

Evaluación del sistema de bombeo de agua del campus Pepito Tey de la Universidad de Las Tunas

Evaluation of the water pumping system of the Pepito Tey campus at the University of Las Tunas

Mario Abel Vega Vega¹ (mariov@ult.edu.cu) (<https://orcid.org/0000-0002-8161-1262>)

Dariel Pérez Ávila² (darielpa@ult.edu.cu) (<https://orcid.org/0000-0002-2505-1192>)

Adonis Navarro Machado³ (adonisnm@ult.edu.cu) (<https://orcid.org/0000-0002-0643-6978>)

Resumen

Con el objetivo de contribuir al uso eficiente de los recursos energéticos con que cuenta el país, se realiza la evaluación del sistema de bombeo de agua del campus Pepito Tey de la Universidad de Las Tunas. Para ello se efectuó el balance de energía mediante la aplicación de la ecuación de Bernoulli y luego se determinó el consumo de energía eléctrica actual del sistema. Como resultado de este trabajo se demostró que, desde el punto de vista energético, a pesar de utilizarse un sistema bomba-motor subcargado, no es conveniente sustituirlo por otro de menor potencia ya que no se lograrían ahorros de electricidad.

Palabras clave: ahorro de energía, ecuación de Bernoulli, bombeo de agua.

Abstract

In order to contribute to the efficient use of the country's energy resources, the evaluation of the water pumping system of the Pepito Tey campus at the University of Las Tunas is carried out, for which the energy balance was related by applying the equation Bernoulli and then the current electrical energy consumption of the system was determined. As a result of this work, it was shown that, from the energy point of view, despite being using a sub-charged pump-motor system, it is not convenient to replace it with another one with less power, since it would not achieve electricity savings.

Key words: energy saving, Bernoulli equation, water pumping

Ahorro de energía eléctrica por sustitución de motores subcargados

El ahorro de energía eléctrica es esencial a todos los niveles. A nivel de país, para disminuir los gastos en combustibles y otros insumos, restringir la dependencia energética del exterior, y reducir la emisión de gases de efecto invernadero. Para los

¹ Máster en Nuevas tecnologías para la educación. Ingeniero nuclear. Profesor Asistente. Centro de Estudios de Eficiencia Energética y Procesos Tecnológicos. Universidad de Las Tunas. Cuba.

² Ingeniero Industrial. Profesor instructor. Centro de Estudios de Eficiencia Energética y Procesos Tecnológicos. Universidad de Las Tunas. Cuba.

³ Ingeniero informático. Universidad de Las Tunas. Energético Universidad de Las Tunas. Cuba.

consumidores industriales, se traduce en dos posibles beneficios, reducción del pago por consumo de energía y por reducción de la demanda.

Según el reporte del 2011 de la International Energy Agency (citado por Quispe, 2015), los sistemas accionados con motores eléctricos son los principales usuarios finales de la energía eléctrica, y les corresponde aproximadamente el 68% de la demanda del sector industrial y el 46% de la demanda global de electricidad.

Los sistemas de bombeo de agua deben cumplir con los requerimientos técnicos que garanticen la estabilidad en los procesos productivos y de servicio y la eficiencia de estos, por lo que se hace necesario su estudio hidromecánico. En este sentido, se encamina el presente artículo, que tiene como objetivo evaluar el sistema de bombeo de agua del campus Pepito Tey de la Universidad de Las Tunas, para determinar si es posible disminuir su consumo energético.

Características del sistema de bombeo en el campus Pepito Tey de la Universidad de Las Tunas

En el campus Pepito Tey de la Universidad de Las Tunas, el agua que se consume es proveniente de la empresa de acueducto y alcantarillado, esta es almacenada en una cisterna, y luego es elevada hacia un tanque tipo hongo mediante una bomba centrífuga horizontal. El sistema de tuberías instalado, para llenar el tanque hongo desde la cisterna presenta tramos de tuberías de diferentes diámetros y materiales (ver figura 1), lo que incrementa las pérdidas de energía por fricción.

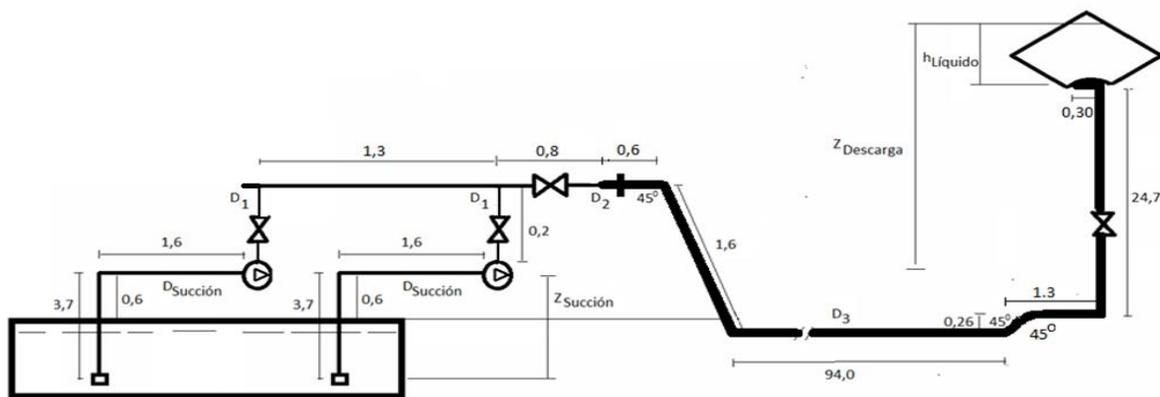


Figura 1 Sistema de tuberías bombeo de agua

Para determinar si la bomba instalada es la adecuada, es necesario conocer todas las longitudes, diámetros y material de todos los tramos de tuberías, así como de sus accesorios. Teniendo en cuenta que no existen los planos del proyecto para esta instalación hidráulica, se determinó mediante una inspección de campo los datos requeridos para llevar a cabo esta investigación, los que se muestran en la siguiente tabla:

| Sección | Longitud | Material | D. Nominal |
|---------|----------|-------------------|------------|
| | m | | |
| Succión | 5,30 | PVC | 3,00 |
| 1 | 0,20 | Acero galvanizado | 2,00 |
| 2 | 2,10 | Acero galvanizado | 3,00 |
| 3 | 97,50 | Acero galvanizado | 4,00 |
| 4 | 25,00 | Hierro fundido | 4,00 |

Tabla 1 Datos de las tuberías

La tubería de succión es de PVC con un diámetro de 3 pulgadas y longitud de 5,30m. Las secciones 1 a la 4 corresponden a la tubería de descarga con diámetro de 2, 3 y 4 pulgadas (ver tabla 1). Los materiales de las tuberías de descarga son acero galvanizado e hierro fundido. Los accesorios con que dispone la instalación se describen en la tabla 2, en lo que los valores de las resistencias hidráulicas locales se tomaron de la tabla 9 del apéndice del libro Colectivo de autores (2011).

| Accesorios | | KL |
|------------|-------------------|------|
| Sección | Accesorio | |
| Succión | Cheque | 10 |
| | Codo 90 | 0,75 |
| 1 | Válvula bola | 0,05 |
| | Codo 90 | 0,75 |
| 2 | Válvula retención | 2,00 |
| 3 | Ensanchamiento | 0,02 |
| | Unión Universal | 0,08 |
| | Codo 45 | 0,35 |
| | Codo 45 | 0,35 |

| | | |
|---|---------------|------|
| 4 | Codo 45 | 0,35 |
| | Codo 45 | 0,35 |
| | Codo 90 | 0,75 |
| | Válvula globo | 6,00 |
| | Codo 90 | 0,75 |
| | Expansión | 1,00 |

Tabla 2 Datos de los accesorios

El tanque instalado es del tipo hongo con las siguientes dimensiones que se muestran en la siguiente figura.

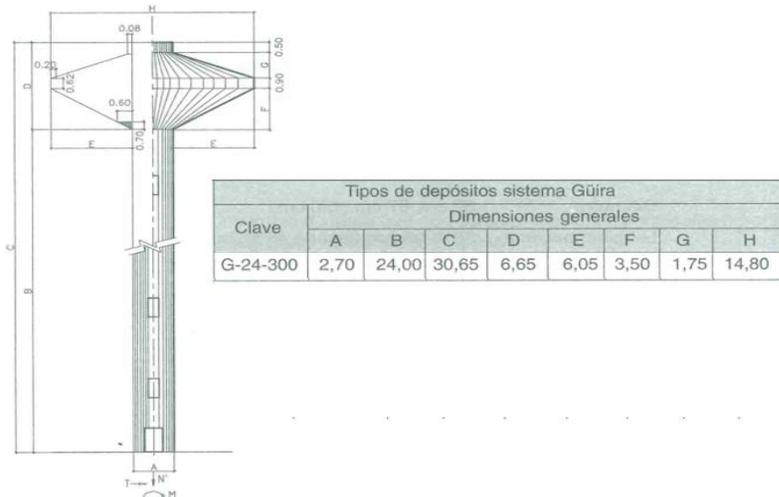


Figura 2 Tanque tipo hongo G-24-300

El volumen del tanque hongo instalado es de 300 m³, el tiempo de llenado es de 2 horas, la temperatura del agua a bombear se toma como 28 °C. Para esta temperatura la densidad del agua es de 996,235 kg/m³ y la viscosidad dinámica 0,000836 Pas.

Las bombas y sus motores eléctricos instalados, de procedencia húngara, tienen las siguientes características (Grundfos, s. a. y Kasatkina, 2014).

Estos datos se precisan en las tablas siguientes:

| | |
|--------|----------------------------|
| Tipo | NK 65-160/177 A1F2AE-SBAQE |
| Modelo | B97828549 P3 16 31 0002 |

País Hungría

| | | | |
|-------------|------------------|-------------------|-------|
| Caudal | Q | m ³ /h | 159,2 |
| Altura | H | m | 52,4 |
| Presión | P | bar | 16 |
| Temperatura | T _{max} | C | 10 |
| Velocidad | n | rpm | 3540 |
| Eficiencia | η | % | 87,1 |

Tabla 3 Datos de las bombas instaladas

Tipo bk - 8850 B crringbro

Modelo 6MC2 000LA 255H2

País Hungría

| | | | | |
|-----------------|-------|-----|-----------|-----------|
| Frecuencia | F | Hz | 60 | 60 |
| Voltaje | V | V | 380/660 | 460/795 |
| Corriente | I | A | 59,5/34,5 | 56,5/32,5 |
| Potencia | N | kW. | 30 | 34,5 |
| Factor Potencia | Cos φ | | 0,91 | 0,91 |
| Velocidad | n | rpm | 3550 | 3550 |
| Eficiencia | η | % | 92,1 | 92,6 |
| Cp | | db | 76 | 78 |

Tabla 4 Datos de los motores eléctricos

Las bombas se encuentran instaladas en paralelo, pero se utiliza una sola. La otra funge como reserva. Ello se muestra en la siguiente figura:

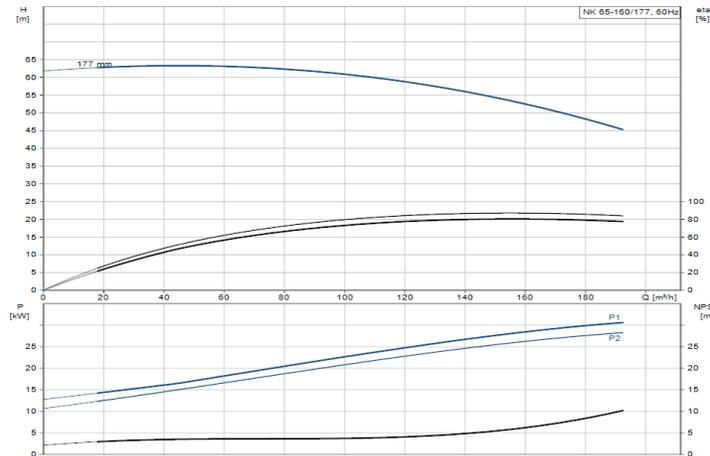


Figura 3 Curvas características de la bomba NK 65-160/177 A1F2AE-SBAQE

Procedimiento empleado para el cálculo de la curva altura - capacidad del sistema de tuberías

Para la solución del problema se aplicaron las ecuaciones que rigen el movimiento de un fluido newtoniano incompresible como el agua (Cengel y Cimbala, 2006; Mott, 2006).

Ecuación de Bernoulli:

$$H = \frac{P_2 - P_1}{\rho g} + \frac{v_2^2 - v_1^2}{2g} + (z_2 - z_1) + \sum h_f$$

(1)

Donde:

H - Energía mecánica total del líquido por unidad de peso, m.

$\frac{P_2 - P_1}{\rho g}$ - Energía mecánica por unidad de peso en virtud de la presión, m.

$\frac{v_2^2 - v_1^2}{2g}$ - Energía mecánica por unidad de peso en virtud de la velocidad, m.

$(z_2 - z_1)$ - Energía mecánica por unidad de peso en virtud de la altura, m.

$\sum h_f$ - Pérdidas de carga por fricción, m.

La aplicación de la ecuación de Bernoulli entre los puntos de succión y descarga queda:

$$H = \frac{P_2 - P_1}{\rho g} + \frac{v_2^2 - v_1^2}{2g} + (z_2 - z_1) + \sum h_f$$

$$\frac{P_2 - P_1}{\rho g} = 0 \quad \text{Recipientes en la succión y descarga abiertos}$$

$$\frac{v_2^2 - v_1^2}{2g} = 0 \quad \Delta Z \rightarrow \text{Se mide respecto a la superficie libre de las cisternas}$$

$A_{\text{cist}} \gg A_{\text{tub}}$

La ecuación se reduce a:

$$H = (z_2 - z_1) + \sum h_f$$

(2)

$$(z_2 - z_1) \quad \text{Constituye la carga estática (H para } Q = 0)$$

Regímenes de corriente

La naturaleza del flujo laminar o turbulento es indicada por el Número de Reynolds.

$$N_{Re} = \frac{v_m D_i \rho}{\mu}$$

(3)

Para tuberías, cuando N_{Re} :

$N_{Re} < 2100$ Régimen es laminar

$2100 < N_{Re} < 4000$ Régimen es de transición.

$N_{Re} > 4000$ Régimen es turbulento

Pérdidas de carga por fricción

Las pérdidas por fricción se calculan en las tuberías de succión y descarga a partir de la longitud de las tuberías y la cantidad de accesorios.

$$\sum h_f = \sum h_{\text{fubos}} + \sum h_{\text{faccessorios}}$$

(4)

a) Pérdidas de energía en tubos recto

$$h_{fubos} = f \frac{L}{D_i} \frac{v^2}{2g}$$

(5)

L: Longitud total de la tubería.

D_i: Diámetro interno de la tubería.

v: Velocidad media del fluido por la tubería.

f: Factor de fricción de Darcy (se determina por el Diagrama de Moody o fórmulas según el régimen laminar o turbulento del fluido)

Utilizando el diagrama de Moody

$$f = f [Re, \varepsilon / D_i]$$

ε : Rugosidad de la tubería. Se obtienen por la tabla 8 del apéndice del libro Colectivo de autores, 2011).

Por fórmulas (método utilizado en la investigación):

Para flujo laminar

$$f = \frac{64}{Re}$$

(6)

Para flujo turbulento

$$f = \left(4 \left(\log_{10} \left(0,27 \frac{\varepsilon}{D_i} + \left(\frac{7}{N_{Re}} \right)^{0,9} \right)^2 \right) \right)^{-1}$$

(7)

b) Pérdidas de energía en accesorios

$$h_{faccessorios} = \sum K_{Li} \frac{v^2}{2g}$$

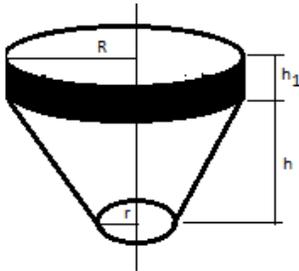
(8)

v- Velocidad media del fluido por la tubería.

K_{LI} – Coeficiente de pérdidas en accesorios. Se obtiene por datos del fabricante del accesorio o tablas (Colectivo de autores, 2011; Cengel y Cimbala, 2006)

Cálculo del volumen de agua en el tanque

El tanque hongo solo se llena hasta el tubo de desagüe situado a $h+h_1$ del fondo



$$V_1 = \frac{h\pi}{3}(R^2 + r^2 + Rr)$$

(9)

$$V_2 = \pi R^2 h_1$$

(10)

$$V_{Tanque} = V_1 + V_2$$

(11)

Construcción la curva altura – capacidad del sistema de tuberías

A partir del tiempo de llenado (2 horas) se determinó flujo volumétrico por la siguiente ecuación:

$$Q = \frac{V_{Tanque}}{T_{llenado}}$$

Donde

Q- Flujo volumétrico (m^3/s).

V_{Tanque} - Volumen máximo de agua en el tanque (m^3).

$T_{llenado}$ - Tiempo de llenado del tanque (s).

Para 6 valores inferiores y superiores al valor del flujo volumétrico determinado, con ayuda de Excel, se determinan las pérdidas totales por fricción. Luego se calcula la altura del sistema (energía mecánica total por unidad de peso) para cada valor de Q

$$H_{Sistema} = (z_{Descarga} - z_{Succión}) + \sum h_f$$

(12)

Con los valores de Q y $H_{Sistema}$ se construye la curva H-Q del sistema de tuberías como se muestra en la figura.

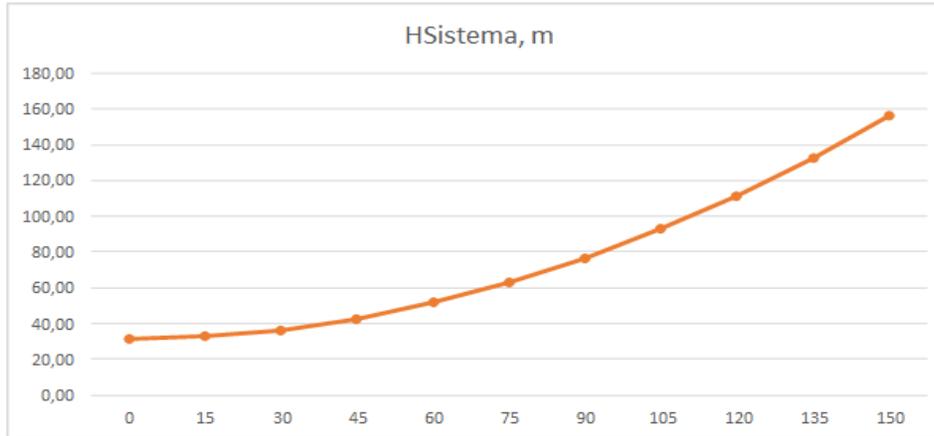


Figura 4 Curva H-Q del sistema de tuberías

Determinación del punto de operación del sistema bomba- tuberías

Para la determinación del punto de operación del sistema bomba-tubería se superponen las curvas H-Q del sistema de tuberías y de la bomba (obtenida del sitio web del fabricante, Grundfos, s. a.). La intersección de ambas curvas establece el punto de operación del sistema bomba-tubería, como muestra la figura 5: $Q=75 \text{ m}^3/\text{h}$ ($0,02083 \text{ m}^3/\text{s}$) y $H_{\text{Bomba}}=63,04 \text{ m}$

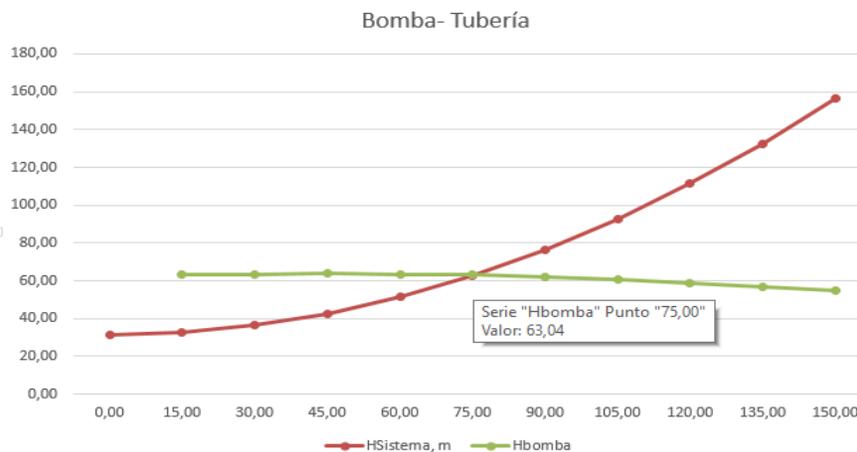


Figura 5 Punto de operación del sistema bomba-tuberías

Características de la bomba en el punto de trabajo

Las características de la bomba en el punto de trabajo se muestran con puntos amarillo y rojos en la figura siguiente (obtenida con ayuda de las gráficas publicadas por el fabricante en su sitio web, Grundfos, s. a.):

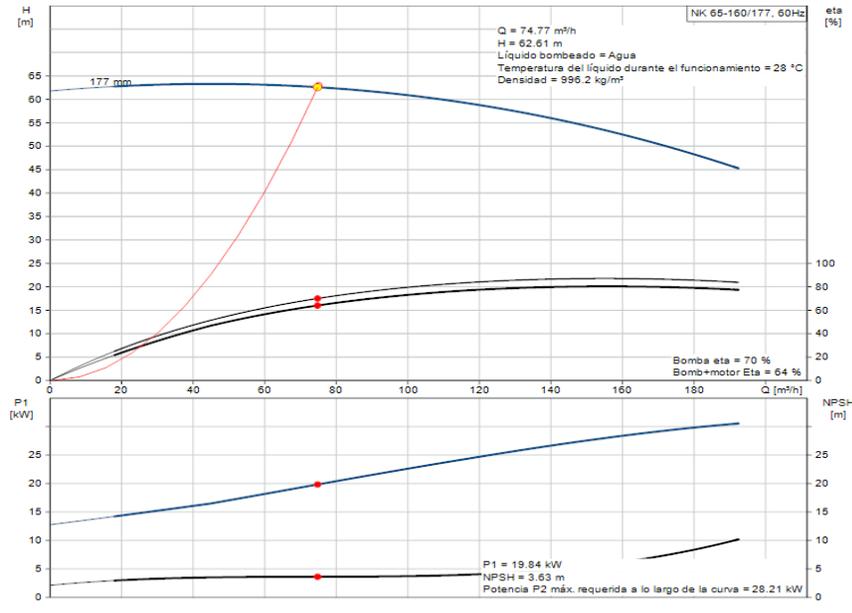


Figura 6 Características de la bomba en el punto de trabajo

Carga neta de succión positiva (NPSH)

$$(NPSH)_{SistTub} = \frac{P_{entrada} - P_v}{\rho g} = h_{ss} - h_{fs} - \frac{P_v}{\rho g} = \frac{P_1}{\rho g} \pm Z_1 - h_{fs1} - \frac{P_v}{\rho g} \quad (13)$$

$$(NPSH)_{SistTub} = \frac{101325}{996,23 * 9,81} + 3,7 - 7,66 - \frac{3783,05}{996,3 * 9,81}$$

$$(NPSH)_{SistTub} = 5,9m$$

$$(NPSH)_{Bomba} = 3,63m$$

La NPSH del sistema de tuberías es superior al de la bomba en más de 0,5 m, por lo que se cumple la condición para evitar la cavitación.

Potencia eléctrica actual

Para determinar la potencia actual, primero calculamos la potencia hidráulica real y luego la potencia eléctrica que consume el motor en las condiciones reales de operación.

- Potencia hidráulica real

$$(14) P_H = \frac{\rho g Q H}{1000}$$

$$P_H = \frac{996.23 * 9.81 * 0,02083 * 63.04}{1000} = 12.91 kW$$

- Potencia eléctrica consumida

$\eta_{Bomba-Motor} = 64\%$, según gráfico fabricante para el caudal real (ver figura 5)

$$(15) P_{Electrica} = \frac{P_H}{\eta_{Bomba-Motor}}$$

$$P_{Electrica_actual} = \frac{12,9}{0,64} = 20,17 kW$$

Ahorro de energía por sustitución del motor eléctrico

En las condiciones reales, el sistema requiere una bomba con un $Q_N = 75 \text{ m}^3/\text{h}$ y una $H_N = 65,0 \text{ m}$ y con una $P_H = 13 \text{ kW}$

- Potencia del motor requerido

De las características de la bomba en el punto de trabajo (figura 6) $\eta_{Bomba} = 87\%$

$$(16) P_{eje} = \frac{P_H}{\eta_{Bomba}} = \frac{13,0}{0,87} = 14,9 kW$$

$$(17) P_{motor} = K_{seguridad} P_{eje}$$

$K_{seguridad} = 1,15$ (Amador, 2013)

$$P_{Motor} = 1,15 * 14,4 = 17,1 kW$$

Se selecciona un motor de potencia $P_N = 20 \text{ kW}$

- Potencia eléctrica consumida por el motor requerido

Se asume una eficiencia del motor de $\eta_{Motor} = 90\%$

$$P_{Electrica_nueva} = \frac{P_{motor}}{\eta_{Motor}} = \frac{20,0}{0,90} = 22,2 kW$$

(18)

Ahorro de energía por sustitución del motor eléctrico

$$Ahorro = (P_{Electrica_actual} - P_{Electrica_nueva}) t_{Trabajo_anual}$$

(19)

$$Ahorro = (20,17 - 22,2) \times 660 = -1339,8 kWh$$

Como se observa, al sustituir el motor sobredimensionado no se obtiene ahorro de electricidad, lo que corrobora lo planteado por Viego y otros (2010), quienes afirman que:

No siempre resulta energéticamente conveniente cambiar un motor subcargado por uno de la potencia adecuada, lo que depende del tipo y de la eficiencia de cada motor, del estado de carga en cuestión y de los ahorros adicionales que se obtengan por mejora del factor de potencia en el circuito o sistema (p.204).

Precisiones finales

El estudio realizado demuestra que, económicamente, no se justifica cambiar la bomba-motor actual por uno de menor potencia, aun más si se tienen en cuenta las pocas horas de trabajo anual de la bomba (660 horas).

Referencias

- Amador, J. L. (2013). *Selección de potencias nominales y tensiones de motores eléctricos acompañantes de bombas*. Recuperado de http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1680-3382013000100005
- Cengel, Y. y Cimbala, J. (2006). *Mecánica de Fluidos. Fundamentos y Aplicaciones*. 1ra edición. México: McGraw-Hill.
- Colectivo de autores (2011). *Algunas Operaciones Básicas de la Industria Química para el Ingeniero Industrial*. La Habana: Félix Varela.
- De León, G., Gómez, J. & Viego, P. (2019). Ahorro de energía por sustitución de motores subcargados que accionan cargas de alta inercia. *Centro Azúcar*, 46(1). Recuperado de <http://centrozucar.uclv.edu.cu>
- Grundfos (s. a.). *Bomba NK 65-160/177 A1F2AE-SBAQE – 97828549*. Recuperado de <https://product-selection.grundfos.com/product-detail.product-detail.html?custid=GMA&lang=ESP&productnumber=97828549&qcid=81950534>
- Mott, R. (2006). *Mecánica de Fluidos*. 6ta edición. México: Pearson Educación.

Quispe, E. (2015). *Recomendaciones para la aplicación de motores de alta eficiencia*. Recuperado de <http://www.reporteroindustrial.com/temas/Recomendaciones-para-la-aplicacion-de-motores-de-alta-eficiencia+105646>

Viego, P. y otros (2010). *Uso final de la energía eléctrica*. La Habana: Félix Varela.