales.

En segundo lugar se plantea una modelización de una bomba manual de uso común, la bomba de mecate o su variación, la bici-bomba de mecate. El modelo obtenido se considera una herramienta útil para el diseño de equipos y para el dimensionado de sistemas, así como para facilitar un mejor conocimiento del principio de funcionamiento de la bomba, sus características fundamentales, rango de acción y problemas que pueden dar.

Finalmente, se realiza una caracterización experimental de la bomba y se comparan los resultados con los datos disponibles en la literatura, con el objetivo de definir la mayor o menor idoneidad de los distintos sistemas en función de las condiciones locales.

METODOLOGÍA

En la primera parte, se ha hecho una revisión bibliográfica que mezcla artículos en revistas científicas, documentos de trabajo de organismos internacionales, documentos de ONGD y manuales de ingeniería. La variedad se debe a la dispersión del conocimiento y la escasez de estudios fundamentales sobre la evaluación del esfuerzo humano y su transformación en energía mecánica. A partir de un estudio crítico de los datos, se llega a una evaluación de la potencia humana disponible, con la que se elaboran gráficos y tablas para el dimensionado de sistemas de abastecimiento de agua mediante bombas manuales. En la segunda parte se elabora un modelo matemático sencillo de la bomba de mecate, se caracterizan teórica o experimentalmente los diversos parámetros del modelo y se exponen los resultados del mismo. Finalmente, se plantean soluciones alternativas actuales mediante sistemas aislados de generación de energía.

RESULTADOS

Tal y como se ha comentado en el apartado anterior, los resultados de este trabajo se presentan en tres facetas interrelacionadas. En primer lugar se hace una estimación de la potencia humana disponible para el bombeo (y se hacen comentarios sobre su variación con peso, edad, tipo de accionamiento y tiempo de bombeo) a partir de los datos disponibles en la literatura y de medidas propias. En segundo lugar se modela y caracteriza un diseño habitual de bomba manual. En tercer lugar se hace un resumen de las alternativas no manuales dentro del rango de su funcionamiento, realizando una comparativa en cuanto a costes, volúmenes y profundidades y tiempos de bombeo.

Rango de funcionamiento de las bombas manuales

El funcionamiento de las bombas manuales está definido por dos parámetros de entrada, la profundidad de extracción y el volumen que cada usuario pretende extraer, y por dos parámetros técnicos, el rendimiento global de la instalación y la potencia humana suministrada. Este último parámetro es el más relevante desde un punto de vista de diseño y evaluación técnica. Es el que determina, a partir de la edad, constitución y forma física del ejecutante y de la ergonomía del proceso, el rango de funcionamiento posible. La opción por el bombeo manual debe resultar de una cuidadosa evaluación de este aspecto. Una vez elegido, la selección de la bomba manual debe de este modo basarse tanto en criterios ergonómicos definidos sobre el usuario final, con el objeto de permitirle desarrollar la máxima potencia con el mínimo esfuerzo, como en la optimización mecánica y operativa (rozamientos, pérdidas, complejidad del mecanismo, mantenimiento, disponibilidad de los materiales, etc.) de su funcionamiento. Es curioso observar, sin embargo, que el tema de la evaluación de la potencia humana disponible no suele ser tratado en profundidad cuando se caracteriza un sistema o diseña un proyecto.

Los parámetros mencionados se relacionan según la ecuación 1.

$$\dot{W} \cdot t = \frac{\rho \cdot g \cdot H \cdot V}{\eta_{BM}} \quad (1)$$

En el primer término, la potencia humana desarrollada y el tiempo de bombeo t definen el esfuerzo necesario. En el segundo término, ρ es la densidad del agua y g la aceleración de la gravedad. La altura de bombeo H viene definida por el emplazamiento, el rendimiento η_{BM} por la bomba y el volumen V por las necesidades de abastecimiento. Las necesidades pueden variar de forma importante en función del número de personas a las que quiera abastecer el ejecutante (frecuentemente, las tareas de búsqueda de agua se concentran en un miembro de la unidad familiar) y del nivel de abastecimiento deseado. Según fuentes dentro de la misma ONU –OMS o PNUD–, el mínimo necesario puede variar entre 20 a 100 lpd –litros/persona/día– (Howard y Bartram 2003). Estas diferencias (entre 1 y 8 miembros de la unidad familiar abastecidos por el ejecutante y entre 20 y 100 lpd) suponen una variación de 40:1 en la energía suministrada, que deberá ser asumida en su mayor parte por un aumento en el tiempo de bombeo. Este rango de variación lo sitúa fuera de cualquier proceso de diseño apriorístico. De este modo, cualquier decisión sobre la utilización de un sistema manual pasa por una primera decisión fuerte sobre el nivel de abastecimiento necesario (con sus connotaciones políticas, sociales, éticas y económicas) y una caracterización rigurosa de los usos y costumbres de las unidades familiares o grupales de la sociedad objetivo. Sin ellas, cualquier proyecto de abastecimiento manual de agua estará alimentando un error.

La evaluación de la potencia humana presenta también serias discrepancias entre diferentes autores. Una estimación habitual se encuentra en *FAO (2000)*, en donde se considera que una persona con buena forma física puede usar energía de forma sostenible a razón de 250-300 W, dependiendo de las condiciones climáticas y necesitando entre 10 y 30 minutos de reposo por hora. La eficiencia de conversión de dicha energía en energía mecánica, según *Grandjean (1988)*, se encuentra entre el 20 y el 25% (el máximo para mecanismos como la bicicleta que aseguran un buen aprovechamiento), lo que da un valor máximo de potencia mecánica disponible de 75 W. Como puede verse, este último número debe corregirse en función del mecanismo (por ejemplo, los sistemas manuales tienen peor rendimiento que los que utilizan las piernas), de las condiciones climáticas y del tiempo de descanso. En el peor caso, el máximo de esta estimación usando una bicicleta y con 250W y 30 minutos de descanso arrojaría una potencia media disponible en una hora de 30W. Otros factores de reducción, como el sexo, la edad y el peso, no se han tenido en cuenta en este primer cálculo.

Otras fuentes dan valores disímiles. *Fuller y Aye (2012)*, utilizando datos de diversas fuentes, estiman que la potencia pico (mecánica) puede ser de 225W durante unos segundos. Actividades intensivas pueden requerir entre 75 y 150W (mecánicos), con continuos intervalos de reposo (que aparentemente no son computados). *Avallone et al (2007)* propone varias correlaciones (de forma potencial o logarítmica) en función del tiempo, la edad del ejecutante, la utilización de brazos o piernas y una específica para el caso concreto de pedalear. Las correlaciones parecen sacadas de los resultados de *Hofkes (1981)*, publicados después por *Fraenkel (1986)* en un libro de amplia difusión. En síntesis, considera que un ciclista entrenado puede producir hasta 400W mecánicos durante un tiempo superior a la hora, que adultos normales con buena forma física pueden dar entre 50 y 150W en el mismo periodo (lo que duplica los datos del estudio de la FAO) y un trabajador a jornada completa de 8 horas puede dar una media de 75W. *O'Hea (1983)*, en un estudio para definir un índice de funcionamiento de las bombas manuales, propone una fórmula similar, considerando el efecto del tiempo y del peso del ejecutante, llegando a resultados ligeramente menores a los del estudio recogido por Avallone. *Tiwari et al. (2011)*, por su parte, consideran que la generación de 60W de energía mecánica de forma sostenida, pedaleando a 50 rpm es razonable. *Gilmore (2008)*, en un estudio de evaluación sobre las posibilidades de recuperar energía de actividades recreativas, aporta datos de fuentes variadas que incluyen desde estudios fisiológicos hasta publicidad de compañías fabricantes de sistemas de aprovechamiento de la energía humana. Los últimos dan valores que se mueven en el entorno 50-200W. A partir de los datos aportando por los primeros, Gilmore obtiene energías diarias disponibles de 840kJ (pedaleando) o entre 470 y 640kJ (elevando con los brazos). Distribuidos en una jornada de 8 horas, dan potencias de 30 y 15-20W respectivamente. En tiempos menores (2 horas) supondrían potencias mecánicas mantenidas de 110 y 65-90W respectivamente. Nótese que en este caso se habla de máximo disponible a partir de una dieta adecuada. *Fraenkel (1986)* considera que la energía diaria disponible es ligeramente superior, entre 720 y 1100kJ por día.

Finalmente, los estudios disponibles sobre bombas manuales suelen plantear rangos de potencia humana en función de la experiencia o de estudios previos. *Kennedy y Rogers (1985)* consideran que se pueden producir 30W de forma sostenible (6-7 horas, con pequeños periodos de descanso) trabajando solo con los brazos, entre 40 y 50W trabajando con todo el cuerpo (sin pedalear) y 75 W pedaleando. Si el esfuerzo se desarrolla durante 10 o 15 minutos, los números pasan a 50W (brazos) 70W (todo el cuerpo) y 180W (pedaleando) y en tiempos menores a 70, 100 y 300W respectivamente. Este estudio señala también que los sistemas tradicionales de bombeo tradicional (previos a la sistematización de los años 80) funcionaban en el entorno de los 10-30W de potencia útil (descontado ya el rendimiento de la bomba). *Fraenkel (1986)*, en su libro ya citado, incluye datos de pozos poco profundos en Zimbabwe (extraídos de *Morgan 1983*). Los pozos son de entre 2 y 10m, los tiempos de bombeo, menores de 2 minutos y las edades de los ejecutantes, entre 9 y 47 años, con especial atención a niños de 9 a 14 años. Las potencias varían entre 6 y 43W. Para el pozo de 2m, las diferencias por edad (6-38 años) no son reseñables y la media es de 9W. Para un pozo a 6m, las diferencias para niños de 9 a 14 años no son reseñables y la potencia media es de 22W. Para el pozo a 10m, la potencia media es de 29W y no hay diferencias por la edad (14-33 años) salvo en el caso de un niño de 9 años, pero la medida es única y puede ser un dato desdeñable. Como se ve, este estudio da parámetros muy diferentes a los que cita el propio *Fraenkel (1986)* y son la base de las correlaciones de *Avallone et al (2007)*. En cuanto a la energía diaria disponible por persona, a razón de 30W, se obtendrían los números de *Fraenkel* citados al final del párrafo anterior con jornadas de bombeo continuado de entre 7 y 10 horas, lo cual parece una extrapolación exorbitada de resultados obtenidos para tiempos inferiores a los dos minutos.

Por su parte, *Lambert y Faulkner (1991)* sugieren una potencia de 50W durante 4 horas para labores de irrigación, lo que según sus cálculos (20% de rendimiento en su conversión a energía mecánica) supone unos 15kJ/min, lo que consideran adecuado según estudios nutricionales en Guatemala y diversas zonas de África. Por último, *Mack y Haslegrave (1990)*, en un estudio detallado de la potencia consumida y entregada en el uso de una bomba manual de palanca, obtienen potencias entre 10 y 55W con rendimientos de conversión en energía mecánica que van del 7 al 28%. Este estudio es de especial interés porque desvela un parámetro fundamental en el aprovechamiento energético de la propulsión humana, que es la necesidad de trabajar con fuerzas y velocidades adecuadas. Si, para una cierta potencia, la fuerza necesaria es muy grande (y la velocidad muy pequeña) o, a la inversa, la velocidad de accionamiento es muy grande (y la fuerza muy pequeña), el aprovechamiento energético se reduce de forma importante.

Como se puede observar, la dispersión de los datos es enorme. Por claridad se han reunido en la Figura 2 los datos más relevantes, así como las curvas propuestas por *Avallone et al (2007)*. Los datos de Zimbabwe publicados por *Fraenkel (1986)*, que miden potencias medias de 9, 22 y 29W en bombeos de 2 minutos, no se han incluido en el gráfico porque son de una escala muy inferior. Sin embargo, son datos experimentales directos sobre bombas de mano, a diferencia del resto (aunque debe tenerse en cuenta que la bomba utilizada era tradicional).

Los motivos de la gran dispersión de datos pueden encontrarse en varios aspectos. En primer lugar, hay que considerar la variabilidad entre personas. La influencia de las condiciones climáticas, la alimentación, edad y peso son también factores importantes. Finalmente, la mayoría de estudios no identifican el método con el que la potencia es desarrollada, sea mediante una bicicleta u otro mecanismo, las características ergonómicas del mismo y la relación fuerza-velocidad que es necesario imponer. En general, los estudios buscan un máximo de aprovechamiento que difícil puede lograrse en el terreno. El factor edad y peso es un parámetro de especial relevancia al aplicarlo a bombeo en zonas empobrecidas, donde los ejecutantes habituales son niños o mujeres. La mayoría de los estudios considera el peso del ejecutante como un parámetro lineal con la potencia obtenida. En ese caso, los valores aportados están en la horquilla de 0,5 a 2 W/kg, lo que para un niño de 12 años y 40kg supone potencias de entre 20 y 80W. Por su parte, *Avallone et al (2007)* y *O'Hea (1983)* consideran una dependencia potencial del peso, de exponente 0,7. Los resultados de *O'Hea (1983)* para un niño de 40kg aparecen en la Figura 2. *Fraenkel (1986)*, como ya se ha comentado, no hayan discrepancias relevantes en cuanto a la edad, pero sus resultados son sólo aplicables a pozos de poca profundidad y periodos de bombeo muy cortos.

Además, y como ya se ha comentado, es importante tener en cuenta el origen de la energía disipada. Las dietas humanas contienen entre 4 y 16 MJ/día. El mantenimiento metabólico basal supone hasta 7MJ/día en una persona adulta de 70kg de peso, lo que supone un gasto medio continuado de unos 80W. *FAO (2003)* estima que

el gasto durante las actividades de abastecimiento de agua es 4,4 veces el basal. Introduciendo el rendimiento de transferencia de energía mecánica, esto aporta números similares a los obtenidos previamente, en el orden de los 80W. Sin embargo, variaciones en el aporte energético de la dieta, habituales en las zonas de uso de las bombas manuales, pueden provocar importantes modificaciones.

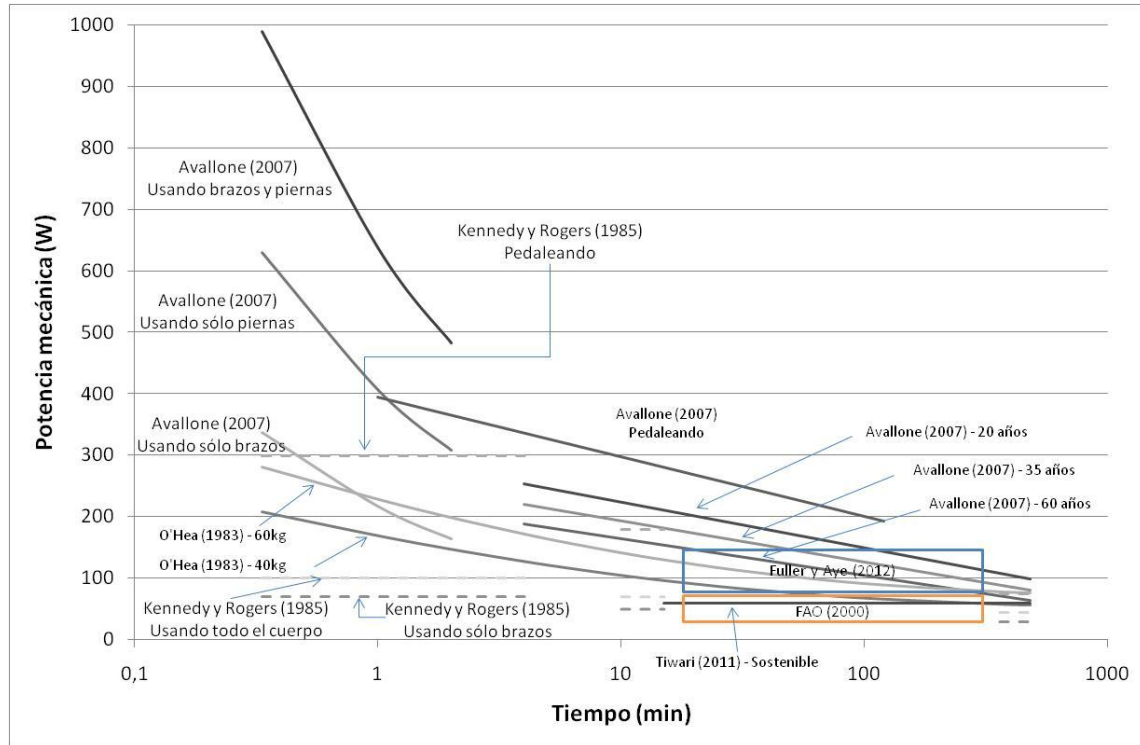


Figura 2.- Potencia mecánica disponible mediante esfuerzo humano, según diferentes fuentes

Como se ve, la evaluación de la potencia humana disponible arroja variaciones importantes, y un efecto claro de las condiciones físicas, edad, peso y alimentación del ejecutante, así como del tiempo de duración del proceso de bombeo, las condiciones climatológicas y la ergonomía y características del par fuerza-velocidad necesario para cada caso. Esto no permite hacer una estimación global de la energía disponible de amplia aplicación. Una estimación entre 30 y 60W, a pesar del amplio espectro, parece una acción fiable a la vista de los datos presentados. Conviene especialmente no extrapolar datos obtenidos en medidas de campo, de uno o pocos minutos, ya que, como muestra la Figura 2, no arrojan datos representativos del uso normal de la bomba. En este sentido, es frecuente encontrar datos en las webs de muchos proyectos de cooperación, o en las de fabricantes de bombas manuales, que presentan datos de caudal-altura de bombeo que precisarían potencias humanas por encima de los 150W, lo que no parece coherente para un proceso continuado a la vista de los datos aportados.

Para terminar, regresando a la ecuación 1, la estimación de la potencia realizada, junto con los datos generales sobre rendimiento de las bombas manuales comentados en la introducción, permiten calcular el volumen de agua extraíble por hora de utilización del sistema. Los resultados se muestran en la Figura 3a para diferentes potencias humanas y rendimientos y en función de la altura de bombeo.

Considerando una jornada disponible de 8 horas (lo cual es una estimación subdimensionada ligeramente) y los diferentes niveles de abastecimiento que definen los organismos internacionales (el PNUD considera abastecimiento 20lpd, la OMS considera el mínimo necesario entre 50 y 100lpd) se puede valorar el rango de personas abastecidas en función de la profundidad del pozo. Los resultados se muestran en la Figura 3b.

Los resultados de la Figura 3b muestran los casos límite de abastecimiento (20 y 100lpd) para la máxima potencia y rendimiento considerados y para la mínima potencia y rendimiento. Por ello, en el gráfico aparecen

dos zonas completamente distintas, la zona A, con el nivel mínimo de abastecimiento, y la zona B, con el nivel óptimo según la OMS. Las dos zonas están separadas, evidentemente, por un factor 5 en el número de personas abastecidas. El gráfico es muy simple, al igual que el anterior, pero se considera útil para caracterizar el rango de uso de las bombas manuales, en función de la población objetivo y el número y profundidad de los pozos. La Tabla 2 muestra algunos casos característicos.

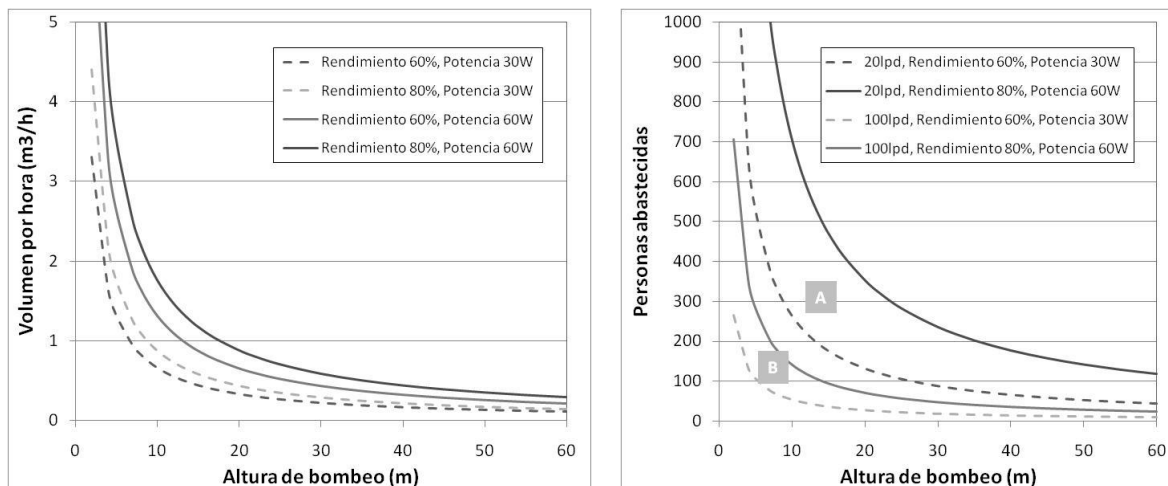


Figura 3.- a) Volumen de agua obtenible en una hora y b) Personas abastecidas, en función de altura de bombeo, potencia humana, rendimiento de la bomba y nivel de abastecimiento

Tabla 2.- Personas abastecidas con un sistema de bombeo manual

Nivel de abastecimiento	Altura (m)	Potencia humana disponible (W)			
		30		60	
		Rendimiento de la bomba		Rendimiento de la bomba	
		60%	80%	60%	80%
20 lpd	5	530	700	1060	1410
	15	175	235	355	470
	35	75	100	150	200
50 lpd	5	210	280	420	560
	15	70	94	140	188
	35	30	40	60	80
100 lpd	5	105	140	210	280
	15	35	47	70	94
	35	15	20	30	40

Modelización de bombas manuales: bomba de mecate, bombas de pistón de acción directa y de palanca

El segundo objetivo de este artículo es presentar una modelización sencilla de una de las bombas manuales más habituales, que permita la comprensión de su diseño y características al personal no técnico y sea un apoyo para la optimización del sistema. Es posible que el modelo que aparecen a continuación sea muy simple y aparentemente evidente, pero de él se pueden extraer conclusiones sobre el funcionamiento del sistema, sus ventajas e inconvenientes que demasiadas veces se pasan por alto.

En el modelo siguiente nos centraremos en relacionar las variables fundamentales del funcionamiento de la bomba, que son la potencia utilizada y el rendimiento global, el caudal extraído y el rendimiento volumétrico o de pérdidas de agua, la fuerza necesaria para la impulsión, la frecuencia del ciclo de bombeo y el rendimiento mecánico o de pérdidas mecánicas (rozamientos, etc.), todo ello en función de los parámetros fundamentales de la bomba (sus dimensiones principalmente)

El movimiento de giro de la rueda superior de la bomba de mecate, accionada a través de una palanca o de una bicicleta, produce un movimiento ascendente de la cuerda con los pistones, elevando el agua. En condiciones perfectas, el caudal obtenido sería el resultado de multiplicar la sección de la tubería por la velocidad ascendente de los pistones. Sin embargo, existen dos efectos que disminuyen este caudal. Por un lado, no toda la tubería contiene agua, ya que hay un cierto espacio ocupado por la cuerda y los pistones. Por otro lado, los pistones no son estancos y dejan escapar un cierto caudal de pérdidas. De este modo, podemos definir el caudal real Q en función de un cierto rendimiento volumétrico η_V que engloba estos dos efectos:

$$Q = \eta_V \frac{\pi D^2}{4} \omega R_r \quad (2)$$

D es el diámetro interno de la tubería, ω la velocidad de giro de la rueda y R_r el radio efectivo de la rueda. El rendimiento volumétrico puede escribirse según la ecuación 3:

$$\eta_V = \frac{\left(\frac{\pi D^2}{4} - \frac{V_{P+C}}{H} \right) \omega R_r - Q_p}{\frac{\pi D^2}{4} \omega R_r} \quad (3)$$

Q_p es el caudal de pérdidas que fluye por el espacio entre el pistón y la tubería, V_{P+C} es el volumen de los pistones y el tramo de cuerda que se encuentra dentro de la tubería y H es la altura de dicha tubería. Por otro lado, la fuerza útil que ejerce la rueda superior sobre la cuerda para elevar el agua puede calcularse en función de la masa de agua elevada. La fuerza real tendrá que incluir, además, los diversos rozamientos existentes en el trayecto de la cuerda: con la propia rueda, con el sistema alineador colocado en el fondo, y con la tubería en la subida (si existe tubería de bajada, deberá ser asimismo considerada). El peso de la cuerda y de los pistones no se tiene en cuenta porque se equilibra entre subida y bajada, las variaciones se desprecian. Por tanto, la fuerza F ejercida por la rueda sobre la cuerda será:

$$F = \frac{1}{\eta_F} \rho g H \frac{\pi D^2}{4} \quad (4)$$

η_F es el rendimiento mecánico. En el cálculo de la masa de agua en la fórmula se desprecia el espacio ocupado por la cuerda y los pistones para simplificar las ecuaciones, como se verá más adelante. El rendimiento mecánico puede escribirse de la forma:

$$\eta_F = \frac{\rho g H \frac{\pi D^2}{4}}{\rho g H \frac{\pi D^2}{4} + F_R} \quad (5)$$

F_R es el sumatorio de las fuerzas de rozamiento comentadas anteriormente. Básicamente, se compone de un término lineal con la altura de bombeo (el rozamiento de los pistones, para un número de pistones por metro de cuerda fijado previamente) y otro constante (los rozamientos con la rueda superior y el mecanismo alineador inferior). Dichos rozamientos dependerán, de forma fundamental, de la tensión de la cuerda.

El rendimiento global de la bomba puede definirse de la forma:

$$\eta_B = \frac{\rho g H Q}{F \omega R_r} \quad (6)$$

En esta última ecuación estamos despreciando el deslizamiento de la cuerda sobre la rueda, que suponemos controlado por una tensión adecuada de la cuerda. Introduciendo las ecuaciones 2 y 4 en la ecuación 6, se obtiene:

$$\eta_B = \eta_V \eta_F \quad (7)$$

Por último, cabe modelar el comportamiento de la transmisión entre la potencia humana y la rueda. En el caso de accionamiento por manivela se trabaja sobre el mismo eje. Se desprecian las pérdidas por deformación de eje, manivela y rueda, pero hay que considerar la variación de la fuerza ejercida y de la velocidad de accionamiento de la manivela, en función de la relación de radios entre el radio efectivo de la rueda y el radio de la manivela. Este aspecto es importante para obtener un buen aprovechamiento de la energía humana, ya que fuerzas o velocidades excesivas suponen disminución de la potencia desarrollada por una persona, tal y como se comentó en el apartado anterior. Por tanto, la fuerza y velocidad de movimiento de la manivela por el ejecutante, F_m y v_m , serán:

$$\begin{cases} F_m = F \frac{R_r}{R_m} \\ v_m = \omega R_m \end{cases} \quad (8)$$

R_m es el radio de la manivela. En el caso de accionamiento mediante bicicleta, deben tenerse en cuenta varias dimensiones, el radio del pedal (p), el del plato solidario al pedal (pp) y el del piñón solidario a la rueda de la bomba (pb).

Las pérdidas de todo el sistema se suelen asumir en el entorno del 5% (rendimiento de la transmisión η_T del 95%), siendo el accionamiento pie-pedal el apartado más conflictivo. Si se desprecia el deslizamiento y las deformaciones de la biela, la fuerza y velocidad angular en el pedal-pie serán:

$$\begin{cases} F_p = F \frac{1}{\eta_T} \frac{R_r}{R_p} \frac{R_{pp}}{R_{pb}} \\ \omega_p = \omega \frac{R_{pb}}{R_{pp}} \end{cases} \quad (9)$$

La selección de todos los radios, en uno u otro caso, se hará para conseguir velocidades angulares en torno a 1Hz en la bicicleta, que se suele considerar como óptimo, y, de ser posible, radios de manivela óptimos (del tamaño del antebrazo) para frecuencias también cercanas a 1Hz en el caso de la acción directa con los brazos.

El modelo nos permite, por un lado, estudiar los efectos separados del caudal de pérdidas, el espacio ocupado por la cuerda y los pistones y los diferentes rozamientos en el funcionamiento de la instalación, y por otro definir relaciones entre la profundidad de extracción de agua, H , y el diámetro óptimo de la tubería.

Vamos a estudiar inicialmente los efectos sobre los rendimientos volumétrico y mecánico. Ambos están definidos por la interacción pistón-tubería, por lo que son parámetros experimentales que varían en función del tipo de pistón y de su desgaste (efecto temporal).

La figura 6 muestra resultados experimentales para el rendimiento volumétrico sobre una instalación de prueba construida en la Universidad Carlos III de Madrid. En la ecuación 3, el rendimiento depende de factores geométricos (sección de la tubería, espacio ocupado por el pistón y la cuerda, radio de la rueda) y por variables experimentales (velocidad angular o frecuencia de bombeo y caudal de pérdidas). En el caso más favorable, en ausencia de caudal de pérdidas se llega a un rendimiento máximo, ideal, que depende sólo de los parámetros geométricos:

$$\eta_{V,\max} = 1 - \frac{4V_{P+C}/H}{\pi D^2} = 1 - \frac{d^2}{D^2} - \frac{4N'V_p}{\pi D^2} \quad (10)$$

El volumen ocupado por la cuerda y el pistón por unidad de longitud se separa en el término de la cuerda y el del pistón. N' es el número de pistones por unidad de longitud y d es el diámetro de la cuerda. Para la bomba de mecate mencionada previamente (tubería de 27,2mm interiores y cuerda de 4mm, pistón troncocónico estándar) dicho rendimiento máximo es del 97,2%.

El caudal de pérdidas es una variable experimental. Resulta fácil calcularlo con la cuerda en reposo, observando el descenso de la superficie libre por la tubería. Para distancias razonables entre pistones, el caudal es aproximadamente constante a lo largo de la tubería. En el caso de nuestro experimento, en el momento de los ensayos, con pistones ligeramente deteriorados, dicho caudal era de aproximadamente 0,20 l/s. Si consideramos que el caudal de pérdidas es independiente de la velocidad de ascensión del pistón, esto nos permite calcular el rendimiento volumétrico mediante la ecuación 11:

$$\eta_v = \eta_{v,\max} - \frac{4Q_p}{\pi D^2 \omega R_r} \quad (11)$$

En este caso, el rendimiento depende de la velocidad angular o frecuencia de bombeo. Para frecuencias muy bajas, el caudal bombeado puede ser igual o menor al de pérdidas, lo que resultará en un caudal bombeado nulo y un rendimiento nulo. Para frecuencias mayores, el rendimiento crece y el efecto del caudal de pérdidas se va minimizando. El rendimiento máximo y el rendimiento suponiendo caudal de pérdidas constante aparecen dibujados en la figura 4a.

Los datos experimentales, sin embargo, muestran una mejora del rendimiento a partir de una frecuencia de 0,6 Hz. Esto se debe a que, al aumentar la velocidad del pistón, el caudal de pérdidas disminuye de forma lineal con la frecuencia, llegando a valores despreciables a frecuencias superiores a 1Hz (aunque el parámetro relevante aquí es la velocidad del pistón, en este caso, la rueda de impulsión tiene un radio de 0,2m, por lo que a 1Hz la velocidad lineal del pistón es de 1,2m/s). De este modo, a frecuencias de trabajo cercanas a 1Hz el rendimiento volumétrico es óptimo y cercano al máximo (93% en nuestros experimentos). Esto coincide con las frecuencias razonables desde un punto de vista fisiológico, tal como se comentó anteriormente. Frecuencias mayores no aumentarían el rendimiento volumétrico pero sí el caudal bombeado. Esto podría sugerir una selección de los radios de plato y piñón en el caso de uso de una bicicleta. Sin embargo, eso no es siempre aconsejable, ya que el aumento excesivo de la velocidad aumenta los esfuerzos en toda la instalación, exige un aumento de la tensión de la cuerda y aumenta el rozamiento, disminuyendo la vida de la instalación. En general, las bombas de mecate habituales no están diseñadas para aguantar grandes velocidades.

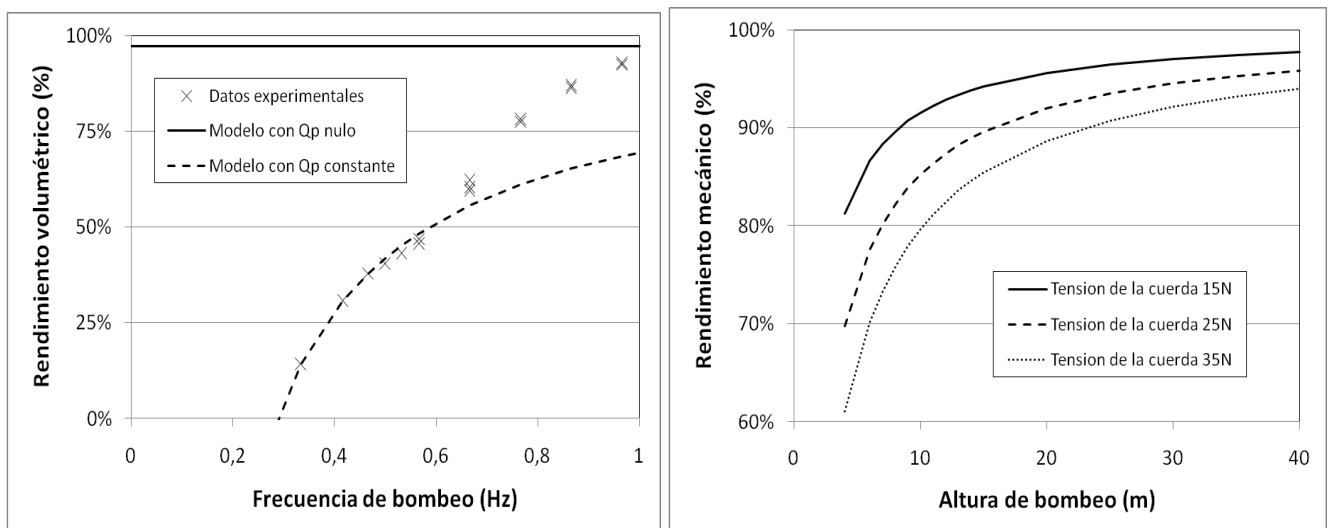


Figura 4.- Evaluación experimental de a) el rendimiento volumétrico y b) el rendimiento mecánico de una bomba de mecate

En segundo lugar, estudiaremos el rendimiento mecánico. En la ecuación 5, el rendimiento depende de factores geométricos (sección de la tubería, altura) y por variables experimentales (altura de bombeo y fuerza de rozamiento total). En el caso más favorable, en ausencia de fuerzas de rozamiento se llega a un rendimiento unidad. Se debe hacer una evaluación experimental del rendimiento mecánico, mediante el cálculo de la fuerza de rozamiento. Hay tres rozamientos en el circuito, entre la cuerda y los pistones y la rueda, entre estos y la caja guía y entre los pistones en la tubería. Sólo el tercero depende de la altura de bombeo. Un modo sencillo de separar ambos efectos, para poder estimar su valor para distintas profundidades, es aumentar el número de pistones por metro de cuerda. En un sencillo experimento recogido en *Patrón (2012)* se duplicó el número de pistones, no obteniéndose ningún efecto reseñable. Esto significa que el efecto del rozamiento entre pistón y tubería es despreciable frente a los otros dos. Es posible, sin embargo, que para alturas de bombeo considerables, este efecto se revierta. De cualquier modo, los experimentos de *Patrón (2012)* muestran que el factor fundamental en el rozamiento es la tensión de la cuerda. El rango de tensiones disponible, por otro lado, no es muy amplio: tensiones muy altas disparan el rozamiento y hacen difícil el manejo del sistema, tensiones muy altas permiten que la cuerda deslice en la rueda. Los rangos habituales probados en laboratorio son entre 15 y 35 N de tensión de la cuerda. La fuerza de rozamiento se comporta linealmente, siendo entre el 35 y el 40% de la tensión. La figura 4b muestra el rendimiento mecánico de la bomba en función de la altura de bombeo. Estos resultados son preliminares y tienen un cierto margen de error. Se basan en la extrapolación de una instalación experimental a 4m de altura. Esto no debería suponer un problema desde el punto de vista del caudal, pero sí podría serlo desde el punto de vista de la fuerza de rozamiento, ya que la tensión óptima de la cuerda variará con la altura.

El rendimiento global de la bomba se obtiene ahora como resultado de la multiplicación de ambos rendimientos (ecuación 7). La figura 5 muestra dicho rendimiento en función de la altura de bombeo para el caso de que la frecuencia de bombeo sea cercana a 1Hz. El gráfico muestra la comparación de los resultados obtenidos para las tres tensiones de cuerda consideradas con los resultados comentados previamente de *Baumann (2000)*.

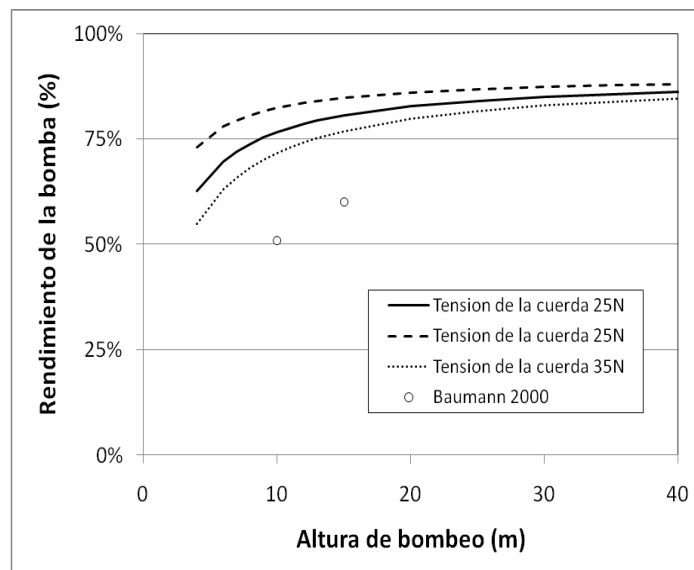


Figura 5.- Evaluación experimental del rendimiento de una bomba de mecate

Los resultados de la figura 8 muestran un rendimiento claramente superior a los resultados de *Baumann (2000)*. No se presenta aquí comparación con otros datos (por ejemplo, en las páginas de los fabricantes de bombas de mecate) porque la dispersión es muy grande y no se trata de resultados independientes.

Como motivos del desajuste, considerando buenos los resultados de *Baumann (2000)*, se pueden sugerir varios factores. En primer lugar, lo ya señalado sobre el efecto de la tensión de la cuerda en pozos más

profundos. Por otro lado, el modelo no considera otras pérdidas de caudal o rozamientos que los aquí indicados. Las pérdidas de agua por la parte superior de la tubería pueden ser un factor a tener en cuenta.

Por último, el modelo permite estudiar la relación de la altura de bombeo con el diámetro de la tubería para buscar un óptimo en cada caso. A partir de la ecuación 4., multiplicando la fuerza por la velocidad obtenemos una ecuación para la potencia desarrollada. Consideremos una potencia máxima de 60W, en concordancia con lo anteriormente expuesto, trabajando a 50rpm (cerca de 1Hz). Introduciendo el resto de datos de la bomba utilizada, la ecuación 12 da una relación para H y D:

$$HD^2 = \frac{4\eta_F \dot{W}}{\pi \rho g \omega R_r} \approx 6.4 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3 \quad (12)$$

Alternativas al bombeo manual

Por último, se presentan las alternativas actuales para el abastecimiento de agua dentro del rango de funcionamiento obtenido para las diferentes bombas manuales. Para dichas alternativas se considerarán en este trabajo sólo las soluciones autónomas, no vinculadas al acceso a la red eléctrica.

En primer lugar estudiaremos las alternativas basadas en la generación y uso de energía eléctrica. Los sistemas de generación para las condiciones citadas serán eólicos o fotovoltaicos. En aplicaciones de baja potencia se emplean gran diversidad de bombas, como las de diafragma o las de desplazamiento positivo o la bomba centrífuga multietapa (para requerimientos de mayor caudal). Pueden ser superficiales o sumergibles y la alimentación podrá ser en alterna (CA) o continua (CC). El rendimiento medio diario de la bomba (potencia mecánica suministrada entre potencia eléctrica recibida) depende levemente del tipo instalación. En la Tabla 3 se recogen valores habituales, *Abella (2006)*:

Tabla 3.- Rendimiento medio diario de diversas bombas eléctricas

TIPO	VALOR MEDIO	VALOR MÁXIMO
MOTOR CC Y BOMBA CENTRÍFUGA SUPERFICIAL	25%	30%
MOTOR CC Y BOMBA CENTRÍFUGA SUPERFICIAL MULTIESTADO	28%	40%
MOTOR AC Ó CC Y BOMBA CENTRÍFUGA SUMERGIBLE Ó MOTOR CC SUPERFICIAL CON BOMBA DESPLAZAMIENTO POSITIVO	32%	42%

Se puede asumir como habitual por tanto un rendimiento entre el 25% y el 35%. Teniendo en cuenta un rendimiento del sistema mecánico en bombeo manual es necesaria una potencia eléctrica de entre 0.7-1.5 kW-h para funcionar como alternativa similar al bombeo manual (definido para potencias de entre 30 y 60W y para 8 horas de bombeo diario, lo que supone un valor medio razonable). A continuación se plantean las opciones eléctricas tomando un valor típico del suministro de energía medio diario de 1kW-h.

Opción Solar Fotovoltaica

Se estudia una primera opción eléctrica al sistema manual descrito previamente. Se dimensiona el generador solar fotovoltaico y la motobomba de acople directo. Las motobombas adecuadas para bajas potencias pueden emplear una bomba de desplazamiento positivo y un motor de corriente continua sin escobillas (y sin mantenimiento). Es una buena opción ya que estos sistemas pueden trabajar entre 10W y 1kW con el mismo controlador y pueden proporcionar una altura máxima de 120 metros o un caudal máximo de 6.000 litros/hora. El caudal bombeado es directamente proporcional a la potencia disponible (no hay una potencia mínima como ocurre en los sistemas con bomba centrífuga). El sistema empieza a sacar agua poco después del amanecer y lo hace hasta casi el ocaso. El dimensionado mínimo del generador fotovoltaico parte del funcionamiento en condiciones estándar (CEM: 1kW/m² y 25°C, a las que el fabricante caracteriza el panel) y en el punto de máxima potencia todo el día, para luego corregirlo con diferentes factores.

El área de paneles necesaria para dar en CEM una cierta potencia pico de salida de un generador FV es:

$$A = \frac{P_p}{GCEM \cdot \eta_g} \quad (1)$$

siendo P_p la potencia pico, $GCEM$ la irradiación y η_g el rendimiento del generador, ambos en condiciones estándar. Sin embargo, para las condiciones reales, el área de paneles necesaria para suministrar una energía diaria E_e debe calcularse a partir del rendimiento medio diario del generador en las condiciones reales de operación, η_{FV} y de la irradiación real:

$$A = \frac{E_e}{Gdm(\alpha, \beta) \cdot \eta_{FV}} \quad (2)$$

siendo $Gdm(\alpha, \beta)$ la irradiación media diaria del mes en el plano del generador orientado un ángulo α e inclinado un ángulo β (con aproximaciones disponibles, por ejemplo, en la base de datos PVGIS-Helioclim (PVGIS)). El rendimiento η_{FV} se calcula, según *Abella (2006)*, de la forma:

$$\eta_{FV} = F_m \cdot (1 - \delta(T_m - 25)) \eta_g \quad (3)$$

siendo F_m el factor de acoplo medio: cociente entre la energía eléctrica generada y la que se generaría si se trabajase en el PMP ($F_m=0,95$ en sistemas con seguidor, $F_m=0,9$ para bombas centrífugas y $F_m=0,8$ para otras bombas), δ el coeficiente de variación de la potencia con la temperatura de las células (0,004 ó 0,005 1/°C para Si monocristalino) y T_m la temperatura media diaria de los módulos.

Para un país cálido de alta irradiación $Gdm(0,15)$ oscila entre 5 y 6 kWh/m² día (la inclinación de 10-15°, ángulo distinto a óptimo, es estándar para facilitar su limpieza) y el valor típico de la temperatura de célula es de 70 °C. Esto supone un área necesaria de paneles de 1,5m² para suministrar 1kW-h. Este área puede ser cubiertas de forma típica por paneles de 60 Wp (0,5m²) o de 180 Wp (1,5m²). Para un clima menos propicio ($Gdm=3$ kWh/m² día), se podría requerir hasta 3 m² de paneles.

La potencia de la motobomba a seleccionar será al menos la del generador fotovoltaico; si se eligiese un motor de menor potencia que el generador, estaría sometido a sobrecalentamiento y disminuiría su tiempo de vida. El coste de este sistema de bombeo es fundamentalmente el de los paneles más el de la motobomba, ya que no requiere sistema de acumulación; el precio del panel oscila entre el euro y los 2 euros por Wp.

Opción Eólica

La energía que desarrolla el viento entre un tiempo t_1 y un tiempo t_2 es:

$$E = \int_{t_1}^{t_2} \frac{\pi}{2} \rho v_i^3 \quad (17)$$

Siendo v_i la velocidad instantánea y ρ la densidad del aire.

Cuando no se dispone de medidas de la velocidad instantánea del viento, sino de las velocidades medias y las desviaciones típicas, la expresión anterior no se puede emplear. En países en desarrollo donde se estudia la opción minieólica normalmente se dispone sólo de los datos básicos del viento en la zona; las medidas de velocidad instantánea son caras y sólo se toman para grandes proyectos de generación eólica. En estos casos lo habitual es acudir a estudios de viento anual a nivel nacional o local ya existentes y estimar la producción a partir de la media de las medidas de la velocidad del viento en cada mes, v_o , a la altura del anemómetro, h_o y de la función de probabilidad de viento en la zona. Los fabricantes de aeroturbinas suelen dar las prestaciones de sus máquinas para distribuciones de vientos tipo Rayleigh, *Vertice, (2011)*.

Para una altura de torre h , calculamos la velocidad media del viento a la altura del buje v :

$$v = v_o \left(\frac{h}{h_o} \right)^\alpha \quad (18)$$

Siendo α el coeficiente de distribución del viento. Su valor depende de la rugosidad del terreno.

Así, la potencia eólica aprovechable para un área barrida en el giro de A se calcula como:

$$P = \frac{1}{2} \rho A v^3 k C_p \eta_M \quad (19)$$

Siendo v el valor de la velocidad del viento medio para el mes de menor recurso a la altura del buje, k el coeficiente de distribución de forma ($k=2$, Rayleigh), C_p el coeficiente de potencia o rendimiento de la aeroturbina y η_M el rendimiento mecánico del molino.

El suministro de 1000 Wh diarios con energía eólica depende fundamentalmente del recurso eólico de la localidad. Cuando no se dispone de datos de viento fiables, el dimensionado inicial parte de una estimación de un tiempo de bombeo medio diario en condiciones de viento nominal de 5 horas, lo que implica una potencia nominal de 200 W. Si consideramos bombeo mecánico con turbina multipala de diámetro D , entonces para valores habituales de C_p y rendimientos mecánicos ($C_p \eta_M = 0,25$):

$$P_{BM} = 0.24 D^2 v^3 \quad (20)$$

Si consideramos bombeo eléctrico con pequeña turbina (número de palas 3-6), entonces para valores habituales de C_p ($C_p=0,42$):

$$P_{BM} = 0.24 D^2 v^3 \quad (21)$$

Los emplazamientos habituales en países en vías de desarrollo para la instalación de aerobombas suelen tener vientos medios para el mes de menor recurso, y medidos a la altura del buje que oscilan entre 7 y 5 m/s. Luego el diámetro de pala necesario para suministrar una energía de 1000 Wh medios diariamente es de entre 1.6 y 2.6 metros para bombeo mecánico y entre 1.2 y 2 m para bombeo eléctrico

El coste de este sistema de bombeo es el de la aeroturbina más el de la motobomba, ya que no requiere sistema de acumulación eléctrico; el precio total de una aerobomba mecánica oscila alrededor de los 200 \$/m² y la eléctrica los 1000 \$/m² según estudios comparativos de varios sistemas comercializados en América Latina (*J.D. Burton, 2006*). Por lo tanto el coste del sistema (sin tener en cuenta la instalación ni el mantenimiento) oscila entre 400 y 1000 \$ para aerobomba mecánica y entre 1130 y 3140 \$ para aerobomba eléctrica.

CONCLUSIONES

Se presenta una evaluación del campo de acción de las bombas manuales y sus interacciones con otros sistemas de bombeo. Se ha elaborado una completa revisión bibliográfica acerca de la potencia humana disponible. La dispersión de los datos hace necesaria una revisión crítica y experimentos específicos sobre cada sistema manual, atendiendo especialmente a las características de la población usuaria, a riesgo de cometer errores importantes de dimensionado. Se presenta asimismo un modelado de una bomba de mano de uso frecuente, la bomba de mecate, que permite caracterizar su funcionamiento, definir y acotar las pérdidas de rendimiento y servir como herramienta de diseño. Por último, se ha realizado una revisión de las soluciones factibles en el rango de trabajo de las bombas manuales (entre 200 y 300W·h/día de potencia mecánica útil). La relación de costes es evidentemente favorable a las bombas de mano, pero sería necesario considerar, en el lado de las bombas manuales, el valor del trabajo de las personas encargadas de la extracción de agua (por ejemplo 1\$/día).

AGRADECIMIENTOS

Gracias a los ex-alumnos de la Universidad Carlos III de Madrid Javier Tobella, Sergio Ruiz y Manuel Patrón, que realizaron sus Proyectos Fin de Carrera sobre bombas de Mecate, y cuyas aportaciones se encuentran diseminadas a lo largo del presente trabajo. Sus PFC pueden encontrarse en e-archivo.uc3m.es.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alonso Abella, M. (2006): *Sistemas fotovoltaicos. Introducción al diseño y dimensionado de instalaciones fotovoltaicas*. AMV 2006.
- Avallone et al (2007): Marks' Standard Handbook for Mechanical Engineers 11th Edition , Eugene A. Avallone (ed), Mc-Graw Hill, New York 2007 ISBN 0-07-142867-4 page 9-4
- Baumann E. y Erpf K. (2005). *Rural Water Supply Technology Options: Handpumps, Mechanised Pumps and Surface Water*. RWSN. SKAT 2005
- Burton, J. D. (2006): *Experiencias de energía Eólica a pequeña escala en América Latina*, Energía, Participación y Sostenibilidad. Tecnología Para el Desarrollo Humano. Ingeniería Sin Fronteras.2006
- Colin, J. (1999). *VLOM for Rural Water Supply: Lessons from experience*. WELL, London, 1999.
- FAO (2000): *The Energy and Agriculture Nexus*. Environment and Natural Resources Working Paper No. 4. FAO, Rome, 2000
- FAO (2003): Human energy requirements. FAO 2003.
- Fraenkel (1986): *Water Pumping Devices a Handbook for Users and Choosers*. FAO 1986
- Fuller, R.J. y Aye, L. (2012). *Human and animal power – The forgotten renewables*. Renewable Energy 48 (2912) 326-332.
- Gilmore, A. (2008): *Human power: Energy recovery from recreational activity*. Guelph Engineering Journal, (1), 8-16.
- Hofkes (1981): Manual Pumping of Water for Community Water supply and small scale irrigation, proc. FAO/DANIDA Workshop on Water Lifting Devices in Asia and the Near East, held in Bangkok Dec 1979, FAO, Rome. 1981
- Howard, G. y Bartram, J. (2003): *La cantidad de agua domiciliaria, el nivel del servicio y la salud*. WHO/SDE/WSH/03.02. OMS, Ginebra, 2003
- Kennedy, W.K. y Rogers T.A. (1985): *Human and animal-powered water lifting devices*. ITDG Publishing, 1985.
- Lambert R.A. y Faulfker R.D. (1991): *The efficient use of human energy for micro-scale irrigation*. Journal of agricultural engineering research, Mar 1991. v. 48 (3)
- Mack, K.,y Haslegrave, C. (1990): *Evaluation of the use of a hand pump*. E.J. Lovesey (Ed). Contemporary Ergonomics 1990, Taylor & Francis, London, 1990, pp 500–506.
- Mancebo J.A. y Rebassa G. (2012): *Bomba de mecate sobreelevada (BM-II)* Editorial Autor/Editor 2012.
- Morgan (1983): Letter in Appropriate Technology Journal Vol 9 No 1, IT Publications, London. 1983
- PVGIS: <http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/apps4/pvest.php?map=africa#>
- Tiwari PS, Gite LP, Pandey MM, Shrivastava AK. (2011): *Pedal power for occupational activities: effect of power output and pedaling rate on physiological responses*. International Journal of Industrial Ergonomics, 2011; 41 3):261-7.
- Vertice (2011): *Desarrollo de proyectos de instalaciones de energía mini-eólica aislada* .Grupo Vertice. 2011