

Bomba manual de cuerda y pistones tipo “mecate, BM-2”

Caracterización de la potencia de accionamiento

De Caso Jaráiz, Héctor

Grupo de cooperación Sistemas de agua y saneamiento para el desarrollo. ETSIDI.

Universidad Politécnica de Madrid.

hector.caso.jaraiz@alumnos.upm.es

Mancebo Piqueras, J.A.

Departamento de Ingeniería Mecánica y Construcción. ETSIDI. Universidad Politécnica de Madrid

ja.mancebo@upm.es

Resumen

A lo largo del artículo se presenta el estudio aplicado al funcionamiento y la evaluación de un tipo concreto de bomba manual, la “bomba de mecate” o bomba de cuerda con descarga elevada (BM-2), con el objeto de lograr la caracterización de la potencia de accionamiento. Para ello se hace especial hincapié en los métodos, algo dispersos hasta ahora, de la medición de la potencia aplicada a la bomba mediante accionamiento humano, así como el análisis de resultados obtenidos de su ensayo, que nos permitirán complementar las conclusiones de estudios previos con relación a la potencia aplicada para el accionamiento de las bombas manuales.

Cabe destacar que estas líneas de trabajo pretenden ser una contribución a la creación de un procedimiento para la caracterización de las bombas de mecate que permita realizar una evaluación energética que permita validar esta tecnología, incluso mediante el estudio comparativo con otras bombas semejantes.

Palabras clave: desarrollo humano, abastecimiento, accionamiento manual, bomba de mecate, potencia de accionamiento.

Resumo

Ao longo do artigo, o estudo aplicada a operação e avaliação de um determinado tipo de bomba manual, a " bomba de corda " ou bomba de corda com elevada descarga (BM-2) é apresentada, a fim de alcançar a caracterização da potência de acionamento. Por isso se faz uma ênfase especial sobre os métodos, alguns espalhados até agora, da medição da potencia aplicada a bomba por meio do aionamento humano, e a análise dos resultados de teste que nos permitirá complementar as conclusões de estudos anteriores com relação à potencia aplicada para o acionamento das bombas manuais.

Note que estas linhas de trabalho pretende ser um contributo para a implementação de procedimentos para a caracterização das bombas de corda que permita fazer uma avaliação energetica, para validar esta tecnologia, incluindo o estudo comparativo com outras bombas similares.

Palavras-chave: desenvolvimento humano, abastecimento, operado manualmente, bomba de corda, potência de acionamento.

DisTecD. Diseño y Tecnología para el Desarrollo

2014, 1, desde pág. 168 - hasta pág. 184

ISSN: 2386 – 8546

1. Introducción

Las bombas manuales experimentan un apreciable crecimiento, especialmente desde los planes de su desarrollo impulsados por UNICEF en los años 70 del S XX, si bien su implantación es escasa en países desarrollados donde las impulsiones se resuelven mediante tecnologías modernas automatizadas, como pueden ser bombas de accionamiento electromecánico. El presente trabajo se centra en el estudio de la “bomba de mecate” o “bomba de cuerda”, y más en concreto aún en el modelo BM-2 (instalación con rueda tractora inferior y otra adicional en altura, que permite descargar a varios metros del suelo pudiendo almacenar el agua en un depósito elevado) que goza de menor desarrollo que su predecesora la BM-1, con una única rueda en su instalación (figuras 1 y 2).

Cabe destacar que, si bien el principio de funcionamiento es el mismo en ambas bombas, una ventaja indudable de la bomba BM-2 frente a la BM-1 consiste en el almacenamiento de agua en un depósito elevado a determinada altura pudiendo aprovecharse este incremento de energía potencial para una red de distribución del agua allí almacenada para diferentes aplicaciones, como por ejemplo, el consumo humano o un sistema de riego por goteo [1] y [2]. Esta acumulación elevada permite además disponer de agua en la red conectada al depósito aunque la bomba no esté impulsando agua en el momento.

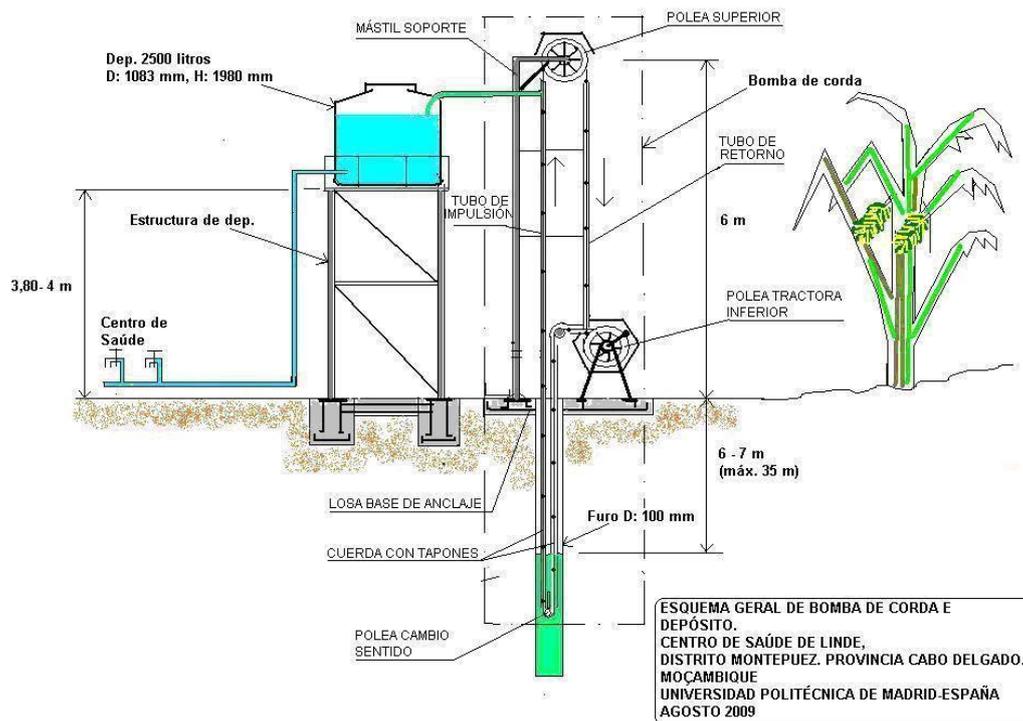


Figura 1. Esquema de funcionamiento de una bomba de mecate (BM-2) [4].

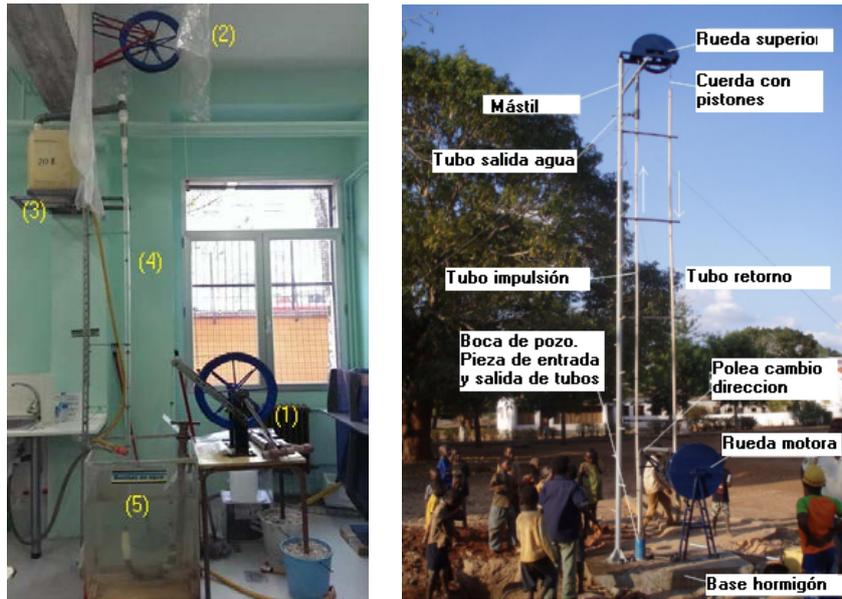


Figura 2. Modelo construido en el laboratorio de Hidráulica para el Desarrollo de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería y Diseño y Industrial-UPM con (1) rueda motora con manivela, (2) rueda en altura, (3) depósito en altura, (4) tubo conteniendo cuerda y pistones y (5) pozo con codo en el fondo del mismo e instalación real de BM-2 en Mozambique.

2. Aspectos constructivos de la BM-2

Puesto que, como se ha indicado previamente, ambos modelos de bombas presentan el mismo principio de funcionamiento, los materiales empleados para llevar a cabo la instalación de estas bombas serán similares, existiendo principalmente la necesidad de una segunda rueda y un soporte para la misma, además de más conductos y el depósito elevado en el caso de la BM-2.

A continuación se enumeran los distintos componentes del modelo construido para su estudio:

- Ruedas de radios metálicos y llanta de caucho reciclada acanalada en forma de “V”.
- Tubo de PVC (3m y diámetro interior de 28mm, a pesar de que es posible salvar alturas mayores con este tipo de bombas volumétricas).
- Codo de 180º de PVC perforado.
- Tapones de silicona/PVC con diámetro variable en función del tubo de PVC.
- Soporte para la rueda inferior (a la que se transmite el movimiento mediante una manivela o un sistema compuesto por plato-piñón, similares a los de una bicicleta).
- Rodamientos para el soporte inferior (también es posible emplear cojinetes de madera puesto que se contemplan como normalizados) [3].
- Soporte para la rueda superior y depósito en altura.
- Depósito con volumen en función de la instalación que se desee llevar a cabo.
- Cuerda de nylon sobre la que se montan los tapones.
- Sistema de fijación del codo al fondo del pozo.

El proceso detallado de instalación y mantenimiento se encuentra en el manual de referencia [4], y en [7] en los que se recogen las experiencias y lecciones aprendidas en Nicaragua y Mozambique.

3. La potencia humana como línea de trabajo

La caracterización de la potencia requiere conocer previamente el par de accionamiento, que hará posible, como quedará demostrado más adelante, descomponer el rendimiento global del mecanismo en los diferentes rendimientos mecánico y manométrico. Con esto se espera poder realizar la evaluación del modelo. La importancia de la caracterización se amplía con la posibilidad de obtener un método de evaluación normalizado que permita comparar cualquier instalación con otra; hecho que redundará en la posibilidad de conocer los fallos más comunes e introducir algunas mejoras en el diseño de las bombas de mecate.

Potencia desarrollada por una persona

La siguiente gráfica (figura 3) muestra un resumen cronológico de los diferentes estudios realizados para llegar a conocer aproximadamente la potencia mecánica que desarrolla un operador humano en distintas hipótesis de trabajo.

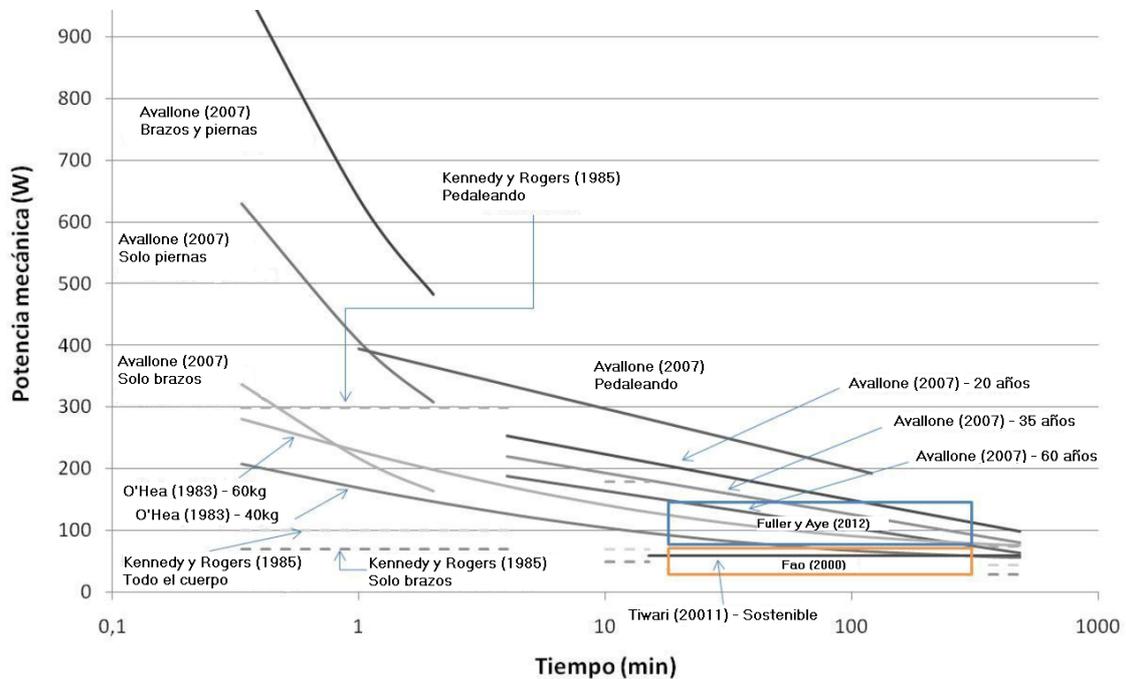


Figura 3. Potencia mecánica disponible mediante esfuerzo humano, según diferentes fuentes y en diferentes condiciones [5].

Es fácil advertir a simple vista que existen enormes diferencias a la hora de presentar la potencia desarrollada por un operario humano para el accionamiento de una bomba, al margen de las diferentes hipótesis de trabajo que plantean los autores en sus respectivos estudios como pueden ser el empleo de diferentes extremidades en las pruebas o tiempo de realización de las mismas.

Es por ello que partiendo de esta referencia se decida ensayar el modelo de BM-2 a fin de obtener de la manera más precisa posible la potencia necesaria para accionar la bomba, principal objeto de este estudio.

4. Metodología del ensayo

Debido a que no hay ninguna metodología consolidada para la medida de par de accionamiento en bombas manuales, y aunque parezca trivial la medida de este parámetro, éste no tiene ningún tipo de similitud con la medida del par de freno para la cual están ideados la mayoría de los sistemas de medida, como por ejemplo el empleado en los bancos de ensayo de bombas electromecánicas y en los de turbinas.

Como solución al problema se plantean distintas maneras de obtener dicho parámetro entre las que solo una de las metodologías propuestas ha resultado válida por proporcionar valores lógicos y previsibles (aunque no se descarta continuar probando con otros métodos propuestos).

Los métodos propuestos y ensayados han sido los siguientes:

- Medida de la potencia con la ayuda de un dinamómetro.
- Accionamiento del mecanismo tractor mediante un motor eléctrico con transmisión por correa.
- Accionamiento mediante motor eléctrico con transmisión por cadena.
- Medida de deformaciones producidas en el eje, a través de galgas extensiométricas.

Medida de la potencia aplicada con ayuda de un dinamómetro

Este método se utiliza habitualmente para la determinación del par de freno de un mecanismo giratorio. Sin embargo, el método no es aplicable para medir el par transmitido que además es “oscilante”, es decir, se caracteriza por presentar picos y valles en función de la posición de la manivela a lo largo de su recorrido circular. Debido a esto, no se llega a probar en la BM-2 para su ensayo.

Accionamiento del mecanismo tractor mediante motor eléctrico con transmisión por correa

Para poder aplicar este método es imprescindible disponer de un motor eléctrico de corriente continua con el cual accionar la BM-2, aplicando su tensión nominal, de manera que para el régimen obtenido, la potencia aplicada sobre el eje de la bomba responde al producto de la tensión por la intensidad, medidos en el motor y conociéndose así su potencia en cada punto de funcionamiento.

De esta manera, comienza el ensayo de la bomba, transmitiendo el movimiento desde el eje del motor al eje de la bomba, mediante una correa de caucho (figura 4). Este método resultó improductivo debido a que se producía deslizamiento entre la correa y los ejes, puesto que el rozamiento por adherencia entre éstos no fue suficiente para transmitir el par necesario.



Figura 4. Instalación de motor con transmisión mediante correa en BM-2 con (1) motor de corriente continua, (2) rueda motora y (3) correa de transmisión.

Accionamiento del mecanismo mediante motor eléctrico con transmisión por cadena

Como solución al problema anterior se planteó e instaló un sistema de transmisión entre ejes formado por dos ruedas dentadas síncronas de igual diámetro (relación de transmisión igual a uno) y una cadena (figura 5). Este sistema funcionó tal y como se esperaba transmitiendo correctamente la potencia entregada por el motor. Sin embargo, no se han conseguido resultados con la bomba en carga, debido a problemas técnicos por el tipo de motor.



Figura 5. Instalación de motor con transmisión mediante cadena en BM-2 con (1) motor de corriente continua, (2) rueda motora, (3) cadena para la transmisión y (4) plato dentado para el correcto funcionamiento de la cadena.

Medida de deformaciones producidas en el eje a través de galgas extensiométricas

Este método para la medición de las deformaciones sobre el eje con galgas extensiométricas, es de compleja aplicación, aunque se obtienen una notable precisión en las medidas, y será el seleccionado para caracterizar el par de accionamiento.

La inclusión de galgas extensiométricas sobre el eje de la bomba dispuestas a 45°, permiten, con la ayuda de una caja de extensimetría y un ordenador, extraer las mediciones con mayor precisión. Esto se consigue gracias a las propiedades del material piezoeléctrico del que esta construida la galga, este tipo de materiales al deformarse producen una diferencia de potencial registrable proporcional a la deformación producida en la galga, y por tanto en la superficie a la que esta adherida. La caja de extensimetría se encarga de convertir la diferencia de potencial medida en la galga en microdeformaciones, que corresponden a un par determinado correspondiente a un par aplicado sobre el eje, cuyo valor conocemos tras la calibración de la caja.

En primer lugar se realiza la calibración de la caja de extensimetría, esto es, se aplica un esfuerzo conocido, como puede ser el producido por una pesa de 10 kg en el extremo de la manivela (despreciamos la flexión por inapreciable, lo que simplifica los cálculos, y asumimos que el eje solo trabaja a torsión) y registramos para dicho esfuerzo las microdeformaciones que se producen según la caja de extensimetría. Como todo el proceso de accionamiento se encuentra en la zona lineal del diagrama esfuerzo-deformación del acero, los pares de accionamiento serán proporcionales al par producido por la pesa, del que se conocen las microdeformaciones.

El par de accionamiento se obtiene midiendo las microdeformaciones que aparecen en el eje en pleno régimen de giro, con resultados que se expondrán en el siguiente punto. Las imágenes de las figuras 6 y 7, muestran la instalación de las galgas sobre el eje de la bomba en la foto de la derecha. En la foto de la izquierda, se muestra la instalación durante el proceso de calibración de la caja de extensimetría.

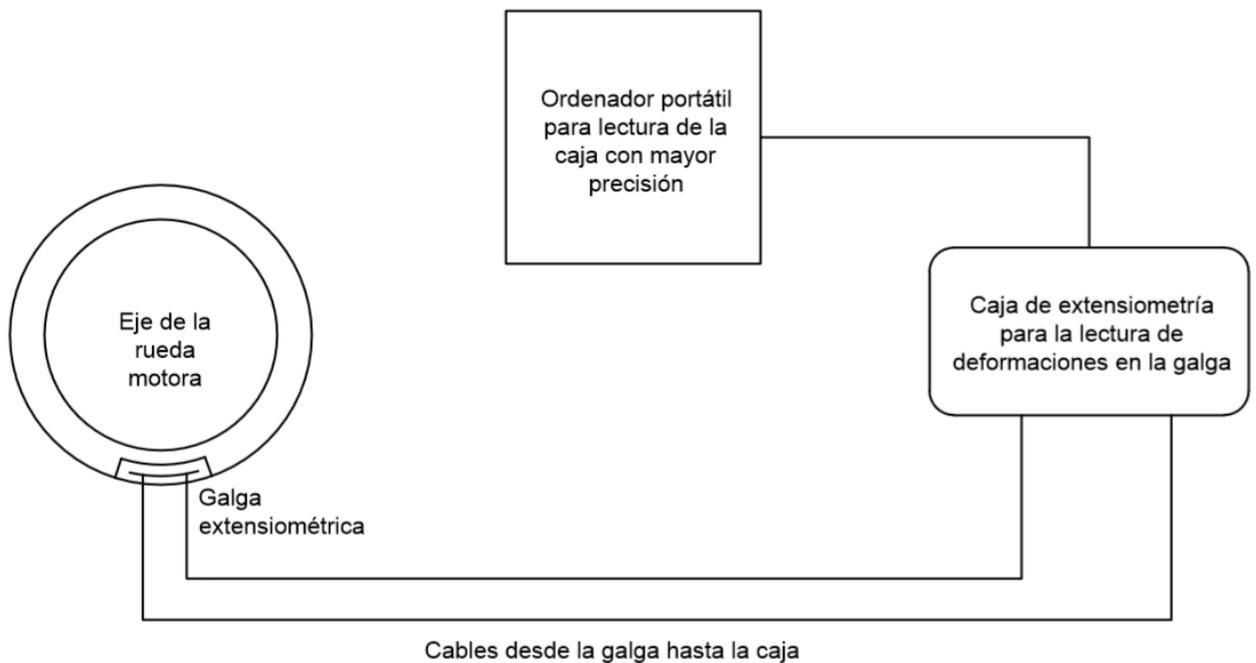


Figura 6. Instalación y ensayo de microdeformaciones con galga extensiométrica.



Figura 7. Instalación y ensayo de microdeformaciones con galga extensiométrica con (1) pesa de 10 kg para la calibración de la caja, (2) bobina de cables que transmiten las deformaciones de la galga a la caja, (3) caja de extensimetría, (4) ordenador portátil para lectura precisa de la caja, (5) rueda motora, (6) detalle de galga extensiométrica y (7) rodamiento.

5. Resultados

Se ha recurrido a la formulación básica de hidráulica y mecánica. A continuación se indican las expresiones aplicadas al funcionamiento de la bomba volumétrica o de desplazamiento positivo, y su relación con los datos experimentales obtenidos en el laboratorio [6], en régimen permanente.

- Caudal. Se obtiene como la relación entre el volumen total extraído en cada ensayo y el tiempo de extracción empleado. El rendimiento volumétrico será ligeramente inferior al real puesto que en el cálculo teórico del caudal extraído a una velocidad determinada no se tiene en cuenta el volumen sólido dentro del tubo por los pistones y la cuerda.

$$Q = \frac{V}{t}$$

Donde, Q es el caudal [m^3/s], V el volumen de agua elevada [m^3] y t el tiempo [s].

Aplicando esta expresión se obtiene un valor medio de caudal, que se empleará en los sucesivos cálculos de 0,423 litros/s.

Los datos obtenidos en la medida del caudal para diferentes regímenes de giro se muestran en la figura 8.

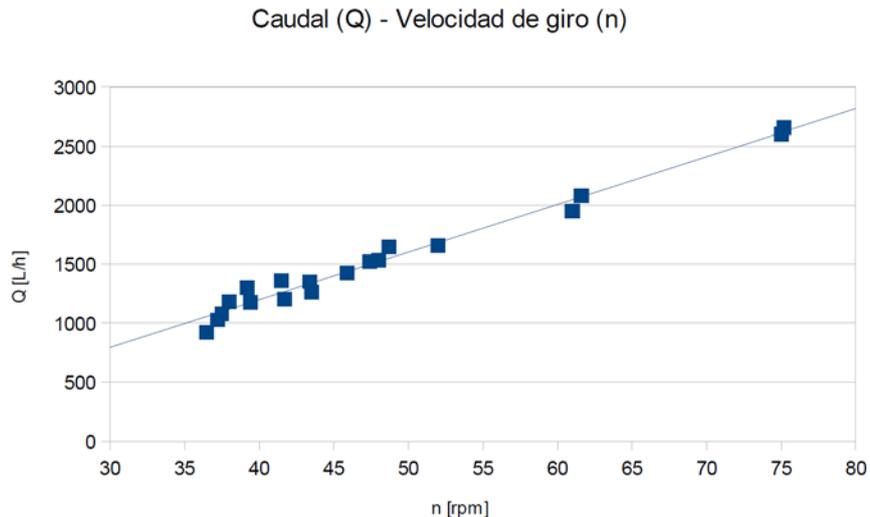


Figura 8. Gráfica que muestra el aumento del caudal extraído con la variación de la velocidad de giro de la bomba (para una misma altura desarrollada de 3m)

- Potencia hidráulica o potencia útil:

$$P_H = \gamma Q H_H$$

Donde P_H es la potencia hidráulica [W], γ el peso específico del agua [N/m^3], Q el caudal [m^3/s] y H_h la altura manométrica o útil [m].

Obteniéndose un valor, aplicando el caudal medio, de **12,655 W**.

- Potencia de accionamiento. Para su obtención se debe medir en primer lugar el par de accionamiento y la velocidad angular.
 - Velocidad angular

$$\omega = \frac{\pi n}{30}$$

Donde, ω es la velocidad angular [rad/s] y n el régimen de giro [rpm]. En adelante el régimen de giro que se emplea en los cálculos es el medido en laboratorio, 46,15 rpm o 4,83 rad/s.

- El par de accionamiento es el valor obtenido por el producto del coeficiente (k) y el valor de las microdeformaciones medidas con la caja de extensimetría.

$$T_{acc} = k \epsilon$$

Donde, T_{acc} es el par de accionamiento sobre el eje [Nm], k un coeficiente obtenido a partir de la calibración de la caja de extensimetría [Nm] y ϵ las lecturas de la caja de extensimetría, que representan microdeformaciones adimensionales [-].

Teniendo en cuenta los datos de la tabla 1, el par accionamiento máximo para el

ensayo que se evalúa en el artículo es de 9,46 Nm y el par de accionamiento medio será 5,63 Nm.

$$k = \frac{T_{cal}}{\epsilon_{cal}}$$

Donde, k es un coeficiente para el cálculo del par [Nm], T_{cal} es el par producido por la pesa de calibración sobre el eje [Nm] y ϵ_{cal} es la lectura de la caja con el par aplicado en la calibración [-].

El coeficiente k , que se calcula a partir de datos experimentales obtenidos de la calibración, para una pesa de masa 10 kg aplicada a 30 cm del eje que produce un momento de 29,4 Nm la lectura de la caja de extensimetría es 276 [-], y por lo tanto el coeficiente k es igual a 0,10625 Nm (Figura 7).

La potencia de accionamiento se define como el producto del par de accionamiento y la velocidad angular.

$$P_{acc} = T_{acc} \omega$$

Donde, P_{acc} es la potencia de accionamiento [W], T_{acc} el par de accionamiento [Nm] y ω la velocidad angular [rad/s].

En la (tabla 1) se pueden encontrar varias de las series de valores tomadas con la ayuda de la caja de extensimetría, en la primera columna encontramos el tiempo (s) y en las sucesivas varios ejemplos de cómo se comportan las deformaciones (ϵ) en el eje, en régimen de giro. Todas las pruebas se realizaron tomando muestras durante 40 vueltas, sin embargo existen diferencias de tiempo entre los diferentes casos, lo que implica que cada muestra representa un régimen de giro diferente.

Tiempo [s]	ϵ_1 [-]	ϵ_2 [-]	ϵ_3 [-]	Tiempo [s]	ϵ_1 [-]	ϵ_2 [-]	ϵ_3 [-]	Tiempo [s]	ϵ_1 [-]	ϵ_2 [-]	ϵ_3 [-]
1	-3	-3	40	31	35	48	9	61	-14	-15	-20
2	-2	-3	33	32	37	-2	65	62	-14	-15	-17
3	-3	-3	-11	33	43	14	14	63	-14	-15	
4	-3	-3	-22	34	52	7	32	64	-14	-2	
5	-3	-3	25	35	25	-14	-4	65	-14	-3	
6	-3	-14	47	36	35	44	33	66	-14	-3	
7	-15	4	38	37	20	46	5	67	-14	-4	
8	48	17	19	38	9	10	36	68	-15	-5	
9	4	-7	68	39	60	-3	15	69	-15	-5	
10	52	-20	0	40	46	-10	8	70	-14		
11	41	16	53	41	37	36	53	71	-14		
12	35	26	29	42	26	4	43	72	-14		
13	23	18	70	43	24	26	23	73	-14		
14	14	-4	18	44	57	-7	1	74	-14		
15	30	18	39	45	34	9	33	75	-14		
16	-1	3	36	46	65	70	24	76	-14		
17	20	5	69	47	30	45	7	77	11		
18	22	63	17	48	17	6	35	78	12		
19	54	53	-8	49	89	21	10	79	12		
20	30	18	33	50	38	31	40	80	3		
21	46	4	-4	51	15	4	10	81	0		
22	46	51	43	52	82	23	-2	82	0		
23	18	14	30	53	48	16	1	83	1		
24	15	15	9	54	-20	22	-10	84	1		
25	45	-1	49	55	45	23	-10	85	1		
26	33	47	32	56	37	20	-25				
27	44	41	24	57	29	13	-25				
28	41	14	4	58	38	-7	-10				
29	16	4	51	59	39	-16	0				
30	28	11	3	60	19	-16	7				

Tabla 1. Evolución de las deformaciones extensiométricas.

Se ha tomado como muestra para el análisis la primera columna. A continuación (Figura 9) se muestra la gráfica del ensayo completo que será progresivamente desglosado, para explicar la evolución de las deformaciones en el eje, que nos permitirán conocer el par aplicado a lo largo del recorrido en cada instante. Además, como aparece reflejado en la expresión anterior, el conocimiento del par de accionamiento supone conocer también la potencia de accionamiento, objetivo principal del ensayo.

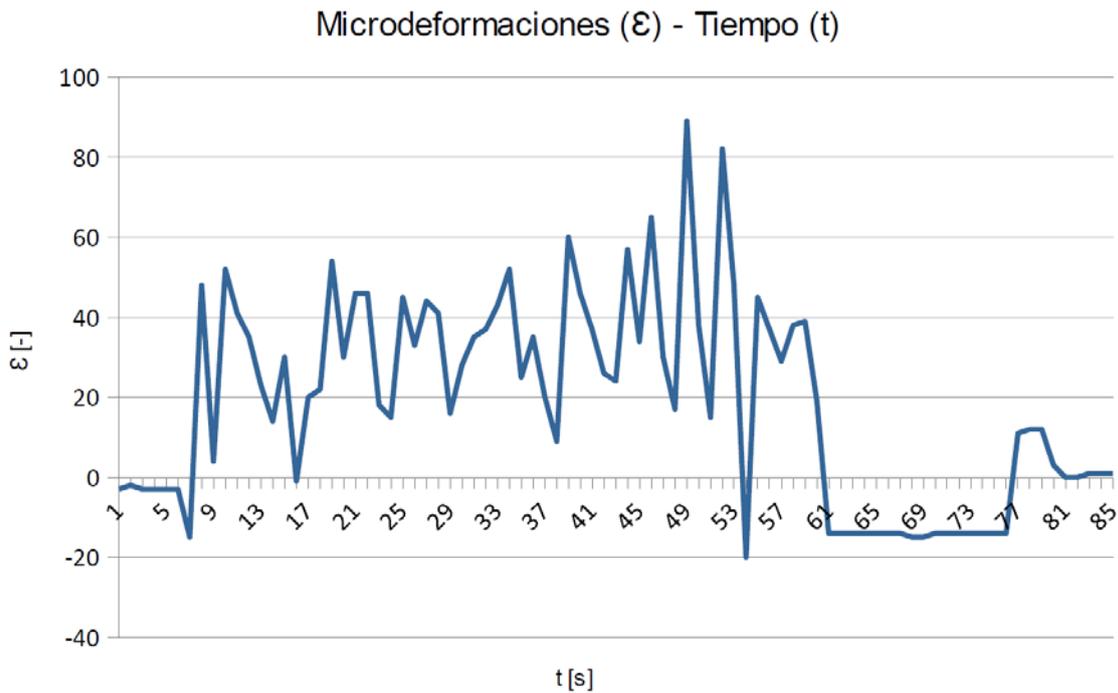


Figura 9. Gráfica de microdeformaciones-tiempo para un ensayo de 40 vueltas.

Interpretación de la gráfica obtenida en uno de los ensayos del par realizado en el laboratorio: se recogió un valor de las deformaciones en el eje para cada segundo de funcionamiento. Se advierte en primer lugar, como cabe esperar, que no es en absoluto regular, trazando picos y valles que representan los puntos de máximo par aplicado al hacer ascender la manivela y la reducción de par aplicado al hacerla descender.

Existen además cuatro áreas destacables en la gráfica que se analizan con detalle a continuación:

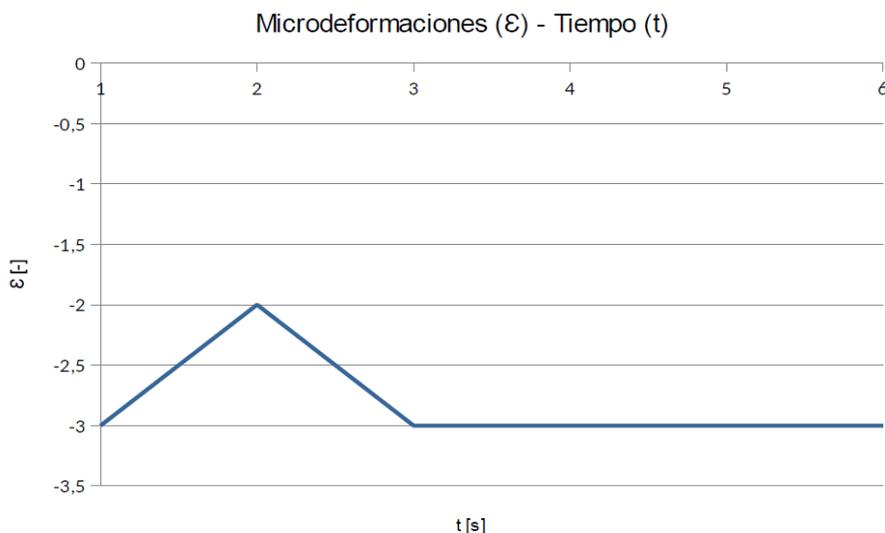


Figura 10. Gráfica detalle de Figura 6 de t=0 s a t=5 s.

En la figura 10 encontramos el primer detalle de la gráfica valores de deformación cercanos a cero, representa cinco segundos de la bomba sin carga con la manivela en estado de reposo, las deformaciones en este apartado de la gráfica son mínimas y resultan del error de calibración de la caja de extensimetría.

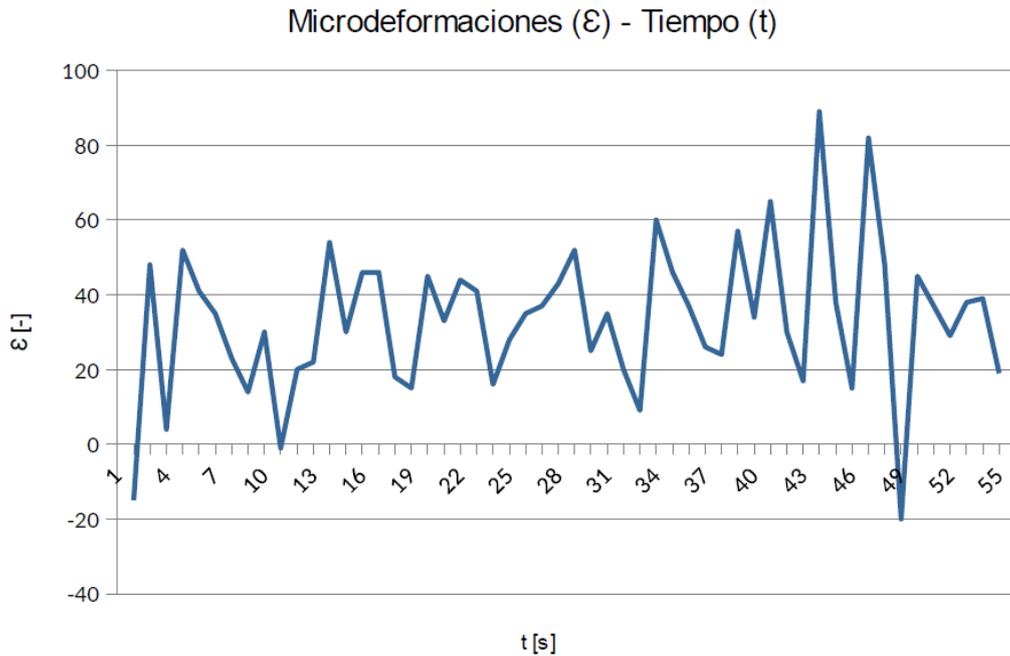


Figura 11. Gráfica detalle de Figura 6 de t=5 s a t=60 s.

En la figura 11 se encuentra la información de mayor relevancia, se trata del tiempo durante el cual transcurren las 40 vueltas del ensayo. En primer lugar se aprecia que las deformaciones en el eje no son constantes, esto se debe al mayor par aplicado para el ascenso de la manivela con respecto al descenso de la misma. Los picos y valles de deformación se mantienen relativamente constantes, hecho del que se extrae que los pares de accionamiento, y por tanto las potencias de accionamiento aplicadas, se mantienen en un rango similar para cada vuelta de manivela llevada a cabo durante el ensayo. Las pequeñas variaciones de pico a pico o de valle a valle se deben a los pequeños desajustes mecánicos de la bomba como pueden ser un pequeño error puntual por desequilibrio mecánico en uno de los rodamientos o el rozamiento de un nudo de la cuerda o tapón en un momento concreto, como por ejemplo ocurre en la parte inferior del tubo curvado que invierte 180° la dirección y sentido de avance de la cuerda.

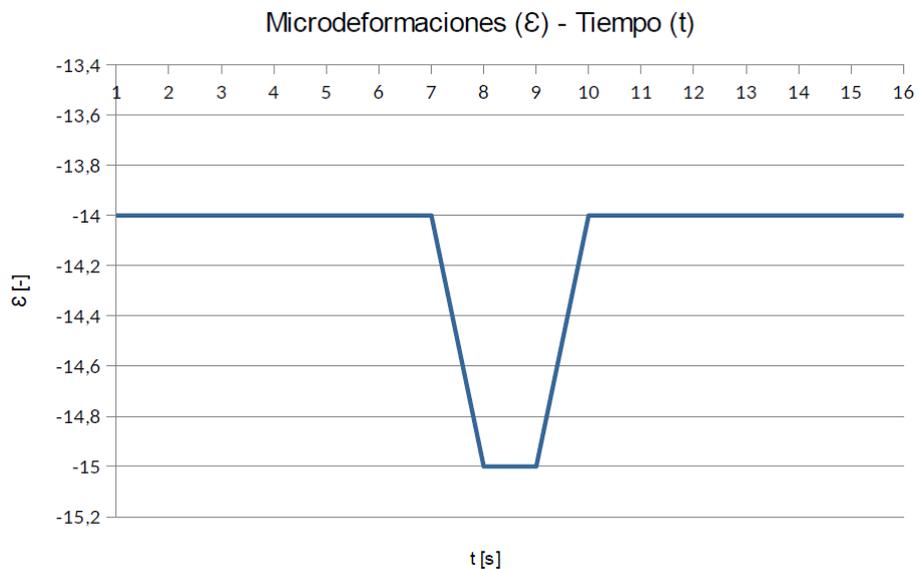


Figura 12. Gráfica detalle de Figura 6 de t=60 s a t=76 s.

En la figura 12 se encuentran valores de deformación negativos, estas deformaciones representan la manivela (y por tanto el conjunto de cuerda y pistones) parada en contra de la bajada de la columna de agua en el interior del tubo, es decir, la descarga una vez finalizados los 40 ciclos del ensayo. En este periodo la manivela ejerce un par de retención, que podría ser cumplido con un trinquete, como el que se incorpora en numerosas aplicaciones en Nicaragua.

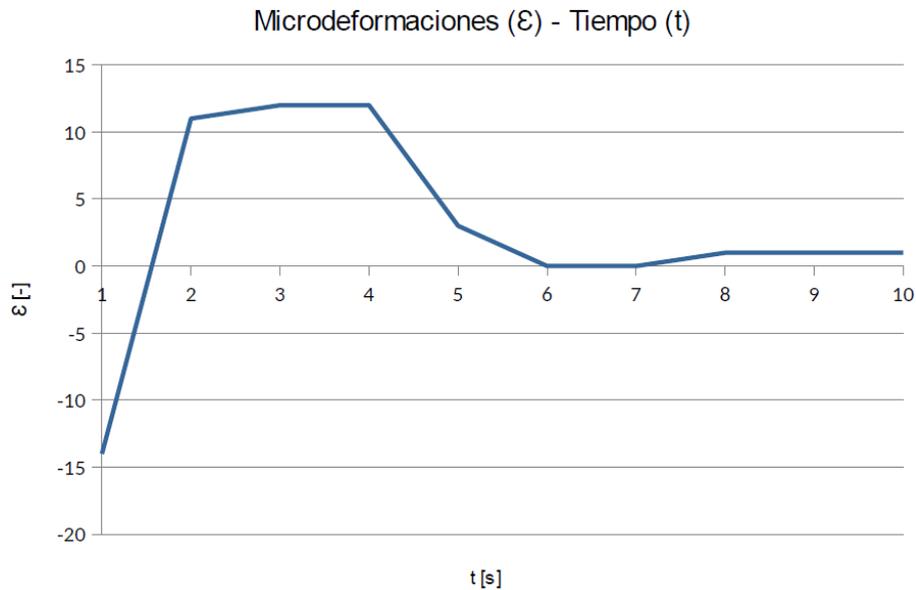


Figura 13. Gráfica detalle de Figura 6 de t=76 s a t=85 s.

En la figura 13 se representa de nuevo, de manera similar a la figura 7, un período de tiempo con la manivela en reposo y la bomba sin carga en la columna del tubo. Se aprecia bien como las deformaciones producidas por la descarga desaparecen gradualmente del eje y de nuevo obtenemos valores cercanos a cero.

Analizando los valores para las deformaciones representados en la figura 8, y aplicando las expresiones previamente presentadas, resulta finalmente un valor pico de 45,7 W para la potencia de accionamiento, y un valor medio, calculado a partir del valor medio para las deformaciones recogidas durante las cuarenta vueltas, de potencia aplicada de aproximadamente 27,2 W.

- Rendimiento volumétrico. Se calcula según la siguiente expresión y empleando los valores medios obtenidos tras evaluar todos los ensayo realizados, resultará de dividir el caudal impulsado entre la suma de los caudales impulsado y de pérdidas.

$$\eta_v = \frac{Q_i}{Q_i + Q_p}$$

Donde, η_v es el rendimiento volumétrico, Q_i el caudal impulsado [l/s] y Q_p el caudal de pérdidas [l/s].

El caudal de pérdidas se calcula haciendo repetidas medidas del tiempo que tarda el tubo en vaciarse tras completar su llenado y conteniendo cuerda y pistones (debido a esto es necesario repetir la medida de tiempo de descarga numerosas veces para que la media sea representativa).

Realizando el cociente entre el volumen total del tubo y el valor medio del tiempo el resultado es 0,106 l/s.

Si se aplica la fórmula propuesta obtenemos un rendimiento volumétrico en torno al 80% teniendo en cuenta los 0,423 l/s de caudal medio.

- Rendimiento global. Obtenido dividiendo la potencia hidráulica entre la potencia de accionamiento según la siguiente expresión.

$$\eta_g = \frac{P_H}{P_{acc}}$$

Donde, η_g es el rendimiento global [%], P_H la potencia hidráulica [W] y P_{acc} la potencia de accionamiento [W].

Se ha obtenido para nuestro modelo un valor de **46,5 %** tras sustituir en la expresión anterior los **12,65 W** de potencia hidráulica útil y **27,2 W** de potencia media de accionamiento.

- Rendimiento hidromecánico. Dado que

$$\eta_g = \eta_{hm} \eta_v = \eta_h \eta_m \eta_v$$

$$\eta_{hm} = \frac{\eta_g}{\eta_v}$$

Donde, η_{hm} es el rendimiento hidromecánico [%], η_g el rendimiento global [%], η_v el rendimiento volumétrico [%].

Siendo el resultado, tras la aplicación de los rendimientos obtenidos, del **58,12 %**, debido al conjunto de disipaciones hidráulicas, mecánicas, fuerzas de fricción, avance de los pistones, etc. Y la expresión para obtener el rendimiento queda:

$$\eta_{hm} = \frac{\gamma Q H}{k \epsilon \omega \eta_v}$$

Por lo que, una vez calibrado el equipo, se obtiene fácilmente la potencia de accionamiento y el rendimiento, partiendo del parámetro (ϵ) ofrecido por las galgas extensiométricas.

6. Conclusiones

Los ensayos se han llevado a cabo en laboratorio, con altura 3 metros, muy inferior a la real en la mayoría de los casos. Sin embargo se ha conseguido simular el funcionamiento de la bomba, midiendo los parámetros necesarios para caracterizar el par y la potencia de accionamiento. Además, en el caso real de mayor altura, el caudal disminuye, por lo que la potencia de accionamiento será parecida a la obtenida en nuestro caso.

Las expresiones y los resultados obtenidos permiten tener otros puntos de funcionamiento. Así, para una potencia de accionamiento más elevada, 60 W, manteniendo el rendimiento -29 W de potencia útil-, y con una altura total de 25 m, el caudal sería de 0,11 litros/s, y por otro lado si la altura fuese de 10 m, el caudal se elevaría a 0,29 litros/s (1064 litros/hora). Estos valores se corresponden con los resultados reales frecuentes para este tipo de bombas, trabajando en las condiciones descritas. De modo que podría trazarse la curva característica de la bomba (Q-H).

Podemos considerar que el método elegido de medición de deformaciones extensiométricas es válido para caracterizar el funcionamiento de la bomba de mecate. Queda por tanto pendiente el diseño de un “kit de evaluación de bombas de mecate” lo más sencillo posible, ya que el sistema con galgas podría mejorarse por resultar algo complicado para su transporte y uso continuado.

La caracterización del funcionamiento de la bomba permite además tratar con sistemas paralelos como el accionamiento con motor eléctrico para contrastar los resultados de cada metodología.

Al margen de los resultados obtenidos, se podría seguir ensayando y tratando de mejorar el diseño de algunos aspectos de la bomba.

7. Agradecimientos

Nuestros más sinceros agradecimientos a todos aquellos que con su esfuerzo y generosidad han apoyado la realización de este estudio, especialmente a Don Antonio Vela por la aportación del motor de corriente continua (Solener, S.A.), a Ulpiano Ruiz-Rivas (UC3M) por sus estudios previos que han servido de gran ayuda, a María del Mar Recio, Christian Polo e Iñaki Garayoa (ETSIDI-UPM) por sus aportaciones tanto en el laboratorio como en la revisión del presente documento.

Referencias

- [1] J. A. Mancebo Piqueras y A. Jiménez. *Tecnologías apropiadas para cumplir el Derecho Humano al Agua. Las bombas manuales. Tiempo de paz (98)*. pp. 92-96. 2010 ISSN 0212-8926. Disponible en web: <<http://oa.upm.es/8726/>>. [Consulta: 16-12-2013].
- [2] J.H. Alberts, J.J. van der Zee and Fernández J. *A multi sectorial approach to sustainable rural water supply in Nicaragua: the role of the rope handpump.* 2004.
- [3] H. Holtslag and J. de Wolf. *Rope pump A-model*, Foundation Connect International, 2010.
- [4] J. A. Mancebo Piqueras, y G. Rebassa (2012). *Bomba de mecate sobreelevada (BM-II). Manual práctico de construcción, instalación y mantenimiento.* 2012.
- [5] U. Ruiz-Rivas. *Modelización de bombas manuales para el abastecimiento de agua*, 2013. Disponible en web: <http://www.sextocongresocud.es/wpcontent/uploads/2013/03/vicongresocud2013_submission_167.pdf>. [Consulta: 10-01-2014].

[6] M. Patrón Codesido. *Caracterización de bombas y bici-bombas de mecate (PFC)*, Julio de 2012.

[6] Rebassa, G., Mancebo, J.A., Rivero, M.M., (2013). Experiencias en Mozambique. Boletín Del Colégio de Ing. Téc. Industriales, nº 229 diciembre 2013.