

TANQUES HIDRONEUMÁTICOS. CÁLCULO DE LA CAPACIDAD

• Alfonso Herrán-Sandoval* •
Ingetec, S.A., Colombia
 *Autor de correspondencia

Resumen

Herrán-Sandoval, A. (julio-agosto, 2014). Tanques hidroneumáticos. Cálculo de la capacidad. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 5(4), 163-171.

En sistemas de bombeo de agua usualmente se necesita calcular y dimensionar tanques hidroneumáticos que operen junto con bombas de proceso en sistemas hidráulicos para usos varios. En esta nota técnica, el autor presenta un método de cálculo general, el cual permite dimensionar un tanque dado, en función de los caudales de la bomba y del sistema, sin exceder el máximo número de arranques del motor por unidad de tiempo. El método propuesto permite dimensionar tanques más pequeños que los calculados por los métodos clásicos establecidos y disminuir también el tamaño de la bomba asociada, en razón al aumento del tiempo de operación de ésta. En el texto se presentan las ecuaciones propuestas, las figuras respectivas que ilustran la bondad del método y un ejemplo de cálculo de un par de tanques hidroneumáticos así dimensionados, los cuales se encuentran instalados y en servicio en una importante fábrica de vidrio flotado localizada en las afueras de la ciudad de Bogotá, Colombia. Finalmente, el resultado de este cálculo y las dimensiones finales de los tanques se comparan con las obtenidas por los métodos tradicionales y se concluye sobre su aplicabilidad.

Palabras clave: tanques hidroneumáticos, capacidad, volumen.

Introducción

En los libros y literatura relacionada con mecánica de fluidos y en los manuales de instalaciones de bombeo (ver lista de referencias: Fairbanks Morse Pump Corporation, 1998; Karassik, Messina, Cooper, & Heald, 2001) se describen métodos de cálculo y dimensionamiento de tanques hidroneumáticos basados en la ley de Boyle-Mariott para la compresión y expansión del aire a temperatura constante, y en la premisa de que el caudal suministrado por la bomba sea

Abstract

Herrán-Sandoval, A. (July-August, 2014). Calculation of Capacity of Hydropneumatic Tanks. *Water Technology and Sciences (in Spanish)*, 5(4), 163-171.

Water pumping systems usually require the calculation and sizing of hydropneumatic tanks that operate along with the process pumps which are used in hydraulic systems for several purposes. In this technical note the author presents a general calculation method which makes it possible to size a given tank according to the flows through the pump and the system, without exceeding a maximum number of motor starts per unit time. The proposed method makes it possible to calculate smaller tanks than those calculated by well-established conventional methods, decreasing the size of the corresponding pump according to the increase in its operating time. The article presents the equations proposed and respective graphs illustrating the goodness of the method, as well as an example of the calculation of the size of a pair of hydropneumatic tanks using this method, which are installed and operating in a large float glass factory located in the outskirts of the city of Bogota, Colombia. Finally, the results from this calculation and the final sizes of the tanks are compared with results obtained using traditional methods and conclusions are presented regarding the applicability of the method.

Keywords: Capacity, hydropneumatic tanks, volume.

el doble del caudal requerido por el sistema, lo cual implica que dicha bomba funcione durante la mitad del tiempo del intervalo operativo y determina en consecuencia un único tamaño de tanque.

El objetivo del método propuesto en esta nota técnica es ofrecer al diseñador del sistema hidráulico la posibilidad de dimensionar el tamaño del tanque, en función de la relación de caudales de la bomba y el sistema, de tal forma que si dicha relación es inferior a 2.0 (en todo caso debe ser superior a 1.25), se pueda

disminuir el tamaño del tanque y el de la bomba, compensando el sistema con un mayor tiempo de operación de esta última. El método permite entonces evaluar varios tamaños de tanques y capacidades de bombas, con el fin de obtener la mejor relación entre el costo de inversión y el costo de la energía durante la operación.

El método se basa en dos ecuaciones fundamentales. En la primera ecuación se establece el tiempo de funcionamiento continuo de la bomba en el intervalo operativo, con base en la relación de caudales de la bomba y del sistema, y en consideración a la máxima frecuencia de arranques por unidad de tiempo permitida para el motor eléctrico de accionamiento. En la segunda se calcula el volumen útil de agua que deberá almacenar el tanque durante un ciclo, en función de la relación de caudales y del tiempo total del intervalo operativo. Después, con base en las presiones máxima y mínima previamente establecidas y utilizando la ley de Boyle-Mariott, se determina el volumen de aire necesario y el volumen total del tanque.

Caudal permanente del sistema y caudal de la bomba

De acuerdo con las necesidades propias del proceso, el usuario debe determinar el caudal de agua permanente Q_s que se debe suministrar al sistema a la presión mínima requerida. Q_s será como mínimo igual al consumo continuo del sistema más el consumo discontinuo o esporádico, afectado por los factores de simultaneidad propios de cada instalación.

En todo caso, la bomba o bombas de la instalación deberán suministrar un Q_b nominal superior a Q_s , tal que una parte de Q_b alimente

el sistema y la parte restante alimente de modo simultáneo el tanque hidroneumático. En el caso límite, en el cual Q_b sea igual a Q_s , no será necesario el tanque hidroneumático, pues toda el agua enviada por la bomba al sistema será continuamente consumida por éste.

Para que el tanque hidroneumático se justifique en una determinada instalación, Q_b deberá ser como mínimo del orden de 1.25 Q_s a la presión mínima requerida por el sistema. Una buena práctica es contar con Q_b igual o superior a 1.5 veces el caudal del sistema Q_s .

Cuanto mayor sea Q_b , en comparación con Q_s , menor será el tiempo de operación de la bomba en el intervalo de tiempo fijado por el número de arranques/h del motor y mayor será el tamaño del tanque hidroneumático. Cuando Q_b sea igual a 2 Q_s , la bomba operará la mitad del tiempo del intervalo y la otra mitad de tiempo el caudal será suministrado al sistema por el tanque hidroneumático.

Si la bomba es centrífuga, se debe considerar que el caudal varía con la presión y entonces el valor de Q_b , a efectos de cálculo, será el promedio de los caudales máximo y mínimo de la bomba $(Q_{\text{máx}} + Q_{\text{mín}})/2$, acorde con la gama de presiones en que operará dicha bomba y según lo indicado en la curva característica. Si la bomba es del tipo de desplazamiento positivo, Q_b será un valor fijo, pues en esta clase de bombas el caudal no varía con la presión.

Número de arranques del motor eléctrico

El número máximo de arranques del motor eléctrico por unidad de tiempo depende del tamaño de la instalación y de la potencia demandada por las bombas. Para efectos de cálculo, se utilizarán los valores indicados en el cuadro 1.

Cuadro 1. Número de arranques del motor eléctrico (Fuente: KSB, 1968).

Tamaño de la instalación. Potencia del motor eléctrico	Máximo número de arranques/hora
Pequeña	de 15 a 30
Mediana	de 8 a 12
Grande	de 6 a 8

Cálculo del tiempo del intervalo y del tiempo de operación de la bomba

El tiempo del intervalo de operación del conjunto motobomba-tanque hidroneumático será de $t_i(h) = 1 / \#$ arranques/h y en este tiempo t_i , la bomba se prenderá una vez y operará un tiempo t_b , tal que $t_b < t_i$. Durante t_b , la bomba suministrará tanto Q_s como el caudal necesario para completar el volumen útil del tanque hidroneumático $V_{út}$, el cual será descargado al sistema una vez detenida la bomba y durante un tiempo igual a $(t_i - t_b)$. Se cumplirá que $Q_b \times t_b = Q_s \times t_i$, de donde $t_b = t_i \times Q_s / Q_b$ y haciendo la relación de caudales $Q_b / Q_s = f$ se tiene que:

$$t_b = t_i / f \tag{1}$$

En la figura 1 se observa la variación del tiempo de operación de la bomba en el intervalo, en función de la relación de caudales $f = Q_b / Q_s$ y para diferentes números de arranques/h del motor.

Presiones y volúmenes de operación

De acuerdo con la característica del sistema, las presiones de operación mínima y máxima en el tanque hidroneumático estarán determinadas previamente y a su vez corresponderán con las presiones de encendido y apagado de la bomba, respectivamente.

La relación entre las presiones $P_{mín}$ y $P_{máx}$ de la bomba dependerá de su velocidad específica, de tal manera que ambas presiones se encuentren siempre dentro de la gama operativa de la curva característica, con eficiencias aceptables. Si la velocidad de la bomba es variable, se tendrá entonces una gama de presiones más extensa. En general, para instalaciones industriales, la diferencia entre la mínima y máxima presión no supera los 2.5 bar (250 kPa).

En la figura 2 se muestran los volúmenes parciales en que se divide el tanque hidroneumático, todo referenciado a un ciclo completo en el tiempo total del intervalo t_i , tal como se describe a continuación:

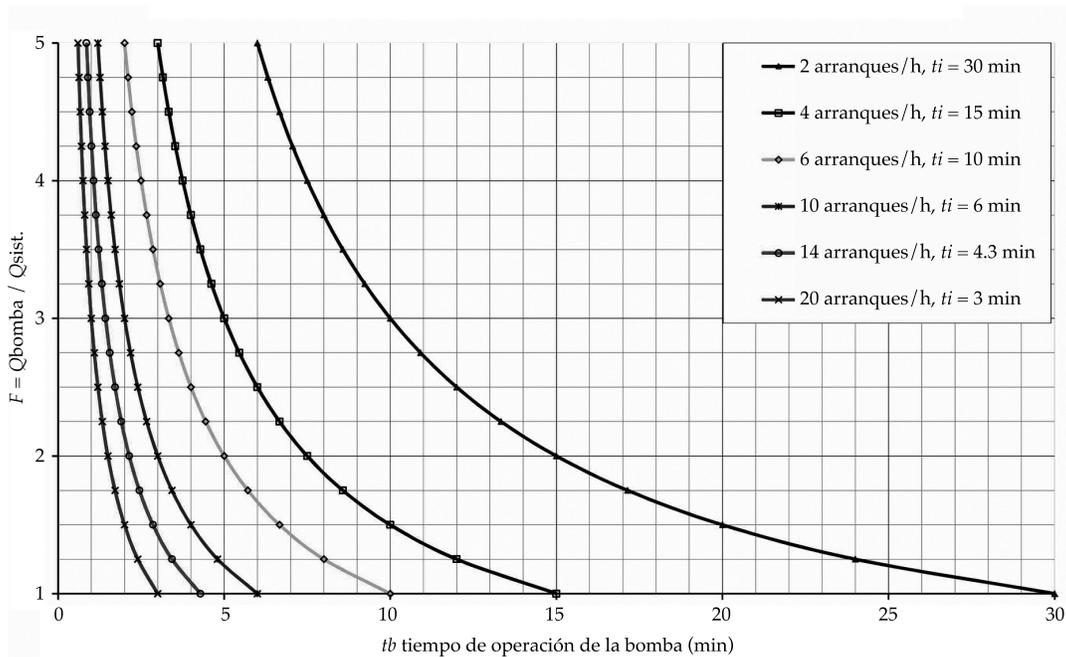


Figura 1. Tiempo de operación de la bomba t_b – VS – Relación de caudales $f = Q_b / Q_s$.

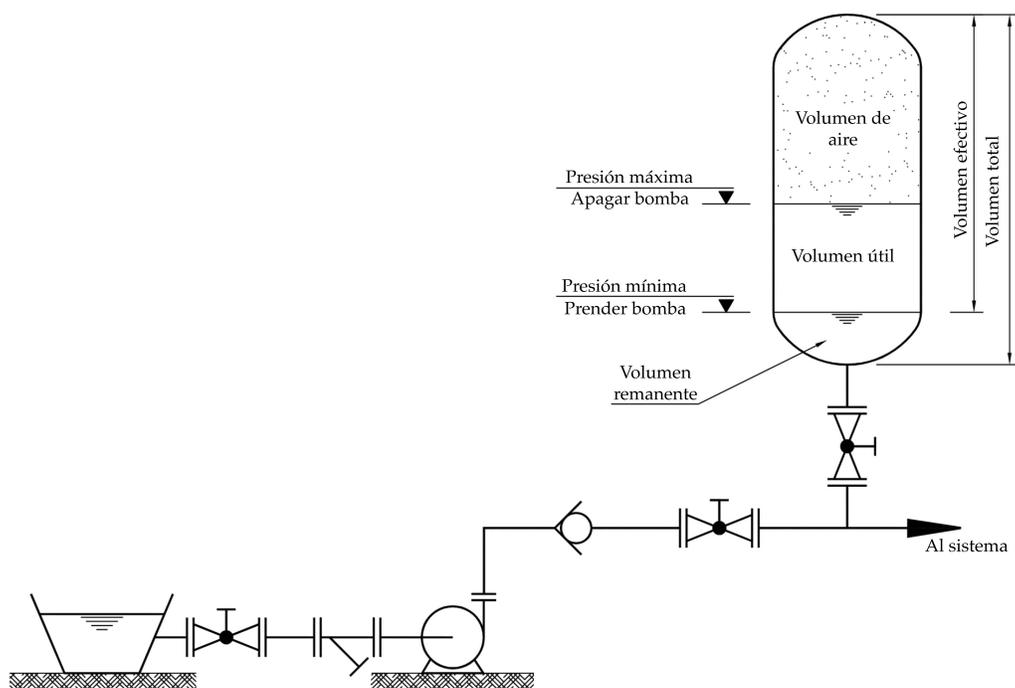


Figura 2. Diagrama unifilar bomba-tanque hidroneumático

Volumen de aire a presión V_a

Es el volumen de aire a presión que impulsa el volumen útil de agua y lo descarga en el sistema una vez que la bomba se ha detenido.

La descarga del agua se realiza entonces por la expansión del volumen de aire desde $P_{m\acute{a}x}$ hasta $P_{m\acute{i}n}$ y durante un tiempo $(t_i - t_b)$. En los tanques sin membrana, el aire se disolverá poco a poco en el agua y será necesario entonces recargar periódicamente este volumen.

Volumen útil $V_{\acute{u}t}$

Es el volumen de agua almacenado en el tanque durante un ciclo y que alimentará el sistema mientras la bomba esté detenida, esto es durante el tiempo $(t_i - t_b)$.

Volumen efectivo V_{ef}

Es el volumen variable durante un ciclo, esto es, la suma de V_a a máxima presión más $V_{\acute{u}t}$. Al final del intervalo, el volumen efectivo V_{ef} estará ocupado sólo por aire a mínima presión.

Volumen remanente V_{rem}

Es el volumen de seguridad que permanece en la parte inferior del tanque y en el caso de tanques sin membrana, impide que el aire se escape hacia el sistema. V_{rem} debe ser $\geq 25\% V_{ef}$.

Volumen total V_t

El volumen total del tanque hidroneumático será la suma de $V_{ef} + V_{rem}$.

Cálculo del volumen útil necesario del tanque hidroneumático

Una vez la bomba se detenga, el volumen útil $V_{\acute{u}t}$ almacenado en el tanque hidroneumático continuará suministrando el caudal Q_s durante el tiempo restante $(t_i - t_b)$ y se cumplirá que:

$$V_{\acute{u}t} = Q_s t_i - Q_s t_b \text{ de donde } V_{\acute{u}t} = Q_s (t_i - t_b)$$

y según la ecuación (1) se tiene $V_{\acute{u}t} = Q_s (t_i - t_i/f)$ de donde:

$$V_{\text{út}} = Q_s t_i (1 - 1/f) \quad (2)$$

y dado que se conoce t_i y la relación de caudales $f = Q_b / Q_s$, se puede por tanto calcular el $V_{\text{út}}$. En la figura 3 se puede también estimar $V_{\text{út}}/Q_s$, en función del tiempo de operación de la bomba y para diferentes números de arranques/h del motor.

Cálculo del volumen efectivo

Considerando isotérmica la compresión y descompresión del aire y de acuerdo con la ley de Boyle-Mariott, se infiere que:

$V_a (P_{\text{máx}} + P_{\text{bar}}) = V_{\text{ef}} (P_{\text{mín}} + P_{\text{bar}})$ y considerando que $V_a = (V_{\text{ef}} - V_{\text{út}})$ se obtiene:

$$V_{\text{ef}} - V_{\text{út}} = (P_{\text{máx}} + P_{\text{bar}}) / (P_{\text{máx}} - P_{\text{mín}}) \quad (3)$$

En la figura 4 se muestra la variación de $V_{\text{ef}}/V_{\text{út}}$ en función de $(P_{\text{máx}} + P_{\text{bar}})$ y en

dependencia de la diferencia de presiones máxima y mínima.

Ejemplo de cálculo

En una planta de fabricación de vidrio se cuenta con un sistema de suministro de agua industrial, cuyos criterios de diseño y consumos son los siguientes:

- Caudal continuo = 12.1 m³/h – caudal discontinuo = 20.37 m³/h.
- Q_s definido = Q continuo x 1.15 + ½ x Q discontinuo = 24.1 m³/h.
- Sitio de instalación = Bogotá, D.C., a 2 650 msnm.
- Presión barométrica = 0.72 bar (72 kPa).
- Presiones: $P_{\text{máx}} = 5.0$ bar (500 kPa), $P_{\text{mín}} = 4.0$ bar (400 kPa).

Bomba seleccionada

- $Q_b = 36.15$ m³/h equivalente a 1.5 Q_s .
- Eficiencia promedio de la bomba = 70%.

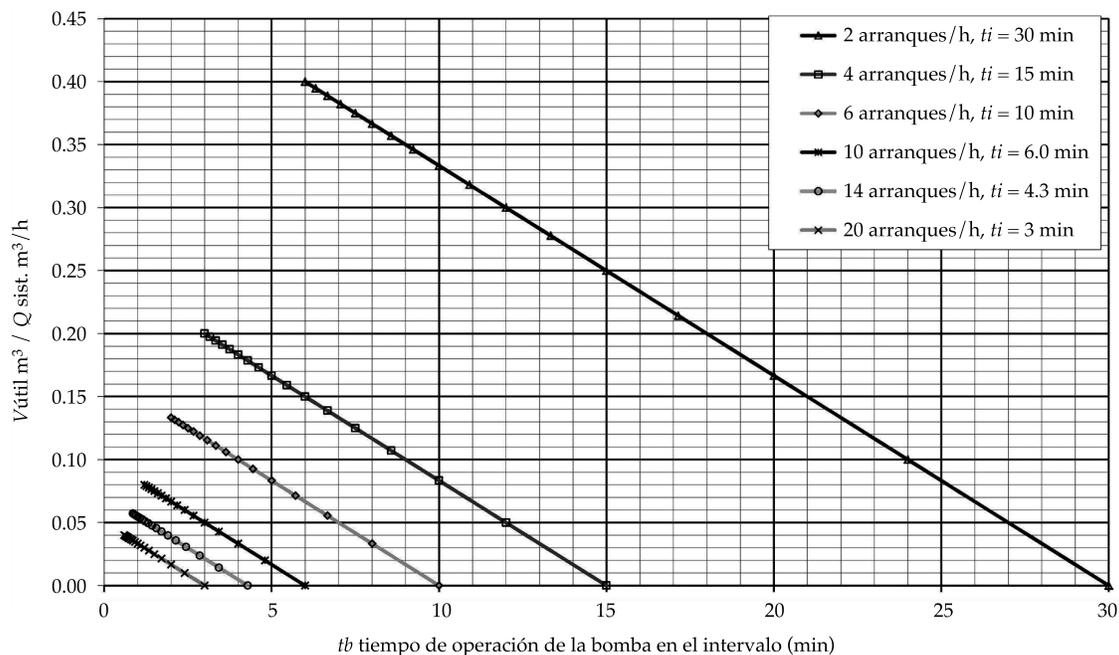


Figura 3. Volumen útil del tanque hidroneumático.

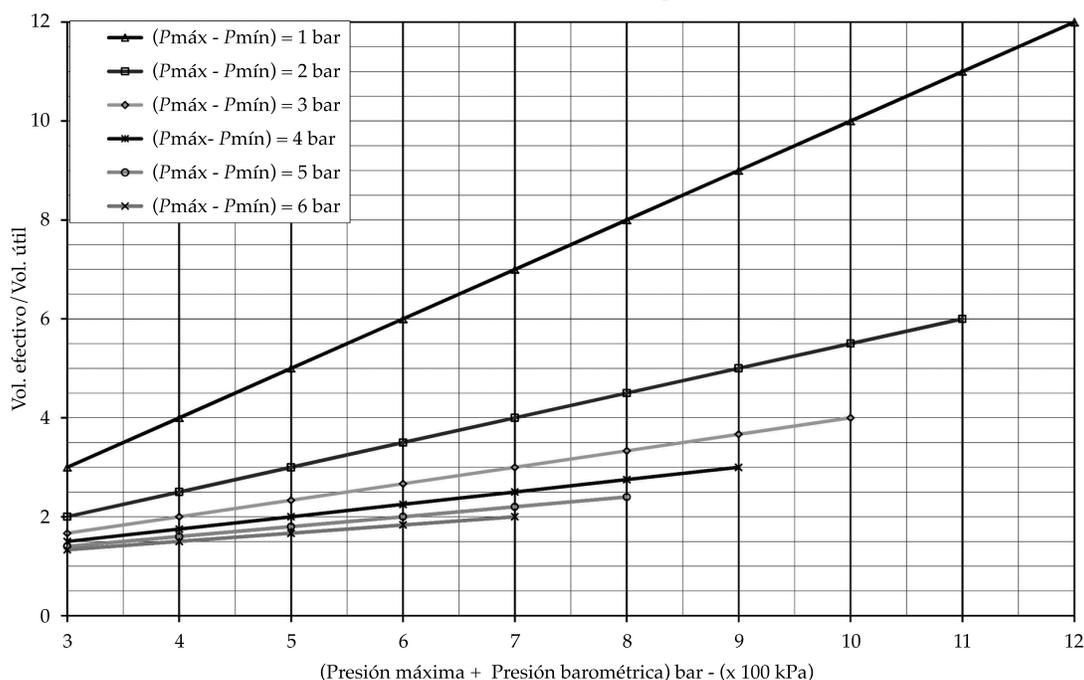


Figura 4. Volumen efectivo del tanque hidroneumático.

- Potencia al freno kW = $9.81 \times 36.15 \text{ m}^3/\text{h} \times 51.0 \text{ mcda}/(1\ 000 \times 0.7) = 25.83 \text{ kW} = 34.62 \text{ Hp}$.
- Potencia nominal del motor eléctrico seleccionado = 40 Hp.

Tiempo del intervalo y tiempo de operación de la bomba

- Máximo número de arranques/h = 10 (ver cuadro 1 para potencia media).
- Tiempo del intervalo $t_i = 1/\#$ de arranques/h = 0.1 h = 6.0 min.
- Relación de caudales $f = Q_b/Q_s = 36.15/24.1 = 1.5$.
- $t_b = t_i/f = 6.0 \text{ min}/1.5 = 4.0 \text{ min}$ (ver ecuación (1) y/o figura 1).

Cálculo de volúmenes

- Volumen útil: $V_{\text{út}} = Q_s t_i (1 - 1/f) = 24.1 \times 0.1 \times (1 - 1/1.5) = 0.8 \text{ m}^3$ (ver ecuación (2) y/o figura 3).

- Volumen efectivo: $V_{\text{ef}}/V_{\text{út}} = (P_{\text{máx}} + P_{\text{bar}})/(P_{\text{máx}} - P_{\text{mín}}) = (5.0 + 0.72)/(5.0 - 4.0) = 5.72$, de donde: $V_{\text{ef}} = 5.72 \times 0.8 = 4.58 \text{ m}^3$ (ver ecuación (3) y/o figura 4).
- Volumen de aire a presión: $V_a = V_{\text{ef}} - V_{\text{út}} = 4.58 - 0.8 = 3.78 \text{ m}^3$.
- Volumen remanente: $V_{\text{rem}} = 0.25 \times V_{\text{ef}} = 0.25 \times 4.58 = 1.15 \text{ m}^3$.
- Volumen total: $V_{\text{total del tanque}} = V_{\text{ef}} + V_{\text{rem}} = 4.58 + 1.15 = 5.73 \text{ m}^3$.

En el cuadro 2 y en la figura 5 se presenta un análisis de sensibilidad del tamaño del tanque en función de Q_b/Q_s .

Considerando entonces que la capacidad total calculada es de 5.73 m^3 (1 513.7 galones), se decidió instalar dos tanques en paralelo, cada uno con una capacidad total normalizada de 2.99 m^3 (792.0 galones, tanques de tamaño normalizado, diseñados y fabricados de acuerdo con lo indicado en el código ASME, American Society of Mechanical Engineers).

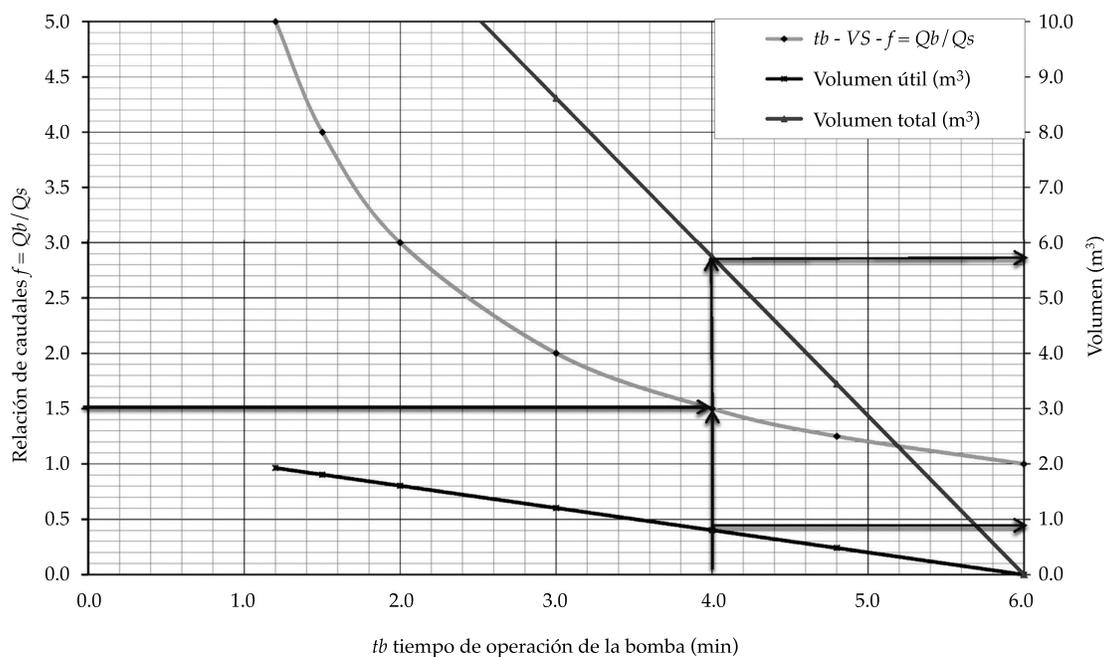


Figura 5. Ejemplo: sensibilidad del tamaño del tanque.

Cuadro 2. Ejemplo-análisis de sensibilidad del tamaño del tanque.

$f = Q_b/Q_s$	$t_b = t_i / f$	$t_b = 0.1/f$ en h	t_b en min	Vút en m^3	Vef en m^3	Va en m^3	Vrem en m^3	V total en m^3
5.00	$t_i/5.0$	0.020	1.20	1.93	11.03	9.10	2.76	13.79
4.00	$t_i/4.0$	0.025	1.50	1.81	10.34	8.53	2.58	12.92
3.00	$t_i/3.0$	0.033	2.00	1.61	9.19	7.58	2.30	11.49
2.00	$t_i/2.0$	0.050	3.00	1.21	6.89	5.69	1.72	8.62
1.50	$t_i/1.5$	0.067	4.00	0.80	4.60	3.79	1.15	5.73
1.25	$t_i/1.25$	0.080	4.80	0.48	2.76	2.28	0.69	3.45
1.00	$t_i/1.0$	0.100	6.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Cálculo de la capacidad necesaria del tanque según el método tradicional y el estado actual del arte

Según el Centrifugal Pump Lexicon y el Pump Handbook de KSB (KSB, 1975), el volumen total del tanque será:

$$V = K \times 0.312 \times Q_m / Z \times (P'a + P_b) / (P'a - P'e)$$

donde:

V = volumen en m^3 .

Q_m = capacidad media de la bomba $m^3/h = (Q'e + Q'a)/2$ (notado como Q_b en las páginas anteriores).

Z = frecuencia de arranques en $1/h$.

$Q'e$ = caudal de la bomba con presión mínima m^3/h .

$Q'a$ = caudal de la bomba con presión máxima m^3/h .

$P'a$ = presión máxima bar.

$P'e$ = presión mínima bar.

P_b = presión barométrica bar.

K = factor de corrección = 1.0 si $Q'a/Q'e < 0.5$, siendo este el caso.

Dado que el caudal medio de la bomba $Q_b/Q_s = 2.0$, se tiene que $Q_b = Q_m = 2.0 \times 24.1 = 48.2 \text{ m}^3/\text{h}$ y $V = 1.0 \times 0.312 \times 48.2 / 10 \times (5.0 + 0.72) / (5.0 - 4.0) = 8.6 \text{ m}^3$.

Se observa entonces que el volumen total del tanque de 8.6 m^3 , calculado por el método tradicional, corresponde a los valores indicados en el cuadro 2 (8.62 m^3) y en la figura 5 para $Q_b/Q_s = 2.0$, tal como era de esperarse.

Se observa también que dicho valor de 8.6 m^3 es superior en un 50% al valor de 5.73 m^3 , calculado por el método propuesto, considerando $Q_b/Q_s = 1.5$, y que la capacidad de la bomba instalada en el sistema de $36.15 \text{ m}^3/\text{h}$ es también inferior a la de $48.2 \text{ m}^3/\text{h}$ sugerida por el método tradicional.

Conclusiones

El cálculo del tamaño del tanque hidroneumático, basado en la relación Q_b/Q_s variable entre 1.25 y 2.0, sin exceder la máxima frecuencia de arranques del motor, permite evaluar la conveniencia de disminuir el tamaño del tanque y de la bomba, y con ello disminuir también el costo de la inversión inicial, a

cambio del aumento del tiempo de operación de la bomba en el ciclo y del correspondiente aumento del costo de operación (el costo de la energía). Para relaciones de Q_b/Q_s superiores a 2.0, el tamaño del tanque y de la bomba se incrementan notablemente, así como el costo respectivo.

Además, se puede concluir también que el dimensionamiento de la capacidad necesaria de un tanque hidroneumático dado, basado en la variación de Q_b/Q_s para máxima frecuencia del arranque, constituye un método general de cálculo y que el estado actual del arte, en el cual se establece una relación fija de $Q_b/Q_s = 2.0$, es un caso particular del método propuesto en esta nota técnica.

Recibido: 29/05/13

Aceptado: 16/11/13

Referencias

Fairbanks Morse Pump Corporation (1988). *Hydraulic Handbook*. Twelfth Edition. Kansas City: Fairbanks Morse Pump Corporation.



Figura 6. El autor junto a los dos tanques de 792 galones (2.99 m^3) citados en el ejemplo.

- Karassik, I. J., Messina, J. P., Cooper, P. & Heald, C. C. (2001). *Pump Handbook*. Third Edition. New York: McGraw Hill.
- KSB (1975). *Centrifugal Pump Lexicon*. Frankenthal, Germany: Klein, Schanzlin & Becker Aktiengesellschaft (KSB).
- KSB (1968). *KSB Pump Handbook. New Edition*. Frankenthal, Germany: Klein, Schanzlin & Becker Aktiengesellschaft (KSB).

Dirección institucional del autor

Ing. Alfonso Herrán-Sandoval

Universidad Nacional de Colombia.
Ingeniero Asociado de Ingetec, S.A.
Carrera 6° # 30 A-30
Bogotá, D.C., COLOMBIA
Teléfono: +57 (1) 3238 050, extensión 336
aherran@ingetec.com.co
aherrans@yahoo.com