

MODELAGE, OPTIMIZACIÓN Y EVALUACIÓN DE UN CARNERO HIDRÁULICO ¹



Ricardo Nicolás Zárate Rojas ²
 Prof. Dr. Tarlei Arriel Botrel ³

ABSTRACT

This work was developed in the Hydraulics Laboratory of the Department of Rural Engineering at ESALQ/USP, with the goal of modeling, optimizing and evaluating a hydraulic ram. For this purpose it was developed a theoretical model validated in the laboratory through the construction of an electronic valve commanded by a computer. Through the filming of water jet and using method of the coordinates to determined the speed of water jet of the alimentation piping of the ram for three different heights and lengths. Afterwards it was built the hydraulic ram in PVC, being used an electronic valve as pulse valve, and using the microprocessor Basic Step, was obtained different times to the shutdown of the valve, varying between 0,2 s and 1,6 s. Two materials were tried as alimentation piping, PVC 25mm nominal diameter and galvanized steel 19,05 mm nominal diameter for three alimentation lengths. The maximum flow obtained was 224 L/h, being the pressure 54 kPa, having as alimentation piping PVC, and the height of alimentation of 2,23 m, for a time of shutdown of electronic valve of 0,2 s. The better obtained performance was 62%, being the alimentation piping of PVC, for a time of shutdown of 0,2 s with a pressure 74 kPa and a flow of 112 L/h.

RESUMEN

Este trabajo fue realizado en el Laboratorio de Hidráulica del Departamento de Ingeniería Rural de la ESALQ/USP, de Piracicaba, Brasil, con el objetivo de modelar, optimizar y evaluar un carnero hidráulico. Para eso fue desarrollado un modelo teórico, validado en el laboratorio a través de la construcción de una electroválvula comandada electrónicamente por computador. Posteriormente fue construido el carnero hidráulico en PVC, siendo utilizada la electroválvula como válvula de escape y por medio de un microprocesador se obtuvieron diferentes tiempos para el cierre de la válvula, variando entre 0,2 s y 1,6 s. Fueron evaluados dos materiales como tubería de alimentación, PVC y acero galvanizado de 25 mm y 19,05 mm de diámetro nominal respectivamente para tres longitudes y alturas de alimentación. El máximo caudal de recalque fue de 224 L/h, siendo la presión de recalque de 54 kPa, siendo la tubería de alimentación de PVC y la altura de alimentación de 2,23 m, para un tiempo de cierre de la electroválvula de 0,2 s. El mayor rendimiento fue de 62 % siendo la tubería de alimentación de PVC, para un tiempo de cierre de 0,2 s con una presión de 74 kPa y caudal de recalque de 112 L/h.

Key words: Hydraulic Ram, electronic valve, microprocessor, modeling, evaluation, flow, revenue, PVC, galvanized steel.

Palabras clave: Carnero hidráulico, electroválvula, microprocesador, modelage, evaluación, caudal, rendimiento, PVC, acero galvanizado.

¹ Parte de la tesis «Modelagem, otimização e avaliação de um Carneiro Hidráulico» a ser defendida en la Escuela Superior de Agricultura «Luiz de Queiroz» ESALQ/USP.

² Alumno de Doctorado de la ESALQ/USP.

³ Profesor del Dpto. de Ingeniería Rural de la ESALQ/USP

INTRODUCCIÓN

La problemática del abastecimiento de agua en el sector rural no es nueva y viene acentuándose principalmente por el aumento del costo de la energía eléctrica y su racionamiento. Para la captación de aguas superficiales y subterráneas, en la mayor parte de los casos, se precisa de energía eléctrica o de combustible para el accionamiento del conjunto motobomba. Cuando se utiliza energía eléctrica se adiciona, el costo de la conducción de la misma, desde la fuente hasta el lugar deseado, que en la mayoría de los casos, cuando el recurso hídrico es superficial, se encuentra en los puntos mas bajos de la propiedad.

En general la fuerza para la elevación del agua proviene principalmente de motores eléctricos principalmente, o también de animales, humanos, o fuentes renovables (climáticas); en el contexto particular de las áreas rurales en los países pobres, la elección es mas restricta. En muchos de estos países, en el sector rural no hay electricidad, los motores presentan problemas atribuidos al combustible y al mantenimiento, el uso animales pueden ser inviable o difícil de aplicar en la elevación y transporte de agua. Por eso la elevación y transporte del agua por el hombre todavía es común a pesar del alto costo de la energía humana (US\$ 2 a 20 por Kw/hora) (THOMAS, 1994).

Cuando se dispone de una fuente superficial de agua y se pretende utilizar una parte de ella de forma racional, económica y sustentable, puede ser utilizado el carnero hidráulico. El mismo trabaja de día y noche sin agredir el medio ambiente, utilizando la energía hidráulica, dispensando otro tipo de energía suplementar. También la rueda de agua puede ser una opción para las condiciones citadas, pero el precio del carnero es mas bajo y los requerimientos de mantenimiento son menores.

Según DENICULI (1992), el carnero hidráulico fue inventado por los hermanos Montgolfier en 1796, siendo una máquina simple y de gran utilidad, cuando se desea elevar pequeños caudales.

El carnero hidráulico es un artificio para bombear agua, propulsado solamente por la energía potencial de la alimentación. Su construcción es simple con solamente dos partes móviles, es barato en relación a otros tipos de bombas y no contamina (YOUNG, 1995).

Este equipo todavía es fabricado en más de diez países. Ellos fueron substituidos por bombas motorizadas en los países ricos, en cuanto que en los países en desarrollo su uso está concentrado en China, Nepal y Colombia (THOMAS, 1994).

De acuerdo con YOUNG (1995), un sistema de bombeamiento por carnero hidráulico consta de (a) un tanque elevado de alimentación, (b) la tubería de alimen-

tación, (c) el carnero hidráulico con las válvulas de escape y recalque, (d) la cámara de aire y (e) la tubería de recalque. La función de la cámara de aire es almacenar agua en la presión de recalque entre golpes y absorber el golpe producido por el bombeamiento.

VESPUY et al. (1993), presenta el diseño esquemático de la instalación del carnero hidráulico (Figura 1).

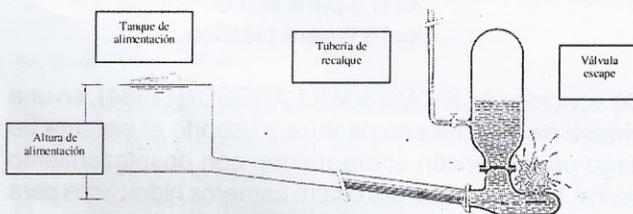


Figura 1 Instalación del carnero hidráulico.

Conforme DENÍCULI (1992), para que una fracción del agua que baja por la tubería de alimentación sea elevada a alturas mayores que el reservorio de alimentación, es necesario que esta fracción aumente su estado de energía. La energía adicional de esta fracción es cedida por el agua que sale por la válvula de escape que disminuye su estado de energía. Esa cesión ocurre por transformaciones de esta, durante el ciclo del carnero hidráulico de la siguiente forma: energía potencia en energía cinética (cuando la válvula de escape se abre), energía cinética en energía de presión (cuando la válvula de escape se cierra) y energía de presión en energía potencial (cuando el aire empuja el agua y esta se eleva en el tubo de recalque).

Según DORNING (1958), la sobrepresión debida al cierre brusco puede ser expresada en columna de líquido es igual a:

$$h_1 = \varphi \sqrt{2 \cdot h \cdot L \cdot \text{sen} \sigma \cdot \frac{a}{A}} \quad (1)$$

en que:

- h_1 Sobrepresión debida al golpe de aríete, m;
- h Altura de alimentación, m;
- a Área de la tubería de alimentación, m^2 ;
- A Área de la tubería de recalque, m^2 ;
- φ Resistencia pasiva de la tubería de alimentación, m;
- L Longitud de la tubería de alimentación, m.

De acuerdo con DENÍCULI (1992), la celeridad de propagación de la onda de presión c , en el agua, a través de tubos es dada por:

$$c = \frac{9900}{\sqrt{48,3 + k \frac{D}{e}}} \quad (2)$$

en que:

- c celeridad, $m \cdot s^{-1}$;
- D diámetro interno del tubo, m;
- e espesura de la pared del tubo, m;
- k constante que depende de la naturaleza del tubo;

donde:

$$k = 0,5 \text{ para } \text{aço e}$$
$$k = 18,0 \text{ para } \text{plástico.}$$

De acuerdo con KITANI & WILLARDSON (1984), en una chacra de 24,3 ha con pastura y usando el sistema de riego por aspersión sobre ruedas con desplazamiento lateral, fueron suficientes cuatro carneros hidráulicos para la provisión de agua. Los mismos fueron instalados en paralelo obteniéndose la presión y el caudal suficiente para el sistema de riego.

Según AZEVEDO NETTO & ALVAREZ (1988), el equipo es instalado en nivel inferior al del manantial en la cota mas baja posible. El agua que llega al carnero hidráulico inicialmente sale por una válvula externa (escape) hasta el momento en que es alcanzada una determinada velocidad elevada. En ese instante, la válvula se cierra, repentinamente, ocasionando una sobrepresión que posibilita la elevación del agua.

De acuerdo con KITANI & WILLARDSON (1984), el material de que es hecho la tubería de alimentación, afecta las prestaciones del carnero hidráulico. El modulo de elasticidad del material de la tubería de alimentación provoca alteración en el aumento de presión, causado por el golpe de ariete, por las mudanzas en la velocidad acústica de la onda de presión en la tubería de alimentación. Desde que los carneros hidráulicos son operados con sucesivas ondas de presión ocasionadas por el golpe de ariete, la espesura de la pared de la tubería de alimentación debe ser lo suficiente para prevenir la rotura y una excesiva flexibilidad.

De acuerdo con AZEVEDO NETTO & ALVAREZ (1988), la longitud L debe satisfacer las siguientes relaciones: $L \geq 1,0 H$ a $1,2 H$; $10 h > L > 5 h$ y $8m < L < 75m$. En que L es la longitud de la tubería de alimentación, H la diferencia de nivel entre el carnero hidráulico y el reservorio de recalque y h es la altura de alimentación.

Conforme a DAKER (1987) & DENÍCULI (1992), la altura de alimentación (h) debe estar comprendida entre 1 m y 9 m. Una $h < 1$ m, ocasiona bajo rendimiento y con una $h > 9$ m ocurre un desgaste excesivo de la válvula de escape. La longitud de la tubería de alimentación debe variar entre 8m y 15 m t debe ser lo mas recto posible.

El canero hidráulico normalmente puede bombear hasta un máximo de $3,154 \cdot 10^{-3} m^3 s^{-1}$ con una elevación máxima de 122 m (JENNINGS, 1996).

Para DAKER (1987), el rendimiento del carnero hidráulico depende principalmente de la relación de la altura de

caída del reservorio de alimentación hasta el carnero hidráulico, y la altura de elevación del equipo al reservorio superior y de la perfección con que es fabricado el carnero hidráulico. El mismo presenta un rendimiento hidráulico que varía entre 50 a 75 %. Para CAPETTI (1930) & DORNING (1958) el rendimiento hidráulico del carnero hidráulico puede alcanzar en condiciones favorables, hasta 60 %.

Conforme a RENNIE & BUNT (1990), son necesarios nuevos trabajos para auxiliar a los proyectistas de carnero hidráulico, modelando a teoría posible en forma computarizada por la manipulación de las principales variables envueltas en el funcionamiento del equipo.

Procurando dar subsidios para la utilización y fabricación de carneros hidráulicos, este trabajo tuvo como objetivo desarrollar el modelado del funcionamiento, construir el prototipo y validar el modelo.

MATERIALES Y MÉTODOS

Fue desarrollado y construido un prototipo de carnero hidráulico en PVC llevando en consideración las recomendaciones de BARRETO (2000) & CLEMSON UNIVERSITY (2001). El diseño esquemático del prototipo construido puede ser observado en la Figura 2.

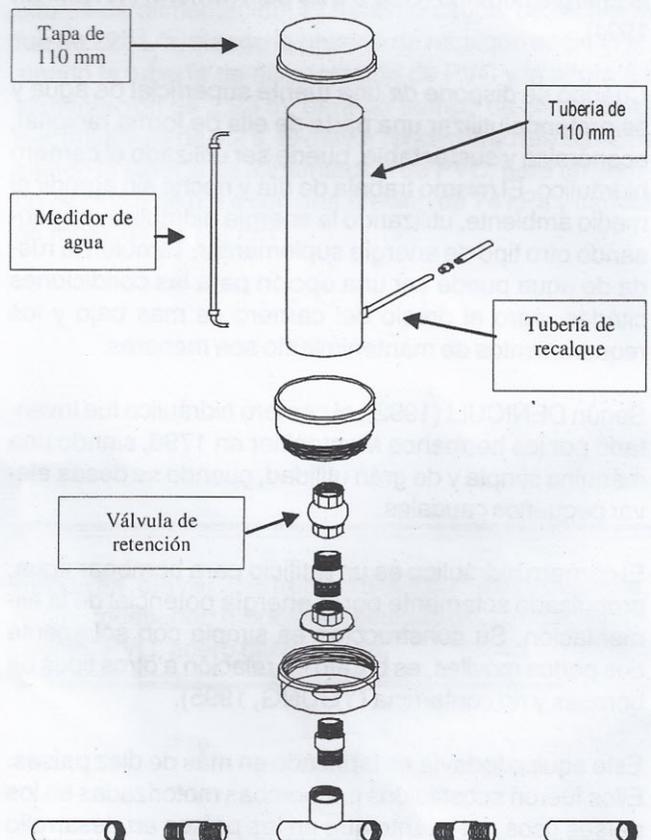


Figura 2 Diseño esquemático del prototipo construido

También fue desarrollada una electroválvula, que actuó como válvula de escape de tal manera a obtener diferentes tiempos pulso, para el cierre de la misma. La válvula fue comandada por un microprocesador. En la Figura 3, se observa la electroválvula comandada por el microprocesador acoplada al prototipo de carnero hidráulico.

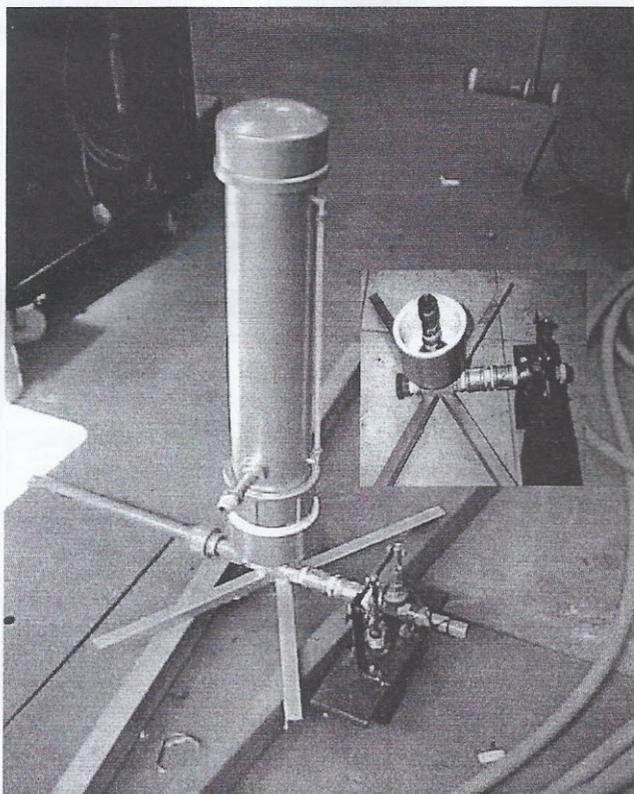


Figura 3 Electroválvula comandada por el microprocesador acoplada al prototipo de carnero hidráulico

Para la evaluación del carnero hidráulico fue instalada un reservorio de agua a una altura de 2 m, alimentada con agua de la red del laboratorio. Fueron utilizadas dos tipos de materiales para la tubería de alimentación PVC de 25 mm de diámetro nominal y acero galvanizado de 19,05 mm de diámetro nominal, ambas con longitudes de 11,81 m y 12 m respectivamente.

Para la medición de los caudales de recalque y alimentación, fue utilizado el método del pesaje del agua por medio de baldes previamente calibrados. Para el caudal de alimentación se utilizó un balde de 10 L y para el caudal de recalque de 2 L, midiéndose el tiempo por medio de un cronómetro. Los baldes cargados de agua luego eran pesados en una balanza digital. La medición de la presión de recalque fue realizada por medio de un manómetro tipo Bordon, previamente calibrado.

Fueron hechas medidas para diferentes intervalos de pulso de la válvula de escape, bajo una altura de alimentación constante, siendo los parámetros considerados:

- Caudal de alimentación,
- Caudal de recalque
- Altura manométrica de recalque
- Rendimiento

Para el cálculo de rendimiento fue utilizada la ecuación presentada por YOUNG (1995).

$$\eta_R = q (h - H) / (Q_w H), \quad (3)$$

en que:

- η_R eficiencia Rankine, decimal;
- q caudal de descarga, $m^3 s^{-1}$;
- h presión de recalque, m;
- H presión de alimentación, m;
- Q_w caudal perdido por la válvula de escape, $m^3 s^{-1}$.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

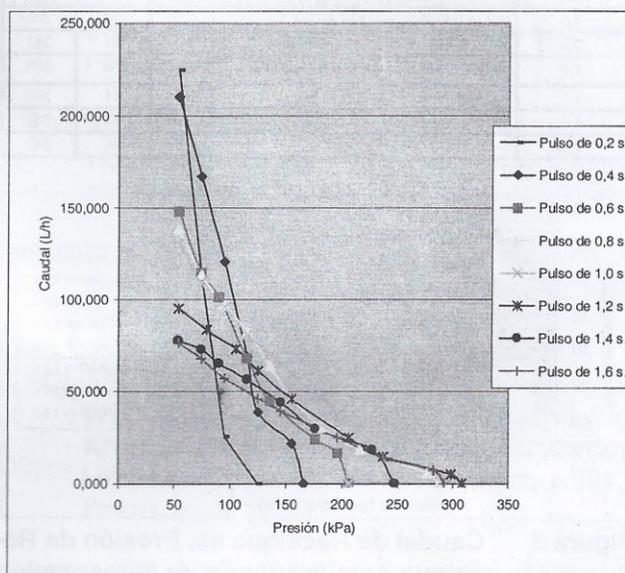


Figura 4. Caudal de Recalque vs. Presión de Recalque con la tubería de alimentación de PVC, para diferentes tiempos de pulso de la electroválvula.

Los mayores caudales se consiguen con los tiempos de pulso menores. Existe una tendencia de disminuir el caudal máximo con el aumento del tiempo de pulso.

Cuadro 1. Ecuaciones de regresión al 5 % de probabilidad, que relacionan el caudal en función de la presión de recalque, para diferentes tiempos de pulso de la válvula de escape, siendo la tubería de alimentación de PVC.

Tiempo de Pulso (s)	Ecuación	R ²	Límites de Validez (kPa)	
			Inf.	Sup.
0,2	$\ln y = 2,279 + 0,205 - 0,020 \cdot x^{1,5}$	0,97	54	206
0,4	$y = 279,179 - 0,029 \cdot x^2 + 0,0001 \cdot x^3$	0,99	54	166
0,6	$y = 118,345 - 0,6 \cdot x + 25374,407 / x^{1,5}$	0,99	54	206
0,8	$y = 78,494 - 6,676 \cdot x^{0,5} + 1072,852 / \ln x$	0,99	54	287
1,0	$y = 190,115 - 0,072 \cdot x^2 + 0,01 \cdot x^{2,5} - 0,0003 \cdot x^3$	0,98	54	206
1,2	$y = 236,669 - 0,171 \cdot x - 32,333 \cdot \ln x$	0,98	54	308
1,4	$y = 223,914 - 12,790 \cdot x^{0,5} - 690,792 \cdot \ln x / x$	0,98	54	247
1,6	$y = 84,878 - 0,03 \cdot x^{1,5} + 2,692 \cdot x^3$	0,98	54	292

Tiempo de Pulso (s)	Ecuación	R ²	Límites de Validez (kPa)	
			Inf.	Sup.
0,2	$\ln y = 2,279 + 0,205 - 0,020 \cdot x^{1,5}$	0,97	54	206
0,4	$y = 279,179 - 0,029 \cdot x^2 + 0,0001 \cdot x^3$	0,99	54	166
0,6	$y = 118,345 - 0,6 \cdot x + 25374,407 / x^{1,5}$	0,99	54	206
0,8	$y = 78,494 - 6,676 \cdot x^{0,5} + 1072,852 / \ln x$	0,99	54	287
1,0	$y = 190,115 - 0,072 \cdot x^2 + 0,01 \cdot x^{2,5} - 0,0003 \cdot x^3$	0,98	54	206
1,2	$y = 236,669 - 0,171 \cdot x - 32,333 \cdot \ln x$	0,98	54	308
1,4	$y = 223,914 - 12,790 \cdot x^{0,5} - 690,792 \cdot \ln x / x$	0,98	54	247
1,6	$y = 84,878 - 0,03 \cdot x^{1,5} + 2,692 \cdot x^3$	0,98	54	292

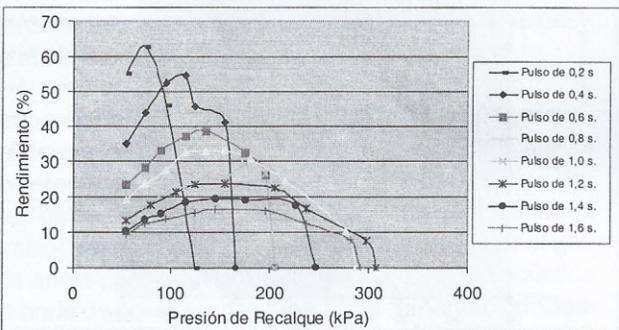


Figura 5 Caudal de Recalque vs. Presión de Recalque con la tubería de alimentación de acero galvanizado, para diferentes tiempos de pulso de la electroválvula.

Para el pulso de 0,2 s, el rendimiento superó la eficiencia máxima esperada por KITANI & WILLARDSON (1984).

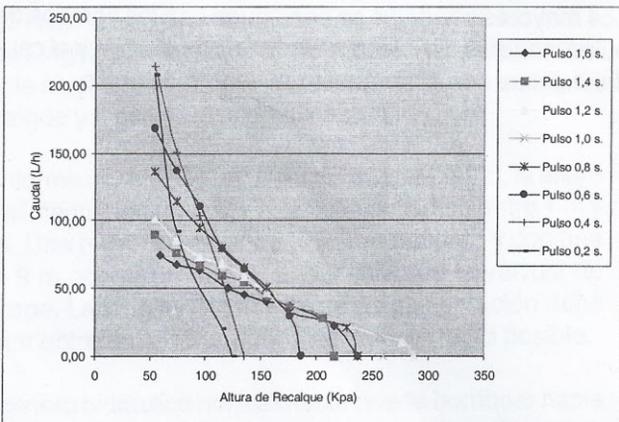


Figura 6 Caudal de Recalque vs. Presión de Recalque con la tubería de alimentación de acero galvanizado, para diferentes tiempos de pulso de la electroválvula.

El caudal máximo fue obtenido con un tiempo de pulso de 0,4 s, pero el rendimiento máximo fue alcanzado con el tiempo de cierre de 0,2 s. (Figura 6).

Cuadro 2 Ecuaciones de regresión al 5 % de probabilidad del caudal en función de la presión de recalque, para diferentes tiempos de pulso de la válvula de escape siendo la tubería de alimentación de acero galvanizado

Tiempo de pulso (s)	Ecuación	R ²	Límites de Validez (kPa)	
			Inf.	Sup.
0,2	$Y = 30,516 - 5,02 \cdot x^3 + 695105,49 / x^2$	0,99	54	125
0,4	$Y = 433,776 - 1,603 \cdot x + 14,434 \cdot x^{0,5}$	0,99	54	135
0,6	$Y = 584,773 + 4,775 \cdot x - 0,007 \cdot x^2 - 88,662 \cdot x^{0,5}$	0,99	54	186
0,8	$Y = 174,441 - 0,034 \cdot x^2 + 0,04 \cdot x^{2,5} - 0,0001 \cdot x^3$	0,98	54	237
1,0	$Y = 116,894 - 0,078 \cdot \ln x$	0,98	54	260
1,2	$Y = 181,3 + 0,0001 \cdot x^2 - 11,059 \cdot x^{0,5}$	0,97	54	287
1,4	$Y = 115,382 - 0,017 \cdot x^2 \cdot \ln x + 0,010 \cdot x^{2,5} - 0,0003 \cdot x^3$	0,97	54	216
1,6	$Y = 129,536 - 0,788 \cdot \ln x + 0,306 \cdot x^{1,5} - 1,685 \cdot x^3$	0,98	59	237

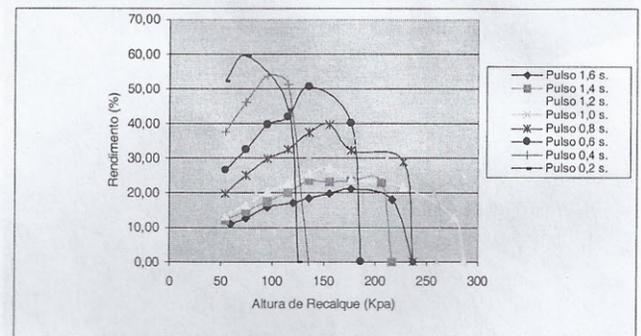


Figura 7 Rendimiento vs. Presión de recalque con la tubería de alimentación de acero galvanizado, para diferentes tiempos de pulso de la electroválvula comandado por el microprocesador.

Con relación al rendimiento máximo (Figuras 8 y 9), se observa en ambos casos una tendencia decreciente del rendimiento máximo con el aumento del tiempo de pulso.

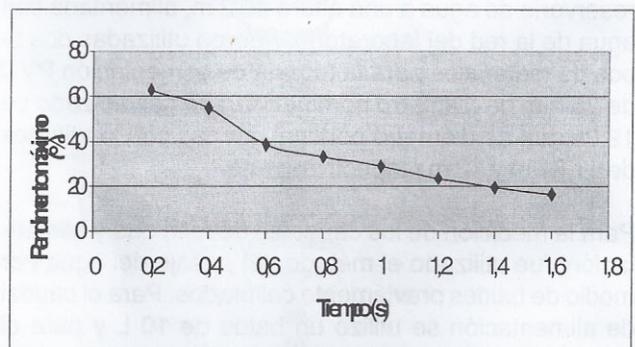


Figura 8 Rendimiento máximo vs. tiempo de pulso con la tubería de alimentación de PVC.

LITERATURA CITADA

AZEVEDO NETTO, J.M.; ALVAREZ, G. A. **Manual de hidráulica**. 2.ed. São Paulo: Edgar Blucher, 1988. v.1 p.724.

BARRETO, A. C. **Carneiro hidráulico de PVC** Uberaba: Escola Agrotécnica Federal de Uberaba 2000. 6 p.

CAPETTI, A. **Notizie generali sulle macchine e macchine idrauliche**. Cedam. Roma. 1930. p 231-4.

CLEMSON UNIVERSITY. **Home – made hydraulic ram pump**. <http://www.clemson.edu/irri/Equip/ram.htm> 23/10/2001.

DAKER, A. **A água na agricultura: captação, elevação e melhoramento da água**. v.2., 7. ed. Rio de Janeiro: Freitas Bastos.v.2, 1987.p.297 – 318.

DENÍCULI, W. **Hidráulica**. Instalações de recalque. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, Departamento de Engenharia Agrícola. 1992. v.2. 115p.

RENNIE, L.C.; BUNT, E.A. Proc The automatic hydraulic ram-experimental results. Johannesburg: **Instn Mech Engrs** 24 nov. 1990. p. 23-31.

THOMAS, T. Disseminating ram-pump technology. In: WEDC CONFERENCE, 20, PICKFORD, J. (Ed.) **Affordable water supply and sanitation**. Leicestershir: Loughborough University, 1994. – Proceedings/.

VERSPUY, C.& TIJSSELING, A. S. **Journal of hydraulic research**, v. 31, n. 2, p. 267 – 269. 1993.

YOUNG, B. W. **Design of the hydraulic ram pump systems**. Proc. Instn Mech. Engrs. V. 209, p. 313 – 322, 1995.

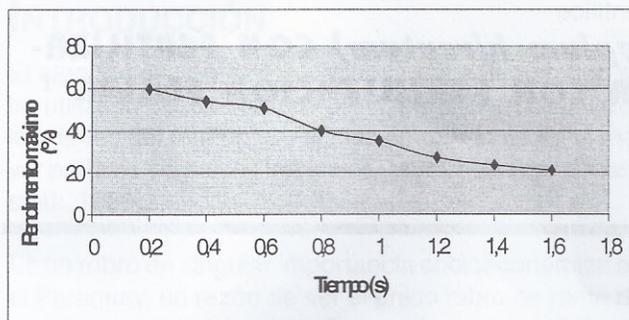


Figura 9 Rendimiento máximo vs. Tiempo de Pulso con la tubería de alimentación de acero galvanizado.

CONCLUSIONES

Fue desarrollado el modelo teórico del funcionamiento del Aríete Hidráulico.

- Se construyó el prototipo y se desarrolló una electroválvula para su evaluación.
- Se observó correlación entre el caudal y la presión de recalque para los diferentes tiempos de pulso.
- Existe una tendencia decreciente del rendimiento máximo en la medida que aumenta el tiempo de pulso de la electroválvula.