

CARACTERIZACIÓN DEL ESFUERZO HUMANO DISPONIBLE PARA BOMBEO MANUAL

Ulpiano Ruiz-Rivas Hernando

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

Resumen

Las bombas manuales han experimentado un importante desarrollo tecnológico en los últimos veinte años, como consecuencia de múltiples aportaciones individuales y colectivas y del apoyo a su sistematización y expansión por parte de organismos como el Banco Mundial y el PNUD. Por otra parte, la utilización de la energía humana como fuente propulsora permite su aplicación en cualquier comunidad con independencia de su grado de abastecimiento de energía.

En este artículo se realiza una evaluación crítica del rango de funcionamiento de las bombas manuales a partir de las características del esfuerzo humano y en función de los parámetros de que depende, como la potencia máxima realizable, el rango de esfuerzos y de velocidades o frecuencias de funcionamiento que puede dar una persona y las características mecánicas de aprovechamiento de dichos parámetros por parte de las bombas manuales habituales

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

Resumo

As bombas manuais experimentaram um desenvolvimento tecnológico significativo nos últimos vinte anos, como resultado de múltiplas contribuições individuais e coletivas e apoio para a sua sistematização e expansão por organismos como o Banco Mundial e o PNUD. Além disso, o uso de energia humana como fonte motriz permite o uso em qualquer comunidade, independentemente do seu grau de fornecimento de energia.

Este artigo fornece uma avaliação crítica da faixa de operação de bombas manuais é a partir das características do esforço humano e em função dos parâmetros que depende, como a potência máxima alcançável, faixa de esforços e velocidades ou frequências de operação que pode dar uma pessoa e as características mecânicas de aproveitamento destes parâmetros pelas bombas manuais usuais.

Palavras-chave: energia human , bombas manuais , abastecimento de água , bombeio, abastecimento rural.

DisTecD. Diseño y Tecnología para el Desarrollo
2014, 1, desde pág. 111 - hasta pág. 130
ISSN: 2386 – 8546

1. Introducción

La energía humana o animal, tradicionalmente denominada energía de sangre, es una fuente de energía renovable de uso frecuente y sorprendentemente poco investigada. En un mundo que solemos asumir como muy tecnificado, los sistemas tradicionales de energía (combustión de biomasa tradicional, solar térmica tradicional, etc.) no suelen estudiarse en profundidad en revistas científicas, pero representan un porcentaje no desdeñable del abastecimiento a escala global. Sólo la biomasa tradicional, que es la única de estas energías que se suele caracterizar, cubre aproximadamente el 10% de las necesidades de abastecimiento a nivel mundial, según PNUD (2004). Este porcentaje se eleva hasta alcanzar casi el 20% si se contabilizan sólo los países en vías de desarrollo y llega hasta el 80% o más del abastecimiento total en algunos países específicos.

Los sistemas de propulsión humana o animal sufren un doble olvido y aparentemente (las fuentes consultadas no lo identifican nunca de forma explícita) no se incluyen en estas cifras. Estudios actuales como el de Fuller y Aye (2012), que extrapola sus datos tomando como base un estudio sobre una comunidad agrícola en el sur de India, estiman la contribución de los sistemas de sangre en un 15% de la contribución 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 doblaría la de la eólica y sería aproximadamente el 13% de la contribución de la hidráulica. Estos números, que se encuentran en el rango del 0,5-1% de la demanda mundial, deberían justificar un gran esfuerzo colectivo para el estudio detallado, sistemático y a nivel global de la energía humana y de las tecnologías que permiten su uso y facilitan su aprovechamiento. 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 VL0M (Colin 1999), que intenta garantizar que la operación y el mantenimiento de los equipos se realicen dentro de la propia comunidad receptora.

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 Intermedite 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 y bombas gravimétricas o de arrastre. Existen también algunos sistemas de bombeo 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 (diseños Nicaragua y Madagascar) que utilizan una cuerda (mecate) con una serie de pistones equiespaciados. Las bombas de diafragma (Vergnet, etc.) o de cavidad progresiva 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, la evaluación del esfuerzo humano y la caracterización del mismo para su aplicación en bombas manuales no se realiza mediante ensayos propios (aunque se comentan algunos resultados fruto de la propia experiencia), sino que se basa en una revisión bibliográfica sobre el tema. Dicha revisión mezcla artículos en revistas científicas, documentos de trabajo de organismos internacionales, documentos de ONGD y manuales de ingeniería. La variedad de las fuentes 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.

2. 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. 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. Nótese que la potencia disponible puede ser en sí misma dependiente del tiempo, a causa del cansancio del usuario. 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 seleccionada y su estado y el volumen V por las necesidades de abastecimiento.

El volumen de abastecimiento es el parámetro primordial, ya que su variación para diferentes casos puede ser muy grande. 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. Es sorprendente constatar que según se sigan diferentes fuentes dentro de la misma ONU –OMS o PNUD–, el mínimo necesario puede variar entre 20 y 100 lpd –litros/persona/día– (Howard y Bartram 2003). Los estudios de evaluación del consumo doméstico real en regiones empobrecidas, por su parte, muestran variaciones en función del

tipo de conexión y el precio a pagar por el agua que van de los 15 a los 135 lpd (Nauges y Whittington, 2010). 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 que resultaría necesario suministrar, si suponemos el resto de parámetros constantes. Esta energía deberá ser asumida en su mayor parte por un aumento en el tiempo de bombeo. Este rango de variación sitúa el problema fuera de cualquier proceso de diseño apriorístico. 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.

Otra forma de tratar el problema es evaluar el volumen V desde un punto de vista global, para toda la comunidad en lugar de hacerlo en función de las necesidades de un solo individuo y las personas a su cargo. En este segundo caso, V se obtiene de la multiplicación entre la población a abastecer y el grado de abastecimiento (lpd) seleccionado para el proyecto. Por otro lado, el tiempo t vendrá definido por el tiempo útil de uso de la bomba, que suele coincidir, como máximo, con las horas de luz disponibles, aunque el emplazamiento del pozo en relación con la comunidad puede modificar dicho tiempo útil. Con este cálculo se podría obtener una potencia media que los miembros de la comunidad deberían producir al utilizar la bomba, pero los requerimientos para cada individuo obligarían a un estudio individual previo.

La altura de bombeo H viene definida por el emplazamiento y, aparte del efecto que tiene en la ecuación (1), tiene efectos sobre la elección del tipo de bomba a utilizar (diferentes bombas se usan para diferentes rangos de alturas) y su rendimiento. Las alturas accesibles para el bombeo manual van desde los 2m hasta los 80m aproximadamente, aunque el rango entre 30 y 80 m es poco utilizado debido a los bajos caudales aportados. Por su parte, el rendimiento de la bomba no es un parámetro fundamental en una primera aproximación, aunque puede serlo en caso de rendimientos muy bajos motivados por una instalación o mantenimiento indebidos. El rendimiento esperado de las bombas manuales estandarizadas y de dominio público puede obtenerse de la literatura. Baumann (2000) presenta datos de caudal para una potencia de accionamiento de 75W, lo que, en función de la altura de bombeo, da los rendimientos que aparecen en la Tabla 1. Los resultados óptimos para cada equipo se mueven entre el 65 y el 87%. El rendimiento medio está en el 60-65%.

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%

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

Por último queda evaluar la potencia entregada. La opción por el bombeo manual debe resultar de una cuidadosa evaluación de este aspecto, pues determina, a partir de la edad, constitución y forma física del ejecutante que se espera tener en cada proyecto y de la ergonomía del proceso, el rango de funcionamiento posible. Una vez elegida la opción de bombeo manual, la selección de la bomba debe 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 de bombeo manual. *Baumann (2000)* y otros autores que evalúan bombas manuales suelen considerar una potencia de 75W como nominal para dicha evaluación, pero esto no quiere decir que esa sea la potencia que se pueda requerir a cualquier usuario en cualquier circunstancia, y extrapolarla a cualquier caso posible puede suponer un grave error de dimensionado. Este tema se trata de forma detallada en la siguiente sección.

3. Estimación del esfuerzo humano

La evaluación del esfuerzo humano, como la de cualquier característica física o psicofísica de las personas, presenta grandes problemas, el primero de los cuales es la dispersión de los datos, ante las amplias diferencias en capacidad y forma física que existen entre los individuos. En el caso de la medida del esfuerzo, un número importante de variables afectan además al resultado, tales como la ergonomía del movimiento estudiado, los músculos vinculados, las condiciones medioambientales, la dieta alimenticia del individuo, el resto de su actividad diaria, etc.

Es importante resaltar que en esta sección se va a hacer referencia a la potencia que puede desarrollar una persona de forma continua, con eventuales descansos cada cierto tiempo, mediante el uso de manos o piernas. Algunos sistemas de bombeo utilizan además, como fuerza impulsiva, el peso del ejecutante, aplicado en una de las carreras del mecanismo. En este caso, el problema se circunscribe a un cálculo del tiempo de duración de la carrera y a una estimación del peso disponible de la persona. Este aspecto se comentará en la siguiente sección.

Los resultados que se obtienen en una revisión bibliográfica difieren de forma importante en función de los autores seleccionados, el procedimiento utilizado para estimar el esfuerzo disponible o, sobre todo, la aplicación que quiere darse a dichos resultados. Debe tomarse con cautela una extrapolación de resultados obtenidos en condiciones muy diversas. Los estudios disponibles incluyen caracterizaciones de la respuesta de deportistas, evaluaciones del rendimiento en el puesto de trabajo, valoraciones del esfuerzo aeróbico y anaeróbico posible, estudios sobre la energía diaria disponible, o estudios de campo vinculados a una herramienta concreta. En este artículo se organizan los diferentes estudios en tres bloques, aquellos que obtienen medidas experimentales directas mediante el uso de ergómetros, aquellos que calculan la energía disponible en función de la alimentación, y por último los estudios que obtienen resultados directamente sobre bombas manuales. En lo posible, se tratara de priorizar los resultados obtenidos en situaciones asimilables a las que se dan en entornos rurales subdesarrollados.

En primer lugar, existen algunas estimaciones generales de amplia difusión. Las publicaciones del Banco Mundial, RWSN o SKAT (por ejemplo *Baumann y Erpf 2005*, *Baumann 2011*, etc.) suelen imponer una potencia de 75W en sus caracterizaciones de bombas

manuales. En documentos de la FAO suele hablarse de 60W. *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 deben tenerse en cuenta para estimar la potencia media (que de ese modo disminuirá de forma importante).

Entre los estudios que caracterizan la potencia humana midiéndola directamente en un ergonómetro, el clásico y más frecuentemente citado es el que aparece en un antiguo estudio de la NASA (Parker y West 1964), en el que se estudia la respuesta en una bicicleta, comparando la de un usuario sano y en buenas condiciones físicas con la de un atleta profesional. Wilson (2004) añade datos de ciclistas profesionales actuales y ciclistas “amateurs” en perfecta forma física. Los resultados pueden dar una idea de los máximos posibles para un hombre, pero debe tenerse cuidado en extrapolarlos para sistemas de bombeo en zonas subdesarrolladas, donde ni las máquinas son similares ni las personas con mayor potencia son las encargadas del bombeo. En otro estudio ergonómico, en este caso desde un punto de vista de evaluación laboral, el Marks' Standard Handbook for Mechanical Engineers (*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. En este estudio se 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 y un trabajador a jornada completa de 8 horas puede dar una media de 75W. Los datos de *Avallone (2007)* para un usuario pedaleando parecen un ajuste de la curva de la NASA. Por último, *Tiwari et al. (2011)* realizan un estudio aplicado específicamente a agricultores indios. Los resultados muestran potencias entre 30 y 90W usando una bicicleta y para tiempos largos. El estudio concluye que un funcionamiento sostenible está en una potencia de 60W, pedaleando a alrededor 50 rpm.

Las profundas divergencias entre los resultados de los diferentes estudios pueden observarse en la figura 2.

Un segundo procedimiento de evaluación de la potencia humana disponible consiste en estudiar desde un punto de vista fisiológico la energía disponible en el cuerpo humano, a partir de la carga energética recibida por los alimentos. Una estimación habitual se encuentra en *FAO (2000)*, en donde se considera que una persona con buena forma física puede usar energía presente en su cuerpo 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 sería para mecanismos como la bicicleta que aseguran un buen aprovechamiento), lo que da un valor máximo de potencia mecánica disponible de 62,5 W (300W con descansos de 10 minutos por hora y eficiencia del 25%). Este valor máximo debe corregirse en función del mecanismo (por ejemplo, los sistemas manuales tienen peor eficiencia de conversión que los que utilizan las piernas), y del tiempo de descanso. Para este estudio, el peor caso (uso de un sistema manual, con 250W, 20% y 30 minutos de descanso) supondría una potencia media disponible en una hora de 25W. Otros factores de reducción, como el sexo, la edad, el peso y las condiciones climáticas, no se han tenido en cuenta en este estudio.

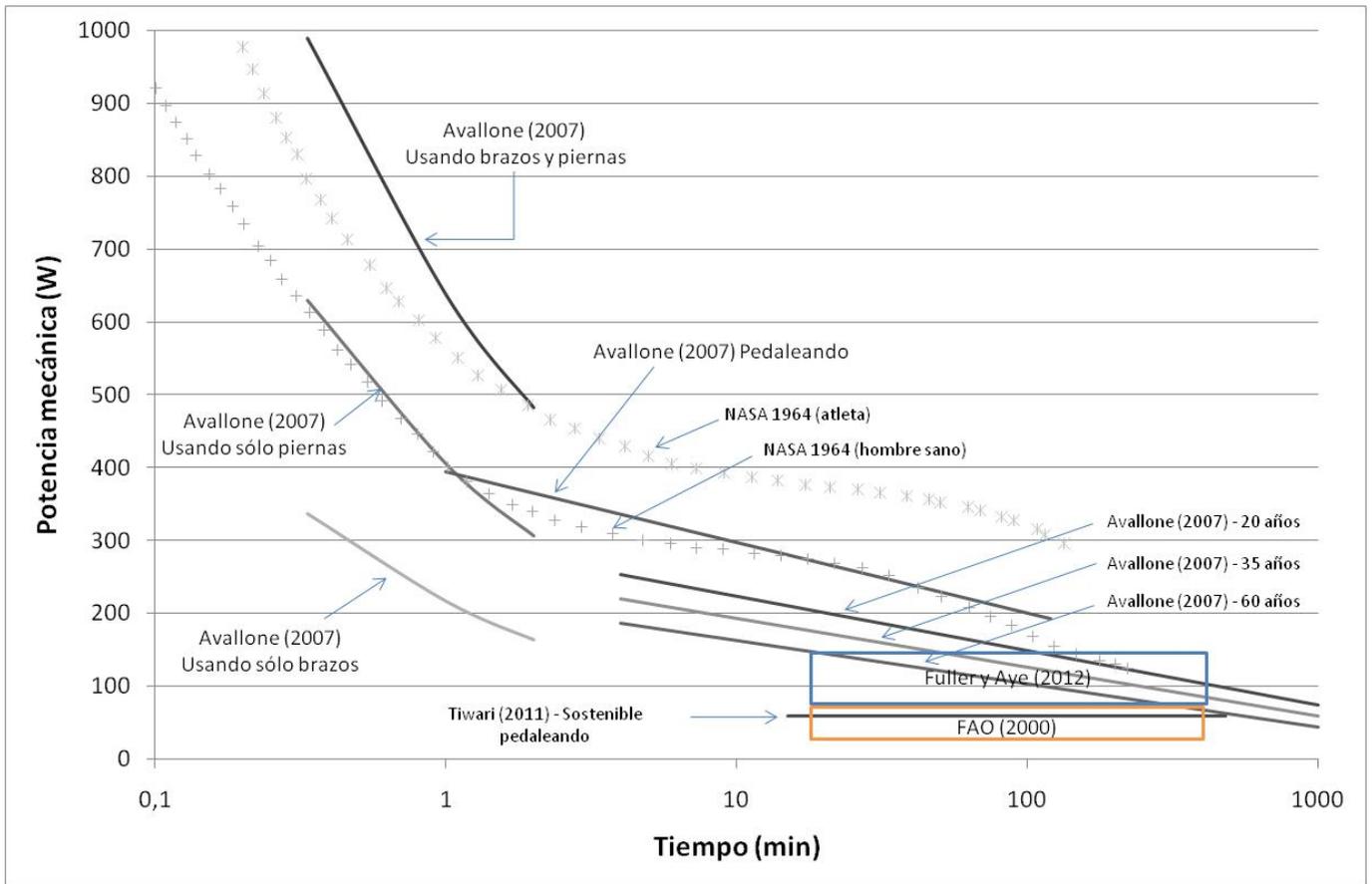


Figura 2. Potencia mecánica disponible mediante esfuerzo humano, según diferentes fuentes.

Por otro lado, *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 mecánicos. A partir de los datos aportando por los primeros, *Gilmore* obtiene energías mecánicas diarias disponibles de 840kJ (pedaleando) o entre 470 y 640kJ (elevando con los brazos). Distribuidos en una jornada de 8 horas, dan potencias mecánicas de 30 y entre 15 y 20W respectivamente. En tiempos menores (2 horas) supondrían potencias mecánicas mantenidas de 110 y entre 65 y 90W respectivamente. Nótese que en este caso se habla de máximo disponible diario (mecánico) a partir de una dieta adecuada. En este sentido, *Fraenkel (1986)* considera que la energía mecánica diaria disponible es ligeramente superior, entre 720 y 1100kJ por día, mientras que *Lambert y Faulkner (1991)* consideran que 720kJ por día (su cálculo es 15kJ/min de energía fisiológica, con una eficiencia de 20% y dispensada durante 4 horas al día), es un gasto energético adecuado, según estudios nutricionales en Guatemala y diversas zonas de África. Estos datos de energía mecánica disponible se pueden comparar con los anteriores de un modo sencillo pero en ciertos extremos poco realista, mediante curvas de energía constante, que aparecen como hipérbolas en un gráfico W-t. Sin embargo, cabe destacar dos problemas para sacar información relevante de estos datos: a) la energía mecánica diaria disponible así evaluada es requerida para todas las labores mecánicas realizadas durante el día, no solo para las tareas productivas, que serán sólo un porcentaje; y b) el comportamiento en los extremos, a tiempo muy bajo o tiempo muy alto, no es extrapolable. Los resultados se muestran en la figura 3. Nótese que en este caso la escala del eje de abcisas es lineal y no logarítmica. Se han dejado las correlaciones de *Avallone et al (2007)*, el resultado de *Tiwari et al. (2011)* y los rangos generales de la FAO y *Fuller y Aye*

(2012) para permitir su comparación. Como se ve en la figura, el efecto de la energía física consumida puede empezar a tener efecto en el entorno de la hora para potencias altas, y a las 2-5 horas, en función del dato de energía disponible elegido, para la potencia sostenible de *Tiwari et al. (2011)* – 60W.

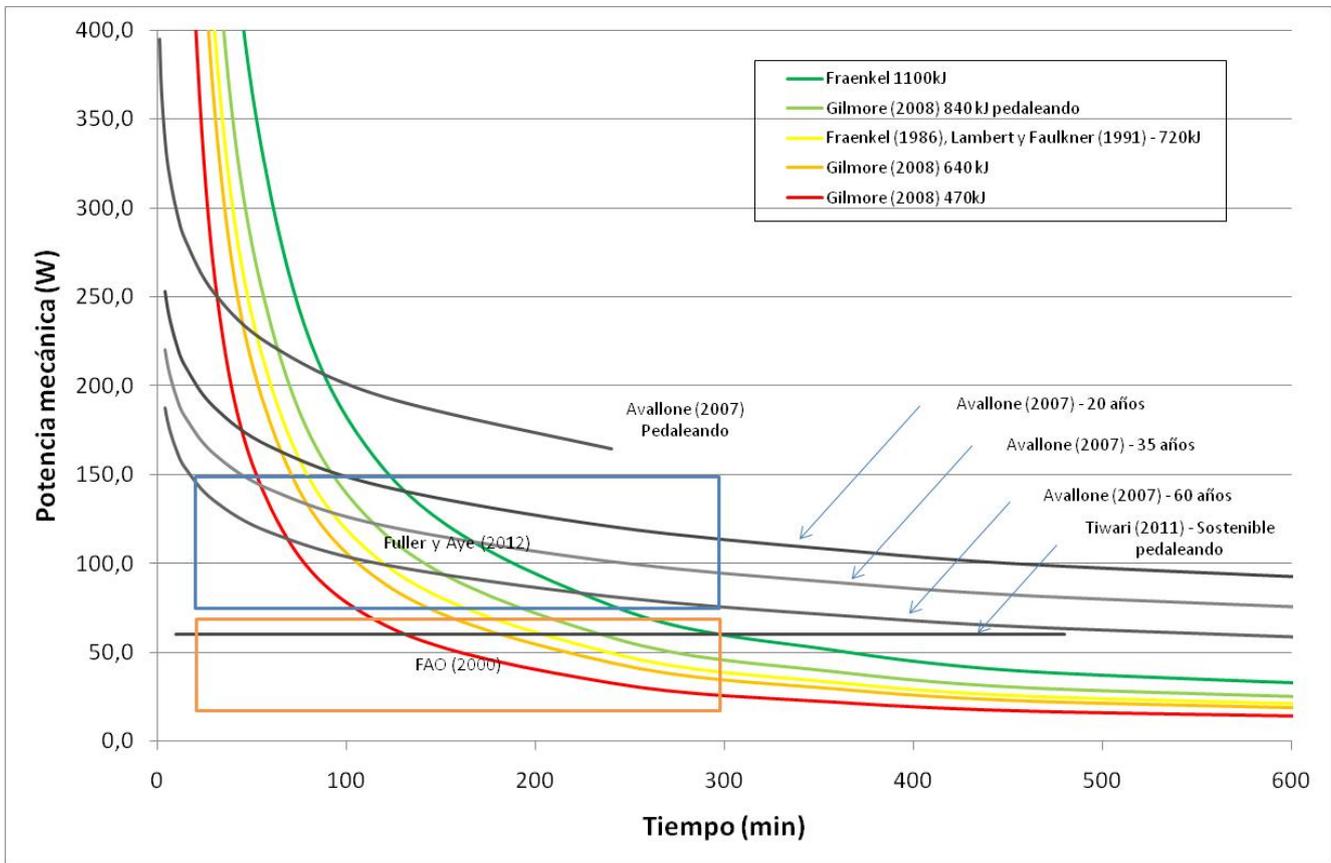


Figura 3. Potencia mecánica disponible mediante esfuerzo humano, en función de la energía diaria disponible.

Finalmente, es interesante revisar los estudios de potencia presentados en trabajos sobre bombas manuales. Los resultados más habitualmente referenciados son los de *Hofkes (1981)*, publicados por la FAO y recogidos después por *Fraenkel (1986)* en un libro de amplia difusión en el ámbito del abastecimiento de agua en zonas desfavorecidas. *O`Hea (1983)*, en un estudio para definir un índice de funcionamiento de las bombas manuales, propone una fórmula similar a la de *Avallone (2007)*, considerando el efecto del tiempo y además el del peso del ejecutante, llegando a resultados menores a los del estudio de Hofkes. *Kennedy y Rogers (1985)*, por su parte, 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 manual (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). Por su parte, *Lambert y Faulkner (1991)*, en el estudio ya citado, sugieren una potencia de 50W durante 4 horas para labores de irrigación basándose en datos de Guatemala y de diversas zonas de África. *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.

Por último, *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 las energías previstas por *Fraenkel* 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.

Los resultados para bombas manuales se muestran en la Figura 4.

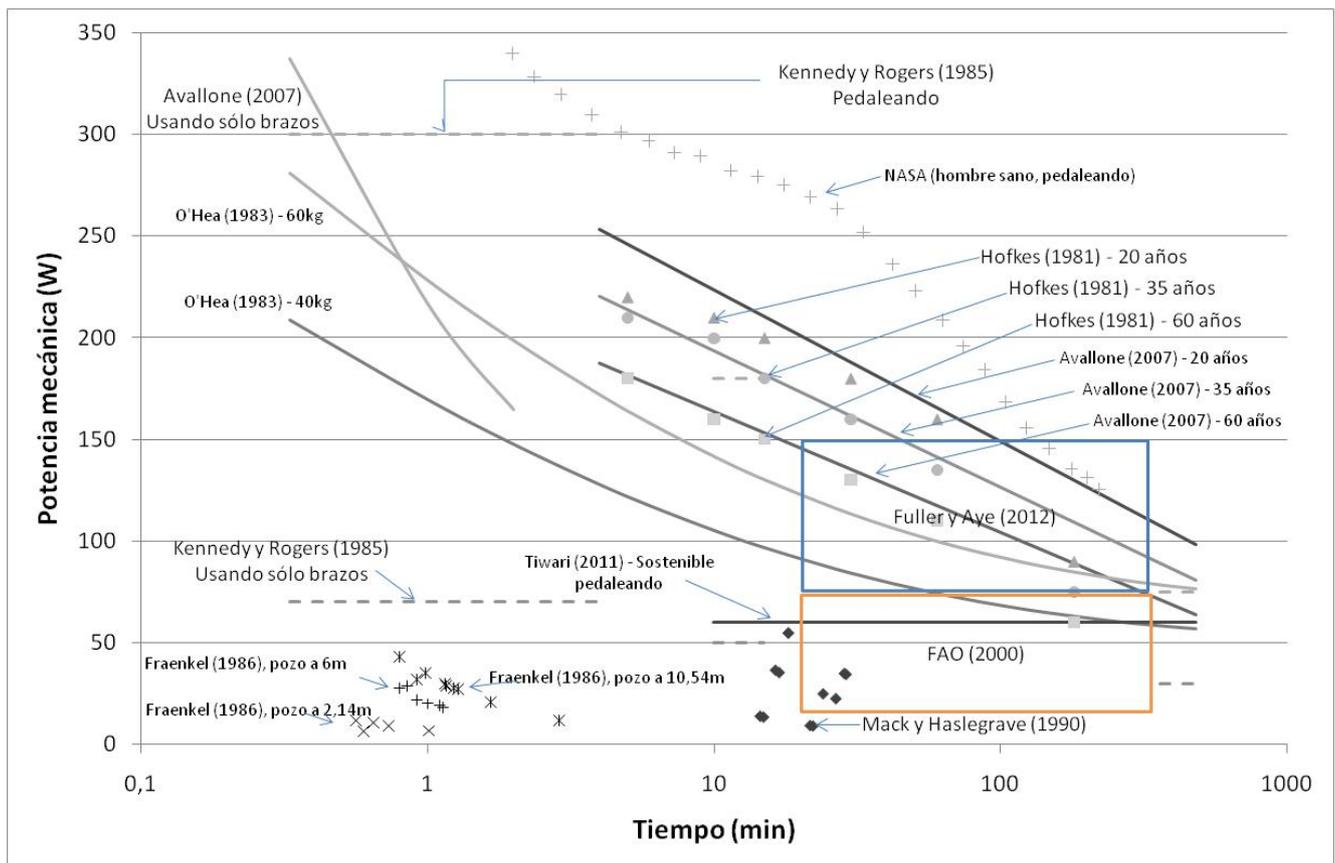


Figura 4. Potencia mecánica disponible mediante esfuerzo humano, en estudios de bombas manuales.

En la figura 4 se pueden distinguir tres entornos muy diferentes. En primer lugar, están los resultados alcanzados usando una bicicleta. Los resultados de la NASA, de *Kennedy y Rogers (1985)* y de *Tiwari et al. (2011)* son disímiles pero muestran una tendencia general. Las

medidas de *Kennedy y Rogers (1985)* muestran la misma tendencia que las de la NASA, pero siempre por debajo, lo que probablemente se puede achacar al tipo de persona objetivo en cada uno de los estudios. Parece más razonable ajustarse a los resultados de *Kennedy y Rogers (1985)* al diseñar un sistema de bombeo. En cuanto a los resultados de *Tiwari et al. (2011)*, muestran un límite sostenible al que tienden los otros dos estudios, mostrando un mínimo sostenible que puede ser útil en un diseño conservador de un sistema.

En cuanto a los resultados trabajando con los brazos, se observan dos zonas muy diferentes. Por una parte, los resultados de *Hofkes (1981)* y *O`Hea (1983)* muestran una tendencia similar a las correlaciones de *Avallone (2007)*. En el caso de los resultados de Hofkes, la coincidencia con las correlaciones de *Avallone (2007)* es tan buena que estas parecerían ajustes hechos sobre dichos datos. Los resultados de *O`Hea (1983)* muestran un efecto razonable del peso sobre estos resultados. Estos resultados hacen buena la estimación de *Fuller y Aye (2012)* para tiempos de bombeo mayores de 10 minutos (aunque cabe recordar que dichos autores preveían tiempos de descanso constantes). Por el otro lado, los resultados de *Kennedy y Rogers (1985)* y *Fraenkel (1986)*, es decir, los de *Morgan 1983* para pozos poco profundos en Zimbabwe) y las estimaciones de la FAO marcan otro rango diferente, por debajo de los 70W y con mínimos por debajo de 10W. El máximo de este rango coincide con la propuesta de *Baumann (2011)*, de 75W.

La existencia de estos dos grupos de datos, tan disímiles, sacados de publicaciones solventes (en el caso de Fraenkel, además, publica datos en los dos rangos), genera un problema de interpretación y validez. Por un lado, a tiempos largos (mayores de 10 minutos) parece dudoso que la potencia disponible utilizando los brazos sea similar, y en algunos casos superior a la obtenida pedaleando, por lo que los resultados de Hofkes y, en menor medida, O`Hea para tiempos largos deben ser utilizados con cautela. Por otro lado, resultados por debajo de los 10W, y especialmente a tiempos muy cortos, no parecen correctos como evaluación de la potencia disponible. Conviene señalar en este sentido que dichos resultados son para pozos poco profundos en su mayoría, aspecto de importancia que se comentará detalladamente en la siguiente sección. Por el momento baste indicar que en dichos pozos no es requerida toda la potencia disponible de la persona, por lo que los resultados son interesantes desde el punto de vista de la determinación de la potencia usada en instalaciones de bombeo manual (lo que es el objetivo final de este trabajo), pero no directamente en la evaluación de la potencia humana disponible (que es el objetivo de esta sección).

En conclusión, los motivos de la gran dispersión de datos pueden encontrarse en varios aspectos y es necesario un conocimiento claro de los mismos y de las características de los posibles usuarios para estimar, en cada caso, la potencia disponible. En primer lugar, hay que considerar la variabilidad entre personas, más cuando se comparan ensayos sobre atletas, deportistas aficionados en el primer mundo, personas de vida sedentaria, campesinos de zonas subdesarrolladas o niños. La influencia de las condiciones climáticas, la alimentación, edad y peso son también factores importantes. Finalmente, la mayoría de estudios no identifican siquiera 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 difícilmente puede lograrse en el terreno, como muestran los resultados en Zimbabwe.

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. En este sentido, la mayoría de los estudios que lo tiene en cuenta 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. *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.

Por último cabe recordar que no se ha considerado la potencia realizada mediante el aprovechamiento del propio peso del cuerpo del ejecutante, parámetro que es utilizado en varias bombas manuales y que será comentado en la siguiente sección.

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 aconsejable 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 muestran las Figura 2, 3 y 4, no arrojan datos representativos del uso normal de la bomba salvo si esta se utiliza para obtener volúmenes pequeños. 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 del caudal frente a la 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.

4. Mecanismos de aprovechamiento del esfuerzo humano

En esta sección se pretende hacer un breve resumen de las características de los mecanismos que aprovechan la potencia humana y que son utilizados frecuentemente en el diseño de bombas manuales. Dichas características afectan a la potencia útil aportada finalmente, que será una fracción de la potencia humana disponible o el resultado de un cálculo totalmente diferente. Este hecho se debe a diversos motivos:

- El rendimiento propio de la instalación utilizada, que incluye rozamientos, pérdidas de caudal, etcétera. Este aspecto no será tratado en detalle en este trabajo, y nos remitiremos a los datos aportados en la tabla 1.
- Los entornos de fuerzas y velocidades que puede desarrollar una persona. En este sentido, debe recordarse que las potencias disponibles tratadas en la sección anterior son en su mayoría computadas para una relación fuerza-velocidad óptima para el

ejecutante. Sin embargo, el mecanismo de aprovechamiento y sus características, unidas a la altura de bombeo, pueden condicionar el rango de fuerzas y velocidades y, en algunos casos, alejarlas de dicho óptimo.

- La existencia de mecanismos que operan aprovechando el peso del cuerpo del ejecutante, y que por tanto no aprovechan la potencia muscular del mismo (o al menos no de forma fundamental), y deben ser tratados aparte.

En la presente sección se tratará de estimar los efectos de los dos últimos aspectos en la potencia útil aportada por el ejecutante. Se considerarán los mecanismos más habituales usados en bombas manuales, pero no se entrará en un detalle excesivo respecto a las características específicas de cada mecanismo. Sólo se pretende dar una idea aproximada de los efectos.

Existen dos formas básicas de desarrollar potencia, tal y como esquematiza la figura 5: mediante el movimiento de una rueda de forma continua y mediante el movimiento alternativo de un eje

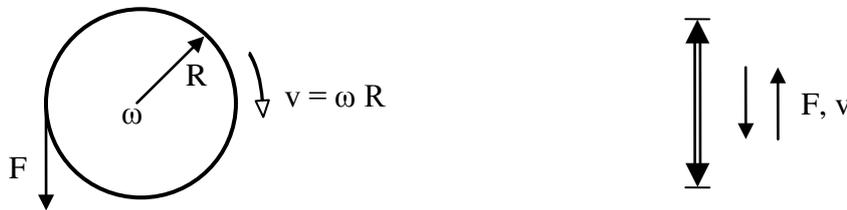


Figura 5. Mecanismos básicos.

El primer mecanismo es el más adecuado para el desarrollo de la fuerza muscular usando la potencia de los brazos o de las piernas, sobre una manivela o un sistema biela-pedal, La relación entre el radio de la manivela/biela y el de la rueda, o la inclusión de un cambio, permiten ampliar el rango de funcionamiento. El segundo mecanismo permite aprovechar el peso del cuerpo en la carrera de bajada, pero no en la de subida. Esto supone una desproporción grande entre ambas fuerzas, por lo que los mecanismos que intentan aprovechar el peso del cuerpo tratan a su vez de buscar un equilibrio de fuerzas que permita trasladar parte de la fuerza ejercida por el cuerpo a la carrera de subida. Las ecuaciones que relacionan la potencia suministrada con los parámetros fundamentales son, para el primer caso:

$$\dot{W} = F \cdot v = F \cdot 2\pi \cdot R_m \cdot f = \tau \cdot \omega \quad (2),$$

donde R_m es el radio de la manivela, f la frecuencia de giro y τ y ω el par sobre el eje y la velocidad angular respectivamente. Para el segundo caso, la ecuación queda:

$$\dot{W} = \frac{F_+ \cdot C + F_- \cdot C}{t_+ + t_-} = \frac{F_m \cdot 2C}{t_{ciclo}} \quad (3),$$

Donde C es la carrera, $+$ y $-$ designan la carrera de subida y la de bajada respectivamente y F_m es la fuerza media aplicada durante el ciclo.

Un ejemplo rápido permite ver el orden de magnitud de los diferentes parámetros. En el caso del esfuerzo muscular, una fuerza razonable para un proceso continuo durante algunos

minutos estaría entre los 30 y 50N (3 y 5 kg), trabajando con una manivela de radio cercano a la longitud del antebrazo (20-25cm) y a una frecuencia en el entorno de 1Hz. Utilizando la ecuación (2) estos datos proporcionan potencias entre 37,7 y 78.5W, en el entorno de lo comentado en el capítulo anterior. En el caso de usar la piernas, la fuerza se podría doblar o triplicar (50 - 150N), el radio habitual de la biela es de 17cm y las frecuencias pueden ir entre 60 y 100rpm. Estos datos proporcionarían potencias entre 60W y 270W, de nuevo de acuerdo con los resultados para bicicleta de la figura 4. En el caso de los sistemas de movimiento alternativo, se puede considerar un peso útil aplicado al mecanismo de 400N (40kg) y una fuerza en la carrera de subida despreciable en relación con la anterior (< 30N dadas las características del movimiento). Las carreras están, para los sistemas habituales, entre 0,2 (Afridev) y 0,4m (Malda) y los tiempos se pueden estimar entre 2 y 4 segundos (la utilización del peso del cuerpo da ciclos más largos). Estos datos dan potencias entre 20 y 80W, que se encuentran en el mismo entorno que las obtenidas con esfuerzo muscular.

Estos números dan una idea del entorno de potencias transmisibles utilizando estos mecanismos. Un estudio más detallado permite una mejor caracterización de la potencia real transmitida. Asimismo, las características del pozo y de la tubería de impulsión son parámetros a tener en cuenta, ya que están directamente relacionados con la fuerza que el mecanismo necesita transmitir para la impulsión del agua. En este caso, los primeros dos términos de la ecuación (2) deben entenderse de otro modo, ya que la fuerza F representa el peso de la columna de agua (dependiente de la altura de impulsión y del diámetro de la tubería) y la velocidad proporciona el caudal obtenible (dependiente del diámetro de la tubería). De esta forma, pueden existir limitaciones sobre la potencia utilizada que provengan de fuerzas necesariamente pequeñas (motivadas por la existencia de alturas pequeñas o la elección de diámetros pequeños, o por que el diseño de los mecanismos no soporte tensiones mayores) o de velocidades necesariamente pequeñas (motivadas por que el diseño de los mecanismos no soporte rozamientos o tensiones mayores).

A continuación se van a considerar las características de tres equipos de uso habitual: una bomba de mecate, una bomba de pistón de acción directa tipo Malda y una bomba de pistón accionada con una palanca tipo Afridev. Los tres tipos de bombas manuales son VLOM y de dominio público, promovidas por NNUU y el Banco Mundial. En el caso de la bomba, se utilizarán las características del modelo denominado Madagascar frente al modelo Nicaragua (que no es un estándar de la ONU). Los datos fundamentales de las citadas bombas vienen detallados en la tabla 2.

a. Bomba de mecate (Modelo Madagascar)

El diseño habitual de la bomba de mecate permite trabajar a frecuencias entre 1 y 1,5Hz (algunos estudios llegan a 2Hz), lo que con las dimensiones de la tabla 2 suponen velocidades entre 1,3 y 2 m/s. Velocidades superiores suponen tensiones en la cuerda, problemas de agarre y un aumento del rozamiento, por lo que no son recomendables. En cuanto a la fuerza, empleada, depende del peso del agua desalojada y del rozamiento:

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

F_R es el sumatorio de las fuerzas de rozamiento comentadas anteriormente. Para una tensión de la cuerda adecuada y una altura de impulsión entre 5 y 30 metros, la fuerza de rozamiento supone entre un 5 y un 10% de la útil, por lo que para un cálculo aproximado será

despreciada. En el cálculo de la masa de agua en la fórmula se ha despreciado también el espacio ocupado por la cuerda y los pistones.

	Mecate (Madagascar)	Malda	Afridev
Diámetro de la tubería de impulsión	28.2mm	51.4mm	53.6mm
Diámetro del eje	-	40mm	12mm
Relación de radios manivela - rueda	222/210	-	-
Carrera	-	408mm	225mm
Relación de radios de la palanca (min)	-	-	648/225
Relación de radios de la palanca (max)	-	-	1168/225
Altura mínima de impulsión	1m	1m	10m
Altura máxima de impulsión	30m	12m (15m)	45m

Tabla 2. Datos técnicos de los modelos a estudiar.

Con los datos de la tabla 2, las fuerzas necesarias para bombear entre 1 y 30m son de 6 y 184N respectivamente. Para una fuerza razonable de 50N, la altura de bombeo es ligeramente superior a los 8m. Para frecuencias de bombeo de 1Hz, estas fuerzas dan potencias necesarias de 8, 65 y 242W (para alturas de 1, 8 y 30m). Esto significa que para alturas mayores de 8m, el diseño de la instalación exige fuerzas excesivas, que sólo podrían mantenerse unos segundos. Para bombear a dichas alturas se requiere una modificación del diseño, que suponga, o una disminución del radio o un aumento de la relación entre los radios de rueda y manivela. Dada la complejidad de lo segundo en este caso (la disminución del diámetro de la rueda de impulsión supone una disminución de la zona de agarre de la cuerda y un aumento de la curvatura, y el aumento del radio de la manivela es contrario a criterios ergonómicos), la solución habitual es disminuir el diámetro de la tubería de impulsión. Un diámetro que fuese la mitad supondría una fuerza necesaria cuatro veces menor. Esta solución es aplicada por ejemplo en la especificación de Cubasolar, pero no en el modelo propuesto por la ONU.

Por otra parte, bombear a alturas menores de los 8m anteriormente citados supondría una potencia necesaria menor que la disponible por las características del esfuerzo humano. Por ejemplo, en un pozo de 2m la potencia necesaria trabajando a 1Hz sería de 16W, y en uno de 5m de 40W, independientemente de que la que pueda aportar el ejecutante sea mayor. Un aumento de la frecuencia supondría un aumento de potencia, pero como ya se ha indicado, esta no es posible en un rango amplio. Esta es, casi con certeza, la causa de la disparidad que presentan en la Figura 4 los resultados publicados por *Morgan (1983)* (accesibles en *Fraenkel 1986*) para pozos poco profundos en Zimbabwe frente a los del resto de autores. Es preciso señalar, de cualquier modo, que los resultados no son en absoluto desdeñables, ya que los pozos poco profundos son muy habituales, por lo que hay que tener especial cautela en asumir potencias elevadas de bombeo en los mismos.

b. Bomba de acción directa (Modelo Malda)

El diseño de la bomba Malda permite, como es habitual en los sistemas basados en movimiento alternativo, aprovechar parte de la fuerza en la carrera de bajada para la carrera de subida. En este caso, eso se consigue aumentando el tamaño y disminuyendo la densidad global del eje (que es hueco y contiene aire en su interior). De ese modo, el empuje hidrostático o de Arquímedes es utilizado para facilitar la carrera de subida. Por otro lado, la disminución de la sección de paso del agua de la zona entre pistones a la zona de impulsión,

debida a la dimensión no despreciable del eje, supone que parte de la impulsión del agua se realice en la carrera de bajada, donde el peso del cuerpo está actuando.

Un cálculo rápido (despreciando rozamientos y el efecto de la fricción al pasar el caudal bombeado a través de las válvulas) muestra que las fuerzas necesarias para elevar el agua (entre 2 y 25kg para alturas entre 1 y 15m) son alcanzables mediante el uso del peso del cuerpo, dada la pequeña sección de impulsión (que es del orden de la de la bomba de mecate debido al tamaño del eje). El problema, sin embargo, es que al trabajar con fuerzas menores y con tiempos largos, las potencias obtenidas son, en todo el rango, menores que las comentadas previamente. Para un tiempo mínimo del ciclo de 2s, que en algunos casos puede ser escaso, se obtienen potencias útiles de entre 3 y 50 W. Por ejemplo, en un pozo de 5m la potencia necesaria sería de 16W, en uno de 13m de 40W, y en uno de 15m de 50W, independientemente de que la que pueda aportar el ejecutante sea mayor. Estos resultados deben tomarse como órdenes de magnitud, ya que las hipótesis realizadas en este caso son más fuertes que en el caso de la bomba de mecate.

c. Bomba de palanca (Modelo Afridev)

El diseño de la bomba Afridev aprovecha, de forma diferente a la Malda, parte de la fuerza en la carrera de bajada para la carrera de subida. En este caso, se consigue mediante el uso de una palanca que tiene dos objetivos: su relación de radios, que es además variable, multiplica en el eje la fuerza ejercida en su extremo; y el peso de la propia palanca compensa el del eje metálico, que para pozos profundos es un factor relevante. Por lo tanto, una cuidada elección de la longitud variable de uno de los brazos de la palanca es indispensable para que el esfuerzo quede compensado entre las carreras de subida y bajada. Esto permite bombear desde profundidades mayores de 20m manteniendo un diámetro de tubería de impulsión grande.

Las ecuaciones para el cálculo de las fuerzas de las carreras de bajada (Ec. 5) y subida (Ec. 6) aparecen a continuación. Nótese que, al existir una palanca, la carrera de bajada (del eje) supone la subida del extremo accionado por el ejecutante y viceversa, por lo que el peso del cuerpo interviene, en este caso, en la fuerza de la carrera de subida del eje.

$$F_h(\text{muscular}) > \rho_{ag} gH \frac{\pi(D_t^2 - D_e^2)}{4r} - \left[\rho_e gH \frac{\pi D_e^2}{4r} - F_p \right] + \frac{F_f + F_R}{r} \quad (5)$$

$$F_h(\text{peso}) \square \rho_{ag} gH \frac{\pi(D_t^2 - D_e^2)}{4r} + \left[\rho_e gH \frac{\pi D_e^2}{4r} - F_p \right] + \frac{F_R}{r} \quad (6)$$

F_h es la fuerza humana necesaria, el primer sumando del segundo término de ambas ecuaciones identifica el peso del agua, el segundo, entre corchetes y de sentido distinto entre subida y bajada, muestra el efecto contrapuesto del peso del eje y de la resultante de fuerzas en la palanca, F_p . F_f es la fuerza debida a la fricción al pasar el agua a través de la válvula y depende de la velocidad del eje al cuadrado. Finalmente, F_R es la fuerza de rozamiento con la superficie de la tubería durante el desplazamiento del pistón.

Las ecuaciones (5) y (6) son inecuaciones ya que es preciso una fuerza superior para lograr el movimiento de todo el conjunto. Dicho aumento será mayor en la carrera de subida (Ec. 6)

ya que se desplaza, además del eje y la palanca, la columna de agua, que en la carrera de bajada no es desplazada. Este aumento depende de la aceleración requerida y por tanto, está vinculado con el tiempo de ciclo.

La figura 6 muestra la variación de estas fuerzas con la altura de bombeo para las diferentes posiciones (7) de la palanca. Eligiendo la posición adecuada de la palanca, las fuerzas varían entre 10 y 45m entre 78 y 243N en la carrera de subida (accionada por el peso) y entre 98 y 164N en la carrera de bajada (accionada por la musculatura). Estas últimas fuerzas son elevadas y no pueden ser mantenidas. Una modificación del diseño que supusiera una disminución del peso de la palanca (que con los datos de diseño compensa el peso del eje a 15m en la posición 1 y a 25m en la posición 7) provocaría mayores fuerzas de subida, asumidas por el peso, y menores fuerzas de bajada, ya que el peso del eje realizará parte del trabajo.

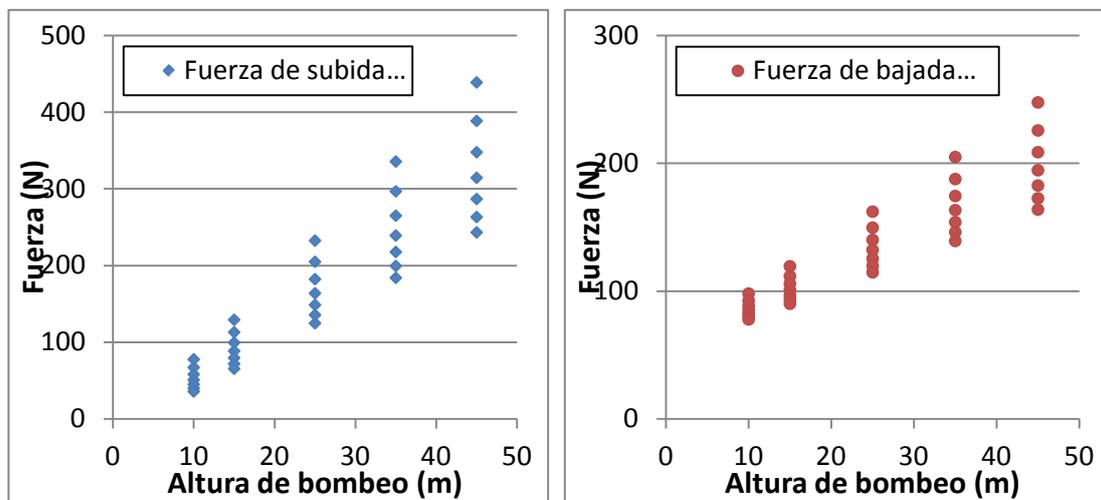


Figura 6. Fuerza necesaria en el brazo de la palanca de una bomba Afridev.

Para mantener potencias en el entorno de 75W es necesario que el tiempo de ciclo esté entre 1,3s (para 10m) y 5,7s (para 45m). Tiempos mayores (se considera difícil alcanzar tiempos menores de 2s a bajas profundidades) supondrían disminuciones de la potencia necesaria, que quedaría en el entorno de los 40W para pozos de 10m.

Estos cálculos son estimativos, al despreciarse la pérdida de carga por fricción en las válvulas. Dicha pérdida está vinculada con la velocidad del proceso y por tanto con el tiempo de ciclo y el caudal disponible. El modelo no es complejo pero excede los objetivos del presente artículo.

5. Volumen de agua extraíble a partir del esfuerzo humano

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 7a para diferentes potencias humanas y rendimientos y en función de la altura de bombeo.

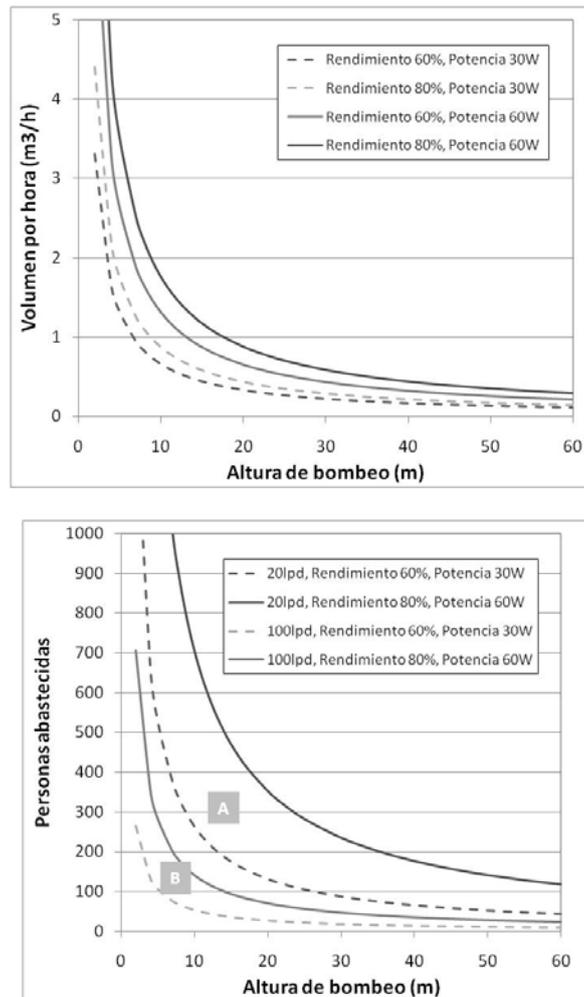


Figura 7. a) Volumen de agua obtenible en una hora y b) Personas abastecidas, en función de altura de bombeo, potencia humana, rendimiento de la bomba y nivel de abastecimiento.

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 7b.

Los resultados de la Figura 7b 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.

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

Tabla 3. Personas abastecidas con un sistema de bombeo manual.

Se puede hacer una comparación entre estos datos y los datos promedio disponibles en los estudios de implantación de bombas de mano. RWSN publicó en 2009 una tabla de datos con una estimación del número de personas abastecidas mediante bombas de mano en diferentes países de África Subsahariana, basado en valoraciones de UNICEF, fundamentalmente, y otros actores con presencia en terreno. Los resultados arrojan un promedio global de 222 personas abastecidas por cada pozo (media de todos los países), con promedios que llegan hasta 690 personas por pozo (promedio estimado en Angola). Los números son aún mayores si se eliminan los pozos con problemas mayores de funcionamiento, obteniéndose promedios de 420 personas por pozo y picos de entre 1000 (Angola) y 1500 (Liberia). Estos números no parecen alcanzables con los parámetros que se han ido desvelando a lo largo del artículo. Nótese por ejemplo que en la tabla 3, los resultados para mayor número de personas suponen potencias de 60W para alturas de bombeo de 5m, que como se ha visto son difícilmente alcanzables sin un diseño previo adecuado.

6. Conclusiones

Se presenta una evaluación del campo de acción de las bombas manuales, mediante una revisión bibliográfica de los trabajos publicados sobre la potencia humana disponible y una valoración de los mecanismos utilizados en bombas manuales de uso habitual. La dispersión de los datos sobre el esfuerzo humano disponible 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. Es importante poner de relevancia este hecho, porque los estudios sobre deportistas hablan de cientos de W, los organismos oficiales suelen hablar de potencias de diseño en el entorno de los 60-75W y en cambio, en muchos sistemas en funcionamiento la potencia utilizada puede estar alrededor de los 10W. Se presenta un modelado simplificado del mecanismo de funcionamiento de tres bombas manuales habituales, poniendo de relieve

las potencias necesarias que el mecanismo define, y los efectos combinados de las velocidades posibles, las fuerzas posibles y las potencias posibles. El uso de cambios y engranajes puede mejorar el rango de potencias usadas, pero en general es una solución costosa y compleja a día de hoy. Soluciones más simples de diseño para los diferentes mecanismos se incluyen en el texto.

Agradecimientos

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

Referencias

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.

Baumann E. (2011): *Low Cost Handpumps*. Rural Water Supply Network Field Note No 2011-3.

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.
- Morgan (1983): Letter in Appropriate Technology Journal Vol 9 No 1, IT Publications, London. 1983.
- Nauges, C. y Whittington, D. (2010): Estimation of Water Demand in Developing Countries. World Bank Research Observer, 25. Disponible en web:
<<https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/4441>>.
- Parker, J.F. y West V.R. (1964): Bioastronautics data book. NASA SP-3006.
- 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.
- Wilson, D.G. (2004). Bicycling Science, 3rd edition. MIT Press.