

## DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE BICI-BOMBAS DE AGUA A PROPULSIÓN HUMANA

### DESIGN AND CONSTRUCTION OF BICYCLE WATER PUMPS OPERATED BY HUMAN POWER

Francisco Najera<sup>1a</sup>, Ian Homer<sup>1b\*</sup>, Cristian Kremer<sup>1c</sup>, Esteban Leiva<sup>1d</sup>

<sup>1a</sup> Departamento Ingeniería y Suelos, Facultad de Ciencias Agronómicas, Universidad de Chile, La Pintana, Santiago, Chile  
<https://orcid.org/0000-0001-6750-3372>

<sup>1b</sup> Departamento Ingeniería y Suelos, Facultad de Ciencias Agronómicas, Universidad de Chile, La Pintana, Santiago, Chile  
<https://orcid.org/0000-0002-3918-5765>

<sup>1c</sup> Departamento Ingeniería y Suelos, Facultad de Ciencias Agronómicas, Universidad de Chile, La Pintana, Santiago, Chile  
<https://orcid.org/0000-0002-4390-4830>

<sup>1d</sup> Departamento Ingeniería y Suelos, Facultad de Ciencias Agronómicas, Universidad de Chile, La Pintana, Santiago, Chile  
<https://orcid.org/0000-0002-4562-7312>

\* Autor para correspondencia E-mail: [ihomer@uchile.cl](mailto:ihomer@uchile.cl)

#### RESUMEN

Este estudio evaluó el rendimiento de cuatro diseños de transmisión de energía a propulsión humana para riego agrícola. En tres diseños se conectó directamente una bicicleta a una bomba de agua, y en uno se utilizó un alternador de automóvil para alimentar de energía eléctrica a la bomba. Se evaluó el desempeño para determinar la eficiencia de transmisión mediante curvas características de la bomba, midiendo caudal de entrega ( $L \text{ min}^{-1}$ ), elevación (m), fuerza ejercida sobre el pedal (N) y las revoluciones de pedaleo (RPM). El diseño donde se colocó la rueda sobre el rotor de la bomba (M4) fue el de mejor desempeño y el de menor costo de construcción, con un caudal máximo de  $36,78 L \text{ min}^{-1}$  a  $1,02 \text{ m}$  y una elevación máxima de  $20,04 \text{ m}$  con un caudal de  $12,48 L \text{ min}^{-1}$ . Las mayores eficiencias de transmisión de energía fueron del orden de 20%, con caudales entre  $13,35 L \text{ min}^{-1}$  y  $30,56 L \text{ min}^{-1}$  a elevaciones de 5 y 10 m.

**Palabras clave:** energía alternativa, diseño de bomba, rendimiento de bomba, potencia de pedal.

#### ABSTRACT

The aim of this study was to assess the performance of four power transmission models operated by human propulsion for field irrigation. A bicycle was directly connected to a pump in three of the models designed, while a car alternator was used to supply electric power to the pump in the other model. The performance of the models was evaluated by determining the highest efficiency using characteristic curves, including measurements of pump outlet flow ( $L \text{ min}^{-1}$ ), elevation (m), force applied to the pedal (N) and pedaling rate (RPM). The model in which a wheel was placed on the pump rotor (M4) had the highest performance and the lowest construction cost, with a maximum flow of  $36.78 L \text{ min}^{-1}$  at  $1.02 \text{ m}$  and a maximum elevation of  $20.04 \text{ m}$  with a flow of  $12.48 L \text{ min}^{-1}$ .

The efficiency values fluctuated between 3.90% and 21.17% during the preliminary evaluation. The highest power transmission efficiency rates were around 20%, with flows between 13.35 L min<sup>-1</sup> and 30.56 L min<sup>-1</sup> at elevations of 5.10 m and 10.20 m.

**Key words:** alternative energy, pump design, pump performance, pedal powered.

## INTRODUCCIÓN

La producción agronómica en gran parte del mundo no cuenta con fuentes de energías eficientes ni de bajo costo para poder llevar a cabo sus labores, como el procesamiento de alimentos o extracción de agua para riego de cultivos, basándose principalmente en la combustión de madera y petróleo (FAO, 2006; Ahamed et al., 2011). Producto de esta dependencia, la agricultura es considerada como una de las actividades que tiene un alto aporte en la emisión de gases de efecto invernadero (Baker et al., 2011). Por lo tanto, la transformación de las fuentes de energía que alimentan los sistemas agropecuarios, y en particular en zonas rurales (FAO, 2011), se ha transformado en una necesidad.

Es así como en Chile se han utilizado distintas fuentes de energías renovables no convencionales (ERNC), por ejemplo, el uso de paneles fotovoltaicos (Mekhilef et al., 2012; MINAGRI, 2013), energía eólica para la operación de equipos de riego (Xydis, 2015), energía hidráulica, como el sistema de ruedas de madera de Larmahue en la VI Región (De Las Casas, 2007), o el uso de combustibles derivados de la descomposición de residuos, tanto gases como líquidos. No obstante, la participación de las ERNC en el proceso productivo agrícola sigue siendo marginal, especialmente en zonas de difícil acceso (ODEPA, 2011). Algunas características que limitan su expansión son los altos costos de inversión con respecto a tecnologías que utilizan derivados del petróleo, el desconocimiento de las tecnologías disponibles, y la ausencia de un marco legal en cuanto a calidad, diseño y seguridad en las instalaciones (Hidalgo, 2006).

Entre las ERNC, existe una forma de producción de energía alternativa, no formalmente catalogada: la tracción humana. Este tipo de energía explora el potencial de la fuerza del ser humano ayudado de mecanismos de poleas y correas para distribuir y mejorar la eficiencia de la potencia disponible. Dentro de esta, el desarrollo de máquinas usando mecanismos de bicicletas, denominadas bicimáquinas (Tobella, 2011), ha liderado. Ejemplos son la bici-bomba de mecate (Patrón, 2012) y desgranadores de corontas de maíz (Marroquín, 2010), como también se ha usado directamente desde una bicicleta, o bien adaptando mecanismos para máquinas de lavar

ropa (Bhatawadekar et al., 2015; Jagushte et al., 2015; Ali et al., 2019), o peladoras y cortadoras de papas (Chand et al., 2013), o bien, máquinas de taller (Hiragar et al., 2019; Pawar et al., 2019).

El uso de mecanismos similares a los de las bicicletas data de finales del siglo XIX, sin embargo, con el uso del petróleo y sus derivados, estas máquinas fueron remplazadas, ya que presentaban mayores eficiencias de trabajo (De Decker, 2014). En la actualidad se han desarrollado máquinas a pedales capaces de realizar trabajos específicos, pudiendo adaptarse para realizar diferentes funciones, utilizando la energía mecánica o transformándola en energía eléctrica. Es así como existen generadores eléctricos que funcionan a pedales, donde una persona es capaz de generar entre 150 y 300 W de potencia, dependiendo de la duración y el esfuerzo en el pedaleo (Nuñez y Flores, 2011; De Decker, 2014) o adaptando el sistema para el uso con bicicletas estáticas de gimnasios, para generar 15 V y 2,5 A, con una eficiencia del sistema de 66,6% (Anyanwu y Anthony, 2016; Kumar et al., 2016). En la agricultura han sido implementadas en sistemas agrícolas pequeños, en donde lo que se produce se destina para autoconsumo o eventualmente puede ser comercializado a baja escala. En base a esto, es que este trabajo busca evaluar mecanismos alternativos para transportar agua y alimentar en sistemas agrícolas de pequeña a mediana producción, utilizando bicimáquinas.

## MATERIALES Y MÉTODOS

El diseño incluyó una plataforma móvil de madera, reforzada con perfiles de hierro, con un soporte para sostener una bicicleta. Los distintos mecanismos de transmisión de energía fueron implementados utilizando cadenas de bicicleta, correa de distribución de automóvil, piñones de 7 velocidades y poleas. Para la transformación de energía mecánica en energía eléctrica, se utilizó un alternador genérico de automóvil. Las pruebas se realizaron utilizando una bicicleta de montaña de rueda de 26 pulgadas (633 mm) de diámetro, con un sistema de transmisión de 3 cambios delanteros (Platos) y 7 cambios traseros (Piñones) (Tabla 1), con un total de 21 combinaciones de cambio (cc) y, por ende, 21 relaciones de transmisiones (RT), que estaría definida por:

**Tabla 1. Descripción de platos delanteros y piñones posteriores.**  
**Table 1. Description of front and rear gears.**

Platos delanteros		Piñones posteriores	
Nº platos	Nº de dientes	Nº piñones	Nº de dientes
1	28	7	14
2	38	6	16
3	48	5	18
		4	20
		3	22
		2	24
		1	34

$$RT = \frac{Z_1}{Z_2} \quad (\text{Ecuación 1})$$

donde:

Z<sub>1</sub>: Número de dientes plato de entrada

Z<sub>2</sub>: Número de dientes del piñón de salida

Para la prueba de bombeo se utilizó una bomba de agua, marca Humboldt modelo TPm-60 de 0,5 HP, con una presión y caudal máximo de 30 metros de columna de agua (mca) y 31 L min<sup>-1</sup> respectivamente, a 2850 RPM. El ensayo se estableció en el laboratorio de Mecanización Agrícola de la Facultad de Ciencias Agronómicas de la Universidad de Chile, el cual utilizó un sistema cerrado de agua, que consistió en un tambor abierto, con una altura de agua inicial de 0,15 m, conectado a la toma de succión de la bomba mediante una tubería de PVC de 32 mm de diámetro y una tubería de descarga de 1 m de largo y del mismo diámetro. En la parte superior de esta última se instaló una llave de paso para la regulación del caudal y presiones (Fig. 1).

Durante el estudio se determinaron las variables: 1) caudal de entrega de la bomba (L min<sup>-1</sup>), para lo cual se utilizó probeta de 2 L y un cronómetro (CASIO modelo W-729H, Tokio, Japón); 2) presión disponible (mca), utilizando un manómetro (BÜRENBERG, Broadheath, Manchester, Inglaterra); 3) fuerza ejercida sobre el pedal de la bicicleta, usando una galga extensiométrica (Smiths Industries, modelo MINTEX, Cleck Heaton, Yorkshire, Inglaterra), y 4) revoluciones de pedaleo, usando un contador de revoluciones óptico (Lutron modelo Digital Tachometer DT-2234B, Shanghai, China) y una aplicación de metrónomo digital (apps Soundcorset, Google Play Store. Seúl, Corea del Sur).

### Diseños ensayados

Se probaron cuatro modelos. El primer modelo (M1), funciona mediante el contacto

directo entre el rotor de la bomba y la rueda trasera de la bicicleta, la cual es responsable de la transmisión de movimiento desde la bicicleta a la bomba. El segundo (M2) corresponde a una transmisión de movimiento entre el piñón mayor de la bicicleta y un piñón ensamblado al eje rotor de la bomba, conectados entre sí por una cadena de bicicleta convencional. El tercer modelo (M3), está compuesto por una polea ensamblada al eje rotor de la bomba, la cual se conecta mediante una correa de distribución a la rueda trasera de la bicicleta (Fig. 2).

El cuarto modelo (M4), transforma la energía mecánica del pedaleo en energía eléctrica, usando un alternador de automóvil conectado a una batería, y ésta conectada a un convertidor de voltaje y un estabilizador (Fig. 3).

### Evaluaciones

Se realizaron tres tipos de pruebas, una preliminar, para seleccionar el modelo más eficiente, posteriormente una **más** detallada, donde se evaluó el modelo que presentó la mayor eficiencia en las pruebas, y por último, una **evaluación cuantitativa**, donde se propone la alternativa de almacenar agua a una altura determinada para alimentar un sistema domiciliario o agrícola.

**Evaluación preliminar.** Encada uno de los modelos se realizó un ensayo preliminar para seleccionar el modelo que sería utilizado para el desarrollo de pruebas más específicas, determinando en cada modelo la curva característica de la bomba a una revolución constante, que, según ecuación 1, fue a una frecuencia o cadencia de pedaleo de 60 RPM y la mayor relación de transmisión (RT) (Mayor revolución en la rueda, relación 3/7 de Tabla 1).

La fuerza motriz proveniente de la bicicleta se relaciona con la frecuencia o RPM (ecuación 2) y ésta, a su vez, depende de la fuerza aplicada sobre los pedales, según la relación de transmisión (RT)



Fig. 1. Sistema de transmisión de energía hacia una bomba de agua conectado (M1).  
 Fig. 1. Power transmission system connected to a water pump (M1).

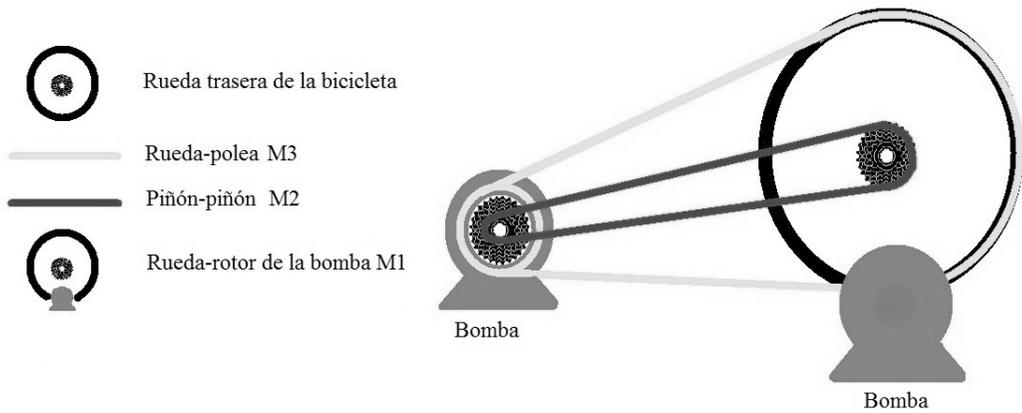


Fig. 2. Mecanismos de transmisión de energía mecánica bicicleta-bomba (M1, M2 y M3).  
 Fig. 2. Bicycle-pump mechanical power transmission mechanisms (M1, M2 and M3).

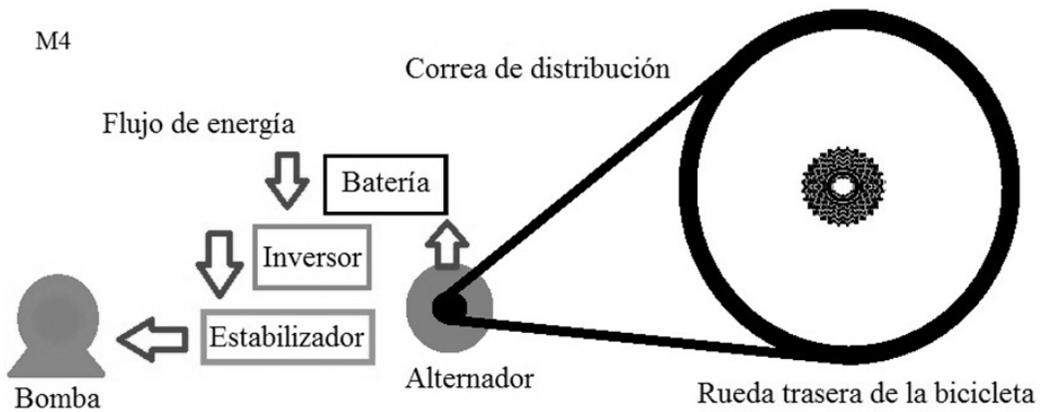


Fig. 3. Mecanismo de transformación de energía mecánica a energía eléctrica (M4).  
 Fig. 3. Mechanism for converting mechanical energy into electrical energy (M4).

escogida (Ecuación 1). La caracterización física se realizó a través de la estimación del trabajo ( $W$ , ecuación 4) y potencia ( $P$ , ecuación 6) producida por la bomba. La elevación (m.c.a), fue medida instalando el manómetro en la salida de agua de la bomba, junto a la llave de paso, ubicada en el tubo de descarga del sistema. De esta forma, se generaron intervalos de cierre de la llave cada 5 mca para la construcción de las curvas características (1,02; 5,10; 10,20; 15,30 y 20,40 mca).

La medición del caudal ( $L \text{ min}^{-1}$ ) entregado por la bici-bomba se midió registrando el tiempo de llenando de la probeta de 2 L de capacidad, usando el cronómetro.

Se calcularon las revoluciones de funcionamiento de la bomba mediante la siguiente fórmula (Márquez, 2011):

$$R_1 \cdot RPM_1 = R_2 \cdot RPM_2 \quad (\text{Ecuación 2})$$

$R_1$  : Número de dientes o diámetro del engranaje conductor

$RPM_1$  : Revoluciones del engranaje conductor (equivalente a cadencia de pedaleo)

$R_2$  : Número de dientes o diámetro del engranaje conducido

$RPM_2$  : Revoluciones del engranaje conducido

**Potencia y eficiencia del sistema.** La fuerza aplicada sobre el pedal se midió instalando una galga extensiométrica, para luego calcular la fuerza generada por la rueda trasera de la bicicleta ( $F_{RB}$ ), utilizando la siguiente fórmula (Kumar et al., 2016):

$$F_{RB} = F_m \cdot \frac{b}{d} \cdot \frac{m}{n} \quad (\text{Ecuación 3})$$

$F_m$  : Fuerza aplicada sobre el pedal (N)

$d$  : Diámetro de la rueda trasera de la bicicleta (polea motriz)

$b$  : Longitud de la biela

$n$  : Número de dientes del plato

$m$  : Número de dientes del piñón

Para cuantificar el trabajo realizado por la rueda trasera ( $W_{RB}$ ) se utilizó (Serway y Jewett, 2008):

$$W_{RB} = F_{RB} \cdot \pi \cdot d \quad (\text{Ecuación 4})$$

$F_{RB}$  : Fuerza generada por la rueda de la bicicleta (N)

$d$  : Diámetro de la rueda trasera de la bicicleta (m)

La potencia generada por la rueda de la bicicleta ( $P_{RB}$ ) ( $W$ ), se calculó usando la siguiente expresión (Serway y Jewett, 2008):

$$P_{RB} = W_{RB} \cdot RPM_{\text{pedal}} \quad (\text{Ecuación 5})$$

La potencia de funcionamiento de la bomba ( $P_{\text{bomba}}$ ) ( $W$ ) se calculó a partir de la siguiente fórmula:

$$P_{\text{bomba}} = \frac{Q \cdot H \cdot \gamma}{0,102 \cdot Efb} \quad (\text{Ecuación 6})$$

$Q$  : Caudal ( $m^3 \text{ s}^{-1}$ )

$H$  : elevación (m.c.a)

$\gamma$  : Peso específico del fluido ( $N \text{ m}^{-3}$ )

$Efb$  : Eficiencia de la bomba (%)

$0,102$  : factor de conversión de unidades

La eficiencia ( $Eft$ ) de transmisión de energía se calculó como el cociente entre la potencia generada por la bomba y la potencia generada por la bicicleta. Así, se obtuvo la proporción en la que se transfiere energía desde la bicicleta a la bomba, expresándose en porcentaje:

$$Eft (\%) = (P_{\text{bomba}} P_{RB}^{-1}) \cdot 100 \quad (\text{Ecuación 7})$$

$P_{\text{bomba}}$  : Potencia generada por la bomba ( $W$ )

$P_{RB}$  : Potencia generada por la bicicleta ( $W$ )

**Evaluación detallada.** Esta evaluación se realizó para el modelo que presentó la mayor eficiencia en las pruebas preliminares. Se realizó un análisis detallado mediante la construcción de curvas características de la bomba las cuales representan una forma de especificar su funcionamiento en base a las variables elevación, eficiencia y potencia en función del caudal (Bansal, 2005). Las cadencias de pedaleo utilizadas fueron 55, 60 y 70 RPM, las cuales, entre 55 y 65 RPM, no alteran la demanda de oxígeno para una persona (Vercruyssen y Brisswalter, 2010), mientras que con 70 RPM el esfuerzo se incrementa, pero sin llegar a duplicar la frecuencia cardiaca de una persona en descanso (Humanes y Cogolludo, 2019). Las combinaciones de cambio (**cc**) utilizadas se clasificaron en tres grupos, según su RT. El primer grupo de valores de RT mayores

a 3, el segundo grupo de valores entre 3 y 2, y el tercer grupo valores entre 2 y 1. De esta manera se escogieron dos cc por grupo para realizar las pruebas.

**Evaluación cuantitativa.** Con el fin de cuantificar el desempeño de una aplicación práctica del diseño seleccionado, se consideraron dos situaciones, el tiempo de llenado de estanque de 600 L ( $T_1$ ), tomando en cuenta un potencial uso domiciliario y un estanque de 2400 L ( $T_2$ ), proyectando regar 100 m<sup>2</sup> de lechugas en un huerto de agricultura familiar por 4 días, o bien 400 m<sup>2</sup> bombeando todos los días asumiendo un consumo de 60 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> (Saavedra et al., 2017) Se determinó la cadencia de pedaleo y las cc más adecuadas a 5,1 y 10,2 mca. Además, se relacionó cada modo de accionar el diseño seleccionado con el esfuerzo humano, presentando la fuerza ejercida en el pedal de la bicicleta ( $F_m$ ).

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Diseño de mecanismos de transmisión bicicleta-bomba

#### Evaluación de los diseños

Al comparar los modelos, M1 presentó los mejores resultados entregando un caudal máximo de 36,78 L min<sup>-1</sup> a 1,02 m de altura, y una elevación máxima de 20,04 m con un caudal de 12,48 L min<sup>-1</sup>. También presentó la máxima eficiencia de 21,17% (Tabla 2). Por el otro lado, M3 registró un caudal máximo de 14,49 L min<sup>-1</sup> y una elevación máxima de 5,10 m, no superando un 10% de eficiencia en ninguno de los casos. El mecanismo del M2 no logró hacer funcionar la bomba, dado que la fuerza ejercida sobre el pedal provocaba la salida de la cadena que conectaba el piñón de la bicicleta con el piñón de la bomba. Esta situación se le atribuyó al movimiento o vibración de la bicicleta sobre el soporte, a ciertas

cadencias de pedaleo. Es por ello que se sugiere, para este tipo de modelo, fijar la bicicleta a una superficie rígida. Para la evaluación del M4 se cargó la batería durante 60 minutos de pedaleo, lo cual permitió hacer funcionar la bomba durante 2 minutos, entregando un caudal de 29,48 L min<sup>-1</sup> a 5,10 m de elevación.

Considerando los resultados preliminares de los modelos, se observa que el M1 registró la mayor entrega de caudal con respecto al M3 y M4, a una elevación de 5,10 m, junto con mostrar una mayor eficiencia de transmisión de energía respecto al resto de los modelos (15,58%), como lo muestra la Tabla 2. Con respecto al M4, se requiere más de 60 minutos de pedaleo para lograr cargar la batería, lo cual también hace que el M1 sea una mejor alternativa, por dicha razón se seleccionó el modelo M1 para la realización de ensayos más detallados.

### Evaluación detallada M1

#### M1 a 55 RPM

En la Fig. 4 se observa que, utilizando la cc 3-7, se alcanzan los mayores caudales en todas las elevaciones, con un máximo de 29,33 L min<sup>-1</sup> a 1,02 m. Además, esta cc alcanzó la máxima elevación con 20,40 m, entregando 4,34 L min<sup>-1</sup>. Luego, la cc 3-6 registra un caudal máximo de 22,58 L min<sup>-1</sup> a 1,02 m, alcanzando una elevación máxima de 15,30 m, con un flujo de 5,42 L min<sup>-1</sup>. La cc 3-5 entregó mayores caudales con respecto a la cc 2-6 a elevaciones de 1,02 m, 5,10 m y 10,20 m, con flujos de 22,04, 15,83 y 8,38 L min<sup>-1</sup>, respectivamente. Si bien ambas cc alcanzaron una máxima elevación de 15,30 m, es la cc 2-6 la que entrega un mayor caudal con 1,31 L min<sup>-1</sup> respecto de la cc 3-5, la cual entrega 0,53 L min<sup>-1</sup>.

En cuanto a eficiencia, la cc 3-5 registró la eficiencia de transmisión de energía más alta de todas las cc, con un 22,90%, entregando un caudal de 15,83 L min<sup>-1</sup>. Luego, la cc 2-6 registra una

**Tabla 2. Modelos a una cadencia de pedaleo de 60 revoluciones por minuto (RPM).**  
**Table 2. Models at a pedaling rate of 60 revolutions per minute (RPM).**

Modelo	cc / RT	Bomba PRB	Elevación (m)	Q (L min <sup>-1</sup> )	R <sub>PM</sub> (W)	P <sub>bomba</sub> (W)	Ef (%)
M1	3-7/3,42	2971	1,02	36,78	157,02	6,13	3,90
			5,10	35,23	188,42	29,35	15,58
			10,20	26,61	209,36	44,33	21,17
			15,30	16,74	261,70	41,83	15,99
			20,40	12,48	261,70	41,60	15,90
M3	3-7/3,42	1337	1,02	14,49	41,87	2,41	5,76
			5,10	6,57	62,81	5,47	8,71

cc: combinación cambios; RT: relación de transmisión.

máxima de 21,70%, con un caudal de 15,03 L min<sup>-1</sup>, la cc 3-7 presentó una máxima eficiencia de 16,10% con un caudal de 27,81 L min<sup>-1</sup> y la cc 3-6 registra la menor eficiencia de todas las combinaciones con un 15,00%. Las máximas eficiencias de cada cc se alcanzaron a una elevación de 5,10 m (Fig. 4 y 5).

**M1 a 60 RPM**

La Fig. 6 muestra que la cc 3-7 es la que entrega un mayor caudal respecto a las demás cc en todas las elevaciones, con un caudal máximo de 36,78 L min<sup>-1</sup> a 1,02 mca. La máxima elevación fue de 20,40 m, al igual que la cc 3-6, entregando caudales de 12,48 y 4,15 L min<sup>-1</sup>, respectivamente. La cc 3-6

entregó mayores caudales que las cc 3-5 y 2-6 en todas las elevaciones, con un máximo de 29,39 L min<sup>-1</sup> a 1,02 m. Mientras la cc 3-5 alcanzó un flujo máximo de 24,47 L min<sup>-1</sup> a 1,02 m, y un mínimo de 1,64 L min<sup>-1</sup> a 15,30 m. La cc 2-6 registró un caudal máximo de 22,70 L min<sup>-1</sup> a 1,02 m y un caudal mínimo de 1,40 L min<sup>-1</sup> a 15,30 m de elevación.

La cc 3-6 alcanzó la mayor eficiencia con respecto al resto de las cc, con un 23,40%, entregando un caudal de 17,66 L min<sup>-1</sup> a una elevación de 10,20 m. Posteriormente, la cc 2-6 registró una eficiencia máxima de 21,40% a una altura de 5,10 m, con un caudal de 16,13 L min<sup>-1</sup>. La cc 3-7 registró una máxima eficiencia de 21,20% a 10,20 m, con un caudal de 26,61 L min<sup>-1</sup>

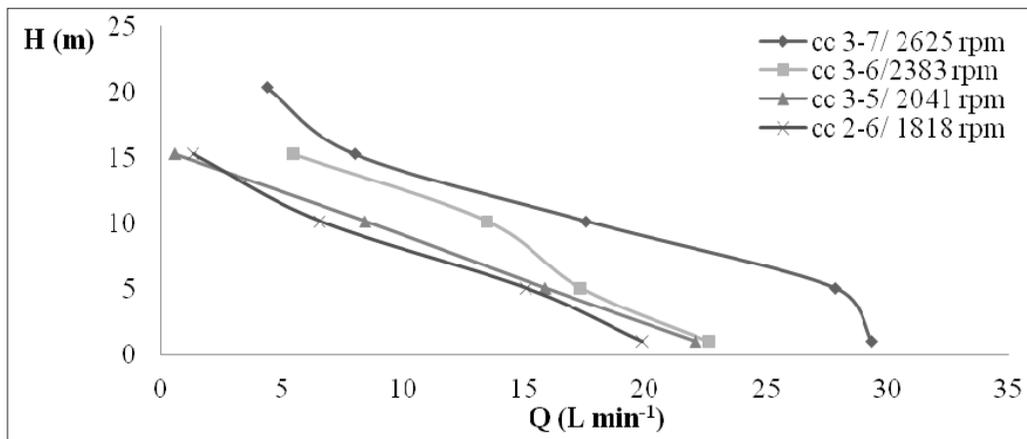


Fig. 4. Curvas características H (m) versus Q (L min<sup>-1</sup>); información de la serie corresponde a cc/ revoluciones de la bomba.

Fig. 4. Characteristic curves H (m) versus Q (L min<sup>-1</sup>); series information corresponds to cc/ pump revolutions.

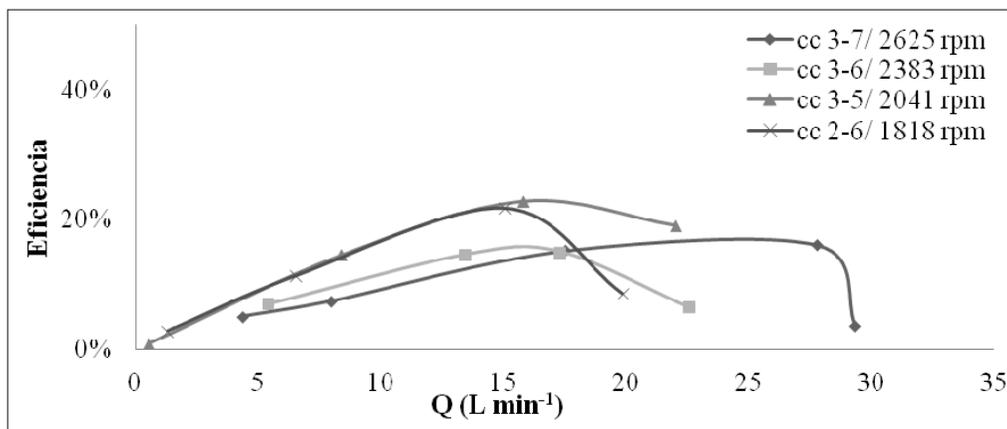


Fig. 5. Curva de eficiencia (%) versus Q (L min<sup>-1</sup>); información de la serie corresponde a cc/revoluciones de la bomba.

Fig. 5. Efficiency curve (%) versus Q (L min<sup>-1</sup>); series information corresponds cc/pump revolutions.

y la cc 3-5 presentó la menor eficiencia del grupo de cc con un 13,60% con un flujo de 20,45 L min<sup>-1</sup> a 5,10 m (Figs. 6 y 7).

L min<sup>-1</sup> a 1,02 m y un mínimo de 6,79 L min<sup>-1</sup> a 20,40 m.

**M1 a 70 RPM**

La Fig. 8 muestra que la cc 3-6 presenta los mayores caudales a todas las elevaciones respecto del resto de las cc, con un máximo de 35,64 L min<sup>-1</sup> a 1,02 m. Mientras la máxima elevación fue de 20,40 m entregando 10,20 L min<sup>-1</sup>. Luego, la cc 3-7 entrega registró un máximo caudal de 30,69

La cc 3-5 presenta un caudal máximo de 29,03 L min<sup>-1</sup> a 1,02 m de elevación y un caudal mínimo de 6,55 L min<sup>-1</sup> a 20,40 m, valores de flujo y elevación que son superiores los registrados mediante la cc 2-6, la cual presenta un caudal máximo de 23,27 L min<sup>-1</sup> a 1,02 m y un caudal mínimo de 9,01 L min<sup>-1</sup> a solo 15,30 m.

En base a la Fig. 9, la mayor eficiencia de todas las cc la alcanza la cc 2-6 con 26,90%, entregando

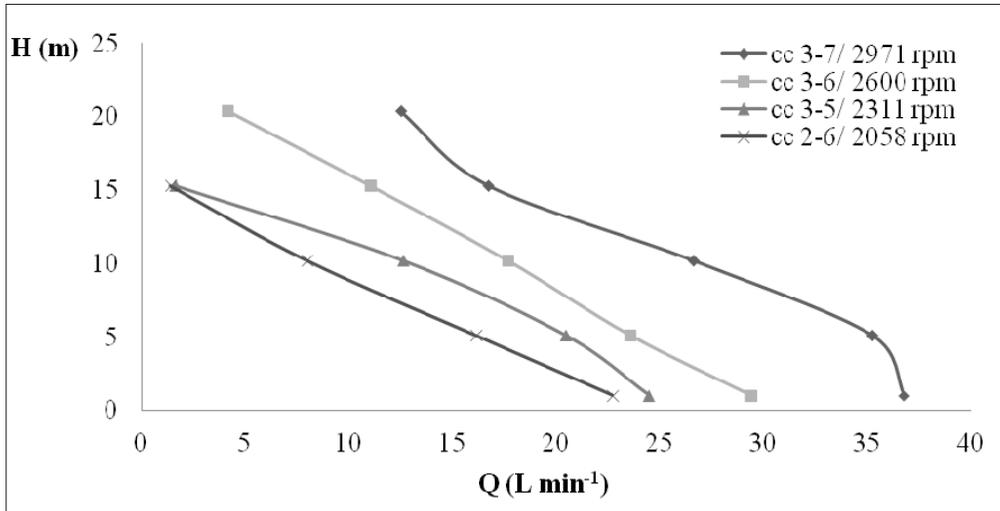


Fig. 6. Curvas características H (m) versus Q (L min<sup>-1</sup>); información de la serie corresponde a cc/ revoluciones de la bomba.

Fig. 6. Characteristic curves H (m) versus Q (L min<sup>-1</sup>); series information corresponds to cc/ pump revolutions.

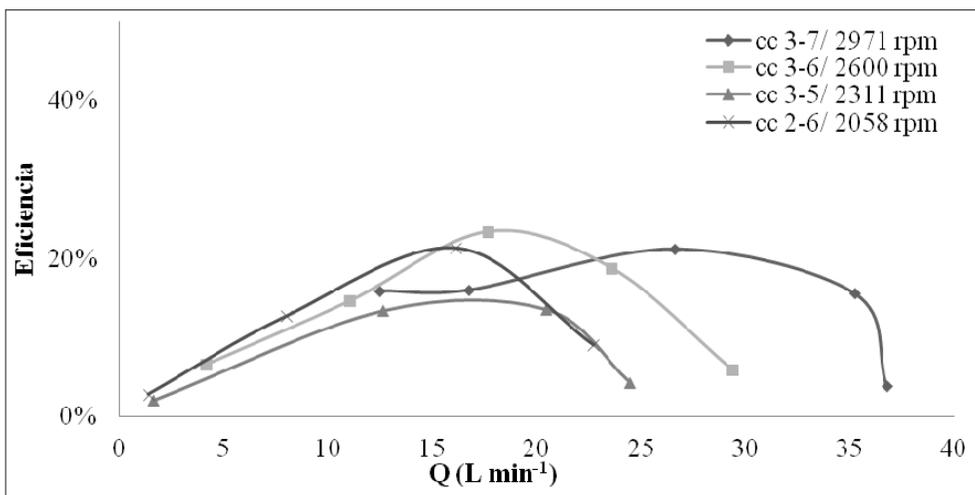


Fig. 7. Curva de eficiencia (%) versus Q (L min<sup>-1</sup>); información de la serie corresponde a cc/revoluciones de la bomba.

Fig. 7. Efficiency curve (%) versus Q (L min<sup>-1</sup>); series information corresponds to cc/ pump revolutions.

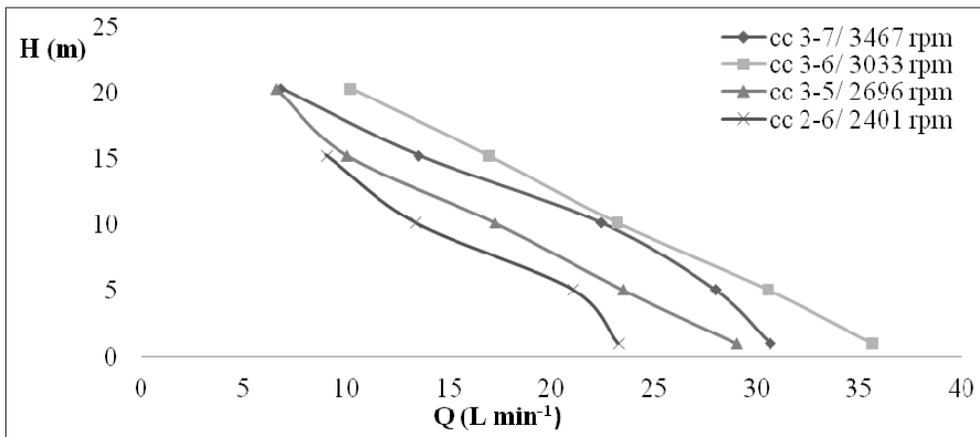


Fig. 8. Curvas características H (m) versus Q (L min<sup>-1</sup>); información de la serie corresponde a cc/ revoluciones de la bomba.

Fig. 8. Characteristic curves H (m) versus Q (L min<sup>-1</sup>); series information corresponds to cc/ pump revolutions.

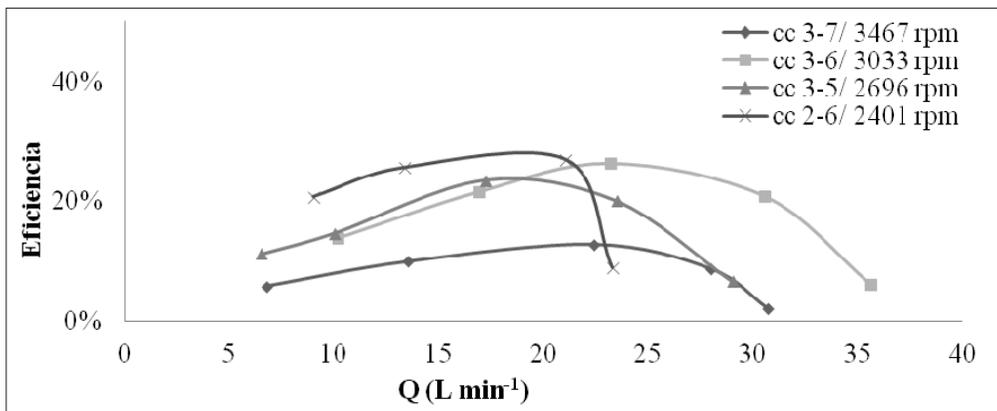


Fig. 9. Curva de eficiencia (%) versus Q (L min<sup>-1</sup>); información de la serie corresponde a cc/ revoluciones de la bomba.

Fig. 9. Efficiency curve (%) versus Q (L min<sup>-1</sup>); series information corresponds to cc/ pump revolutions.

un caudal de 21,06 L min<sup>-1</sup> a una elevación de 5,10 mca. En la misma cc, se destaca un 25,60% de eficiencia, la cual también es mayor al resto de las cc, exceptuando la cc 3-6, con un caudal de 13,35 L min<sup>-1</sup> a 10,20 m.

Luego, la cc 3-6 presenta una máxima eficiencia de 26,40%, con un caudal de 23,19 L min<sup>-1</sup> a 10,20 m de elevación. Posteriormente, la cc 3-5 alcanza la mayor eficiencia de 23,50% con un caudal de 17,21 L min<sup>-1</sup> a una elevación de 10,20 m. La cc 3-7 registra la menor eficiencia de todas las cc con 12,70% con un flujo de 22,41 L min<sup>-1</sup> a 10,20 m de elevación.

#### Eficiencia de transmisión

Las figuras que se presentan a continuación muestran cómo varía la potencia de la bomba

$P_{bomba}$  en función de la potencia de la rueda de la bicicleta  $P_{RB}$  y aunque dicha tendencia tiene un efecto, debido a la eficiencia, también describe el efecto del patinaje entre la rueda de la bicicleta y el rotor de la bomba, apreciándose, en las Figs. 10, 11 y 12, que existe una relación proporcional entre la  $P_{RB}$  y la  $P_{bomba}$ ; sin embargo, esta relación se vuelve inversamente proporcional una vez que se alcanza un punto máximo, lo cual indica que existe un límite en cada curva en donde la energía del pedaleo se disipa sin transmitirse a la bomba. Considerando que la  $P_{bomba}$  está en función del caudal y la elevación, los rangos en donde la relación entre la  $P_{RB}$  y la  $P_{bomba}$  es inversamente proporcional, se explica por la disminución de caudal de entrega de la bomba a medida que aumenta la elevación, limitando la transmisión

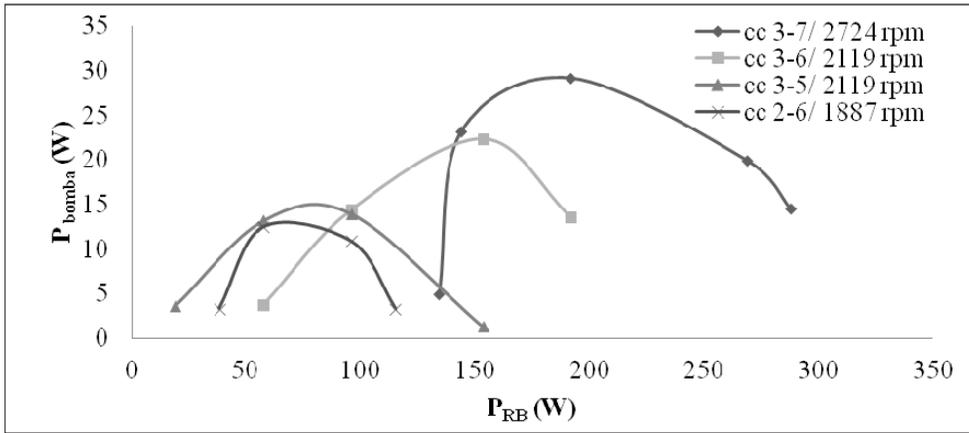


Fig. 10. Potencia de la rueda de la bicicleta ( $P_{RB}$ ) versus potencia de la bomba ( $P_{bomba}$ ) a 55 RPM.  
 Fig. 10. Bicycle wheel power ( $P_{RB}$ ) versus pump power ( $P_{pump}$ ) at 55 RPM.

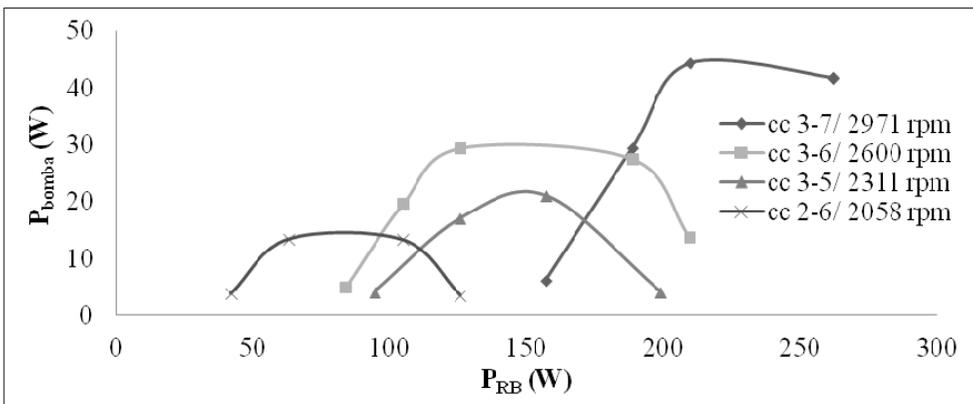


Fig. 11. Potencia de la rueda de la bicicleta ( $P_{RB}$ ) versus potencia de la bomba ( $P_{bomba}$ ) a 60 RPM.  
 Fig. 11. Bicycle wheel power ( $P_{RB}$ ) versus pump power ( $P_{pump}$ ) at 60 RPM.

de energía y por ende la eficiencia.

En la Fig. 10, se muestra que, bajo esta condición, se requiere ejercer una  $P_{RB}$  de 57,57 W, para elevar a 5,1 m un caudal de 15,83 L min<sup>-1</sup>, con una  $P_{bomba}$  resultante de 13,19 W. En 10,2 m, la relación entre  $P_{RB}$  y la  $P_{bomba}$  se mantiene proporcional, pero con una menor eficiencia, para luego transformarse en una relación inversamente proporcional, asociada el efecto de patinaje. Este comportamiento es común para las cc 3-7 y 3-6. Mientras que para la cc 2-6, la relación  $P_{RB}$  versus  $P_{bomba}$  se vuelve inversamente proporcional a 10,2 m, inmediatamente después de alcanzar su máxima eficiencia a 5,1 m. Los resultados de la figura 10 muestran que el funcionamiento que presentar la mayor eficiencia del M1 a 55 RPM fue utilizando la cc 3-5.

Para la cadencia de 60 RPM la mayor eficiencia fue alcanzada en cc 3-6, requiriendo una  $P_{RB}$  de 125,61 W (Fig. 11), entregando un caudal de 17,66

L min<sup>-1</sup> a 10,2 m de elevación. Inmediatamente después de esta condición de máxima eficiencia, la relación es inversamente proporcional entre la  $P_{RB}$  y  $P_{bomba}$ , comportamiento similar para las cc 3-7 y 2-6 en donde la caída ocurre a 15,3 m y 10,2 m, respectivamente, exceptuando la cc 3-5, en donde después de alcanzar su máxima eficiencia a 5,1 m (Fig. 11), se mantiene una relación proporcional entre la  $P_{RB}$  y  $P_{bomba}$  a 10,2 m con una menor eficiencia, para posteriormente (15,3 m) transformarse en una relación inversamente proporcional.

La cc 2-6 presenta la mayor eficiencia (Fig. 9), requiriendo una  $P_{RB}$  de 65,26 W, desarrollando una  $P_{bomba}$  de 17,54 W (Fig. 12), elevando a 5,1 m un flujo de 21,06 L min<sup>-1</sup>. La cc 2-6 es la única que mantiene una relación proporcional entre la  $P_{RB}$  y la  $P_{bomba}$ , dado que esta cc presenta una relación de transmisión (2,38) requiriendo de una menor fuerza aplicada sobre el pedal al aumentar

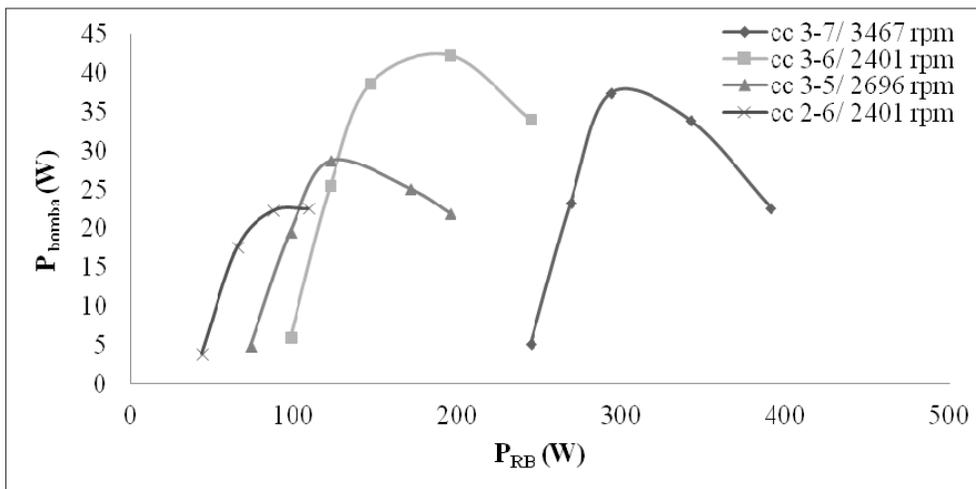


Fig. 12. Potencia de la rueda de la bicicleta ( $P_{RB}$ ) versus potencia de la bomba ( $P_{bomba}$ ) a 70 RPM.  
Fig. 12. Bicycle wheel power ( $P_{RB}$ ) versus pump power ( $P_{bomba}$ ) at 70 RPM.

la cadencia de pedaleo, lo cual se refleja en los valores de potencia alcanzada con respecto a las demás *cc*, disminuyendo el efecto de patinaje de la rueda de la bicicleta sobre el rotor de la bomba.

Respecto al resto de las *cc*, la relación entre  $P_{RB}$  y la  $P_{bomba}$  fue inversa inmediatamente después de la máxima eficiencia a 10,2 m de elevación para 3-7 y 3-5, mientras que para la *cc* 3-6, después de alcanzar su máxima eficiencia se mantiene una relación proporcional hasta los 15,3 m, para luego transformarse en una relación inversamente proporcional.

La relación entre la  $P_{RB}$  y la  $P_{bomba}$  a 55 y a 60 RPM, se observa un comportamiento inversamente proporcional a 15,3 y 20,4 m de elevación en todas las *cc* (Figs. 10 y 11). A 70 RPM, se observa el mismo comportamiento, excepto para las *cc* 2-6 y 3-6, sin embargo, estas presentan bajas eficiencias del orden de 8,9% y 6,1%, respectivamente, en comparación con el resto de las elevaciones (Fig. 12). Esto se explica por el efecto de patinaje de la rueda sobre el rotor de la bomba, lo cual provoca que la potencia ejercida por la bicicleta no se refleje en un aumento de potencia de la bomba.

Las elevaciones adecuadas de funcionamiento del M1 fueron a 5,1 m y 10,2 m, ya que presenta las mayores eficiencias y mantiene una relación proporcional entre  $P_{RB}$  y la  $P_{bomba}$  en la mayoría de las *cc* (Figs. 10, 11 y 12), exceptuando en la *cc* 2-6 a 55 y 60 RPM a 10,2 m (Figs. 10 y 11).

### Evaluación cuantitativa

Se determinó el modo óptimo de accionar, bajo los criterios de caudal y eficiencia del M1 identificando la cadencia de pedaleo y las *cc* más adecuadas a 5,1 m (Tabla 3) y 10,2 m (Tabla 4). Además, se relacionó cada modo de accionar

el M1 con el esfuerzo humano, presentando la fuerza ejercida en el pedal de la bicicleta ( $F_m$ ).

Según la Tabla 3, las cadencias de pedaleo más adecuadas para alcanzar una elevación de 5,1 m fueron 55 y 70 RPM. Por lo tanto, es posible accionar el M1 utilizando la *cc* 2-6 a 70 RPM, ejerciendo  $F_m$  de 6 kg si se requiere la mayor eficiencia. En el caso de llenar un estanque para uso domiciliario demoraría un tiempo de 28 minutos, mientras que para un estanque que alimente un huerto de autoconsumo demoraría 114 minutos. El menor tiempo para llenar ambos estanques se registra utilizando la *cc* 3-6 a 70 RPM aplicando una  $F_m$  de 10 kg, demorando 20 minutos para el contenedor de 600 L y 79 minutos para el de 2400 L. Si se requiere disminuir el esfuerzo, es posible manteniendo una cadencia de pedaleo de 55 RPM con una *cc* 3-5 ejerciendo una  $F_m$  de 6 kg, siendo más eficiente que la *cc* 2-6, pudiendo llenar un estanque de 600 L en 38 minutos y uno de 2400 L en 152 minutos.

En base a la Tabla 4, las cadencias de pedaleo más adecuadas para alcanzar una elevación de 10,2 m fueron 60 y 70 RPM, ya que presentan los mayores caudales y las mejores eficiencias. El M1 puede ser accionado utilizando la *cc* 3-6 a 70 RPM, si se requiere un funcionamiento con eficiencia máxima. El llenado de un estanque para uso domiciliario demoraría un tiempo de 45 minutos, mientras que para un huerto de autoconsumo demoraría 103 minutos. El menor tiempo para llenar ambos estanques se alcanza, utilizando la *cc* 3-7 a 60 RPM, aplicando una  $F_m$  de 20 kg, demorando 23 minutos para el contenedor de 600 L y 90 minutos para el de 2400 L. Manteniendo la cadencia de pedaleo, es posible disminuir el esfuerzo modificando la *cc* a 3-6, ejerciendo una

**Tabla 3. Tiempo de llenado de un estanque de 600 L ( $T_1$ ) y de 2400 L ( $T_2$ ) a 5,1 m de elevación.**  
**Table 3. Filling time of water tanks of 600 L ( $T_1$ ) and 2400 L ( $T_2$ ) at 5.1 m.**

RPM	cc	F <sub>m</sub> (kg)	Q (L min <sup>-1</sup> )	Ef (%)	T <sup>1</sup> (min)	T <sup>2</sup> (min)
55	3-5	6	15,83	22,9	38	152
	2-6	6	15,03	21,7	40	160
70	3-6	10	30,56	20,8	20	79
	2-6	6	21,06	26,9	28	114

RPM: cadencia de pedaleo; cc: combinación cambios; F<sub>m</sub>: fuerza aplicada sobre el pedal; Ef: eficiencia.

**Tabla 4. Tiempo de llenado de un estanque de 600 L ( $T_1$ ) y de 2400 L ( $T_2$ ) a 10,2 m de elevación.**  
**Table 4. Filling time of water tanks of 600 L ( $T_1$ ) and 2400 L ( $T_2$ ) at 10.2 m.**

RPM	cc	F <sub>m</sub> (kg)	Q (L min <sup>-1</sup> )	Ef (%)	T <sup>1</sup> (min)	T <sup>2</sup> (min)
60	3-7	20	26,61	21,2	23	90
	3-6	12	17,66	23,4	34	136
70	3-6	12	23,19	26,4	26	103
	3-5	10	17,21	23,5	35	139

RPM: cadencia de pedaleo; cc: combinación cambios; F<sub>m</sub>: fuerza aplicada sobre el pedal; Ef: eficiencia.

F<sub>m</sub> de 12 kg, pudiendo llenar el estanque de 600 L en 34 minutos y el de 2400 L en 136 minutos. Aplicando la misma F<sub>m</sub> y manteniendo la cc, pero aumentando la cadencia de pedaleo a 70 RPM, es posible llenar el estanque de uso domiciliario en 26 minutos y el contenedor para el huerto de autoconsumo en 103 minutos.

## CONCLUSIONES

Según la evaluación del diseño y rendimiento de los cuatro modelos construidos, el M1 entregó una mayor capacidad de entrega de caudal y una mayor capacidad de elevación del agua, presentando las mejores eficiencias en el funcionamiento y de menor costo de construcción.

Este tipo de tecnología es aplicable para sistemas agrícolas o de uso domiciliario que no demanden una presión de operación mayor a 10 mca. Las mejores eficiencias de transmisión de energía fueron encontradas en el diseño M1 y fluctúan entre 20,85 y 26,88%, dependiendo de las combinaciones de cambio y la cadencia de pedaleo que se utilice, con caudales que van desde 13,35 L min<sup>-1</sup> y 30,56 L min<sup>-1</sup> a elevaciones de 5,10 m y 10,20 m. A estas elevaciones, se presentan las menores pérdidas de energía.

Estos resultados demostraron que es factible diseñar y construir mecanismos a propulsión humana a bajo costo, para accionar bombas de

agua que puedan alimentar un sistema de riego, de bajas necesidades de potencia, utilizando partes de bicicletas y automóviles en desuso.

## LITERATURA CITADA

- Ahamed, J., R. Saidur, H. Masjuki, S. Mekhilef, M. Ali, and M. Furqon. 2011. An application of energy and exergy analysis in agricultural sector of Malaysia. *Energy Policy* 39:7922–7929. doi:10.1016/j.enpol.2011.09.045
- Ali, A., K.S. Yadav, and A. Yadav. 2019. Mechanical washing machine. *International Journal of Research in Engineering, Science and Management* 2(6):76-80
- Anyanwu, S.I., and A.E. Anthony. 2016. Design and fabrication of a pedal operated power generator. *Innovative Systems Design and Engineering* 7(3):1-14.
- Baker, J., B. Murray, B. McCarl, S. Rose, and J. Schneck. 2011. Greenhouse gas emissions and nitrogen use in U.S. agriculture: Historic trends, future projections, and biofuel policy impacts. Nicholas Institute for Environmental Policy Solutions. Report NI R 11. Available at <http://nicholasinstitute.duke.edu/climate/policydesign/greenhouse-gas-emissions-and-nitrogen-use-in-u.s.-agriculture>. (Accessed 11 november 2017).

- Bansal, R. 2005. Fluid mechanics and hydraulic machines. 9na Edición. Laxmi publication (P) LTD: 22, Golden House, Daryaganj, New Delhi-110002. 479p.
- Bhatawadekar, G., B. Salman, N. Chiplunkar, S. Devrukhakar, and S. Akashdeep. 2015. Design and fabrication of pedal powered washing machine. *International Journal of Engineering Research and General Science* 3:1307-1311.
- Chand, K., R.K. Pandey, N.C. Shahi, and U. Lohani. 2013. Pedal operated integrated potato peeler and slicer. *Agricultural Mechanization in Asia, Africa, and Latin America* 44(1):65-68.
- De Las Casas, A. 2007. Las ruedas de Larmahue: pervivencia en Chile de un sistema hidráulico español. p. 205-216. En V Congreso Nacional de Historia de la Construcción. 9 junio 2007, Burgos, España. Sociedad Española de Historia de la Construcción (SEDHC), Madrid, España.
- De Decker, K. 2014. The short history of early pedal powered machines. *Low-tech Magazine*. Available at: <http://www.lowtechmagazine.com/2011/05/history-of-pedal-powered-machines.html> (Accessed 6 December 2014).
- FAO. 2006. Energy and gender in rural sustainable development. Food Agriculture Organization of the United Nations (FAO), Rome, Italy.
- FAO, 2011. Energy-smart, food for people and climate. Food Agriculture Organization of the United Nations (FAO). Issue Paper. Rome, Italy.
- Hidalgo, P. 2006. Proyecto de electrificación rural, localidad de Cámar, II Región, Antofagasta. Memoria Ingeniero Civil Electricista. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile. Santiago, Chile
- Hiragar, Y., K. Dantani, G. Prajapati, R. Kakani, and G.S. Virdi. 2019. Design and fabrication of pedal operated multi-purpose machine. *International Journal of Science Technology & Engineering* 4(10): 91-95.
- Humanes, A. y E. Collogudo. 2019. Valoración de la condición física e intervención de accidentes. Editex. Pozuelo de Alarcón, Madrid, España.
- Jagushte, G.S., A. Singh, G. Bhatawdekar, S. Budy, and N. Chiplunkar. 2015. Design and fabrication of pedal powered washing machine. *Journal of Advance Research in Mechanical & Civil Engineering* 2(3):68-71.
- Kumar, M., D. Kiran, and M.S. Naidu. 2016. Design and development of electric module for battery monitoring system and effective utilization of power (Power Generation by Manual Pedal). *International Journal of Advanced Technology and Innovative Research*. 8:4521-4530.
- Márquez, L. 2011. Tractores agrícolas: tecnología y utilización. B&H Grupo Editorial. Madrid, España.
- Marroquín, C. 2010. Pedal de fuerza molidor/desgranador. Maya Pedal. Disponible en: [http://www.mayapedal.org/corn\\_mill.pdf](http://www.mayapedal.org/corn_mill.pdf) (Consultado 12 Diciembre 2017).
- Mekhilef, S., S. Faramarzi, R. Saidur, and Z. Salam, Z. 2012. The application of solar technologies for sustainable development of agricultural sector. *Renew. Sust. Energ. Rev.* 18:583-594.
- MINAGRI. 2013. Ministerio de Agricultura inaugura sistemas de riego con energía solar que beneficiará a más de 200 agricultores de Petorca, Santiago, Chile. Ministerio de Agricultura (MINAGRI), Santiago, Chile. Disponible en: <http://www.minagri.gob.cl/ministerio-de-agricultura-inaugura-sistemas-de-riego-con-energia-solar-que-beneficiara-a-mas-de-200/> (Consulta 6 diciembre 2018).
- Nuñez, C. y J. Flórez. 2011. Diseño de un sistema de generación de energía eléctrica a partir de bicicletas estáticas. Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Electricista e Ingeniero Electrónico. Facultad de Ingenierías Físico Mecánicas, Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga, Colombia.
- ODEPA. 2011. La agroenergía en la encrucijada energética de la agricultura. Oficina de Estudios y Políticas Agrarias (ODEPA), Ministerio de Agricultura. Santiago, Chile.
- Patrón, M. 2012. Caracterización de bombas y bicibombas de mecate. Proyecto final de carrera Ingeniería Técnica Industrial. Universidad Carlos III de Madrid. Madrid, España.
- Pawar, S., A. Khandale, C. Punekar, G. Kayarkar, and P. Patil. 2019. Pedal operated drilling and grinding machine. *International Journal of Innovations in Engineering and Science* 4(4):6-8.
- Saavedra, G., F. Corradini, A. Antúnez, S. Felmer, P. Estay y P. Sepúlveda. 2017. Manual de producción de Lechuga. Boletín INIA N°374. Instituto de Investigaciones Agropecuarias, Centro de Investigación La Platina, Santiago, Chile.

- Serway, R. y J. Jewett. 2008. Física para ciencias e ingeniería. 7ª. ed. Paraninfo Madrid, España.
- Tobella, J. 2011. Diseño, montaje y ensayo de una bomba de mecate. Proyecto final de carrera Ingeniería Técnica Industrial especialidad mecánica. Universidad de Carlos III de Madrid, Madrid, España.
- Vercruyssen, F., and J. Brisswalter. 2010. Which factors determine the freely chose cadence during submaximal cycling? *J. Sci. Med. Sport* 13:225-231. doi:10.1016/j.jsams.2008.12.631.
- Xydis, A. 2015. Wind energy integration analysis using wind resource assessment as a decision tool for promoting sustainable energy utilization in agriculture. *J. Clean Prod.* 96:476-485. doi:10.1016/j.jclepro.2013.11.030