

## **ALTERNATIVA DE UNA BOMBA NEUMÁTICA PARA LA EXTRACCIÓN DE AGUA UTILIZANDO UN MOLINO MULTIPALA**

**L. Rodrigo<sup>1</sup>, H. Greco<sup>2</sup>, F. Bergoglio<sup>3</sup>, C. Medaglia<sup>4</sup>**

Laboratorio de Energías Renovables – Universidad Nacional de San Luis  
Facultad de Ingeniería y Ciencias Agropecuarias

**Avda. 25 de Mayo 384 - C.P. 5730 - Villa Mercedes - San Luis - Argentina**

**Tel. Central VoIP: 054-2657-531000 Int. 7169 - e-mail: [lucas123rodrigo@gmail.com](mailto:lucas123rodrigo@gmail.com)**

*Recibido 12/08/19, aceptado 22/10/19*

**RESUMEN:** En el siguiente trabajo se encuentra desarrollada una alternativa para una bomba neumática de desplazamiento positivo cuya función principal es la extracción de agua en áreas rurales alejadas de un suministro eléctrico. Dicho dispositivo opera con aire comprimido y sus principales características son la de ser propulsado por energía eólica aprovechando las instalaciones de los molinos multipala y la reducción de partes móviles respecto a los mismos. Se describen las características, componentes, principio de funcionamiento, cálculos estimativos de dimensionamiento y capacidad de extracción como así también las ventajas sobre la extracción de agua mediante el método tradicional de molino multipala.

**Palabras Claves:** extracción, agua, energía eólica, aire comprimido, multipala

### **INTRODUCCIÓN**

El molino multipala o molino americano, se ha extendido a lo largo del mundo debido principalmente a su uso en hidrobombeo. Desde hace más de 100 años este dispositivo es una alternativa ampliamente utilizada para la extracción de agua en zonas rurales para el riego de cultivos, alimentación del ganado y el propio consumo de personas, debido principalmente a que no depende de una red eléctrica para llevar a cabo su función. Sin embargo, posee como principal desventaja la de tener partes móviles en juego, (pistón, suelas, cilindros, varillas) lo cual implica fricción entre ellas y consecuentemente el desgaste de las mismas. Esto trae aparejado elevados costos relacionados al mantenimiento y reparación de los cuales están asociados a la complejidad de la tarea y al tiempo empleado en su desarrollo. Un dato que no es menor es el hecho de que a lo largo de muchos años, estos molinos no han sufrido desarrollos significativos (Diez, 2006).

En función de esto, y de la tendencia mundial de maximizar el proceso de captación de energía (Dominguez, 2008), se diseñó una bomba neumática (Di Genaro et al., ASADES 1997; Rodrigo et al., ASADES 1998), cuya finalidad es resolver la problemática planteada acercando una solución de mantenimiento simple y económico. El principio de funcionamiento del dispositivo es generar una presión mayor en las cámaras introducidas dentro del agua, para que la misma sea expulsada a la altura de funcionamiento. Cabe destacar que es factible utilizar los cilindros diseñados en prototipos anteriores, ya que las modificaciones propuestas en dichos trabajos se basaron en los elementos de control de tiempos, no sobre el dispositivo de inyección de aire comprimido, por lo tanto, el análisis propuesto es válido para cualquiera de los modelos desarrollados destacando el hecho que en el presente trabajo se prescinde de cualquier elemento que controle los tiempos de carga y descarga del cilindro.

---

<sup>1</sup>Investigador CyT UNSL

<sup>2</sup>Investigador CyT UNSL

<sup>3</sup>Investigador CyT UNSL

<sup>4</sup>Investigador CyT UNSL

Por ello, el rediseño de la bomba permite la utilización del molino ya instalado (rueda multipala, máquina y torre), que serán los encargados junto a un cilindro generador de aire comprimido, de extraer el agua desde a profundidad.

Sin perder de vista estos objetivos, se presentan en este trabajo una alternativa al dispositivo original, que lo convierte en una variante viable para extraer agua a profundidad con solo la utilización de un recurso renovable como es la energía eólica también a otras zonas donde sea necesario el aprovisionamiento de agua y no existan fuentes de energía eléctrica cercanas, o bien en lugares en donde a pesar de tener acceso a la energía La principal ventaja sobre el primer modelo radica en prescindir de compresor de aire, el cual es reemplazado por un mecanismo de bombeo de aire acoplado directamente a un molino multipala, generando de esta manera una solución de bajo costo que permite eliminar la problemática del desgaste de piezas móviles en las instalaciones de molinos eólicos mencionados anteriormente. De esta forma se pretende bombear agua desde una perforación sin la utilización de energía eléctrica, generando una evolución en un dispositivo que representa un recurso confiable para el desarrollo agrario. Se destaca que su utilización no es un ámbito de aplicación exclusivo del dispositivo, el mismo puede extenderse eléctrica se decida recurrir al mismo como un ahorro en el consumo de electricidad y en el mantenimiento del mismo.

Para lograr satisfacer las necesidades antes mencionadas, el dispositivo posee dos características fundamentales, que son la ausencia de partes móviles que sean de difícil acceso y sustitución y la utilización de energía eólica. A esto se suma el hecho de que la construcción se realiza con materiales económicos y de fácil adquisición.

## **DESCRIPCIÓN DEL PROTOTIPO**

El equipo de bombeo de agua consiste en dos partes fundamentales: el dispositivo de bombeo de aire comprimido que se encuentra en la superficie y el equipo de extracción de agua.

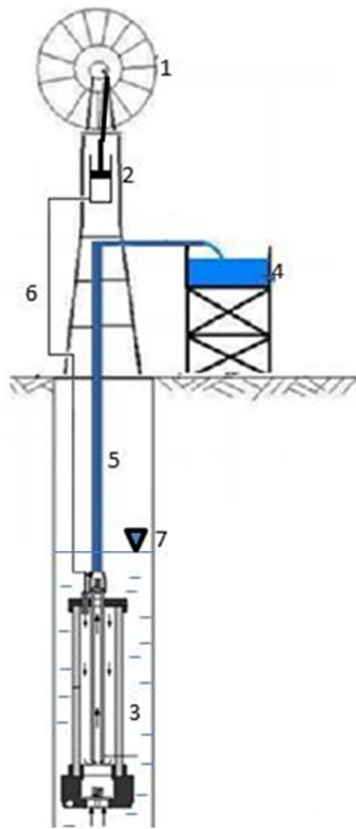
El primero de ellos está conformado por el rotor multipala, la máquina acoplada a este, encargada de generar el movimiento oscilante, y la torre del molino. A la máquina se le acopla un cilindro neumático que es el encargado de comprimir el aire y llevarlo hacia el equipo de extracción de agua, que está situado en la profundidad del pozo, a través de la manguera de aire comprimido de 10mm de diámetro.

El molino seleccionado en este caso es marca *Basso modelo MD8* y cuenta con las siguientes características:

- golpe de bombeo: tipo largo para poca profundidad (190mm)
- golpes de bombeo por minuto: 28
- profundidad de perforación: 20m
- velocidad de viento: 20 km/h
- caudal: 1450 litros/hora

## **REFERENCIAS DE BOMBA**

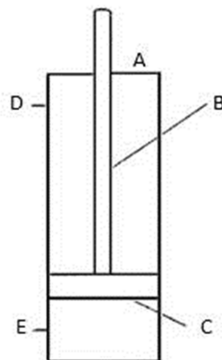
- 1- Rotor multipala con máquina y torre.
- 2- Cilindro compresor de aire acoplado a la máquina.
- 3- Bomba
- 4- Depósito de agua
- 5- Cañería de expulsión de agua de la bomba.
- 6- Cañería de aire comprimido.
- 7- Nivel de agua de la napa



*Figura N°1: Croquis esquemático de bomba*

#### REFERENCIAS DE CILINDRO NEUMATICO

- A- Cilindro neumático
- B- Vástago del cilindro
- C- Pistón del cilindro
- D- Salida de aire comprimido. Coincide con el punto muerto inferior (PMI)
- E- Entrada de aire a presión atmosférica. Coincide con punto muerto superior (PMS)



*Figura N°2: Croquis esquemático del cilindro compresor*

#### **FUNCIONAMIENTO DE LA BOMBA**

El cuerpo de la bomba descrito anteriormente se introduce completamente en la perforación desde la cual se desea extraer agua, produciéndose el llenado de la cámara, debido a la presión existente a dicha profundidad, a través de la válvula de retención que se encuentra en la parte inferior del cilindro.

Por otra parte, cuando el rotor del molino comienza a girar, este transmite su movimiento de rotación a una máquina reductora formada por un tornillo sin fin y un engranaje, el cual a su vez se encuentra acoplado a un sistema de biela-manivela capaz de transformar la rotación en un movimiento oscilante con un recorrido de 190mm. Dicha biela se encuentra directamente vinculada a un pistón que se mueve en el interior de un cilindro, y será el encargado de generar aire comprimido necesario para extraer el agua del cuerpo de la bomba.

Cuando el pistón realiza su carrera descendente desde el punto muerto superior (Punto A, Figura N°2), hacia el punto muerto inferior (Punto B, Figura N°2), la presión generada por esta compresión, estará aplicada a la entrada superior de la bomba. De esta forma, la presión dentro de la cámara de la bomba impulsa el fluido a través de la tubería de salida (19,05 mm de diámetro) y la válvula de retención colocada en dicha tubería, la cual impide el retorno del agua a la cámara de la bomba. Cabe destacar que durante este proceso, la válvula de retención inferior de la bomba se encuentra cerrada evitando la salida del fluido a la perforación.

Por otro lado, cuando el émbolo o pistón del cilindro realiza su carrera ascendente, la válvula de retención inferior permite el llenado de la cámara repitiendo el proceso nuevamente.

Este ciclo de compresión de aire; transmisión a través de la tubería e impulsión del agua de la cámara de la bomba a través de la cañería de salida, será repetido 28 veces por minuto, ya que estos son los golpes que indica el fabricante del molino que se ha tomado como modelo para una velocidad de viento de 20 km/h.

El procedimiento explicado anteriormente permite mejorar el diseño inicial del sistema de bombeo (Di Genaro et al., ASADES 1997; Rodrigo et al., ASADES 1998), eliminando algunos aspectos críticos respecto de los diseños previos, tales como el tiempo de descarga del dispositivo, o el consumo de energía eléctrica.

## DESARROLLO DE CÁLCULOS

Tomando como datos de entrada la información de un molino multipala comercial, se pretende realizar los cálculos de potencia del prototipo a fin de conocer la capacidad del mismo para bombear agua conociendo los datos de la cañería como así también las medidas del cilindro que se utilizarán en la construcción.

*Cálculo de pérdidas de carga en cañería de expulsión*

Se plantea la ecuación de Bernoulli entre los puntos 7 y 4 (Ver Figura N°1)

$$\frac{P_1}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2g} + Z_1 - J + H_B = \frac{P_2}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2g} + Z_2 \quad 1$$

Siendo:

P<sub>1</sub>: Presión en el punto 7

P<sub>2</sub>: Presión en el punto 4

V<sub>1</sub>: Velocidad del fluido en el punto 7

V<sub>2</sub>: Velocidad del fluido en el punto 4

Z<sub>1</sub>: altura en el punto 7

Z<sub>2</sub>: altura en el punto 4

H<sub>B</sub>: Energía de la bomba medida en metros

J: Pérdidas equivalentes en accesorios y cañería recta

g: Gravedad

γ: Densidad del fluido

Despejando se obtiene:

$$H_B = \frac{P_2 - P_1}{\gamma} + \frac{V_2^2 - V_1^2}{2g} + (Z_2 - Z_1) + J \quad 2$$

Considerando que la velocidad en los puntos 1 y 2 son iguales, al igual que las presiones y que la altura en el punto 1 es 0, se obtiene:

$$H_B = Z_2 + J \quad 3$$

Para calcular las pérdidas de carga se debe tener en cuenta:

- 1- Los metros de cañería de la instalación (de 22m de largo y ¾" o 19,05mm de diámetro)
- 2- Sumar los equivalentes de cada uno de los accesorios (que se miden en metros de cañería lineal)

Analizando la Figura N°1 se pueden observar los siguientes accesorios

- Codo 90° pp ¾" (equivale a 0,5m de caño recto)
- Válvula de retención ¾" (equivale a 2,667m de caño recto)

Sabiendo que el caudal es de 1450 litros/h (dato del fabricante) o  $4,02 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{seg}$ , se busca la velocidad del fluido dentro de la tubería, para obtener el número de Reynolds necesario para determinar las pérdidas de carga. Entonces:

$$Q = V * A \quad 4$$

Sabiendo el diámetro de la tubería se obtiene el área:

$$A = \frac{\pi * D^2}{4} \quad 5$$

$$A = \frac{\pi * (0,01905 \text{ m})^2}{4} = 2,85 * 10^{-4} \text{ m}^2$$

Entonces sabiendo el caudal y el área podemos obtener la velocidad del fluido a través de la ecuación 4:

$$V = \frac{4,02 * 10^{-4} \text{ m}^3/\text{seg}}{2,85 * 10^{-4} \text{ m}^2} = 1,41 \text{ m}/\text{seg} \quad 6$$

La longitud total de cañería, teniendo en cuenta las perdidas locales de los accesorios es:

$$LT = 22\text{m} + 2,667\text{m} + 0,5\text{m} = 25,167\text{m} \quad 7$$

El número de Reynolds será:

$$Re = \frac{V * D}{\mu} \quad 8$$

Donde:

$\mu$ : viscosidad cinemática del agua a 5°C

$$Re = \frac{1,41 \text{ m}/\text{seg} * 0,01905\text{m}}{1,52 * 10^{-6} \text{ m}^2/\text{seg}} = 18088,81$$

El valor de número de Reynolds indica que el flujo es turbulento.

Con la Ecuación de White-Coolbrook según (Mataix, 1978) se obtiene el valor del coeficiente de fricción  $f$ :

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 * \log \left( \frac{2,51}{Re * \sqrt{f}} + \frac{K/D}{3,71} \right) \quad 9$$

Donde:

K: Rugosidad absoluta de la tubería (para polipropileno 0,0015mm)

D: Diámetro de la tubería en milímetros

Reemplazando nos queda:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 * \log \left( \frac{2,51}{18088,81 * \sqrt{f}} + \frac{0,0015/19,05}{3,71} \right)$$

Entonces:

$$f = 0,0267$$

Las pérdidas totales son:

$$J = f * \frac{L_T * V^2}{D * 2 * g} \quad 10$$

$$J = 0,0267 * \frac{25,167m * (1,41 m/seg)^2}{0,01905m * 2 * 9,81 m/seg^2} = 3,57m$$

Teniendo estos valores se puede obtener la energía de la bomba, de la ecuación 3:

$$H_B = Z_2 + J = 20m + 3,57m \cong 24m$$

Este valor, llevado a unidades de presión, será:

$$\begin{aligned} 10,33mca &\rightarrow 1,033 \text{ kg/cm}^2 \\ 24mca &\rightarrow X \\ X &= \frac{24mca * 1,033 \text{ kg/cm}^2}{10,33mca} = 2,4 \text{ kg/cm}^2 = 235353,13 Pa \end{aligned}$$

La presión necesaria para extraer agua del pozo es de 235353,12 Pa.

#### *Cálculo de pérdida de carga en cañería de aire comprimido*

A continuación, se determinan los cálculos de las pérdidas en la cañería de aire comprimido. Con estos datos se desea conocer la capacidad del cilindro que cumplirá la función de inyectar el aire comprimido a 2,4 kg/cm<sup>2</sup> para lograr extraer agua del pozo.

Los datos iniciales son:

- Capacidad cilindro inferior: 863cm<sup>3</sup>

- Diámetro de cañería para transporte de aire: 10mm
- Longitud de cañería para aire comprimido: 20m

Se da comienzo a obtener el volumen de aire de la cañería de aire comprimido a través de la utilización de la ecuación 5:

$$A = \frac{\pi * d^2}{4} = \frac{\pi * 1^2}{4} = 0,785 \text{ cm}^2$$

El volumen de la cañería será:

$$V = A * l = 0,785 \text{ cm}^2 * 2000 \text{ cm} = 1570 \text{ cm}^3 = 1,57 \times 10^{-3} \text{ m}^3 \quad 11$$

Para lograr extraer  $863 \text{ cm}^3$  de agua por cada golpe del molino se necesita el siguiente volumen:

$$\begin{aligned} V_{T \text{ aire}} &= V_{\text{cañería}} + V_{\text{cilindro}} \\ V_{T \text{ aire}} &= 1570 \text{ cm}^3 + 863 \text{ cm}^3 = 2433 \text{ cm}^3 = 2,43 \times 10^{-3} \text{ m}^3 \end{aligned} \quad 12$$

*Cálculo de caída de presión en la cañería de aire comprimido*

Para ello se utiliza la siguiente relación:

$$\Delta P = \frac{\beta}{RT} \frac{v^2}{D} L P \quad 13$$

Siendo:

$\Delta P$ : Caída de presión medida en atm

P: Presión absoluta en atmosferas (P manométrica + P atmosférica) en atm

R: Constante de gas, en el caso del aire equivale a 29,27

T: Temperatura absoluta (t+273)

D: Diámetro interior de la tubería en mm.

L: Longitud de la cañería en metros

V: Velocidad del aire en m/seg.

$\beta$ : Índice de resistencia, grado medio de rugosidad, variable con la cantidad de aire suministrado G.

G: Cantidad de aire suministrado en Kg/hora =  $1,3 \text{ m}^3/\text{min} * 60$

Se calcula la cantidad de aire suministrada:

$$G = \text{gpm} * V_{T \text{ aire}} \quad 14$$

$$G = 28 \text{ gpm} * 2433 \text{ cm}^3 = 68124 \frac{\text{cm}^3}{\text{min}} = 0,068 \frac{\text{m}^3}{\text{min}} = 1,13 \times 10^{-3} \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

Donde:

gpm: golpes por minuto del molino

Luego de esto, se precisa conocer la cantidad de aire suministrada en kg/h, por lo tanto:

$$G = 1,3 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * 0,068 \frac{\text{m}^3}{\text{min}} * 60 \frac{\text{min}}{\text{h}} = 5,3 \frac{\text{kg}}{\text{h}} = 1,47 \times 10^{-3} \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

Para esta cantidad de aire suministrado, el índice de resistencia, según (Carnicer Royo, 1977) será:

$$\beta \cong 2,14$$

La velocidad del aire será, si se realiza una analogía con la ecuación 4 bajo:

$$V = \frac{G}{A}$$

Donde:

V: velocidad del aire

A: sección de la cañería de aire  $A = \frac{\pi \cdot (0,01m)^2}{4} = 7,85 \cdot 10^{-5} m^2$

G: caudal de aire en  $m^3/seg$

Entonces:

$$V = \frac{0,068 \frac{m^3}{min} \cdot \frac{1 min}{60 seg}}{7,85 \cdot 10^{-5} m^2} = 14,39 \frac{m}{seg}$$

Por lo tanto, aplicando la fórmula 13:

$$\Delta P = \frac{\beta}{RT} \cdot \frac{v^2}{D} \cdot L \cdot P = \frac{2,14}{29,27 \cdot (4 + 273)} \cdot \frac{(14,39)^2}{10} \cdot 20 \cdot (2,4 + 1) = 0,37 \frac{kg}{cm^2} = 37490,25 Pa$$

Por lo tanto la presión necesaria para poder extraer el volumen de agua en un golpe del molino será:

$$P = P_{agua} + \Delta P = 235353,13 Pa + 37490,25 Pa = 272843,38 Pa$$

*Calculo del cilindro compresor de aire*

Sabiendo que:

$$Q_{Normal} = Q \cdot \frac{P + P_{atm}}{P_{atm}} \quad 15$$

$$Q_{Normal} = 1,13 \times 10^{-3} \frac{m^3}{s} \cdot \frac{272843,38 Pa + 101330 Pa}{101330 Pa} = 0,004172 \frac{m^3}{s} \cong 250000 \frac{cm^3}{min}$$

$$Volumen del cilindro = \frac{250000 \frac{cm^3}{min}}{28 gpm} = 8928,5 cm^3 = 8,92 \times 10^{-3} m^3$$

Por lo tanto sabiendo que el molino entrega 28 gpm el volumen del cilindro será  $V = 8,92 \times 10^{-3} m^3$

La máquina del molino genera un desplazamiento de vaivén de 0,19m, por lo tanto el diámetro del cilindro será:

$$Area = \frac{volumen}{largo cilindro} = \frac{8,92 \times 10^{-3} m^3}{0,19 m} = 0,0469 m^2$$

$$d = \sqrt{\frac{0,0469 m^2 \cdot 4}{\pi}} = 0,24 m$$

## DISCUSIÓN DE RESULTADOS

De los análisis previos se pudieron determinar los valores característicos para la instalación del sistema de bombeo a través del dispositivo neumático. Se verifica que los valores obtenidos, son totalmente viables de ser fabricados y ensayados. El cálculo se realizó siguiendo los lineamientos de la bibliografía dedicada y de los datos de un molino multipala comercial. Algunos datos han sido



conservadores para otorgar mayor validez a los resultados, y obtener de esa manera un margen de error a los mismos.

## CONCLUSIONES

Como principal conclusión se puede destacar, que el dispositivo diseñado ha podido ser calculado obteniéndose valores que permiten inferir un resultado satisfactorio. De esta forma se obtuvo un desarrollo matemático que permite sentar las bases para desarrollar las experiencias para recabar los datos necesarios para dicha verificación. Se desprende de lo anterior que los pasos a futuro consistirán en la verificación experimental de los valores obtenidos con el planteo de las ecuaciones. Por otro lado se destaca que el prototipo permite satisfacer las necesidades de fiabilidad y mantenimiento simple, presentes en zonas rurales, basado en la ausencia de partes móviles y el uso de energías renovables.

Por otro lado, este diseño permite prescindir de un compresor considerando a éste como el principal elemento de consumo de energía eléctrica. Los resultados son promisorios y se puede destacar que el prototipo diseñado permitiría contar con un sistema de bombeo muy fiable y con costos de mantenimiento reducidos a un valor mínimo, haciendo del mismo una alternativa sumamente atractiva para la extracción de agua en zonas rurales.

## REFERENCIAS

- Di Gennaro J., Rodrigo V., Rossi, A. (1997)– Bomba de aire comprimido para la extracción de aguas subterráneas en la zona de V. Mercedes (San Luis) - ASADES –Vol 1 Nro. 2, pág. 189 – Rio Cuarto (Córdoba).
- Díez Fernández, P. (2006). Energía Eólica. Departamento de Ingeniería Eléctrica y Energética. Universidad de Cantabria. Santander, España. Sitio Web: <http://es.pfernandezdiez.es/libro/?id=6>. Consultado en Julio de 2019.
- Domingo Basso. Fabricante de molinos para bombeo de agua. Sitio web: <http://www.domingobasso.com/molinos-de-viento/>. Consultado en Agosto 2019
- Domínguez Gómez, José A. (2008). Energías Alternativas. 3° edición. Ed. Equipo Sirius, Madrid, España.
- E. Carnicer Royo. (1977) – “AIRE COMPRIMIDO Teoría y cálculo de las instalaciones”. Editorial Gustavo Gili. Barcelona, 1977. Pag. 228
- Mataix C. (1978) – Mecánica de los fluidos y máquinas hidráulicas – Harper &Row Publishers Inc.
- Rodrigo V., Di Gennaro J., Ribotta S., Monasterolo R. (1998) – Bomba de aire comprimido para la extracción de aguas subterráneas en la zona de V. Mercedes (San Luis) - ASADES –Vol. 2 Nro. 2, pág. 06-37 – Salta.

## ALTERNATIVE OF A NEUMATIC PUMP FOR WATER EXTRACTION USING A MULTI-BLADE MILL

### ABSTRACT

This work presents an alternative development of a pneumatic positive displacement pump whose main function is the extraction of water in rural areas which are away from an electrical supply. This device operates with compressed air. One of its main features is to be powered by wind power for which it takes advantage of the American mills which are installed in these areas. Another important feature is the reduction of mobile parts. The characteristics, components, principle of operation, estimates of sizing and extraction capacity are described in this work, as well as the advantages over water extraction through the traditional multi-blade mill method.

**Keywords:** extraction, water, wind energy, compressed air, multi-blade