

## Método práctico de obtención de potencia y eficiencias de unidades de bombeo en operación

M.Sc. Ing. Ángel Urbano Barreda Trujillo  
Departamento de Ingeniería Hidráulica. Universidad de Oriente. Cuba.  
email: [abarreda@fco.uo.edu.cu](mailto:abarreda@fco.uo.edu.cu)

### RESUMEN

El procedimiento propuesto, basado en el empleo de un coeficiente de proporcionalidad de potencia-rendimiento deducido por métodos estadísticos, permite determinar, con un error menor del 5%, en motores de inducción asincrónicos trifásicos, la potencia solicitada por la bomba y las eficiencias de la bomba y del motor en régimen de operación, a partir de las mediciones de la potencia consumida de la red de suministro de energía eléctrica. Es un procedimiento no invasivo que por su simpleza, demanda de mínimos recursos y la precisión de los resultados lo hacen factible en la realización de los peritajes a las unidades de bombeo sin necesidad de sacarlas de operación.

**Palabras clave:** eficiencia energética, eficiencia hidráulica, unidades de bombeo.

## Practical method to obtain power and efficiencies of pumping units in operation

### ABSTRACT

The proposed method, based on the use of a proportionality coefficient of power and efficiency, deduced by statistical methods, allows the determination, with an error below 5 %, in asynchronous three-phase induction motors, of the power requested by the pump and the efficiencies of the pump and motor in operating regime from measurements of the power consumption of the supply network. The procedure is non-invasive, simple and requires minimum expense. Due to the accuracy of its results, makes itself feasible in the realization of expert reports to the pumping units without disconnecting them.

**Keywords:** energy efficiency, hydraulic efficiency. pumping units.

## INTRODUCCIÓN

Con frecuencia las unidades de bombeo funcionan más de 2000 horas al año, y se reporta que el 20% del consumo eléctrico mundial se utiliza en sistemas de bombeo. El costo del ciclo vital de una unidad de bombeo (conjunto motor-bomba) es una forma de expresar cuánto cuesta adquirir, instalar, utilizar, mantener y desechar una unidad de bombeo durante su vida útil. De forma general se puede establecer que los costos de inversión y de mantenimiento constituyen el 20 % mientras que el costo por consumo energético llega a alcanzar entre el 60% y el 80% del costo del ciclo vital.

El control del comportamiento periódico de los indicadores técnico-económicos, y entre ellos el consumo energético por metro cúbico de fluido bombeado ( $\text{kW.h/m}^3$ ) y las eficiencias energética e hidráulica, constituye una herramienta de trabajo fundamental para el personal técnico y administrativo responsabilizado con la explotación de un sistema de bombeo, ya que permiten incidir en aquellos aspectos que son determinantes para su explotación eficaz y eficiente, así como en la toma de decisiones ante situaciones eventuales.

Los principales factores que influyen en el consumo de energía y en el comportamiento de las eficiencias energética e hidráulica de un sistema de bombeo son:

- El perfil de carga-caudal
- El rendimiento de la bomba para los puntos de operación del sistema.
- El rendimiento del motor.
- El dimensionado de la bomba. A menudo, los márgenes de seguridad establecidos en el diseño, y/o el redondeo de los cálculos, tienden a proponer la instalación de bombas sobredimensionadas para una aplicación determinada.
- Otros componentes del sistema, como tuberías, válvulas y otras pérdidas locales.
- Métodos de ajuste del punto de operación del sistema de bombeo.
- El estado técnico de las unidades de bombeo y del sistema de bombeo en general.

La necesidad de dilucidar incertidumbres o desconocimientos del comportamiento operacional de las unidades de bombeo en relación con los parámetros de diseño tanto hidráulicos como eléctricos, o en relación con los índices técnicos-económicos de eficiencia y de explotación, requiere la realización de un peritaje, que constituye en esencia una investigación de carácter tecnológica. Los resultados del peritaje pueden dar lugar a la toma de decisiones para recuperar los parámetros de diseño e índices técnicos de eficiencia de explotación, o para dar respuesta a nuevas solicitaciones, aspectos que pueden ser logrados por medio de:

- El mantenimiento de las unidades de bombeo.
- La reparación y/o rehabilitación de las unidades de bombeo.
- La sustitución de unidades de bombeo.
- La aplicación de procedimientos de ajuste de operación de las unidades de bombeo, por cambios en: el estado técnico; la demanda o la calidad del fluido; disponibilidad de reservas de fluido o energéticas; régimen de bombeo; etc.

Es una realidad que por lo general, no se disponen de las curvas características de los motores eléctricos de las unidades de bombeo reportadas en catálogos por el fabricante, lo cual impide determinar la potencia solicitada por la bomba, a partir del conocimiento de la potencia consumida de la red de suministro eléctrico por el motor. Por otra parte, ante esta situación, resulta embarazoso determinar en régimen de operación, sin incurrir en errores, la eficiencia hidráulica y energética de la unidad de bombeo. También puede darse el caso que aún

disponiendo de las curvas características del motor, éste haya sido sometido a reparaciones y modificaciones que den lugar a cambios del diseño de su devanado (Viego y Quispe 2001), y por tanto de los parámetros de diseño del motor reportados en la chapilla y la no correspondencia con las curvas características originales. Una solución a esta problemática sería la de someter el motor eléctrico a ensayo en un banco de pruebas al efecto (Costa et al. 2004), lo cual implica su desmontaje y salida de operación.

En los últimos años han aparecido en el mercado instrumentos especiales basados en tecnologías de la informática, de uso práctico en la industria para la determinación de la eficiencia del motor y de la potencia entregada en régimen de operación, algunos de estos instrumentos requieren que el motor sea desacoplado temporalmente para realizar pruebas en vacío (sin carga) para minimizar los errores. Por otra parte, los altos precios de estos instrumentos en el mercado y dificultades con su reparación y calibración no los hacen atractivos.

### PROCEDIMIENTOS DE ESTIMACIÓN DE LA POTENCIA SOLICITADA POR LA BOMBA AL MOTOR ELÉCTRICO

En la práctica se aplican diversos procedimientos para estimar el estado de carga del motor eléctrico en régimen de operación cuando el acople con la bomba es directo (Costa y Vilaragut 2004) a partir de:

- 1) La potencia " $P_{2n}$ " y la eficiencia nominal reportados en la chapilla del motor y la medición de la potencia consumida " $P_1$ ", para estimar la potencia solicitada por la bomba " $P_2$ ", partiendo del criterio que el valor de la eficiencia se mantiene constante, lo cual solo se cumple aproximadamente para motores del alto rendimiento.
- 2) A partir de la medición de la frecuencia de giro del motor, determinar el deslizamiento " $n$ " y estimar la potencia solicitada por la bomba en relación con la potencia nominal partiendo de la misma relación entre el deslizamiento calculado y el nominal ( $n/ns$ ).
- 3) De igual manera, otro procedimiento propone que el estado de carga es proporcional a la relación entre la corriente medida y la corriente nominal. La proporcionalidad lineal de la corriente consumida solo se cumple aproximadamente para un estrecho rango del estado de carga del motor.

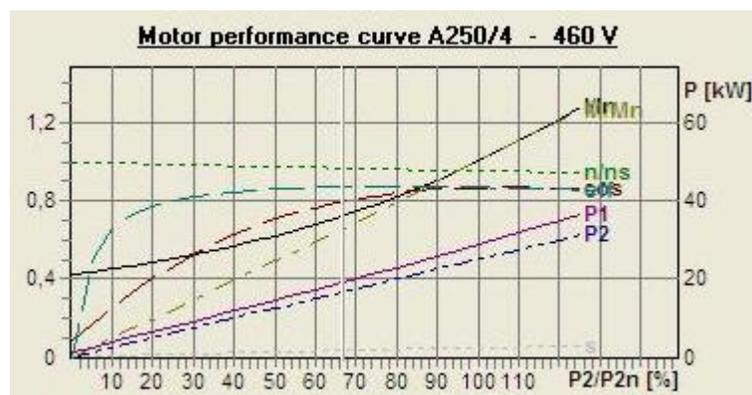


Figura 1. Curvas características de un motor eléctrico asincrónico trifásico a 60 Hz, de alto rendimiento con una potencia nominal " $P_{2n}$ " de 25 kW.

La estimación del estado de carga del motor por estos procedimientos solo permite tener un criterio a priori del comportamiento operacional del sistema de bombeo, que por lo general manifiesta una correspondencia entre el estado de carga del motor y las posibles causas que la originan. Ver tabla 3 al final.

### **Procedimiento basado en el método del circuito equivalente para la determinación de la potencia y la eficiencia de los motores eléctricos asincrónicos trifásicos en régimen de operación.**

Se reportan las normativas para ensayos de máquinas eléctricas (IEEE 1996, IEC 1994), así como metodologías para la determinación de la potencia entregada en el eje y la eficiencia de los motores eléctricos asincrónicos trifásicos en régimen de operación con una alta precisión (Álvarez 2009); (Freyre y Jornet 2000); (Vilaragut et al. 2004), siendo una de las más factibles, la basada en algoritmos genéticos que emplean el método del circuito equivalente desarrollada por un colectivo de autores del Centro de Estudios de Energía y Medio Ambiente. Universidad de Cienfuegos. Cuba (Sousa et al. 2005). La aplicación de la referida metodología requiere disponer de un analizador de redes, un amperímetro de gancho u otro instrumento convencional que permita determinar la intensidad de la corriente, un puente de Wheatstone u otro instrumento convencional para determinar resistencia del estator, un termómetro para medir la temperatura a la cual fue determinada la resistencia del estator, tacómetro óptico o estroboscopio preferiblemente acoplado a una tarjeta de adquisición de datos que posibilite almacenar las mediciones de la frecuencia de giro del motor automáticamente, y del software de cálculo elaborado al efecto en MATLAB 7.0 para el procesamiento de la información. Además, es criterio de los autores, de que es necesaria una estrecha colaboración con los técnicos, personal de operación y autoridades administrativas de la entidad para proceder a la realización de las mediciones, ya que es necesario tener en cuenta los efectos de otros consumos energéticos.

### **PROCEDIMIENTO BASADO EN EL COEFICIENTE DE PROPORCIONALIDAD “ $C_{P-R}$ ” DE POTENCIA-RENDIMIENTO PARA LA DETERMINACIÓN DE LA POTENCIA Y LA EFICIENCIA DE LOS MOTORES ELÉCTRICOS ASINCRÓNICOS TRIFÁSICOS DE UNIDADES DE BOMBEO EN RÉGIMEN DE OPERACIÓN**

Los motores eléctricos utilizados para accionar las bombas rotodinámicas son de corriente alterna, asincrónicos, trifásicos, y de rotor en cortocircuito (también denominados como rotor tipo jaula de ardilla), en correspondencia con las características de trabajo comunes de las bombas, es decir:

- Servicio de velocidad prácticamente constante, con deslizamientos en vacío mínimo del 2% y a plena carga máximo del 8%.
- Par de arranque no excesivo (del 150 al 250% del par a plena carga).
- Potencias entre 0,35 a 1000 kW.

Los motores eléctricos en general son máquinas eficientes (Álvarez 2009), no obstante, en correspondencia con las características de su diseño electromagnético y mecánico, los motores eléctricos asincrónicos trifásicos utilizados en las unidades de bombeo, se clasifican en el presente trabajo atendiendo a su rendimiento nominal en tres categorías:

- Bajo Rendimiento < 80%
- 80% ≥ Rendimiento Medio < 90 %
- Alto Rendimiento ≥ 90 %

Los motores asincrónicos se caracterizan por tres parámetros íntimamente relacionados y que expresan directamente sus propiedades: la potencia consumida de la red de suministro eléctrico “ $P_1$ ”, la frecuencia de rotación “ $N$ ”; y el par motor “ $M$ ” (momento o torque) en el eje (GRUNDFOS A/S. 2009). La relación entre estos tres parámetros se expresa por:

$$M \propto \frac{P_1}{N_o} \Rightarrow M = K * \frac{P_1}{N_o} \quad (\text{N-m}) \quad (1)$$

$K$ : coeficiente de igualdad.

$P_1$ : potencia consumida de la línea de suministro eléctrico, (watt)

$N_o$ : frecuencia de rotación, (rpm.)

La potencia en el eje del motor se determina en función del par motor por la expresión:

$$P_2 = M * \omega = 2 * \pi * M * \frac{N}{60} = 0,1047 * M * N_o \quad (\text{watt}) \quad (2)$$

$P_2$ : potencia en el eje del motor

$\omega$ : velocidad angular (rad/s).  $\omega = 2\pi n_o$

$n_o$ : revoluciones por segundo (rps).  $n_o = N_o/60$

$M$ : momento en el árbol del motor, (N-m)

Y sustituyendo el momento:

$$P_2 = 0,1047 * K * P_1 \quad (\text{kW}) \quad (3)$$

Como **Coficiente de Proporcionalidad de Potencia-Rendimiento** “ $C_{P-R}$ ” se ha denominado al producto:

$$C_{P-R} = 0,1047 * K \quad (4)$$

$$P_2 = C_{P-R} * P_1 \quad (\text{kW}) \quad (5)$$

para una red de suministro trifásica (3 $\phi$ ):

$$P_1 = \frac{\sqrt{3} * V * I * \cos \varphi}{1000} \quad (\text{kW}) \quad (6)$$

$V$ : voltaje en la línea, en volt (V).

$I$ : intensidad de corriente que consume el motor, en ampere (A).

$\cos \varphi$ : factor de potencia del motor (depende de la intensidad consumida).

### El coeficiente de proporcionalidad “ $C_{P-R}$ ” de potencia-rendimiento

Los coeficientes de proporcionalidad “ $C_{P-R}$ ” fueron determinados por el autor empleando métodos estadísticos a partir de una muestra aleatoria de 100 ensayos de banco de motores asincrónicos trifásicos para bombas rotodinámicas, seleccionada de una población de 383 ensayos (ABS 2003), y estructurada inicialmente en cuatro rangos de potencia nominal. Los coeficientes de proporcionalidad fueron evaluados atendiendo a 5 criterios: marca del motor; la frecuencia de la energía eléctrica (50 y 60 Hz); la frecuencia de rotación (rpm); la potencia y la eficiencia nominal. Esta base de datos de ensayos de motores fue obtenida del catálogo electrónico para la selección de bombas y motores de la firma ABS (2003). Los motores cumplimentan las normas de ensayos establecidas por la IEC (1994).

Los motores evaluados responden a las tres categorías de clasificación de los rendimientos nominales referidas anteriormente y comprendidos desde 0,7 kW a 1000 kW de potencia nominal. Están acoplados directamente a: bombas diseñadas para aguas limpias y residuales; bombas de circulación para sistemas de climatización; y bombas para procesos industriales; en posición de trabajo horizontal y vertical, e instalados en seco y sumergidos en función del uso, diseño y capacidad de la bomba correspondiente.

Los análisis preliminares demostraron que las frecuencias de la energía eléctrica y de rotación del motor no tenían incidencia sobre el coeficiente de proporcionalidad. En igualdad de categoría de rendimiento la marca del motor no mostró incidencia significativa en el coeficiente de proporcionalidad. Por el contrario, la potencia nominal, la categoría del rendimiento y el estado de carga del motor, indicaron una incidencia directa con el coeficiente de proporcionalidad, marcando cambios significativos para determinados rangos de valores de estos parámetros.

Lo anterior señaló la necesidad de:

- a. Reagrupar los motores en 6 rangos de potencia nominal y tres categorías de rendimiento
- b. Aplicar para cada rango de potencia y categoría de rendimiento de forma independiente, el procesamiento estadístico de los parámetros obtenidos en los ensayos.
- c. Aplicar como procesamiento estadístico la teoría de las muestras pequeñas, utilizando el estadígrafo “t” de Student, y determinando los límites de confianza para el 95% de probabilidad de los coeficientes de proporcionalidad para la población por cada rango de potencia nominal y categoría de rendimiento.

**Tabla 1. Coeficientes de proporcionalidad “ $C_{P-R}$ ” para motores asincrónicos trifásicos**

Rango de $P_{2n}$ (kW)	Rendimiento < 80%		80 % $\geq$ Rendimiento < 90%		90 % $\geq$ Rendimiento	
	Estado de Carga del Motor en %					
	25 $\leq$ > 50	50 - 120	25 $\leq$ > 50	50 - 120	25 $\leq$ > 50	50 - 120
$P_{2n} < 5$	<b>0,60</b>	<b>0,70</b>	<b>0,70</b>	<b>0,80</b>		
$5 \geq P_{2n} < 30$	<b>0,65</b>	<b>0,75</b>	<b>0,76</b>	<b>0,84</b>	<b>0,84</b>	<b>0,90</b>
$30 \geq P_{2n} < 100$			<b>0,84</b>	<b>0,90</b>	<b>0,84</b>	<b>0,90</b>
$100 \geq P_{2n} < 250$					<b>0,87</b>	<b>0,90</b>
$250 \geq P_{2n} \leq 500$					<b>0,90</b>	<b>0,95</b>
$500 > P_{2n}$					<b>0,95</b>	<b>0,95</b>
$P_{2n}$ : Potencia nominal del motor						

Los coeficientes de proporcionalidad “ $C_{P-R}$ ” de potencia-rendimiento de la población de 383 ensayos, son reportados en la tabla 1, por rango de potencia nominal y categoría de rendimiento del motor, y constituyen valores promedio comprendidos dentro de los límites de confianza para el 95% de probabilidad.

### DETERMINACIÓN DE LAS EFICIENCIAS ENERGÉTICA E HIDRÁULICA

Para acople directo del motor y la bomba, la eficiencia del motor se determina por la expresión:

$$\eta_{Motor} = \frac{P_2}{P_1} * 100 \quad (\%) \quad (7)$$

La eficiencia hidráulica de la bomba se determina por la expresión:

$$\eta_{Bomba} = \frac{P_H}{P_2} * 100 \quad (\%) \quad (8)$$

$$P_H = \gamma * H * Q / 1000 \quad (\text{kW}) \quad (9)$$

La potencia hidráulica “ $P_H$ ” o potencia útil entregada al fluido también se denomina por “ $P_3$ ”

$P_H = P_3$  : potencia hidráulica útil, (kW)

$\gamma_e$  : peso específico del fluido a la temperatura de bombeo “ $T$ ” (°C), (N/m<sup>3</sup>).

$H$  : carga manométrica de bombeo, (m) de columna de agua

$Q$  : caudal de bombeo, (m<sup>3</sup>/s)

Por tanto, el problema se reduce a que, para el cálculo de las eficiencias energética e hidráulica de la unidad de bombeo (Sousa et al. 2005), es imprescindible determinar previamente en régimen de operación, la potencia solicitada por la bomba “ $P_2$ ” y la potencia hidráulica entregada al fluido bombeado “ $P_H$ ”, para poder evaluar el estado técnico de la unidad de bombeo y/o el comportamiento operacional hidráulico y energético del sistema de bombeo.

La potencia “ $P_2$ ” se puede determinar estableciendo el coeficiente de proporcionalidad “ $C_{P-R}$ ” y midiendo la potencia consumida de la red de suministro eléctrico “ $P_1$ ”. La potencia “ $P_1$ ” se puede medir directamente con un vatímetro, o calcularla midiendo los valores de voltaje, intensidad y el factor de potencia (cos  $\varphi$ ) con instrumentos portátiles, o con un analizador de redes de disponerse de éste. También puede tomarse de lecturas del metro contador de electricidad para un período de tiempo dado, si éste solo reporta el consumo del motor en evaluación.

La potencia hidráulica “ $P_H$ ” se determina midiendo el valor del caudal bombeado con un caudalímetro o por el método volumétrico, y el valor de la carga con un manómetro situado a la salida de la bomba. El peso específico se selecciona de tablas al efecto para la temperatura del fluido.

Para la determinación de la carga de bombeo real se requiere instalar lo más cerca posible de la brida de succión un vacuómetro o un manómetro y otro manómetro lo más cerca posible de la brida de impulsión. Pero el hecho es que en los sistemas de bombeo, salvo contadas excepciones, no tienen instalado el vacuómetro, dificultándose la obtención de la carga real de bombeo.

**Procedimiento experimental en régimen de operación de las unidades de bombeo para la determinación del comportamiento hidráulico y energético**

Es de conocimiento que el procedimiento experimental para la realización de los ensayos en régimen de operación de las unidades de bombeo para la determinación del comportamiento hidráulico y energético, consiste en la puesta en funcionamiento del conjunto motor-bomba con el caudal de bombeo máximo, e ir reduciendo el caudal en cada ensayo, por medio del cierre progresivo de la válvula situada en la tubería de impulsión, hasta alcanzar el cierre total de la misma, es decir, caudal cero.

Para cada punto de operación seleccionado comprendido entre  $Q_{máx}$  y  $Q = 0$  se miden: la carga; el caudal; la frecuencia de giro del motor; la tensión e intensidad de corriente; y el factor de potencia o la potencia consumida, tabla 2.

Los valores de voltaje entre fases, y de la intensidad consumida en las tres fases, se promedian, y los de la potencia suministrada las fases se suman

$$P_1 = W_1 + W_2 + W_3 \quad (\text{kW}) \quad (10)$$

En este caso, el valor del factor de potencia se obtiene de la relación:

$$\cos \varphi = \frac{1000 * P_1}{\sqrt{3} * V * I} \quad (11)$$

De no disponerse de vatímetros, será necesario entonces medir el valor del factor de potencia y calcular “ $P_1$ ”.

**Tabla 2. Tabulación de las mediciones de los parámetros eléctricos**

Ensayo No.	Voltaje			Intensidad			Potencia			Frecuencia rpm.	H (mca)	Q (L/s)	Observaciones
	V <sub>1</sub>	V <sub>2</sub>	V <sub>3</sub>	A <sub>1</sub>	A <sub>2</sub>	A <sub>3</sub>	W <sub>1</sub>	W <sub>2</sub>	W <sub>3</sub>				

Nota: Es necesario mantener constante el valor de “ $\gamma_{fluido}$ ”

**Complemento al procedimiento experimental en régimen de operación de las unidades de bombeo para la determinación del comportamiento hidráulico y energético**

Se propone complementar el procedimiento experimental descrito con los pasos siguientes:

- a) Verificar en la chapilla del motor los parámetros de diseño:  $P_{2n}$  ; rpm.;  $\eta_n$  (potencia, velocidad de rotación y eficiencia).
- b) Clasificar el motor en función del rango de potencia nominal y categoría de rendimiento.

Procesamiento de la base de datos recopilada en cada ensayo:

- c) Del valor de la frecuencia de giro del motor “ $N$ ” (rpm.) medida, establecer el criterio sobre el estado de carga del motor a partir de la relación entre el deslizamiento real “ $s_r$ ” y el deslizamiento nominal “ $s_n$ ” por medio de las expresiones:

$$s_n = \left( \frac{rpm_{\text{sin crónica}} - rpm_{\text{no min al}}}{rpm_{\text{sin crónica}}} \right) * 100 \quad (\%) \quad (12)$$

$$s_r = \left( \frac{rpm_{\text{sin crónica}} - rpm_{\text{real}}}{rpm_{\text{sin crónica}}} \right) * 100 \quad (\%) \quad (13)$$

El estado de carga del motor (ó factor de carga “FC”) será igual a:

$$E_{\text{carga motor}} = \frac{s_r}{s_n} * 100 \quad (\%) \quad (14)$$

El estado de carga del motor también se puede establecer por la relación entre el consumo de corriente real y el nominal, es decir,

$$FC = \frac{I_r}{I_n} * 100 \quad (\%) \quad (15)$$

o por la relación entre la potencia suministrada real y la nominal

$$FC = \frac{P_{I_r}}{P_{I_n}} * 100 \quad (\%) \quad (16)$$

La comparación entre los estados de carga del motor determinados por estas relaciones permite detectar la existencia de diferencias significativas en los valores de los parámetros medidos en la unidad de bombeo en evaluación, y determinar las causas que las originan.

- d) Seleccionar el valor del coeficiente de proporcionalidad “ $C_{P-R}$ ” de potencia-rendimiento apropiado.  
 e) Calcular la potencia “ $P_2$ ” solicitada al motor por la expresión (5)  
 f) Calcular el rendimiento del motor por la expresión (7)  
 g) Calcular el par motor (torque) “ $M$ ”.

$$M = \frac{9551 * P_2}{N} \quad (\text{N-m}) \quad (17)$$

- h) Calcular la potencia hidráulica “ $P_H$ ” por la expresión (9)  
 i) Calcular el rendimiento de la bomba por la expresión (8)

Con la base de datos del conjunto de ensayos:

- j) Graficar las curvas características reales del motor:  $P_1$  vs  $P_2$ ;  $M$  vs  $P_2$ ;  $\eta_{\text{motor}}$  vs  $P_2$ ;  $I$  vs  $P_2$ ;  $\cos \varphi$  vs  $P_2$

- k) Graficar las curvas características reales de la bomba para un valor de “*N*” aplicando las leyes de semejanza:  $H$  vs  $Q$ ;  $\eta_{bomba}$  vs  $Q$ ;  $P_2$  vs  $Q$ .

**Tabla 3. Estado de carga del motor de la unidad de bombeo y sus posibles causas**

Consecuencia	Causas Posibles
<p>La frecuencia de rotación (rpm.) del motor de la unidad de bombeo son altas en comparación con las de chapilla, o se acerca al valor de las rpm. de sincronismo.                      Bajo consumo de corriente.                      Bajo factor de potencia.                      Bajo consumo energético (<math>P_1</math>).                      Estos valores indican que el motor entrega baja potencia (<math>P_2</math>).</p>	<p>El motor está entregando una baja potencia. debido a:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>❖ Motor sobredimensionado.</li> <li>❖ Alta tensión de la energía eléctrica.</li> <li>❖ Problemas de acople motor-bomba.</li> <li>❖ La bomba entrega un bajo caudal o ninguno, que puede ser consecuencia de:                             <ul style="list-style-type: none"> <li>◆ Sentido incorrecto de rotación.</li> <li>◆ Presencia de aire en la tubería de succión por cebado incorrecto, falta de hermeticidad en la tubería de succión o en la entrada de la bomba, ó sumergencia insuficiente.</li> <li>◆ Obstrucción en tubería y accesorios de la succión.</li> <li>◆ Impelentes dañados u obstruidos.</li> <li>◆ Obstrucción o presencia de aire en la tubería de impulsión.</li> <li>◆ Válvulas de regulación o de check de la impulsión cerrada, obstruida o dañada.</li> <li>◆ La carga que entrega la bomba es menor que la de otra unidad de bombeo en operación simultánea.</li> <li>◆ Sobrepresión en la descarga.</li> </ul> </li> </ul>
<p>La frecuencia de rotación (rpm.) del motor de la unidad de bombeo son bajas en comparación con las de chapilla.                      Alto consumo de corriente.                      Alta demanda energética de la red de suministro eléctrico.                      Sobrecalentamiento del motor                      Estos valores indican que el motor está sobrecargado o dañado.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>❖ Motor inadecuado, o dañado.</li> <li>❖ Baja tensión de la energía eléctrica.</li> <li>❖ Presencia del fenómeno de cavitación.</li> <li>❖ Problemas con: lubricación; aros de desgaste; alineación correcta motor-bomba o en la transmisión intermedia; rodamientos.</li> <li>❖ La bomba está entregando un alto caudal con baja carga. Ello puede ser a su vez consecuencia de:                             <ul style="list-style-type: none"> <li>◆ Bomba inadecuada, diseñada para mayor carga que la solicitada por el sistema de conducción para el caudal a bombear.</li> <li>◆ Altas cargas de bombeo por pérdidas por fricción del sistema de impulsión</li> <li>◆ Rotura o altas fugas en el sistema de conducción de impulsión.</li> </ul> </li> </ul>

## CONCLUSIONES

- El procedimiento experimental propuesto para la determinación del comportamiento hidráulico y energético en régimen de operación de las unidades de bombeo, basado en el *coeficiente de proporcionalidad* “ $C_{P-R}$ ” de *potencia-rendimiento* deducido por métodos estadísticos, requiere mínimos recursos para su aplicación, no es invasivo, ni es necesario sacar de operación la unidad de bombeo.
- Los valores del coeficiente de proporcionalidad establecidos por rangos de potencia y categoría de rendimiento del motor, y su estado de carga, fueron calculados por medio de la teoría de las muestras pequeñas, utilizando el estadígrafo “t” de Student, y determinando los límites de confianza para el 95% de probabilidad.
- Los pasos comprendidos desde el “a” hasta el “g” referidos, fueron aplicados en un total de 42 ensayos de 24 motores trifásicos asíncronos de diferentes marcas, no incluidos en la muestra procesada, comprendidos en todos los rangos de potencia, categorías de rendimiento y estados de carga, con la finalidad de avalar los coeficientes de proporcionalidad “ $C_{P-R}$ ” obtenidos. La determinación de: la potencia entregada “ $P_2$ ”; la eficiencia “ $\eta_{motor}$ ”; el par motor (torque) “ $M$ ”; y el deslizamiento “ $s$ ”; reportan resultados menores del 5% de error, en comparación con los resultados de los ensayos de banco, disminuyendo el error directamente proporcional a la potencia nominal y categoría de rendimiento.
- Con la aplicación del complemento descrito al procedimiento experimental en régimen de operación de las unidades de bombeo, se obtiene con un mínimo de recursos y en corto tiempo, una base de datos de parámetros eléctricos e hidráulicos, que permite graficar las curvas características del comportamiento del motor y de la bomba y compararlas con las reportadas por el fabricante para evaluar su estado técnico o modificaciones al diseño original. También puede ser utilizado para evaluar con la precisión requerida el comportamiento hidráulico y energético del sistema de bombeo.
- Actualmente se enfrenta la mayor crisis económica y energética a nivel mundial, y el consumo de energía eléctrica por los sistemas de bombeo alcanza un valor significativo llegando a alcanzar su costo hasta el 80% del costo del ciclo de producción. Esta situación demanda que las entidades responsabilizadas con la explotación de sistemas de bombeo, realicen peritajes encaminados a la operación eficaz y eficiente de los mismos tanto desde el punto de vista técnico como económico. El procedimiento propuesto en el presente trabajo constituye una acción para el logro de estos objetivos.

## REFERENCIAS

- ABS** (2003). “ABSEL product selection program version 1.7.1.” (CD-ROM). VSX-Vogel Software GMBH. ABS pumps, S.A. Germany.
- Álvarez, N.** (2009). “Análisis de diferentes procedimientos y ensayos para la determinación del rendimiento en motores de inducción trifásicos”. Localizable en: <http://www.biblioteca.universia.net/ficha.do?id=38559858>

- Costa, A. y Vilaragut, M.** (2004). “Determinación del comportamiento energético del motor de inducción a partir de sus datos de catálogo y la lectura de las corrientes del estator”. III Taller Caribeño de Energía y Medio Ambiente, Cienfuegos, Cuba.
- Costa, A.; Vilaragut, M.; De Armas, M.; Gómez, J.** (2004). “Determinación de las características de comportamiento de los motores de inducción trifásicos”. Congreso de Ingeniería Mecánica, Eléctrica e Industrial de la UNAICC, CIMEI, Holguín, Cuba.
- Freyre, M. y Jornet, A.** (2000). “Ensayo de la curva par-intensidad / velocidad dinámica en motores asíncronos trifásicos”. Universitat Politècnica de Catalunya (UPC). España.
- GRUNDFOS A/S.** (2009). “Grundfos industrial solution. Pump handbook”. (CD-ROM). Grundfos Group Software. Denmark.
- IEC** (1994). “Methods for determining losses and efficiency of rotating electric machinery from tests”. Standard-60034-2. International Electrotechnical Commission. USA.
- IEEE** (1996). “Test procedure for induction motors and generators”. Standard 112-B. Institute of Electrical and Electronics Engineers. USA.
- Sousa, V.; Viego, P.; De Armas, M.; Gómez, J.** (2005). “Metodología para la determinación de las eficiencias de máquinas asíncronas en condiciones de campo. Caso de estudio”. Centro de Estudios de Energía y Medio Ambiente. Universidad de Cienfuegos. Cuba.
- Viego, P. y Quispe, E.** (2001). “La reparación de los devanados de los motores asíncronos para una mayor eficiencia, potencia nominal y capacidad de sobrecarga”. Centro de Estudios de Energía y Medio Ambiente. Universidad de Cienfuegos. Cuba.
- Vilaragut, M., Costa, A., García, A., Ayala, C.** (2004). “Métodos para la determinación de la eficiencia energética en los motores de inducción trifásicos”. Centro de Investigaciones y Pruebas Electroenergéticas (CIPEL). Revista Ecosolar, No 10, octubre-diciembre. Ciudad de La Habana, Cuba.