

Optimización de energía en sistemas de bombeo¹

Energy optimization in pumping systems

Recibido: 23-03-2013 Aceptado: 06-05-2013

BERNARDO ROGER SABOGAL ABRIL²
JAIRO ARCESIO PALACIOS PEÑARANDA³
CRISTHIAN LIBARDO PANTOJA TOVAR⁴

Resumen

Se realizó un estudio de optimización energética en sistemas de bombeo, resaltando el impacto de los variadores de frecuencia, con el objetivo de proponer un modelo para diagnosticar sistemas de bombeo que permitieran valorar la disminución del consumo energético. Se hizo una búsqueda y recopilación de las teorías aplicadas a: sistemas de bombeo, motores de corriente alterna, variadores de frecuencia y su uso en las industrias. Se propuso el modelo de diagnóstico y se desarrollaron mediciones en un banco de pruebas; se analizaron los datos recopilados con una herramienta desarrollada en Excel, que permitió caracterizar el sistema; se realizó una simulación que consistió en asignarle unos porcentajes de uso de la curva de carga; se demostró un ahorro energético, si el sistema logró operar en un punto de mayor eficiencia. Se analizaron las pruebas con el variador de velocidad, las cuales presentaron un ahorro mayor de energía debido al menor consumo de potencia. La herramienta desarrollada en Excel permitió, a través de datos iniciales, calcular la curva de carga de todo el sistema, la eficiencia de la bomba, el motor, el conjunto motor variador (en el caso del uso del variador de frecuencia) y control del motor o arrancador (centro de control de motores).

Palabras clave: Gasto energético, sistemas de bombeo, eficiencia, banco de pruebas, potencia consumida

Abstract

Within this research a study was performed on energy optimization in pumping systems, highlighting the impact of variable frequency drivers (VFD). This work seeks to propose a model to diagnose pumping systems, contributing towards reduced energy consumption. A search and compilation was performed of theory of pumping systems, AC motors, VFD, and industrial applications. A model is proposed for diagnosis and experimental data was obtained from a test bench. After taking the data, it was proceeded to analyze it on an Excel Tool developed by the author. This tool allowed identifying the system; then, a simulation was performed consisting on assigning a percentage of use to the load curve; thus, showing a saving if the system is used at the highest efficiency

- 1 Proyecto de investigación Modelo de optimización de uso de energía en sistemas de bombeo. Se inició en enero de 2011 y se terminó el 30 de noviembre de 2012. La financiación y la ejecución son propias del autor, con el apoyo de la Universidad Autónoma de Occidente que facilitó los laboratorios, talleres y equipamiento para las pruebas, también se recibió colaboración, en cuanto a laboratorios, en la Universidad del Valle.
- 2 MS.c. Docente Programa Ingeniería Mecatrónica. Colombiano - Universidad Autónoma de Occidente, grupo de investigación Convergía. brsabogal@uao.edu.co
- 3 Ph.D. Docente Escuela Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Colombiano - Universidad del Valle. Director grupo de investigación en conversión de energía -Convergía. jairo.palacios@correounivalle.edu.co
- 4 Estudiante Maestría en Ingeniería con énfasis en Mecatrónica, Colombiano - Universidad Autónoma de Occidente. clpantoja@uao.edu.co; cristian.pantoja@gmail.com

point. Lastly, all the procedure was carried out via a system with VFD, which showed less energy consumption. The tool developed in Excel allows, through a set of data, computing load system, pump efficiency, motor efficiency, motor – VFD, and MCC or motor starter.

Keywords: Energy expenditure, pump systems, efficiency, test pump system, power consumed.

Introducción

Según la International Energy Agency en el 2010 el 41.5% del consumo de energía eléctrica en el mundo se debió al sector industrial. Los sistemas de bombeo para transportar fluidos en los procesos, tales como: el agua fría o caliente, leche, petróleo; entre otros, son de los mayores consumidores y de los que presentan más pérdidas, por lo que se convierte en un requerimiento aumentar su eficiencia. El sistema de bombeo convencional está conformado por: la carga hidráulica, la bomba, el motor, el acople motor - bomba, variador de velocidad para el motor (opcional) y el Centro de Control de Motores (CCM) o arrancador en la alimentación del sistema (European *et al.*, 2012.).

En cuanto a las metodologías de diseño, selección y mantenimiento de cada uno de los equipos por separado han trabajado varios autores (Benhaddadi *et al.*, 2007; Link, 2002; Chiricozzi *et al.*, 2012; Carlson, 2000; (Pacific Gas and Electric Company, 2012); Mcnaughton, 1989; Pottebaum, 1984; Castrillón *et al.*, 2009) tanto de motores convencionales, como de alta eficiencia, bombas para que trabajen eficientemente, conjunto motor - bomba, el conjunto motor - variador de velocidad, o bomba, motor – variador de velocidad; es poco lo que se ha trabajado en un modelo para todo el sistema de bombeo, como lo realizado por el grupo conformado en el 2012 por European Copper Institute (ECI), Fraunhofer – ISI, KuLeuven y University of Coimbra (U.C)

Para minimizar el consumo de energía se dispuso de un modelo para el estudio o diagnóstico de todo el sistema, para conocer su eficiencia, cada una de sus partes, su potencia, el punto o sector donde se puede obtener la mayor eficiencia del sistema, y mediante su análisis inferir las modificaciones necesarias para lograr un uso eficaz de la energía utilizada por el sistema.

El artículo se basa en la fundamentación teórica del sistema de bombeo, para el análisis de cada una de sus partes, comenzando desde el sistema hidráulico de carga, hasta la fuente de energía y considerándolo como un todo, para caudal variable, tanto a velocidad constante como a velocidad variable. El propósito de hacer el diagnóstico de cada una de las partes en la eficiencia del sistema, es encontrar el sector o punto de operación para el cual el

sistema puede trabajar con alta eficiencia. Se demostró que el ahorro de energía, se logra por la diferencia del consumo de potencia entre los dos modos de funcionamiento a velocidad constante y a velocidad variable.

El objetivo del artículo es proponer un modelo para diagnosticar los componentes del sistema de bombeo, carga, bomba centrífuga horizontal, acople motor-bomba, motor eléctrico de inducción jaula de ardilla convencional, variador de velocidad y Centro de Control de Motores (CCM) o arrancador, para que trabaje el conjunto en alta eficiencia energética. Entre los beneficios del estudio sobresalen:

- Coadyuvar con el ahorro de energía, tanto para las empresas generadoras como para los usuarios, lo que trae beneficios adicionales, menor impacto al medio ambiente, mayor competitividad de las empresas consumidoras porque sus costos unitarios pueden bajar lo correspondiente al ahorro de energía por unidad producida.
- El ahorro de energía eléctrica en el sistema de bombeo hidráulico permite disminuir la producción de CO_2 .
- Los costos operacionales en la industria pueden disminuir, por la disminución de intervenciones en mantenimiento para motores y bombas, principalmente por trabajar con mayor eficiencia, o cuando se trabaja con variador de velocidad por frecuencia, la cavitación puede ser disminuida, los arranques y paradas de bombas ser más amortiguados y los caudales están mejor controlados por la velocidad comandada por el variador. El desgaste de equipos es menor, por lo que las necesidades de mantenimiento disminuyen y las frecuencias de mantenimiento preventivo bajan, el tiempo medio entre fallas (TMBF) aumenta, mejorando la confiabilidad de los equipos. Un claro ejemplo de esto es lo realizado en la planta de papel Daishowa América, reportado en el 2002, por el United States Department of Energy.

Metodología desarrollada

Los sistemas de bombeo que transportan un fluido, generalmente agua, están conformados por aguas arriba, por la red de carga del sistema, la bomba centrífuga, el acople motor-bomba, el motor de inducción trifásico, el accionamiento (driver) o AFD (adjustable frequency drives), accionamiento de frecuencia variable, si lo tiene, y el Centro de Control de Motores CCM o, en su defecto, el arrancador correspondiente.

Muchos de los procesos son de flujo variable, y para lograr ese cambio se utilizaron diferentes métodos mediante válvula de estrangulamiento en la descarga de la bomba, o con el AFD o DRIVER variando la velocidad del motor que impulsa la bomba, siendo el primer método más costoso que el segundo, por el desperdicio de energía

en el proceso de estrangulamiento, razón por la cual, este artículo pretende demostrar la conveniencia de utilizar un modelo que contenga los componentes del segundo método, lograr identificar los ahorros posibles de energía y determinar el punto o sector donde el sistema puede operar con eficiencia más alta.

Se realizaron las mediciones y cálculos desde la carga hidráulica, aguas arriba, hacia la fuente de alimentación, analizando los procesos de transformación y el balance energético del sistema.

Para las pruebas y el análisis respectivo se adaptó un banco de pruebas para bombas centrífugas del laboratorio de fluidos de la Universidad Autónoma de Occidente, el cual originalmente era un pequeño sistema de bombeo básico, conformado por una red hidráulica, una bomba centrífuga, un motor de corriente continua de 1 KW de potencia para 3000 r.p.m. con un variador de velocidad D.C por campo.

En el estudio se cambió el motor de corriente continua por un motor de corriente alterna de inducción, para lo cual se hizo una adaptación mecánica para soportarlo y acoplarlo a la bomba. Por ser un motor pequeño no se utilizó un Centro de Control de Motores CCM, sino un arrancador directo; para los otros tipos de arranque a nivel industrial, el análisis es diferente y no está incluido en este artículo.

Se presenta el análisis de los diferentes conceptos y elementos en el marco teórico para el estudio energético del sistema de bombeo, tomado de diferentes entidades y autores Viholainen, 2009; De Alameida, 2009; Pottebaum (1984); Pacific Gas and Electric Company; Jones, 2011; Monteagudo y Borroto, 2002; McNaughton (1988); Mataix (1986); Ramos, *et al.*, 2011; PG and E; Guardiola de Cabo, 2011; European Copper Institute (ECI), Fraunhofer-ISI, KULeuven y University of Coimbra; Castrillon, Oslingery Palacios; Carlson, (2000), y finalmente Ulrichy Eppinger (2004). La referencia bibliográfica más destacada la del proyecto de ahorro de energía desarrollado en el 2009, Unidad de Planeación Minero Energética de Colombia (UPME) y Colciencias, que destacó los aspectos claves relacionados con el sistema. Se muestra en orden el procedimiento de cálculos, mediciones y determinación de las características del sistema de bombeo para realizar el análisis energético por componente y completo, a velocidad tanto constante, como variable mediante el variador de velocidad por frecuencia.

Lo primero que se tuvo en cuenta, fue la curva característica de la bomba Caudal Q vs Velocidad de rotación n , esto

es dejando el caudal en función de la velocidad, a fin de obtener un punto c de operación necesario para caracterizar el sistema.

$$Q = f(n) \quad (1)$$

La caracterización del sistema de bombeo se realizó mediante,

$$H_s = J + KQ^2 \quad (2)$$

Donde:

J : Carga dinámica (m)

KQ^2 : Carga estática (m)

La carga dinámica está dada por la adición de la diferencia de presiones de succión y descarga sobre el peso específico, y la diferencia de alturas de descarga y succión como se ve en la eq. (3).

$$J = \frac{P_2 - P_1}{\gamma} + Z_2 - Z_1 \quad (3)$$

Donde:

$P_2 - P_1$: Presión de succión y descarga (m)

γ : Peso específico (N/m^3)

$Z_2 - Z_1$: Altura con respecto a un punto de referencia (m)

La ecuación 4 representa la componente de la carga estática k

$$k = \left(\sum_1^2 \lambda \frac{lv^2}{D^2g} + \sum_1^2 \frac{\xi v^2}{2g} \right) \quad (4)$$

Donde:

g : Gravedad ($\frac{m}{s^2}$)

λ : Factor pérdidas por fricción tubería recta

l : Longitud del tramo (m)

D : Diámetro interno de la tubería (m)

v : Velocidad lineal del fluido ($\frac{m}{s}$)

ξ : Factor pérdidas por accesorios

La característica de carga de la bomba se determinó mediante el comportamiento cuadrático, de la siguiente forma:

$$H_b = a - cQ^2 \quad (5)$$

a : Presión manométrica de salida más presión del vacuómetro a la entrada con Q cero (m)

c : Punto de operación²

² Despejando la ecuación 5 se obtiene el valor de $c = ((a - H_b))/Q^2$

Caracterizado el sistema, se procedió a calcular las potencias; se calculó primero la potencia útil de la bomba P_{util} que de forma general es igual a

$$P_{util} = \gamma Q H_b \quad [W] \quad (6)$$

O también

$$P_{util} = \frac{\rho g Q H_b}{1000} \quad [KW] \quad (7)$$

Donde:

ρ : Densidad del líquido (Kg/m^3)

Otra forma en el sistema inglés, donde SG es la gravedad específica del agua y equivale a 1:

$$P_{util} = HHP = \frac{SG * Q H_b}{3960} \quad [hp] \quad (8)$$

La característica de potencia útil de la bomba se determinó en función del flujo. En la Figura 1 se ilustran las pérdidas de potencia de la bomba.

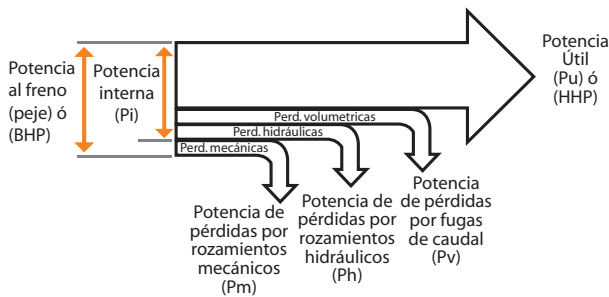


Figura 1. Pérdidas de potencia de la bomba centrífuga.

Fuente: El autor

Una vez calculada la potencia se procedió a calcular la potencia en el eje, que es igual a:

$$P_{eje} = 0,1047nM \quad [W] \quad (9)$$

Donde:

n : velocidad en el eje de la bomba (rpm)

M : par ($N*m$)

Ahora se calcula la eficiencia de la bomba η_b por medio de:

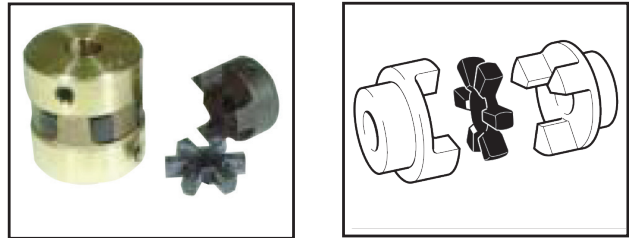
$$\eta_b = \frac{P_{util}}{P_{eje}} * 100 \quad [\%] \quad (10)$$

Se construyó la curva característica Eficiencia Vs caudal para velocidad constante y velocidad variable, y se procedió a determinar el rango y punto de mayor eficiencia.

Se señaló la eficiencia del acople motor bomba η_{acople} para el caso del banco de pruebas utilizado en esta investigación. En la Figura 2, se presenta el acople tipo rígido con araña de caucho utilizado para bajas potencias.

En la Figura 3 se presenta el dibujo y cuadro con especificaciones del acople flexible utilizado, referencia L75 suministrado por un proveedor especializado en el tema. El acople de la Figura 2 corresponde a la referencia RSC70.

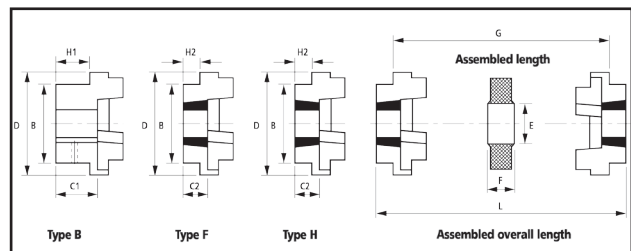
Spider Coupling



The Cost Effective Solution

Small powered, torsionally flexible coupling with shock absorbing and misalignment capacity.

Max Kw @ 100 rpm:	1.12
Max Torque:	107 Nm
Page No	20




Coupling Size	Power /100rpm Kw	Torque Nominal Nm	Speed Max rpm	Type B		Type F & H		Max. Misalignment		End Float mm	
				Bore Dia Max	Bore Dia Min	Bush Size	Bore Max	Bore Min	Offset mm		Angular deg
RSC70 ***	0.33	32	7700	32	0	TB1008	25	9	0.3	0.5	+2
RSC90 ***	0.84	80	6300	42	0	TB1108	28	9	0.3	0.5	+5
RSC110 ***	1.68	160	5000	55	0	TB1610	42	14	0.3	1	+6
RSC130 ***	3.30	315	4100	60	0	TB1610	42	14	0.4	1	+8
RSC150 ***	6.28	600	3600	70	0	TB2012	50	14	0.4	1.5	+9
RSC180 ***	9.95	950	3000	80	0	TB2517	65	16	0.4	1.5	+1.1
RSC230 ***	21	2000	2600	100	48	TB3020	75	25	0.5	2	+1.3
RSC280 ***	33	3150	2200	115	60	TB3525	90	35	0.5	2.5	+1.7

Figura 2. Acople flexible tipo araña

Fuente: Renold Couplings, Resilient and soft start Couplings 4th edition. Renold Power Transmission Ltd. Ref 2000/ENG/ 02.02. p 08.

En la Figura 3 se observó:

- La potencia del acople fue de 2hp para un motor de 2 polos, o sea 3600 rpm para agujero de 3/4 ".
- El motor del banco de prueba fue de 1,2 hp, 2 polos 3600 rpm. eje 3/4 ".
- El par del acople RSC70 a 100 rpm equivale a 32 N-m, ese mismo acople a 3543 rpm es la velocidad del motor del banco de prueba a velocidad constante, corresponde a un par de 0,9031 N-m.



SE UTILIZA EN TRANSMISIÓN DE FUERZA PARA MONTAJES E INSTALACIONES INDUSTRIALES: MOTOR – GENERADOR, MOTOR – REDUCTOR Y MOTOR – BOMBA. ALIVIA LA CARGA DE ARRANQUE Y COMPENSA LAS VARIACIONES DE LA HORIZONTALIDAD; SU EMPAQUE DE CAUCHO, ADEMÁS DE PRESENTAR RESISTENCIA A LA ABRASIÓN, ACEITES Y QUÍMICOS AMINORA LOS RUIDOS.

H. P. A TRANSMITIR Y SUS CARACTERÍSTICAS EN m/m.

R. P. M.	Ref:	L75	L90	L95	L100	L99	L125	L150	L190	L225
100	H. P.	0.1	0.3	0.4	0.5	0.8	1.0	1.5	2.5	4.0
600	H. P.	0.4	0.8	1.2	1.8	2.7	4.5	7.5	11.0	15.0
1.200	H. P.	0.7	1.4	2.2	3.5	5.0	8.5	15.0	22.0	30.0
1.800	H. P.	1.0	2.0	3.0	5.0	7.5	12.0	20.0	30.0	40.0
2.400	H. P.	1.3	2.7	4.0	6.4	9.5	15.0	24.0	37.0	50.0
3.600	H. P.	2.0	4.0	5.4	7.5	11.0	19.0	30.0	45.0	60.0
Máximo Orificio		3/4"	7/8"	1"	1 1/3"	1 1/4"	1 1/2"	1 5/8"	2"	2 1/4"
Diámetro Manzana		35	40	48	50	58	68	80	96	108
Diámetro Mayor cruceta		45	53	53	63	63	78	94	110	125
Largo total Acople		53	60	68	70	82	94	108	125	135
Peso Aprox. Kilos		.4	.6	.8	1.2	1.5	2.5	4.	6.5	9

Figura 3. Acople flexible de cruceta (o tipo araña)
Fuente: Proveedor especializado – Cali (Proveedor del acople)

Lo anterior permitió confirmar que el acople utilizado cumplió con los requerimientos de potencia y de par establecidos con un factor de seguridad por encima del utilizado en la fórmula de par. De lo anterior, se espera que haya máxima transferencia de potencia del motor a la bomba. Adicionalmente se logró un montaje exacto en cuanto a alineamiento axial, lateral y angular. La rotación del sistema está libre de vibración, pero se sabe que no es un acople perfecto o ideal, por lo cual tomando como base lo analizado y lo presentado (ECI, 2012) se toma para este tipo de acople una eficiencia de η_{acople} de 98%.

Para encontrar la eficiencia del motor a velocidad constante:

- Se determinaron las pérdidas utilizando el método de separación de pérdidas
- Otra forma es por el método directo: midiendo la potencia de la máquina a la salida y a la entrada (consumo), para obtener la eficiencia del motor η_m mediante la fórmula directa.

$$\eta_m(\%) = \frac{P_{sal}}{P_{in}} * 100 \quad (11)$$

Donde:

P_{sal} : Potencia a la salida del motor

P_{in} : Potencia a la entrada del motor

La potencia a la entrada de la bomba es la potencia de salida del motor multiplicada por la eficiencia del acople. En la Tabla 1 se muestran las eficiencias de motores de inducción según NEMA.

Tabla 1. Eficiencias para motores de inducción trifásicos, clasificación B, de acuerdo con NEMA

hp	Nominal efficiency Range	Average nominal efficiency
1	68 – 78	73
1.5	68 – 80	75
2	72 – 81	77
3	74 – 83	80
5	78 – 85	82
7.5	80 – 87	84
10	81 – 88	85
15	83 – 89	86
20	84 – 89	87.5
25	85 – 90	88
30	86 – 90.5	88.5
40	87 – 91.5	89.5
50	88 – 92	90
60	88.5 – 92	90.5
75	89.5 – 92.5	91
100	90 – 93	91.5
125	90.5 – 93	92
150	91 – 93.5	92.5
200	91.5 – 94	93
250	91.5 – 94.5	93.5

Fuente: Emady, Ali. Energy Efficient Electric Motors. Third Edition revised and expanded. 2005. 406 p.

Los variadores de velocidad no son fuentes sinusoidales puras, por lo tanto las lecturas de los instrumentos convencionales no dan la información correcta de la potencia.

De acuerdo con lo anterior se debe tomar el conjunto variador motor y se procede en forma directa, se calcula la eficiencia del conjunto mediante la relación entre la potencia en el eje del motor (salida mecánica) y la potencia eléctrica consumida a la entrada del variador

Si esta última se mide a la salida del MCC, se deberá restar de esa potencia las pérdidas debidas a conductores hasta la entrada al variador.

$$\eta_{m-AFD} = \frac{P_{mec. ent. carga mec.}}{P_{elec.cons.AFD}} \quad (12)$$

Donde:

$P_{mec.ent.carga mec.}$ Es la potencia mecánica de la salida del motor entregada a la carga mecánica

$P_{elec.cons.AFD}$ Es la potencia eléctrica consumida a la entrada del variador de velocidad o AFD.

El arranque utilizado es arranque directo por el tamaño del sistema, adicionalmente todos los cálculos presentados en este trabajo aplican solo para este tipo de arranque. El arrancador es para una capacidad de corriente de 16 amperios.

Para hallar las pérdidas del arrancador se usó el analizador de redes tomando la potencia a la entrada del arrancador y a la salida del mismo, por lo cual la diferencia de las dos potencias es la potencia de pérdidas del arrancador.

$$\eta_{arr}(\%) = \frac{P_{sal}}{P_{in}} * 100 = \left(1 - \frac{P_{perdidas}}{P_{in}}\right) * 100 \quad (13)$$

$$\eta_{SB} = \eta_b * \eta_{acop} * \eta_m * \eta_{arr} \quad (14)$$

Donde

η_{SB} = Eficiencia del sistema de bombeo

η_b = Eficiencia de la bomba

η_{acop} = Eficiencia del acople motor bomba

η_m = Eficiencia del motor para velocidad cte.

η_{m-AFD} = Efic. Motor-AFD para veloc. variable.

η_{arr} = Eficiencia del arrancador

Instrumentación y montaje

La Figura 4 muestra el montaje realizado con la instrumentación correspondiente para las mediciones a velocidad constante donde se realizó el cambio de flujo por medio de estrangulación de la válvula. (Cierre o apertura); la variación de la velocidad del motor, mediante el variador de velocidad.

En la toma de datos se utilizaron los siguientes equipos:

- 2 analizadores de red trifásicos HT Instruments
- PQA824, osciloscopio digital UNI – T UTD2102CEL
- Mili ohmímetro digital Extech
- Pinza digital voltiamperimétrica Clamp Meter 640D.
- Resistencias variables/shunt 0-10Ω 3,16 A,
- Variac trifásico 208V 240 V 10 Amp, 4,8 KVA,
- Termómetro digital Fluke 51, Tacómetro óptico digital SPI, Termo higrómetro

Resultados

En la caracterización del sistema de bombeo se tomaron los datos de: velocidad constante y velocidad variable; se ingresaron en la aplicación diseñada en Excel, que se basó en la toma de datos de las características de carga del sistema, potencias y eficiencias de cada uno de los componentes del sistema de bombeo a velocidad constante y variable. Para cada componente se construyó la Tabla en Excel y se requirió conocer de cada una de las mediciones, cálculos y características del comportamiento hidráulico, mecánico y eléctrico. En la Figura 5 se presentan los pasos seguidos en la aplicación en Excel para lograr los objetivos propuestos, las características obtenidas, su comparación y el análisis desarrollado.



Figura 4. Montaje para toma de datos del sistema de bombeo

Fuente: El autor

Pasos a velocidad constante; pasos a velocidad variable

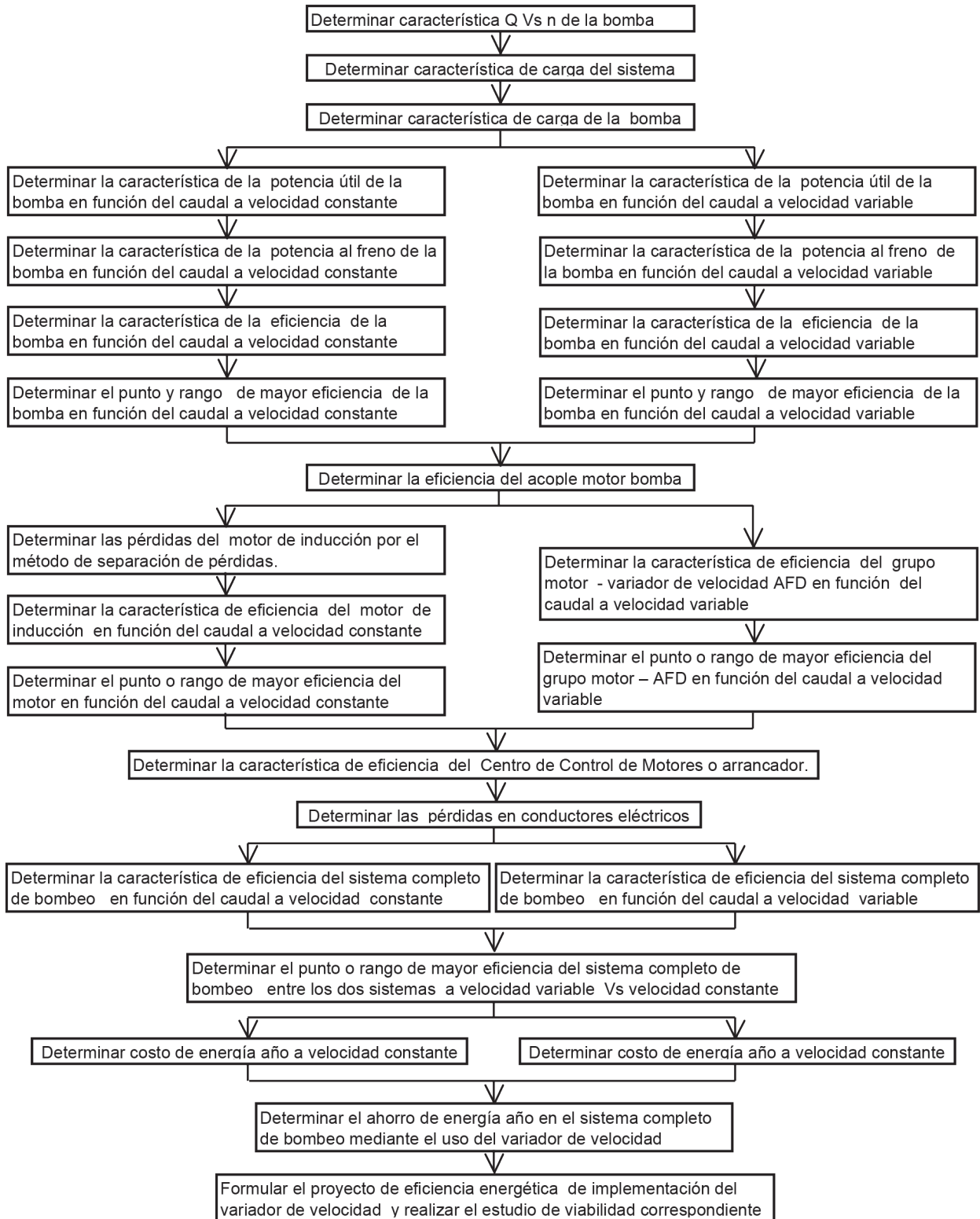


Figura 5. Cuadro resumen de la aplicación en Excel por pasos a velocidad constante y velocidad variable

Fuente: El autor

Se conoció el comportamiento del caudal Q en función de la velocidad de la bomba para determinar el punto de caudal adecuado y requerido por la herramienta informática y mencionada en el marco teórico. La herramienta requirió el ingreso manual de datos y el análisis por parte del usuario.

En la Figura 6 se observa la característica del caudal Q en función de la velocidad. Teniendo en cuenta el concepto de eficiencia, se tomó un punto del caudal Q en el codo de saturación como caudal base, con el que se realizaron los cálculos básicos para hallar el comportamiento del sistema y determinar la característica de carga del mismo. Se toma $Q_{base} = 10,6383 \text{ gpm}$.

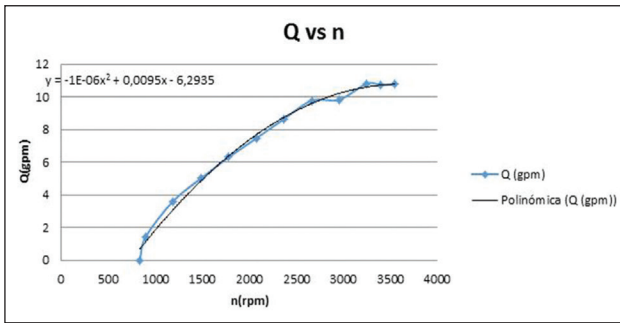


Figura 6. Caudal en función de la velocidad de la bomba

Fuente: El autor

Sistema completo de bombeo a velocidad constante

La Figura 7 presenta el resultado del análisis en la herramienta de Excel de los datos experimentales obtenidos en la bomba a velocidad constante, partiendo del punto de operación indicado, donde la válvula de estrangulamiento estaba totalmente abierta. Se muestra la característica de carga del sistema y la curva de la bomba. Conocido el comportamiento de la carga y de la bomba del sistema, se procedió a calcular la potencia útil de la bomba para cada valor de caudal Q y carga de la bomba H_b . Esta potencia útil es la potencia hidráulica a la salida de la bomba que corresponde a la potencia en cada punto de operación del intercepto de las características de la bomba, que se mantuvo fija ya que la velocidad es constante, y de la carga del sistema que está variando mediante la válvula de estrangulamiento; con mayor apertura de la válvula mayor caudal. Se muestra además la potencia al freno de la bomba o potencia en el eje o también llamada BHP en el sistema inglés, que para el propósito del montaje se mide en forma directa mediante la balanza y el brazo torsor construido específicamente en este caso con el extensor del estator del motor. Finalmente se observó que la eficiencia máxima de la bomba, fue de 17,76% que corresponde a un caudal de 7,51 gpm.

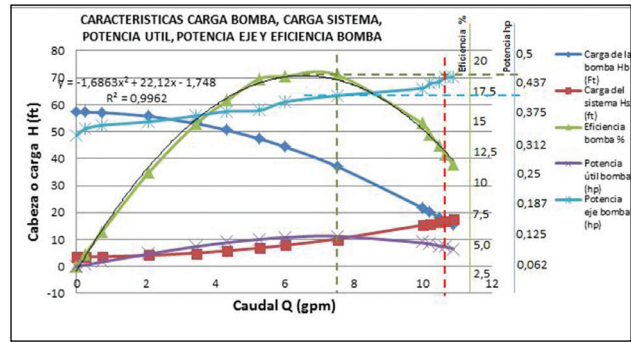


Figura 7. Característica de carga de la bomba, carga del sistema, potencia útil, potencia en el eje y eficiencia de la bomba a velocidad constante.

Fuente: El autor

La Figura 7 presenta el rango de máxima eficiencia de la bomba entre 6 a 8 gpm que contiene el punto de máxima eficiencia de 7,51 gpm obtenido por mediciones. A partir de este punto comienza a disminuir la potencia útil, como consecuencia de la caída en la característica de carga de la bomba. Mientras que la potencia al freno no cae, al contrario aumenta, para poder alimentar la potencia de pérdidas en la bomba, las cuales aumentan con el caudal.

Terminadas las pruebas del sistema de bombeo a velocidad constante, se presenta en la Figura 8 las eficiencias totales y de cada componente del sistema.

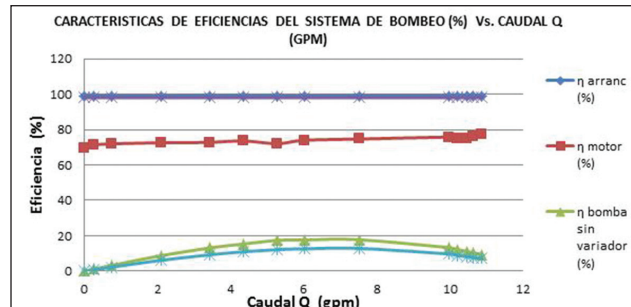


Figura 8. Características de eficiencia total y de cada componente a velocidad constante.

Fuente: El autor

Sistema completo de bombeo a velocidad variable

Realizadas las pruebas a velocidad variable, en la Figura 8 se presentan los principales resultados comparativamente con los resultados a velocidad constante. Se puede inferir que el sistema de bombeo con variador de velocidad es más eficiente que el sistema de bombeo a velocidad constante. La máxima eficiencia del sistema a velocidad variable se logra a un caudal de 5,02 gpm y una velocidad de 1486 rpm, cuya frecuencia es 25 Hz. También se observa que la mayor eficiencia está en el rango aproximado de velocidad de 1186 rpm a 2075 rpm, correspondiente a 20Hz a 35 Hz.

Al comparar la Figura 9 con la Figura 8, se encuentra que, a velocidad constante, el sistema presenta su máxima eficiencia a un caudal aproximado de 7, 5 gpm, esto es, un 33% mayor el caudal al flujo máximo que a velocidad variable.

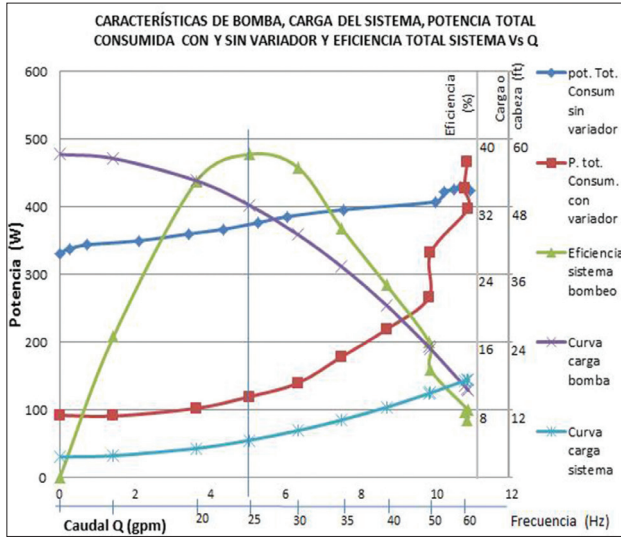


Figura 9. Característica de carga bomba, carga del sistema, potencia útil, potencia en el eje y eficiencia de la bomba a velocidad variable, comparativa con velocidad constante.

Fuente: El autor

En la Figura 10 se muestran las eficiencias totales de los dos sistemas: a velocidad constante y a velocidad variable, para apreciar sus diferencias. Es necesario tener en cuenta que el motor está sub-cargado, por lo cual puede variar algo el comportamiento, cuando el sistema esté completamente cargado, aunque el motor estará trabajando en su zona lineal.

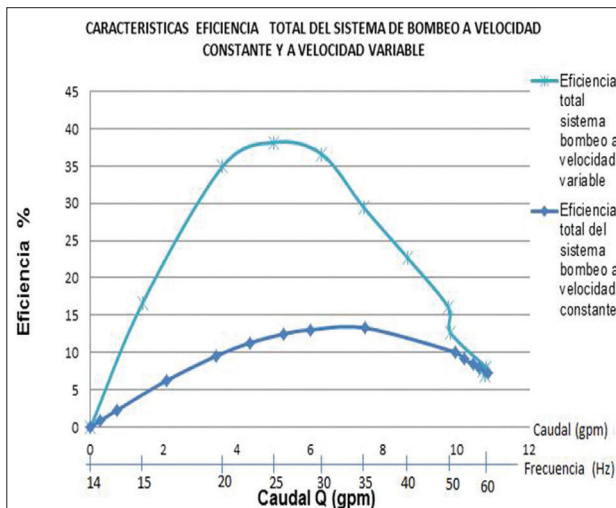


Figura 10. Características de eficiencia total del sistema de bombeo a velocidad constante y variable.

Fuente: El autor

Análisis técnico-económico

Ahorro de energía en el sistema de bombeo

El ahorro de energía-año en un sistema de bombeo que utiliza un variador de velocidad, se determina por la diferencia de los consumos de energías de velocidad constante a velocidad variable año, proceso que debe hacerse cuidadosamente.

Conocidas las potencias al freno para cada caudal en el eje de la bomba, tanto a velocidad constante como variable y las eficiencias de los componentes del sistema desde la entrada hasta el eje de la bomba, se halla el factor de eficiencia correspondiente mediante el producto de las eficiencias de los componentes respectivos. La potencia eléctrica consumida para cada caudal se determina mediante la relación entre la potencia al freno y el factor de eficiencia. Dependiendo del peso o porcentaje de cada caudal al año se puede hallar el peso de cada potencia eléctrica. La suma de estas potencias dará la potencia eléctrica promedio año. El producto de esta potencia por el tiempo de trabajo del sistema permite hallar la energía consumida tanto a velocidad constante como a velocidad variable correspondientemente.

Con base en las pruebas realizadas en la Tabla 2 se muestra la tabulación del consumo de potencia-año a velocidad constante para hallar el costo de energía respectivo. En la Tabla 3 se hace lo propio para velocidad variable.

Inicialmente se tabularon los caudales de trabajo del sistema de bombeo de acuerdo con las pruebas realizadas en el banco de pruebas y se simularon para un periodo de un año, asignándole porcentajes a cada uno con base en el comportamiento de la característica de eficiencia del sistema de bombeo mostrada en la Figura 9, esto es, se le da mayor porcentaje a aquellos caudales donde el sistema es más eficiente. Luego se registran los valores de potencia al freno calculados para cada caudal.

Calculadas las eficiencias de cada componente del sistema de bombeo para cada caudal, tanto a velocidad constante como a velocidad variable, se tuvo en cuenta las eficiencias de los componentes hasta el eje de la bomba, relacionados con energía eléctrica, el producto de estas eficiencias dio como resultado el factor de eficiencias, que se registró para cada caudal.

En la Tabla 2 se toma un caudal de prueba $Q = 10.63$ gpm, se ha asignado un 5% de utilización de este caudal año. Para este caudal la potencia en el eje BHP es 0.4372hp, para el factor de eficiencias de componentes del sistema de bombeo a nivel eléctrico se tuvo en cuenta la eficiencia del CCM o arrancador, incluyendo las pérdidas en conductores, y la eficiencia del motor, por lo cual se tiene:

$$Factor_{\eta\ comp..} = \eta_{arr.} * \eta_{motor.} =$$

$$98,9285\% * 76,1636\% = 75.3475\% \quad (15)$$

Con la potencia a la salida del motor en el eje o BHP y el factor de eficiencia, se calcula la potencia eléctrica consumida por caudal:

$$P_{elect.consumida} = \frac{P_{eje}}{Factor_{\eta\ comp.}} =$$

$$\frac{0,4372\ hp}{0,7534} = 0,5747\ hp \quad (16)$$

El peso de potencia por caudal anual es el producto de la potencia eléctrica consumida por el porcentaje de tiempo por caudal año, se tiene:

$$Peso_{pot\ Q-año.} = P_{elect.consumida} *$$

$$\%_{tiempo\ Q\ año.} = 0,5802\ hp * 0,2 =$$

$$0.0287\ hp \quad (17)$$

De la misma forma se completa toda la Tabla y se halla el valor de potencia eléctrica promedio como la sumatoria de los pesos de potencia por caudal anual.

El costo de energía a velocidad constante año será igual a:

$$\frac{\$_{ener.vel\ cte.}}{año} = P_{elect.prom}(hp) *$$

$$0,746 \left(\frac{KW}{hp}\right) * \frac{\$}{KWH} * \frac{365\ dias}{año} * \frac{24H}{dia} =$$

$$\frac{\$_{ener.vel\ cte.}}{año} = 0,56(hp) * 0,746 \left(\frac{KW}{hp}\right) * \frac{290\ \$}{KWH} *$$

$$\frac{365\ dias}{año} * \frac{24H}{dia} = \$1.055.442,32 \quad (18)$$

De la misma forma como se calculó el costo de energía a velocidad constante se calcula el costo de energía a velocidad variable. Como lo que se espera es encontrar el ahorro de energía, como resultado de la diferencia entre el consumo de energía a velocidad variable y a velocidad constante, se toman los mismos tiempos de caudal por año como ejemplo para el análisis.

Tabla 2. Consumo de potencia a velocidad constante para hallar el costo de la energía

Caudal	Tiempo por caudal año	Potencia al freno por caudal	Factor de η componentes hasta BHP	Potencia eléctrica por caudal	Peso de potencia por caudal anual
(GPM)	(%)	(BHP)	(%)	(HP)	(HP)
4,3486	20%	0,3598	72,77%	0,4916	0,0983
5,2702	25%	0,3616	71,26%	0,5047	0,1262
6,0193	20%	0,3812	73,05%	0,5162	0,1032
7,5175	10%	0,3958	73,90%	0,5301	0,0530
9,9724	10%	0,4132	74,90%	0,5462	0,0546
10,2064	5%	0,4237	74,16%	0,5658	0,0283
10,4665	5%	0,4284	74,40%	0,5702	0,0285
10,6383	5%	0,4372	75,35%	0,5747	0,0287
	100%				
Potencia eléctrica promedio a velocidad constante (HP)					0,5209

Tabla 3. Consumo de potencia a velocidad variable para hallar el costo de energía

Frecuencia (Hz)	Velocidad (rpm)	Caudal (GPM)	Tiempo por caudal año (%)	Potencia al freno por caudal (BHP)	Factor de Eficiencia por componentes (%)	Potencia eléctrica por caudal (HP)	Peso de potencia por caudal anual (HP)
20	3,6132	3,6132	20%	0,0438	31,75	0,1600	0,0320
25	5,0204	5,0204	25%	0,0663	41,18	0,1872	0,0468
30	6,3193	6,3193	20%	0,0871	46,17	0,2392	0,0478
35	7,4738	7,4738	10%	0,1167	48,35	0,2931	0,0293
50	9,8350	9,8350	10%	0,3072	67,96	0,3558	0,0356
55	10,8173	10,8173	5%	0,3995	73,87	0,4454	0,0223
57,5	10,7258	10,7258	5%	0,4471	76,65	0,5316	0,0266
60	10,8004	10,8004	5%	0,4879	76,74	0,5722	0,0286
Potencia eléctrica promedio a velocidad variable (HP)							0,2690

Como se indicó anteriormente, en la Tabla 3 se muestra la tabulación del consumo de potencia año a velocidad variable para hallar su correspondiente costo de energía, con valores de caudal muy similares a los de velocidad constante, pero indicando para cada uno su velocidad y correspondiente frecuencia.

En la Tabla 4 se muestra el costo de energía tanto a velocidad constante como a velocidad variable, como el producto de la potencia promedio calculada previamente

por el factor de KW/HP por el costo de KWH por los 365 días del año por las 24 horas del día. Se revela el ahorro en el costo de energía como la diferencia entre el costo de energía a velocidad constante y a velocidad variable y el ahorro en KWH. Se indica el porcentaje ahorrado al utilizar variador de velocidad respecto a velocidad constante, que es de 48,36%, para los caudales utilizados y los tiempos por caudal mostrados en las tablas 2 y 3, los que se acentúan en porcentaje en la zona de mayor eficiencia.

Tabla 4. Costo y ahorro de energía con el variador de velocidad por frecuencia.

Costo/año (\$) =	(Pot.Prom (HP))	(0,746 KW/HP)	(\$/KWH)	(365 días/ año)	(24 hrs/día)
Vel.Con/te.	0,5209	0,746	290,00	365	24
Vel.var/ble.	0.2690				

Costo energía a veloc. cte./año (\$)	987.196,54	Cantidad KWH	3.404,13	
Costo energía a veloc. var./año (\$)	509.751,91	Cantidad KWH	1.757,77	
AHORRO ENERGÍA /AÑO (\$)	477.444,63	48,36%	AHORRO KWH/AÑO	1.646,36

Conclusiones

- Mediante el estudio previo y el conocimiento claro de cada uno de los componentes del sistema de bombeo se cumplió el objetivo general de plantear un modelo que permitió diagnosticar el comportamiento real en funcionamiento de cada uno de los componentes de este sistema, en el banco de prueba adaptado para el mismo.
- El uso de variadores de velocidad generalmente presenta aportes muy importantes en ahorro de energía y el método implementado en Excel permite cuantificarlos.
- La herramienta en Excel para analizar el proyecto energético resulta muy útil, siempre y cuando se tengan los parámetros o datos básicos para alimentar la herramienta.
- El proceso más dispendioso de la parte de implementación del banco de pruebas para poner el sistema de bombeo en funcionamiento y realizar las mediciones necesarias, fue la construcción de los soportes del nuevo motor de inducción adaptado al banco. La principal dificultad fue lograr mediante estos soportes, la alineación del motor a la bomba, casi perfecta, que permitió un funcionamiento muy suave del conjunto motor bomba.
- El motor trifásico de inducción utilizado no obedeció a un previo proceso riguroso de selección sino de oportunidad, estaba disponible en los laboratorios y por semejanza de potencia con respecto al motor de C.C. inicial del banco de prueba, se tomó la decisión de usarlo.

- La determinación de la eficiencia del acople motor bomba es una de las más complejas de hallar, por lo cual para este trabajo se trató de fundamentar las relaciones existentes y se relacionó con otras investigaciones realizadas, mas no se pudo encontrar una relación exacta que permitiera hallar este valor y se definió con base en esas investigaciones previas y el marco teórico. Se expuso que experimentalmente se podría hallar esta eficiencia, pero eso debe ser motivo de otra investigación.
- Se verificó que la eficiencia final del sistema de bombeo es el producto de las eficiencias parciales de sus componentes, por lo tanto la disminución significativa de cualquiera de las eficiencias de estos componentes afecta considerablemente la eficiencia de todo el sistema.

Referencias

- BENHADDADI, M.; OLIVIER, G. and DIMA B. Energy savings by means of generalization adjustable speed drive. En: XX CANADIAN CONFERENCE ON ELECTRICAL AND COMPUTER ENGINEERING (CCECE) (2007: Montreal). Montreal: 2007. p 389-392.
- CARLSON, Ron. The correct method of calculating energy savings to justify adjustable frequency drives on pumps. En: Revista de IEEE transactions on industry applications. No. 36, 6 (Nov./Dic., 2000); p. 1725-1733.
- CASTRILLON, Rosaura; OSLINGER, José Luis y PALACIOS, Jairo Arcesio. In-Field Induction Motor Efficiency Determination Methods in the Scope of Efficiency-Based Maintenance. EnergyResearchGroup GIEN. Universidad Autónoma de Occidente, Cali, Colombia. EnergyResearchGroup CONVERGIA Universidad del Valle Cali, Colombia. 2009
- CHIRICOZZI, E.; TURSINI, M.; VILLANI, M., and CASTELLINI, L. An Integrated Electromechanical Actuator for High Dynamic Pump Application. En: XIX INTERNATIONAL CONFERENCE ON ELECTRICAL MACHINES (ICEM) (2010: Roma), Roma: 2010. p. 1-6.
- DE ALMEIDA, Anibal. Motors with Adjustable Speed Drives: Testing Protocol and Efficiency Standard. [en línea] <<http://www1.cetim.fr/eemods09/pages/programme/038-Brunner-final.pdf>> [Citado en 14 de diciembre, 2009].
- EMADY, Ali. Energy Efficient Electric Motors. Third Edition revised and expanded. 2005. 406 p.
- EUROPEAN COPPER INSTITUTE (ECI); FRAUNHOFER-ISI; KU LEUVEN y UNIVERSITY OF COIMBRA (U.C). Energy Efficient Motor Driven [en línea] <<http://www.copperinfo.co.uk/motors/downloads/pub-176-energy-efficient-motor-driven-systems.pdf>>. [citado en 2 de julio, 2012].
- GUARDIOLA DE CABO, Luis Antonio. Análisis de la norma IEC 60034-2-1. Aplicación en la determinación de las pérdidas y el rendimiento de motores de inducción trifásicos [en línea] <<http://upcommons.upc.edu/pfc/bitstream/2099.1/5455/1/resumen.pdf>> [citado en 2 de marzo de 2012].
- INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). Key World Energy STATISTICS, [en línea] <<https://www.iea.org/pub/lications/freepublications/publication/kwes.pdf>> [citado en 21 diciembre, 2012].
- JONES, W.V. Motor selection for centrifugal pump applications made easy. Pulp and Paper Industry Technical. En: INDUSTRY TECHNICAL CONFERENCE (PPIC), Conference Record of 2011 Annual IEEE. p. 140-150.
- LINK, P.J. Application Requirements for ASDs in the Pulp and Paper Industry. En: INDUSTRY APPLICATIONS CONFERENCE (2002: Pittsburgh): the XXXVII IAS Annual Meeting. Pittsburgh: 2002; p.1244-1249. Vol. 2.
- MATAIX, Claudio. Mecánica de fluidos y máquinas hidráulicas. 2 ed. Madrid: Ediciones del Castillo S.A..1986. 660p. ISBN 84-219-0175-3.
- McNAUGHTON, Kenneth. BOMBAS: Selección, uso y mantenimiento. México D.F.: Mc Graw Hill. 1989. 373. p. ISBN 968-422-036-7.
- MONTEAGUDO YANES, José y BORROTO NORDELO, Aníbal. Ahorro de energía en sistemas de bombeo y ventilación. En: BORROTO NORDELO, Aníbal *et al.* Ahorro de energía en sistemas termomecánicos. La Habana: Editorial Universidad de Cienfuegos, 2002. p. 3-40. ISBN 959-257-045-0.
- NEMASTANDARS PUBLICATION MG 1.1997 MOTORS AND GENERATORS. National Electrical Manufacturers Association, Washinton. DC, USA. 1997
- PACIFIC GAS AND ELECTRIC COMPANY (PG and E). Efficiency Opportunities with Adjustable Speed Drives. [en línea] <http://www.pge.com/includes/docs/pdfs/about/edusafety/training/pec/inforesource/efficiency_opportunities_with_adjustable_speed_drives.pdf>. [Citado en 1 de mayo, 2012].
- POTTEBAUM, Joseph R. Optimal characteristics of a variable-frequency centrifugal pump motor drive. En: Revista de IEEE transactions on industry applications. No. IA-20, 1 (Ene., 1984); p. 23-31.
- RAMOS, A.; ISAAC, A.; PEREZ, C. Y MONTERO, C. Métodos de selección de acoples para sistemas navales. Cuba: CIDNAV. [en línea]. <http://www.ipen.org.br/downloads/XVIII/CT2_REPARACION/ct201%20metodos%20de%20seleccion.pdf> [citado en 28 de mayo, 2011].
- UNIDAD DE PLANEACIÓN MINERO ENERGÉTICA DE COLOMBIA (UPME) y COLCIENCIAS. Ahorro de energía en sistemas de bombas centrifugas. [en línea] <<http://www.si3ea.gov.co/Portals/0/Gie/Tecnologias/bombas.pdf>> [citado en 15 de Diciembre, 2009].
- ULRICH, Karl y EPPINGER, Steven. Diseño y Desarrollo de Productos, enfoque multidisciplinario. México D.F.: McGraw Hill Interamericana. 2004. 366 p. ISBN 970-10-4793-1.
- UNITED STATES DEPARTMENT OF ENERGY (DOE). Forest products, Best Practices Project Case Study. Pump System Optimization Saves Energy and Improves productivity at Daishowa America paper Mill. Office of Energy Efficiency and Renewable Energy, Industrial Technologies Program, Washington, D.C. DOE/GO-102002-1558. 2002.
- UNIVERSIDAD DE CIEN FUEGOS (UCF). Metodología para la determinación de la eficiencia de máquinas asincrónicas en condiciones de campo. Caso de estudio. [en línea]. <<http://www.bibliociencias.cu/gsd1/collect/revistas/archives/HASHbef7.dir/doc.pdf>>. [citado en 13 de mayo, 2012].
- VIHOLAINEN, Juha. Energy-efficiency in Variable Speed Drive (VSD) controlle dparallel pumping [en línea] <<http://www1.cetim.fr/eemods09/pages/programme/006-Viholainen-final.pdf>>. [citado en 15 de diciembre, 2009].