



NILO FERREIRA DE AZEVEDO

**ESTIMATIVAS DE CONSUMO DE ENERGIA
DE UNIDADES DE BOMBEAMENTO
OPERANDO COM E SEM INVERSOR DE
FREQUÊNCIA**

LAVRAS - MG

2014

NILO FERREIRA DE AZEVEDO

**ESTIMATIVAS DE CONSUMO DE ENERGIA DE UNIDADES DE
BOMBEAMENTO OPERANDO COM E SEM INVERSOR DE
FREQUÊNCIA**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos em Sistemas Agrícolas, área de concentração em Engenharia de Irrigação, para a obtenção do título de Mestre.

Orientador

PhD. Alberto Colombo

LAVRAS - MG

2014

**Ficha Catalográfica Elaborada pela Coordenadoria de Produtos e
Serviços da Biblioteca Universitária da UFLA**

Azevedo, Nilo Ferreira de.

Métodos de estimativa da potência ativa em unidades de
bombeamento operando com e sem inversor de frequência / Nilo
Ferreira de Azevedo. – Lavras : UFLA, 2014.

73 p. : il.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Lavras, 2014.

Orientador: Alberto Colombo.

Bibliografia.

1. Eficiência energética. 2. Estações de bombeamento de água.
3. Motores elétricos. I. Universidade Federal de Lavras. II. Título.

CDD – 621.252

NILO FERREIRA DE AZEVEDO

**ESTIMATIVAS DE CONSUMO DE ENERGIA DE UNIDADES DE
BOMBEAMENTO OPERANDO COM E SEM INVERSOR DE
FREQUÊNCIA**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos em Sistemas Agrícolas, área de concentração em Engenharia de Irrigação, para a obtenção do título de Mestre.

APROVADA em 27 de Março de 2014.

Dr. Jacinto de Assunção Carvalho	UFLA
Dr. Paulo Henrique Cruz Pereira	CEFET - MG

PhD. Alberto Colombo
Orientador

LAVRAS - MG

2014

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus por me fortalecer nos momentos mais difíceis, pela existência e por ter me dado a capacidade para concretização desta etapa da vida.

Há em mim uma imensa gratidão por estes e também àqueles a quem Deus, na sua infinita sabedoria, designou a tarefa de zelar pela minha vida, Milton Azevedo e Nilda Ferreira, acompanhados sabiamente pela família Azevedo e Ferreira.

Meus irmãos, na figura de Fernanda, Alexandre e Luana. Os quais me incentivaram, dando força e coragem. Meus sobrinhos Wlly, Wany, Renata, Felipe, Maria Isabela, Lucas e Enzo.

A vocês minhas afilhadas (Rebeca, Lorenza e Lunna) é com grande satisfação que as tenho como de fundamental importância em minha tão simples vidinha.

À Thaise, minha namorada, companheira e amiga. Falta palavras para expressar o quanto sou grato pela existência em minha vida.

Alberto Colombo pelos ensinamentos, amizade, e claro, pela confiança a que foi depositada sobre mim.

À Universidade Federal de Lavras em especial ao Programa de Pós-graduação Recursos Hídricos em Sistemas Agrícolas, meu profundo agradecimento.

Lívia Alvarenga, Myriane Scalco Ana Cláudia Sátiro, Matheus Vidal, Thiago Henrique Teixeira, Daniel Araújo, João Paulo Menezes, Herlon Barreto. Todos vocês contribuíram de alguma forma pela formação do profissional que daqui sai.

Aos anjos em forma de amigos (Magdiel Fernandes, Allef, Raimundo Faé, Raylan Trindade, Nathália Brito, Cíntia Paula Feitosa, Raizandra Barbosa

Daniela Sacramento, Welber Gonçalves, Suzane Araújo, Aysa Santana, Lara Cruz, Ana Maiara Pereira, Josiane Veiga, Thauanny Sabino, Ianka Sabino, Mayara Pacheco, João Dias, José de Jesus e Cecília Souza) que desde os primeiros passos somaram suas alegrias e completaram a minha felicidade juntamente aos que foram acrescentados na cidade que me recebeu.

Aos meus irmãos de República em especial Volmar Vida, Luan Carneiro, Felipe Sivieiro, Fernando Puertas e Victor Scarano, aqui deixo meu profundo agradecimento. Vocês foram de essencial importância na construção do profissional que aqui fizera.

À todos, que de alguma forma, contribuíram para a realização deste trabalho,

O meu sincero AGRADECIMENTO.

RESUMO

Estimativas confiáveis dos acréscimos nos níveis de eficiência energética que podem ser atingidos em uma unidade de bombeamento são mais difíceis de serem obtidas. Estas estimativas dependem tanto do realismo das estimativas de eficiência energética fornecidas pelos modelos matemáticos utilizados, como, também, da representatividade dos dados requeridos por estes modelos, incluindo, entre estes, as características técnicas dos componentes que são fornecidas nos catálogos dos fabricantes. Neste estudo, valores medidos de potência elétrica ativa (kW), determinados com o auxílio de um analisador de qualidade de energia, modelo Fluke 435II, durante a operação, em diversos valores de vazão bombeada de duas diferentes unidades de bombeamento, foram comparados com estimativas teóricas de potência ativa. Estas estimativas teóricas foram calculadas com base em informações de catálogos de fabricantes de bombas e dos motores. Na primeira unidade avaliada (bomba KSB- ETA 80-20 acoplada a um motor de indução trifásico de 4 polos com potência de 5.5 kW), os valores foram determinados sem alterações do valor da frequência nominal (60 Hz) da rede de suprimento de energia. Na segunda unidade avaliada (bomba KSB-ETA 65-20 acoplada a um motor de indução trifásico de 2 polos com potência de 30 kW), os valores foram determinados na rede de alimentação de um inversor de frequência, da marca WEG modelo CFW5, operando com duas frequências de chaveamento distintas (1,8 e 14 kHz). Em cada uma destas frequências de chaveamento do inversor, valores de potência ativa foram determinados com o valor nominal de frequência da rede elétrica (60 Hz) e com valores reduzidos de frequência na rede de alimentação do motor, que foram selecionados de forma a manter, em sucessivos valores decrescentes de vazão bombeada, um valor constante de rotação do eixo da bomba. O valor absoluto do erro médio das estimativas, baseadas em valores de catálogo, de potência ativa das unidades de bombeamento, operando com o valor nominal de frequência da rede (60 Hz), variou entre 23% (para o motor de 7,5 kW) e 12% (para o motor de 30 kW). No caso da operação com valores de frequência da rede de alimentação menores que 60 Hz, as determinações efetuadas indicam que somente as estimativas teóricas que levam em consideração uma redução gradual da eficiência do motor, decorrente da redução do seu índice de carregamento, fornecem valores próximos dos valores medidos de potência elétrica ativa. Os resultados também indicaram, que, em todos os valores de frequência da rede avaliados, a mudança da frequência de chaveamento do inversor, de 1,8 para 14 kHz, não causou alteração na relação vazão bombeada/potência elétrica ativa requerida.

Palavras-chave: Eficiência energética. Estações de bombeamento de água. Motoreselétricos

ABSTRACT

Trustworthy estimates of the increase in energy efficiency levels that might be reached in a pumping unit are more difficult to obtain. These estimates depend on the realism of the energy efficiency estimates provided by the used mathematical models, as well as on the representativeness of the data required by these models, including, among them, the technical characteristics of the components supplied in the manufacturer catalog. In this study, measured values of active electric power (kW), determined with the aid of an energy quality analyzer, model Fluke 435II, during the operation, in several flow values pumped from two different pumping units, were compared with theoretical estimates of active power. These theoretical estimates were calculated based on information from catalogs of pump and motor manufacturers. In the first evaluated unit (pump KSB-ETA 80-20 coupled to a triphasic induction motor with 4 poles with potency of 5.5 kW), the values were determined with no alteration of the nominal frequency value (60 Hz) of the supply chain network. In the second evaluated unit (pump KSB-ETA 65-20 coupled to a triphasic induction motor with 2 poles with potency of 30 kW), the values were determined in the feeding network of a frequency inverter, brand WEG model CFW5, operating with two distinct keying frequencies (1.8 and 14 kHz). In each of these keying frequencies of the inverter, active power values were determined with the nominal value of the electric grid frequency (60 Hz) and the reduced values of the motor feeding grid frequency, which were selected to maintain, in successive decreasing pump flow values, a constant value for the axis rotation of the pump. The mean error absolute value of the estimates, based on values from the catalog, of active potency of the pumping units, operating with a nominal value of grid frequency (60 Hz), ranged from 23% (for a 7.5 kW motor) to 12% (for a 30 kW motor). In the case of the operation with grid feeding frequency values lower than 60 Hz, the determinations promoted indicate that only the theoretical estimates considering a gradual reduction of the motor's efficiency, derived from the reduction its loading index, provide values near those measured from the active electric potency. The results also indicated that, in all the evaluated grid frequency values, the change in inverter keying frequency, from 1.8 to 14 kW, did not cause alteration on the pumping flow / active electric potency relation required.

Keywords: Energy efficiency. Water pumping stations. Electric motoras.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Diagrama dos motores elétricos	22
Figura 2	Curva de conjugado x rotação para motores de indução com rotor do tipo gaiola	23
Figura 3	Triângulo de potência.....	26
Figura 4	Curva característica do motor.....	28
Figura 5	Curva conjugado x rotação.....	32
Figura 6	Plaquetas da bomba do motor do conjunto 1.....	36
Figura 7	Curvas de desempenho da bomba KSB, ETA 80-20	36
Figura 8	Tubulação de recalque da bomba ETA 80-20	37
Figura 9	Medidor de vazão eletrônico de pás SIGNET utilizado.....	37
Figura 10	Determinação da temperatura da água com o multímetro MD-380.....	39
Figura 11	Determinação da rotação da bomba com Tacômetro TDR-100	40
Figura 12	Analizador de Qualidade de Energia Fluke 435 II	40
Figura 13	Plaquetas da bomba e do motor do conjunto 2.....	41
Figura 14	Curva da Bomba ETA 65-20 (conjunto 2)	42
Figura 15	Instalação do conjunto motobomba 2.....	43
Figura 16	Medidor magnético de vazão KROHNE, modelo IFS 4000	44
Figura 17	Detalhe da instalação dos transdutores de pressão utilizados no ensaio do conjunto 2.....	44
Figura 18	Inversor de frequência WEG, modelo CFW-05	46
Figura 19	Estimativa da potência elétrica ativa “Catálogo bomba e motor”	47
Figura 20	Estimativa da potência elétrica ativa “Catálogo Escorregamento”	48

Figura 21	Ajuste dos parâmetros do motor utilizando a ferramenta solver do Excel.....	49
Figura 23	Valores adimensionais de vazão e altura manométrica total correspondentes aos valores dimensionais obtidos em curvas do catálogo da bomba KSB-ETA80/20.....	51
Figura 24	Valores adimensionais de vazão e altura manométrica total correspondentes aos valores dimensionais obtidos em curvas do catálogo da bomba KSB-ETA65/20.....	52
Figura 25	Valores adimensionais de vazão e altura manométrica total obtidos em três ensaios de laboratório da bomba KSB-ETA80/20.....	53
Figura 26	Valores adimensionais de vazão versus altura manométrica total obtidos de ensaios da bomba KSB-ETA80/20 conduzidos sob seis diferentes valores de rotação.....	54
Figura 27	Curvas adimensionais da bomba KSB-ETA80/20 ajustadas com valores de catálogo e com valores de laboratório (pontos amostrados).....	55
Figura 28	Curvas adimensionais da bomba KSB-ETA65/20 ajustadas com valores de catálogo e com valores de laboratório (pontos amostrados).....	56
Figura 29	Curvas adimensionais de rendimento da bomba KSB-ETA80/20 ajustadas com valores de catálogo (pontos amostrados).....	57
Figura 30	Curvas adimensionais de rendimento da bomba KSB-ETA65/20 ajustadas com valores de catálogo (pontos amostrados).....	57

Figura 31	Valores estimados e observados de potência ativa requerida para acionamento do conjunto motobomba 1 em função da vazão bombeada	59
Figura 32	Curvas vazão-rendimento da bomba, obtidas com parâmetros ajustados e com parâmetros de catálogo	60
Figura 33	Curvas rotação-torque no eixo do motor, obtidas com parâmetros de plaquetas e com parâmetros ajustados	61
Figura 34	Curvas carregamento-rendimento do motor elétrico obtidas com parâmetros ajustados e com parâmetros de catálogo.....	62
Figura 35	Relação entre valores de potência no eixo calculados com base no escorregamento do motor e valores de potência no eixo calculados com base no rendimento da bomba	62
Figura 36	Valores estimados e observados de potência ativa requerida para acionamento do conjunto motobomba 2 em função da vazão bombeada	63
Figura 37	Curvas vazão-rendimento da bomba, obtidas com parâmetros ajustados e com parâmetros de catálogo	64
Figura 38	Curvas rotação-torque no eixo do motor, obtidas com parâmetros de plaqueta e com parâmetros ajustados.....	65
Figura 39	Curvas carregamento-rendimento do motor elétrico obtidas com parâmetros ajustados e com parâmetros de catálogos	66
Figura 40	Potência ativa sob diferentes valores de vazão de uma bomba KSB/65/20 operando com diferentes valores de rotação e frequência de chaveamento do inversor (1,8 e 14 kHz).....	67
Figura 41	Estimativas de rendimento do motor operando sob controle de um inversor em relação às curvas de rendimento sem inversor: de catálogo e justada	68

Figura 42 Fator de potência em função do índice de carregamento de um motor operando com inversor de frequência.....68

LISTA DE SÍMBOLOS

a_H, b_H, c_H, d_H	Coefficientes de ajustes da curva característica da bomba
$a_\eta, b_\eta, c_\eta, d_\eta$	Coefficientes de ajustes da equação de rendimento de bomba
a_0, a_1, a_2, a_3	Coefficientes do polinômio de terceiro grau que descreve a característica hidráulica desejada
c_0, c	Parâmetros de equação de rendimento versus carregamento, ajustados de acordo com as informações do fabricante
f	Frequência da rede de alimentação (Hz)
$F(x)$	Característica hidráulica do desempenho desejado (altura manométrica total, rendimento, etc.)
g	Aceleração da gravidade (m/s^2)
HMT	Altura manométrica total (m)
HTM_{BE}	Altura manométrica total no ponto de rendimento ótimo (m)
I	Valor eficaz (RMS) da corrente, médio das três fases (A)
I_N	Valor eficaz (RMS) da corrente nominal (A)
κ	Índice de carregamento do motor
m	Desnível entre a tomada de pressão na entrada da bomba e na saída (m)
N_e	Velocidade de rotação (rpm)
N_N	Velocidade nominal de rotação do motor (rpm)
n_p	Número de pares de polos, por fase, no estator
n_r	Número de rotores da bomba considerada
N_s	Velocidade síncrona de rotação do motor (rpm)
N_{sBE}	Velocidade de rotação específica da bomba no ponto de ótimo rendimento (rpm)
N_{sf}	Rotação síncrona na frequência f (rpm)
P_{abs}	Pressão absoluta na entrada da bomba (N/m^2)

P_{atm}	Pressão atmosférica local(N/m ²)
P_e	Pressão na entrada da bomba (N/m ³)
P_{EP}	Potência elétrica aparente (VA)
P_{EA}	Potência elétrica ativa (W)
P_{EAN}	Potência elétrica ativa nominal (W)
P_H	Potência hidráulica (W)
P_{ER}	Potência elétrica reativa (Var)
P_{ME}	Potência mecânica no eixo (W)
$P_{MEN=}$	Potência mecânica nominal no eixo (W)
P_S	Pressão na saída da bomba(N/m ²)
Q	Vazão bombeada (m ³ /s)
Q_{BE}	Vazão de bombeamento no ponto de rendimento ótimo (m ³ /h)
S	Escorregamento ($0 \leq S \leq 1$)
t	Temperatura da água medida durante o ensaio(°C)
V	Valor eficaz (RMS) da voltagem entre fases,média da(V)
V_N	Valor nominal eficaz (RMS) da voltagem entre fases (V)
v_s	Velocidade de escoamento da água (m/s)
x	Variável independente (vazão)
ϕ	Diâmetro do rotor (m)
γ	Peso específico da água (N/m ³)
η_B	Rendimento da bomba
η_{IF}	Rendimento do inversor de frequência
η_M	Rendimento do motor
ηN_M	Rendimento nominal do motor
λH	Altura manométrica total adimensional
λQ	Vazão bombeada adimensional
ρ	Massa específica da água (Kg/m ³)

τ	Torque ou conjugado no eixo do motor (N.m)
τ_N	Torque ou conjugado nominal no eixo do motor (N.m)
ω	Velocidade angular do rotor (rad/s)
ω_N	Velocidade angular nominal do rotor (rad/s)
ΔZ	Desnível entre a tomada de pressão na entrada da bomba e na saída (m)

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
2	REFERENCIAL TEÓRICO	18
2.1	Bombas Centrífugas	18
2.2	Motores Elétricos	21
2.3	Inversor de frequência	31
3	MATERIAL E MÉTODOS	35
3.1	Ensaio do primeiro conjunto	35
3.2	Ensaio do segundo conjunto	41
3.3	Estimativas de potência ativa	46
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	50
4.1	Curva adimensional de vazão versus pressão	50
4.2	Curva adimensional de vazão versus rendimento da bomba	56
4.3	Caracterização dos motores	58
4.4	Potência ativa do conjunto motobomba 1	59
4.5	Potência ativa do conjunto motobomba 2	63
4.6	Potência com inversor de frequência	66
5	CONCLUSÕES	69
	REFERÊNCIAS	70

1 INTRODUÇÃO

A demanda de energia elétrica no Brasil está diretamente ligada ao crescimento populacional e ao desenvolvimento dos setores produtivos, mas a geração não tem crescimento na mesma proporção.

O dimensionamento correto de unidades de bombeamento, além de atender as exigências de vazão e altura manométrica, deve também buscar a otimização do consumo de energia, proporcionando maior sustentabilidade e redução dos custos financeiros desta atividade.

Nos sistemas de irrigação, o consumo de energia elétrica está concentrado no acionamento de conjuntos motobombas com bombas centrífugas. A seleção e o manejo adequados desses conjuntos têm efeitos diretos sobre o consumo de energia e o custo de produção.

Objetivando redução do consumo de energia nas operações, no setor industrial, as bombas centrífugas vêm sendo utilizadas associadas a inversores de frequência, que permitem o controle da rotação do eixo da bomba de forma que a mesma forneça os valores de pressão e/ou vazão necessária para cada situação específica.

Deve-se salientar, no entanto, que, qualquer investimento objetivando a redução do consumo de energia nas operações energéticas de uma unidade de bombeamento, deve ser precedido de um estudo que possa quantificar a economia de energia que se pode alcançar. Estimativas exageradas de economia de energia, que são bastante comuns, são evitadas através de estimativas confiáveis da eficiência energética atual e da eficiência energética que se pode atingir.

Valores confiáveis do nível de eficiência energética de uma unidade de bombeamento são obtidos através do monitoramento destes valores durante a operação dessas unidades. Estimativas confiáveis dos acréscimos nos níveis de

eficiência energética que podem ser atingidos em uma unidade de bombeamento são mais difíceis de serem obtidas. Estas estimativas dependem tanto do realismo das estimativas de eficiência energética fornecidas pelos modelos matemáticos utilizados como, também, da representatividade dos dados requeridos por estes modelos, incluindo, entre estes, as características técnicas dos componentes que são fornecidas nos catálogos dos fabricantes.

Neste estudo, visando avaliar a efetividade dos valores de economia de energia, fornecidos por diferentes estratégias de cálculo teórico da potência elétrica ativa (kW) requerida para acionamento de unidades de bombeamento, valores medidos de potência elétrica ativa (kW) foram comparados com estimativas teóricas de potência ativa. As comparações abrangeram uma unidade de bombeamento operando sem inversor de frequência (bomba KSB- ETA 80-20 acoplada a um motor de indução trifásico de 4 polos com potência de 5.5 kW) e uma unidade (bomba KSB-ETA 65-20 acoplada a um motor de indução trifásico de 2 polos com potência de 30 kW) controlada por um inversor de frequência (WEG/CFW5), operando com duas frequências de chaveamento distintas (1,8 e 14 kHz).

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Bombas Centrífugas

As bombas centrífugas também conhecidas como turbomáquinas impulsoras ou bombas rotodinâmicas são aquelas em que a transferência de energia da bomba para o fluido é feita pela ação de um órgão propulsor, denominado rotor, desenvolvendo na massa fluida forças responsáveis pelo escoamento. A finalidade do rotor, também chamado impulsor ou impelidor, é comunicar à massa líquida a aceleração devido à transformação em energia mecânica (CARVALHO; OLIVEIRA, 2008; MACINTYRE, 1987; QUINTELA, 2002).

A seleção de uma bomba centrífuga é realizada com base na curva característica que relaciona a vazão (Q) versus a altura manométrica total (HMT) de bombeamento. Para facilitar a seleção da bomba, os fabricantes disponibilizam gráficos de cobertura hidráulica que mostram toda a região de vazão versus altura manométrica de bombeamento, compreendida por seus diferentes modelos de bombas e que podem ser disponibilizados para diferentes diâmetros de rotores (PRADO; SILVA 2013; SCHMIDLIN JÚNIOR, 2006).

As curvas características de uma máquina hidráulica podem ser apresentadas de forma adimensional ou dimensional. Os fabricantes de bombas apresentam as curvas dimensionais da altura de elevação, potência e rendimento em função do caudal. Alcântara (1988), Pereira (2011), Marchin e Simpson (2013) e Simpson e Marchin (2013) calculam as alterações nos valores dimensionais das curvas características de bombas centrífugas (vazão x altura manométrica e vazão x rendimento) decorrentes de alterações nos valores de diâmetro e/ou de velocidade de rotação do rotor, com base em valores adimensionais de vazão e da altura manométrica dados pelas Equações 1 e 2:

$$\lambda Q = \frac{Q}{\phi^3 \cdot \omega} \quad (1)$$

$$\lambda H = \frac{g \cdot HMT}{\phi^2 \omega^2} \quad (2)$$

Em que:

g = Aceleração da gravidade (m/s²);

HMT= Altura manométrica total (m);

Q = Vazão bombeada (m³/s);

ϕ = Diâmetro do rotor (m);

λH = Altura manométrica total adimensional;

λQ = Vazão bombeada adimensional;

ω = Velocidade angular do rotor (rad/s).

Abadia, Rocamora e Vera (2012), Mahar e Singh (2014), Maradi-Jalal, Marino e Afshar (2003), Moreno et al. (2009) e Ulanicki, Kahler e Coulbeck (2008) utilizaram polinômio quadrático para a representação das curvas características das bombas centrífugas (Equação 3). Esses mesmos autores adimensionalizaram essas curvas, seguindo as recomendações propostas por Alcântara (1988), Marchin e Simpson (2013), Pereira (2011) e Simpson e Marchi (2013) para representar as curvas de altura manométrica total e rendimento segundo as Equações 4 e 5.

$$F(x) = a_0 + a_1 \cdot x + a_2 \cdot x^2 \quad (3)$$

a_0, a_1, a_2 = Coeficientes do polinômio de terceiro grau que descreve a característica hidráulica desejada;

$F(x)$ = Característica hidráulica do desempenho desejado (altura manométrica total, rendimento, etc.);

x = Variável independente (Vazão).

$$\lambda H = \frac{nr \cdot \phi^2 \cdot \omega^2}{g} \cdot \left[a_H + b_H \cdot \frac{Q}{\phi^3 \cdot \omega} + c_H \cdot \left(\frac{Q}{\phi^3 \cdot \omega} \right)^2 \right] \quad (4)$$

a_H, b_H, c_H = Coeficientes de ajuste da curva característica da bomba;

nr = Número de rotores da bomba considerada.

$$\eta_B = a_\eta + b_\eta \left(\frac{Q}{\phi^3 \cdot \omega} \right) + c_\eta \cdot \left(\frac{Q}{\phi^3 \cdot \omega} \right)^2 \quad (5)$$

a_η, b_η, c_η = Coeficientes de ajuste da equação de rendimento de bomba;

η_B = Rendimento da bomba.

O rendimento de uma bomba é a razão entre a potência útil cedida ao fluido (Potência hidráulica) e a potência absorvida pela bomba (Potência mecânica no eixo), ou seja, é a eficiência da máquina hidráulica na transformação de energia (CARVALHO; OLIVEIRA, 2008; GUIMARÃES, 2008; MACINTYRE, 1980).

$$\eta_B = \frac{P_H}{P_{ME}} \quad (6)$$

P_H = Potência hidráulica (W).

$$P_H = Q \cdot HMT \cdot \gamma \quad (7)$$

γ = Peso específico da água (N/m³).

A potência mecânica é a grandeza física que determina a quantidade de energia concedida por uma fonte a cada unidade de tempo (CARVALHO; OLIVEIRA, 2008). Nem toda potência fornecida ao eixo da bomba é aproveitada na transmissão de energia ao líquido pelo rotor. Uma parte dessa energia se perde por atrito mecânico nos mancais e gaxetas (MACINTYRE, 1987). Assim, a potência mecânica requerida no eixo de acionamento de uma bomba é dada pela seguinte Equação:

$$P_{ME} = \frac{Q.HMT.\gamma}{\eta_B} \quad (8)$$

P_{ME} = potência mecânica no eixo (W);

2.2 Motores Elétricos

O motor elétrico é uma máquina que transforma energia elétrica ativa em energia mecânica disponível em seu eixo. Na maioria dos segmentos econômicos rurais e industriais, os motores elétricos são a principal forma de uso final da energia elétrica. No Brasil, os motores elétricos representam mais de 50% do uso final da energia elétrica da indústria (OLIVEIRA FILHO et al., 2010).

Conforme descrito por Ramos (2009) e ilustrado no diagrama da Figura 1, os motores elétricos são divididos em dois grandes grupos: os motores de corrente contínua e os motores de corrente alternada.

Américo (2003) estima que 75% dos motores existentes no Brasil correspondem a motores de indução, trifásicos, com rotor em gaiola de esquilo. Esse autor estima que os 25% restantes seriam constituídos por motores menores, dos quais grande número se constitui de motores com potência abaixo que 1cv, monofásicos, com aplicação em equipamentos residenciais (geladeira,

ar-condicionado, máquina de lavar, ventiladores, etc.). Os motores de corrente alternada, de indução, trifásicos, com rotor em gaiola de esquilo serão o objeto deste estudo.

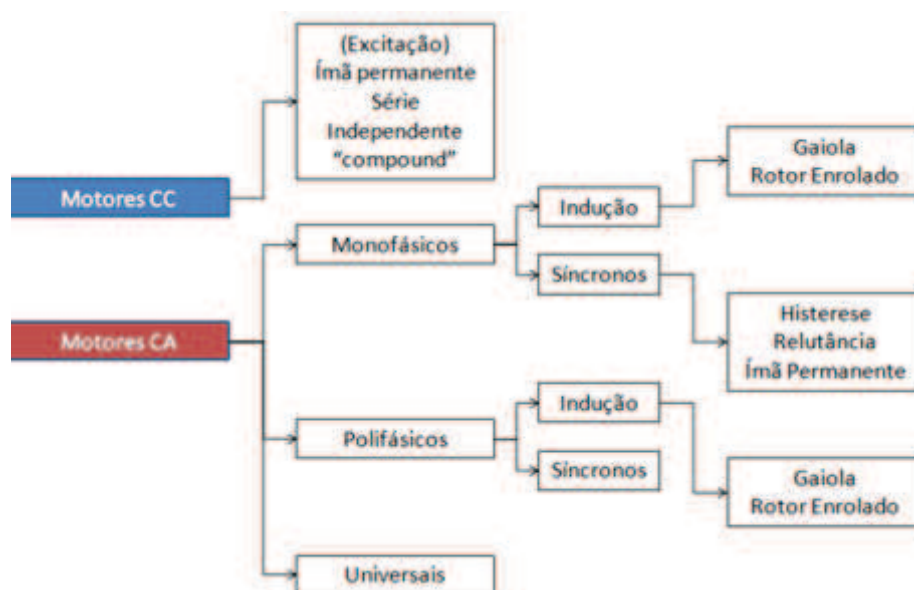


Figura 1 Diagrama dos motores elétricos
 Fonte: Adaptado de Lobosco e Dias (1988).

Conforme indicado pelo nome, os motores de indução utilizam o princípio da indução para transferir energia do estator (parte fixa do motor) para o rotor (parte móvel que contém o eixo). Quando energizado, o estator produz um campo magnético rotativo cuja velocidade de rotação, que é conhecida como velocidade síncrona, depende da frequência da rede elétrica de alimentação do motor e do número de pares de polos, por fase, do estator (AHONEN et al., 2012):

$$N_s = \frac{60 f}{np} \quad (9)$$

f = frequência da rede de alimentação (Hz);

n_p = número de pares de polos, por fase, no estator;

N_s = velocidade síncrona de rotação do motor (rpm).

Quando não existem perdas ou cargas solicitadas no eixo, o eixo do motor teria velocidade bem próxima à síncrona. Entretanto, ao ser aplicada uma carga no seu eixo, o rotor diminui a sua velocidade na proporção necessária para que a corrente induzida, pela diferença de rotação entre o campo girante do estator e do rotor passe a produzir um conjugado eletromagnético igual e oposto ao conjugado aplicado no seu eixo (LOBOSCO; DIAS 1988).

Desta forma, nos motores de indução com rotor de gaiola, o conjugado disponível no eixo varia de acordo com a rotação, conforme ilustrado na Figura 2.

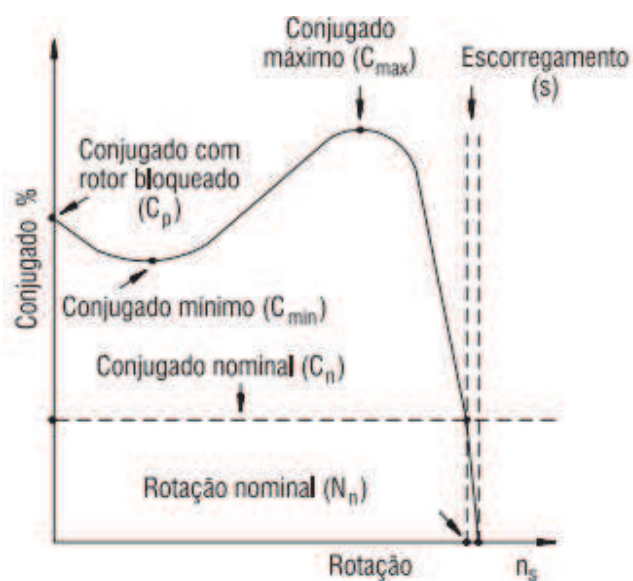


Figura 2 Curva de conjugado x rotação para motores de indução com rotor do tipo gaiola

Fonte: WEG (2013).

A diferença entre a velocidade de rotação do campo magnético girante do estator e a velocidade de rotação do eixo do motor é chamada de deslizamento, ou escorregamento (CARVALHO; OLIVEIRA, 2008; MCINTYRE, 1987).

$$s = \frac{N_s - N_e}{N_s} \quad (10)$$

s = escorregamento ($0 \leq s \leq 1$);

A velocidade de rotação do eixo de um motor pode ser transformada em velocidade angular:

$$\omega = \frac{N_e}{60} \cdot 2 \cdot \pi \quad (11)$$

Quando os valores nominais de frequência e tensão da rede elétrica de alimentação de um motor de indução trifásico são atendidos, a linearização da curva do conjugado versus rotação do motor permite estimar com precisão o conjugado em função do valor da rotação do motor (AHONEN et al., 2012; PEREIRA, 2011; SILVA, 1999).

$$\tau = \tau_N \left(\frac{N_s - N_e}{N_s - N_N} \right) \quad \text{para } N_N \leq N_e \leq N_s \quad (12)$$

N_N = Velocidade nominal de rotação do motor (rpm);

τ = torque ou conjugado no eixo do motor (N.m);

τ_N = torque ou conjugado nominal do motor (N.m);

Sendo o torque nominal estimado pela seguinte equação:

$$\tau_N = \frac{P_{MEN}}{\omega_N} \quad (13)$$

P_{MEN} = potência mecânica nominal no eixo (W);

ω_N = velocidade angular nominal do motor (rad/s).

De acordo com Saidur (2010), a análise de desempenho de motores elétricos é feita com base no fator de potência e no rendimento.

O fator de potência é o cosseno do ângulo de defasagem entre a onda de tensão e a onda de corrente do circuito. A análise de desempenho de motores elétricos deve sempre considerar o seu fator de potência e o seu rendimento. O fator de potência é a relação entre a potência ativa e a potência aparente:

$$\cos\varphi = \frac{P_{EA}}{P_{EP}} \quad (14)$$

P_{EA} = Potência elétrica ativa (W);

P_{EP} = Potência elétrica aparente (VA).

A potência ativa é a capacidade que o circuito tem de produzir trabalho, ou seja, é a potência elétrica que chega ao motor que realmente é convertida em potência mecânica. Em contra partida, uma parcela dessa potência é transferida e armazenada nos elementos indutivos e capacitivos do circuito, a chamada potência reativa. E a potência total, também chamada de potência aparente é o somatório dessas duas potências. Assim, segue abaixo as fórmulas dessas potências utilizadas para circuitos elétricos trifásicos:

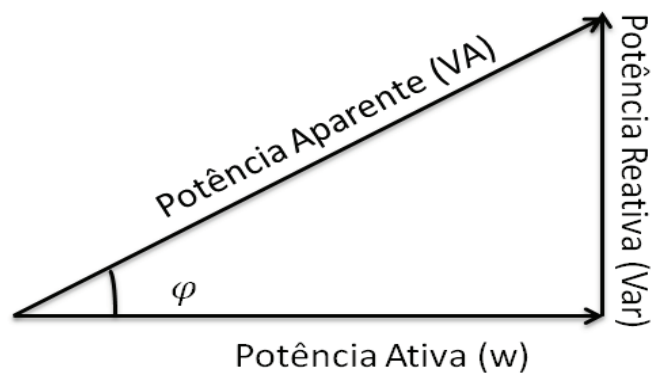


Figura 3 Triângulo de potência

$$P_{EA} = \sqrt{3} \cdot V \cdot I \cdot \cos\varphi \quad (15)$$

I = valor eficaz (RMS) da corrente, média das três fases (A);

V = valor eficaz (RMS) da voltagem entre fases, média das três fases (V).

O rendimento do motor é a relação existente entre a potência útil e a potência ativa. Pereira (2011) afirma que os motores elétricos de indução convertem 80-90% da potência aparente absorvida em trabalho útil.

$$\eta_M = \frac{P_{ME}}{P_{EA}} \quad (16)$$

η_M = Rendimento do motor.

Tabela 1 Rendimentos elétricos mínimos para motores elétricos monofásicos e trifásicos

POTÊNCIA NOMINAL		MONOFÁSICO		TRIFÁSICO	
		Polos		Polos	
Cv ou hp	kW	2	4	2	4
0,16	0,12	39,7	43,3	61,0	61,5
0,25	0,18	39,7	43,3	65,0	66,5
0,33	0,25	44,0	45,4	66,5	68,5
0,5	0,37	50,8	49,0	72,5	72,0
0,75	0,55	55,1	53,1	74,0	75,0
1	0,75	58,8	56,6	80,0	80,5
1,5	1,1	60,4	59,5	82,5	81,5
2	1,5	65,2	63,0	83,5	84,0
3	2,2	71,1	65,7	85,0	85,0
4	3	75,1	70,3	85,0	86,0
5	3,7	77,4	74,5	87,5	87,5
6	4,5	78,5	76,1	88,0	88,5
7,5	5,5	79,7	77,5	88,5	89,5
10	7,5	82,4	79,6	89,5	89,5
12,5	9,2	84,0	81,5	89,5	90,0
15	11	84,0	81,5	90,2	91,0
20	15			90,2	91,0
25	18,5			91,0	92,4

Fonte: Adaptado de Brasil (2010).

O índice de carregamento de um motor elétrico expressa a fração da sua potência mecânica nominal que está disponível no seu eixo

$$k = \frac{P_{ME}}{P_{MEN}} \quad (17)$$

k= Índice de carregamento do motor.

O conhecimento do percentual de carregamento do motor é importante porque o rendimento, o escorregamento, o fator de potência e a corrente absorvida variam com essa grandeza. A Figura 4 ilustra a dependência entre essas grandezas.

Nos catálogos dos motores elétricos é comum a apresentação de valores de rendimento e de fator de potência em três diferentes condições: 50%, 75% e 100% de plena carga (WEG, 2005).

Bernier e Bourret (1999) e Garcia (2003) modelam o rendimento do motor em função do índice de carregamento com base em uma equação com a seguinte forma:

$$\eta_M = c_0 \cdot (1 - e^{-c \cdot k}) \quad (18)$$

c_0 e c = Parâmetros da equação de rendimento versus carregamento do motor, ajustados de acordo com as informações do fabricante.

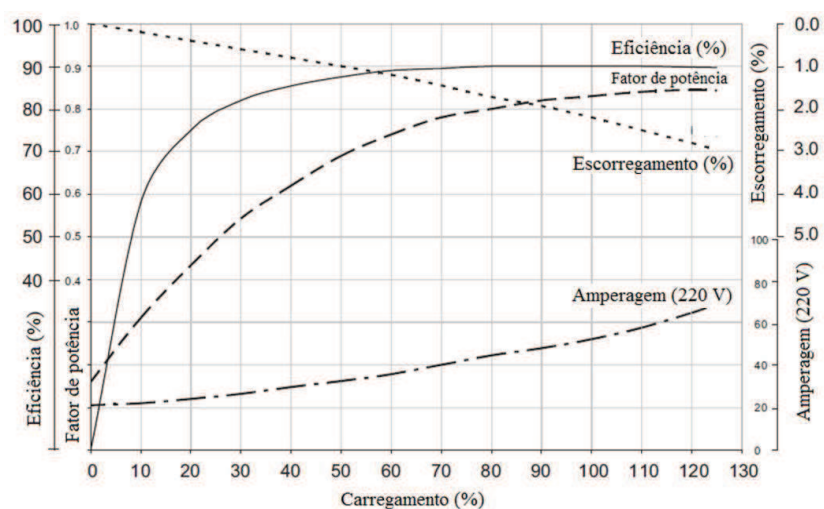


Figura 4 Curva característica do motor

Fonte: Adaptada de Garcia et al. (2007).

Na falta de informações específicas para motores de alta eficiência, para ajuste dos parâmetros da Equação 18, Bernier e Bourret (1999) assumem, para motores maiores que 25cv, valores de eficiência de motor dados pela seguinte equação:

$$\eta_M = 0,94187. (1 - e^{-0,0904.k}) \quad (19)$$

Sirak e Pillay (2012) ressaltam que a eficiência de um motor elétrico pode ser afetada também por outros fatores, além do índice de carregamento, tais como: desbalanceamento da voltagem entre as fases de alimentação do motor; elevação ou redução da voltagem da linha de alimentação em relação ao valor nominal; temperatura do motor e problemas internos do motor relacionados aos rolamentos e a seu enrolamento.

Nas condições normais de trabalho dos motores elétricos, é muito difícil determinar diretamente no eixo do motor o valor do torque fornecido pelo motor. Visando superar essa dificuldade, diversos pesquisadores desenvolveram diferentes metodologias para a estimativa da potência mecânica disponível no eixo do motor: Segundo Ahone et al. (2012), a equação geral do carregamento de motores elétricos, pode ser obtida pela equação 20.

$$k = \frac{P_{ME}}{P_{MEN}} = \frac{\eta_M \cdot P_{EA}}{\eta_{M_N} \cdot P_{EAN}} = \frac{\eta_M \cdot \sqrt{3} \cdot V \cdot I \cdot \cos\phi}{\eta_{M_N} \sqrt{3} \cdot V_N \cdot I_N \cdot \cos\phi_N} \quad (20)$$

η_{M_N} = rendimento nominal do motor;

I_N = Valor eficaz (RMS) da corrente nominal (A);

P_{EAN} = Potência elétrica ativa nominal (W);

V_N = Valor eficaz (RMS) da voltagem entre fases (V).

De acordo com a portaria 488 do Inmetro (BRASIL, 2010), para o ponto de 100% de carga do motor, a diferença entre o valor de potência ativa nominal declarada pelo fabricante e o valor de potência ativa determinada em ensaio não deve exceder $\pm 0.5\%$, da potência ativa nominal declarada.

Challenge (1997) e Kaya et al. (2008) adotam uma simplificação da Equação 20 nas estimativas de carregamento do motor através do chamado método da corrente elétrica:

$$k = \frac{P_{ME}}{P_{MEN}} = \left(\frac{I}{I_N} \cdot \frac{V}{V_N} \right) \quad (21)$$

Baseado na linearização da curva rotação torque, Christiman (2010) estima o carregamento do motor através dos valores de rotação do motor (método do escorregamento):

$$k = \frac{P_{ME}}{P_{MEN}} = \frac{(N_s - N_e)}{(N_s - N_N)} \cdot \left(\frac{N_e}{N_N} \right) \quad (22)$$

De acordo com Garcia (2003), este método é aparentemente melhor, por não depender de nenhuma outra informação da plaqueta do motor, além da sua rotação nominal (N_N). Porém este método resente-se da incerteza no valor da rotação nominal do motor. Segundo Holmquist, Rooks e Richter (2004), a norma dos fabricantes americanos de motores elétricos (NEMA- National Electrical Manufacturers Association) especifica que o valor absoluto da diferença entre a rotação nominal declarada pelo fabricante (N_N) e o valor medido de rotação do motor, na temperatura de 25°C e sob os valores de voltagem nominal, frequência nominal e torque nominal, não pode superar 20% do valor declarado de $N_s - N_N$.

Holmquist, Rooks e Richter (2004) estimam o carregamento pelo método do escorregamento, com parâmetros da voltagem (Equação 23).

$$k = \frac{P_{ME}}{P_{MEN}} = \frac{\omega \cdot \tau}{\omega_N \cdot \tau_N} = \frac{(N_s - N_e)}{(N_s - N_N)} \cdot \left(\frac{V}{V_N}\right)^2 \quad (23)$$

Gopalakrishnan, Chaudhari e Plummer (2008), estimam o carregamento do motor assumindo algumas constantes, como pode ser visto na equação que se segue:

$$k = \frac{P_{ME}}{P_{MEN}} = 0,14511 + 0,77806 \cdot \frac{(N_s - N_e)}{(N_s - N_N)} + 0,0000207 \cdot (N_s - N_N) \cdot V_N \quad (24)$$

2.3 Inversor de frequência

Segundo Camoirano e Dellepiane (2005), o inversor de frequência pode ser considerado como uma caixa preta que recebe uma corrente elétrica, numa dada frequência e tensão e é capaz de gerar uma frequência diferente e ajustável à tensão. Sendo assim, o inversor é uma função de tensão e frequência, não oferece altos torques em baixas rotações, pois o torque é função direta da corrente de alimentação, não da tensão (GUIMARÃES, 2008).

O encontro das curvas de conjugado em função de rotação, do motor elétrico e da carga, define o ponto de funcionamento do conjunto. Nos motores elétricos assíncronos submetidos a uma carga constante, a velocidade de trabalho é praticamente invariável. Segundo Guimarães (2008), ao se variar a frequência de alimentação de um motor de corrente alternada, varia-se a velocidade do rotor. O comportamento do motor permanece da mesma forma, entretanto, deslocado na rotação conforme a frequência, como observado na figura abaixo:

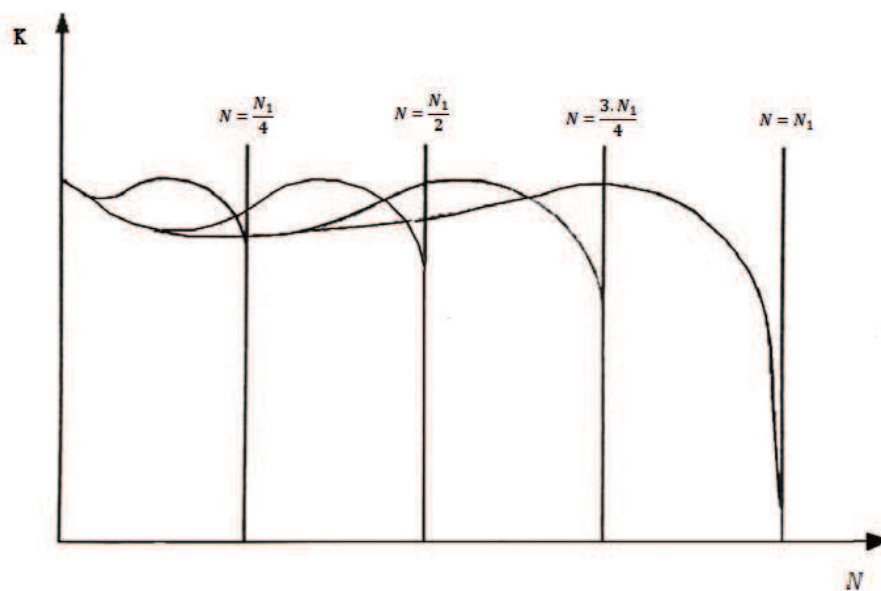


Figura 5 Curva conjugado x rotação

Fonte: Adaptada de Guimarães (2008)

Christiman (2010) estima a potência mecânica no eixo acionado por um inversor de frequência, pela Equação 25.

$$\eta_M \cdot PMN_{eixo} = PM_{eixo} = PMN_{eixo} \cdot \frac{N_e}{N_N} \cdot \frac{N_{SF} - N_e}{N_{SF} - N_N} \quad (25)$$

N_{SF} = Rotação síncrona na frequência F (rpm).

Bernier e Bourret (1999) afirmam que o rendimento do inversor de frequência é dado pela relação existente entre a potência hidráulica ativa e os rendimentos de motor e bomba. Equação 26

$$\eta_{IF} = \frac{P_h}{P_{at} \cdot \eta_M \cdot \eta_B} \quad (26)$$

η_{IF} =Rendimento do inversor na frequência F.

Com o avanço da Eletrônica de Potência, as aplicações diversas dos *drivers* de controle de velocidade de motores elétricos de indução, e recentes pesquisas concluíram que a redução da velocidade de um motor elétrico proporciona maior economia de energia elétrica do que o controle *on/off* (SILVA; SILVA; CRUZ, 2013; TSUTIYA, 2008; WEG, 2013).

Os autores Burt et al. (2008) relatam que em média a eficiência relativa do sistema elétrico com o inversor de frequência pode ser de aproximadamente 8% mais baixa do que a eficiência relativa de um sistema sem o uso do inversor de frequência. Se considerarmos o campo real operacional, essa condição de 8% é enganadora, porque a energia poupada pode ser obtida com o inversor de frequência, devido à sua capacidade para ajustar as velocidades para atender às condições reais do campo.

Azevedo (2003) ressalta na análise de oito sistemas de irrigação que a economia de energia proporcionada pelo uso do inversor de frequência assume valores na faixa de 15,9% a 32,2% daquele estimado sem o uso de inversor de frequência. Também foi reportado que a economia de energia propiciada pelo uso de inversores de frequência depende principalmente de três fatores: O superdimensionamento da unidade de bombeamento, o desnível geométrico ao longo da lateral e a perda de carga ao longo da lateral móvel.

Moraes et al. (2011) simularam o gasto com energia elétrica e lâminas de irrigação para um perímetro irrigado hipotético na região do Jaíba-MG. Os autores concluíram que o uso do inversor de frequência e o gerenciamento do número de horas de disponibilidade da irrigação no sistema de fornecimento de

água para irrigação no perímetro estudado, garantiram economia de energia elétrica, que variou em torno de 7% a 62%.

3 MATERIAL E MÉTODOS

Dois conjuntos motobombas com acionamento elétrico (circuitos trifásicos), pertencentes ao Laboratório de Hidráulica do Departamento de Engenharia da Universidade Federal de Lavras, em Lavras MG, foram ensaiados no período de setembro de 2013 a janeiro de 2014.

3.1 Ensaio do primeiro conjunto

O primeiro conjunto motobomba ensaiado (Conjunto 1) era constituído por uma bomba KSB modelo ETA 80-20 acionada por um motor de indução de 7,5 cv, da marca ARNO, modelo ER 112 L. De acordo com as informações da plaqueta mostrada na Figura 6, a bomba 80-20, quando trabalhando com 1.750 rpm tem capacidade de bombear 60 m³/h de água com uma altura manométrica de 11,5 mca. A plaqueta do motor da marca ARNO, modelo ER 112 L, mostrada na Figura 6, indica que este motor, quando alimentado por rede trifásica de 60 Hz/220V, requer uma corrente de 21A para manter, com rotação de 1.710 rpm, uma potência mecânica de 7,5 cv (5,5 kW) no seu eixo.

Curvas com valores de vazão, altura manométrica e rendimento da bomba KSB 80-20, fornecidas pelo fabricante são apresentadas na Figura 7.

Conforme indicado na Figura 8, a bomba do conjunto 1 trabalhava afogada, alimentando uma tubulação de PVC branco roscável de 3 polegadas, dotada de anel de tomada de pressão, medidor de vazão de pás e um registro gaveta de 3 polegadas no seu final.

Foram realizadas três repetições do ensaio deste conjunto, ao longo do período de setembro de 2013 a janeiro de 2014. Estas repetições foram identificadas como Teste 1, Teste 2 e Teste 3.



Figura 6 Plaquetas da bomba do motor do conjunto 1

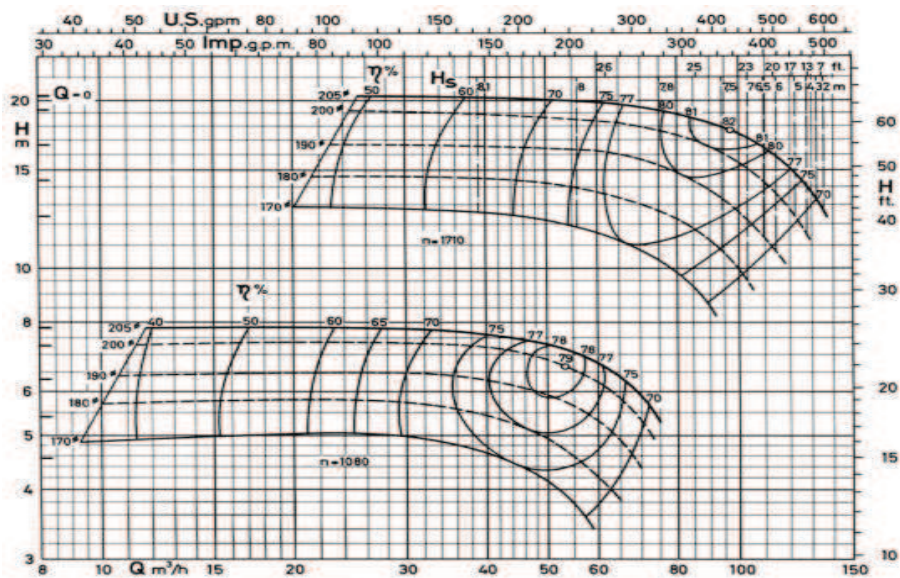


Figura 7 Curvas de desempenho da bomba KSB, ETA 80-20

Fonte: catálogo do fabricante.



Figura 8 Tubulação de recalque da bomba ETA 80-20

Na Figura 9, é mostrado o medidor de pás da marca SIGNET, modelo 515/3-8510-XX, que estava acoplado a um integrador de sinais da marca SIGNET, modelo 5.100. A pressão na saída do conjunto 1 foi determinada com manômetro digital da marca GULTON, modelo GULpress 1.000, conectado a um anel de tomada de pressão instalado a uma distância de 31 cm da saída da bomba.



Figura 9 Medidor de vazão eletrônico de pás SIGNET utilizado

A altura manométrica total, correspondente a cada um dos diferentes valores de vazão determinados, foi calculada pela seguinte equação:

$$HMT = \frac{P_s}{\gamma} + \frac{v_s^2}{2 \cdot g} + \Delta z \quad (27)$$

P_s = Pressão na saída da bomba (N/m²);

v_s = Velocidade de escoamento da água (m/s).

Δz = Desnível entre a tomada de pressão na entrada da bomba e na saída (m);

Nesta equação, o peso específico da água bombeada foi determinado a partir do produto do módulo da aceleração da gravidade pela massa específica da água:

$$\gamma = \rho \cdot g \quad (28)$$

ρ = Massa específica da água (kg/m³).

Atendendo à recomendação da portaria n° 455 do INMETRO (BRASIL, 2010), referente ao ensaio de bombas, na determinação do peso específico da água foi utilizado um valor de aceleração da gravidade de $g = 9,81 \text{ m/s}^2$ associado a valores de massa específica dependentes da temperatura da água, conforme a seguinte equação:

$$\rho = 1000,14 + 0,0094 \cdot t - 0,0053 \cdot t^2 \quad (29)$$

t = Temperatura da água medida durante o ensaio (°C).

Durante os ensaios, os valores da temperatura da água bombeada foram registrados com o auxílio de um multímetro digital portátil, da marca INSTRUTHERM, modelo MD-380 (Figura 10).



Figura 10 Determinação da temperatura da água com o multímetro MD-380

Para cada um dos valores de vazão determinados, foi registrada, com auxílio de um tacômetro digital marca INSTRUTEMP, modelo TDR-100, o valor da rotação do eixo da bomba (Figura 11).



Figura 11 Determinação da rotação da bomba com Tacômetro TDR-100

Para cada um dos valores de vazão obtidos, também foram registrados valores de amperagem em cada fase, voltagem entre fases, potência ativa e fator de potência, com auxílio de um analisador de qualidade de energia, da marca Fluke, modelo 435-II (Figura 12).



Figura 12 Analisador de Qualidade de Energia Fluke 435 II

3.2 Ensaio do segundo conjunto

O segundo conjunto motobomba ensaiado (Conjunto 2) era constituído por uma bomba KSB, modelo ETA 65-20, acionada por um motor de indução de 40 cv (29 kW) marca GENERAL ELETRIC, modelo 26.3272.405. De acordo com as informações da plaqueta mostrada na Figura 13, a bomba 65-20, quando trabalhando com 3.500 rpm tem capacidade de bombear 80 m³/h de água com uma altura manométrica de 80 mca. A plaqueta do motor da marca GENERAL ELETRIC, mostrada na Figura 13, indica que este motor, quando alimentado por rede trifásica de 60 Hz/380V, requer uma corrente de 59,2A para manter, com rotação de 3.540 rpm, uma potência mecânica de 40 cv (29 kW) no seu eixo.

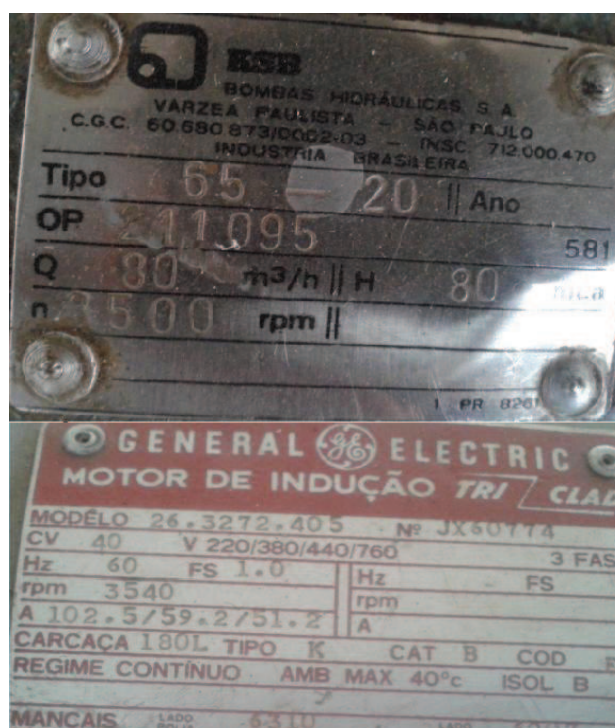


Figura 13 Plaquetas da bomba e do motor do conjunto 2

Curvas com valores de vazão, altura manométrica e rendimento da bomba KSB 65-20, fornecidas pelo fabricante são apresentadas na Figura 14.

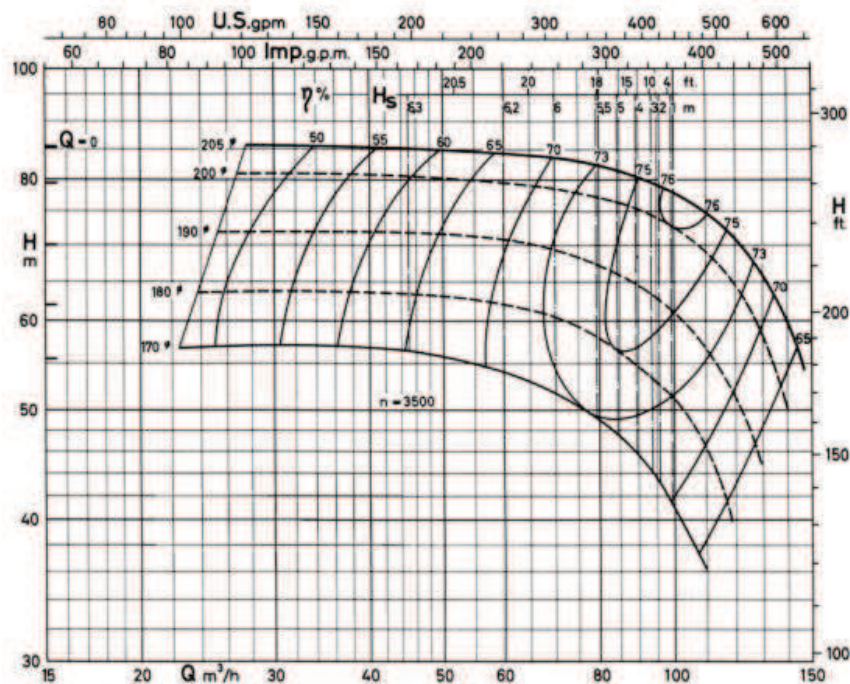


Figura 14 Curva da Bomba ETA 65-20 (conjunto 2)

Fonte: catálogo do fabricante

Conforme ilustrado na Figura 15, o conjunto motobomba 2 foi instalado com seu eixo de acionamento localizado a uma distância de 45 cm acima do nível de água do reservatório do qual era retirada a água bombeada. Esta água era conduzida através de uma tubulação de aço zincado, com diâmetros de 100 e 150 mm, retornando ao mesmo reservatório de onde era retirada.



Figura 15 Instalação do conjunto motobomba2

Os valores de vazão da bomba ETA 65-20 (Conjunto 2) foram determinados por meio de um medidor magnético de vazão da marca KROHNE, modelo IFS 4.000 (Figura 16).

Nos diferentes valores de vazão determinados, a pressão na entrada da bomba ETA 65-20 foi determinada com o auxílio de transdutor de pressão absoluta com capacidade de 1500 mbar da marca INSTRUTHERM, modelo VDR 920. Conforme ilustrado na Figura 17, este transdutor de pressão absoluta foi instalado em um circuito com registros interligados, de forma a fornecer leituras alternadas da pressão atmosférica (kPa) e da pressão na entrada da bomba (kPa).

Uma tomada de pressão instalada no corpo da bomba permitiu a determinação dos valores da pressão na saída da bomba. A pressão da saída da bomba foi determinada com um transdutor de pressão relativa com capacidade de 20bar, INSTRUTHERM MODELO PS100-20BAR, acoplado a um leitor digital portátil INSTRUTHERM MVR-87 (Figura 17).



Figura 16 Medidor magnético de vazão KROHNE, modelo IFS 4000

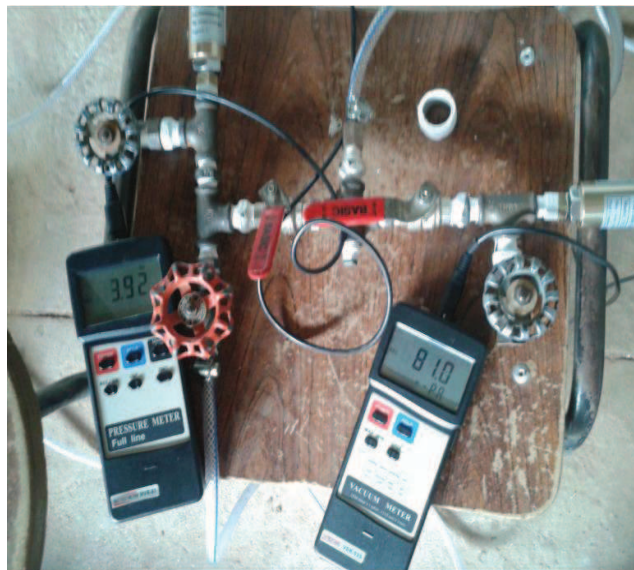


Figura 17 Detalhe da instalação dos transdutores de pressão utilizados no ensaio do conjunto 2

Nos ensaios de conjunto motobomba 2, a altura manométrica total foi calculada através da seguinte expressão:

$$HMT = \frac{P_e}{\gamma} + \frac{P_s}{\gamma} + \Delta Z \quad (30)$$

Em que:

$$\frac{P_e}{\gamma} = \frac{P_{abs}}{\gamma} - \frac{P_{atm}}{\gamma} \quad (31)$$

P_e = Pressão na entrada da bomba (N/m²);

P_{abs} = Pressão absoluta na entrada da bomba (N/m²);

Os valores de peso específico considerados no cálculo da altura manométrica total do conjunto motobomba 2 também foram computados com base na temperatura da água bombeada, que foi determinada com o mesmo instrumento descrito para o conjunto motobomba 1.

Seguindo a mesma metodologia descrita para o conjunto motobomba 1, para cada determinação de vazão e altura manométrica total do conjunto 2, foram também feitas determinações de rotação do eixo, amperagem em cada fase, voltagem entre fases, potência ativa e fator de potência do motor.

O conjunto motobomba 2 foi ensaiado operando com e sem o controle de um inversor de frequência. Os ensaios com inversor de frequência foram realizados sob seis valores distintos de rotação do eixo da bomba (3.500, 3.000, 2.500, 2.000, 1.500 e 1.000 rpm), obtidos com o auxílio da variação do valor da frequência da rede elétrica de alimentação do motor. Esses ensaios com rotação constante foram realizados sob duas frequências distintas de chaveamento do inversor: 1,8 KHz e 14 KHz.

O inversor de frequência utilizado neste estudo foi da marca WEG modelo CFW-05 (Figura 18).



Figura 18 Inversor de frequência WEG, modelo CFW-05

3.3 Estimativas de potência ativa

Pares de valores de vazão e potência ativa determinados durante os ensaios realizados com os conjuntos motobomba 1 e 2, operando sem inversor, foram comparados com valores estimados de potência ativa por dois processos de cálculo distintos.

No primeiro processo de estimativa da potência ativa, que foi identificado no capítulo referente aos resultados como “Catálogo bomba e motor”, os valores de vazão, altura manométrica e peso específico permitiram o cálculo da potência hidráulica (Equação 7). Valores de potência hidráulica e de rendimento da bomba, que foram estimados por meio de valores adimensionais de vazão (Equação 1) aplicados ao polinômio de segundo grau ajustado de rendimento da bomba (Equação 5), forneceram os valores de potência mecânica no eixo (Equação 8) necessários para determinação do índice de carregamento do motor (Equação 17) e do rendimento do motor (Equação 16). Com base no valor da potência do eixo do motor e no seu rendimento, foi possível estabelecer o valor da potência ativa.

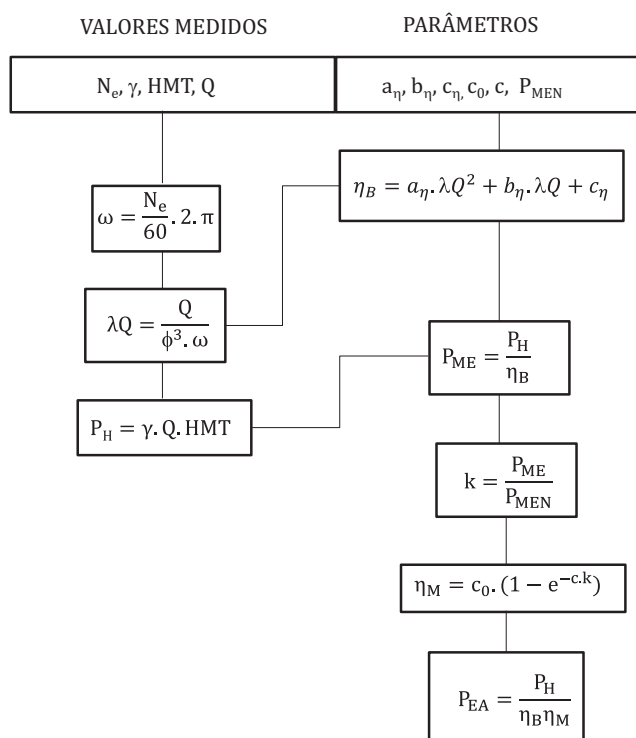


Figura 19 Estimativa da potência elétrica ativa “Catálogo bomba e motor”

No segundo processo de estimativa da potência ativa, que foi identificado nos resultados como “Catálogo Escorregamento”, os valores medidos de rotação da bomba permitiram a cálculo do índice de carregamento do motor (Equação 22) e, posteriormente, do rendimento do motor (Equação 18). Com base em valores da potência do eixo do motor correspondente ao carregamento (Equação 17) e do rendimento do motor, foi possível estabelecer o valor da potência ativa (Equação 18).

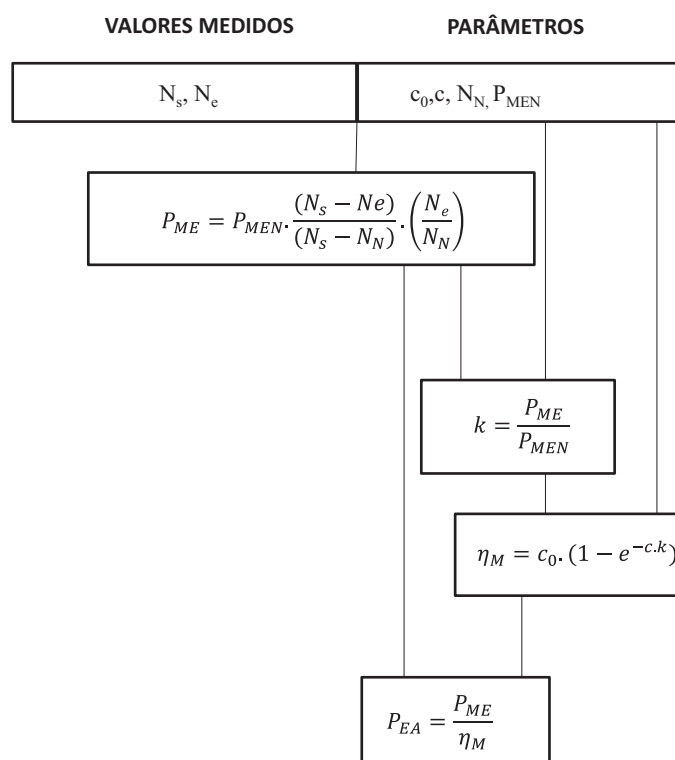


Figura 20 Estimativa da potência elétrica ativa “Catálogo Escorregamento”

Tendo em vista que os valores de índice de carregamento do motor obtidos nos dois processos descritos anteriormente eram diferentes, um terceiro processo de cálculo da potência ativa foi utilizado. Neste terceiro processo de

cálculo, que foi identificado no capítulo de resultados como “Ajuste”, a ferramenta Solver da planilha do Excel foi utilizada para:

Ajustar os valores de parâmetros a_η , b_η , c_η , do polinômio de rendimento da bomba (Equação 5), de potência nominal (P_{MEN}) e escorregamento nominal do motor ($N_S - N_N$), de forma a minimizar as diferenças nos valores de potência mecânica no eixo calculadas através da seguinte somatória:

$$\sum_{i=1}^n \left| \frac{\frac{Q_{YHMT}}{a_\eta + b_\eta \lambda + c_\eta \lambda^2}}{P_{MEN} \left(\frac{(N_S - N_e) N_e}{(N_S - N_N) N_N} \right)} - 1 \right| \quad (32)$$

Ajustar os valores de parâmetros C_0 e c da equação de rendimento de motor em função do seu carregamento de forma a minimizar as diferenças nos valores quando comparados ao catálogo, conforme Figura 21.

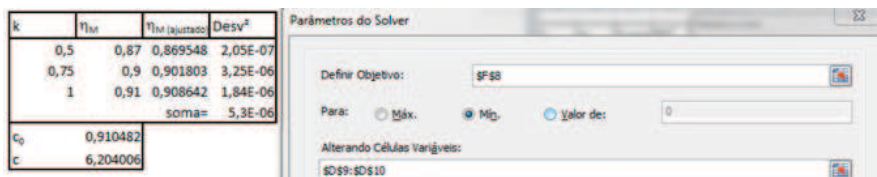


Figura 21 Ajuste dos parâmetros do motor utilizando a ferramenta solver do Excel

Com base nos parâmetros ajustados para cada conjunto motobomba foi feita uma terceira estimativa dos valores de potência ativa.

O Rendimento Global foi estimado pelo produto do rendimento de bomba e motor (Equação 33).

$$\eta_G = \eta_B \cdot \eta_M \quad (33)$$

η_G = Rendimento Global.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Curva adimensional de vazão versus pressão

A adequação do procedimento de adimensionalização, baseada nas Equações 1 e 2, para representação matemática das curvas de vazão versus altura manométrica total, fornecidas nos catálogos das bombas KSB-ETA80/20 e KSB-ETA65/20 (Figuras 7 e 14), pode ser avaliada por meio da análise representada nas Figuras 22 e 23. Nestas Figuras, é possível observar que, nos dois casos analisados, os valores adimensionais tendem a se agrupar em torno de uma curva, que poderia ser utilizada para representar todos os rotores considerados pelo fabricante. A comparação entre as Figuras 22 e 23 permite, também, inferir que a dispersão dos valores adimensionais de vazão e altura manométrica total da bomba KSB ETA80/20, que trabalha com 1.710 rpm, é bem menor que a dispersão dos valores adimensionais da bomba KSB ETA65/20, que trabalha com de 3.500 rpm.

Visando eliminar a dispersão dos valores adimensionais da vazão e altura manométrica mostrada nas Figuras 22 e 23, que é decorrente dos diferentes diâmetros de rotor considerados, somente os dados referentes ao diâmetro de rotor de cada uma das bombas ensaiadas (170 mm, para a 80/20, e 200 mm para a 65/20) foram considerados no processo de ajuste dos coeficientes dos polinômios de segundo grau que representam as curvas adimensionais de desempenho.

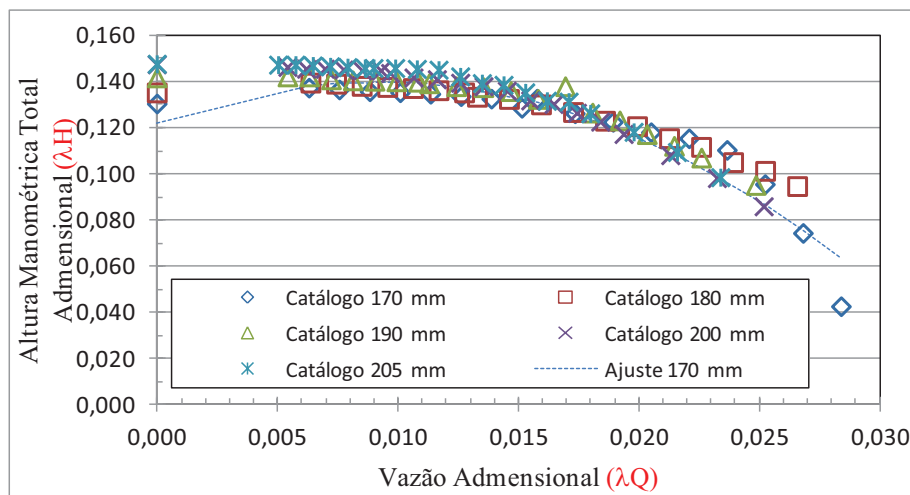


Figura 22 Valores adimensionais de vazão e altura manométrica total correspondentes aos valores dimensionais obtidos em curvas do catálogo da bomba KSB-ETA80/20

Os coeficientes do polinômio de segundo grau que foram ajustados ($R^2 = 0,9069$) aos valores adimensionais da curva vazão versus altura manométrica total do catálogo da bomba KSB ETA80/20, trabalhando com rotor de 170 mm com 1.710 rpm, são mostrados na equação abaixo:

$$\lambda H_{80/20C} = 1,22 \times 10^{-1} + 3,8264\lambda Q - 2,0738 \times 10^2 \lambda Q^2 \quad (34)$$

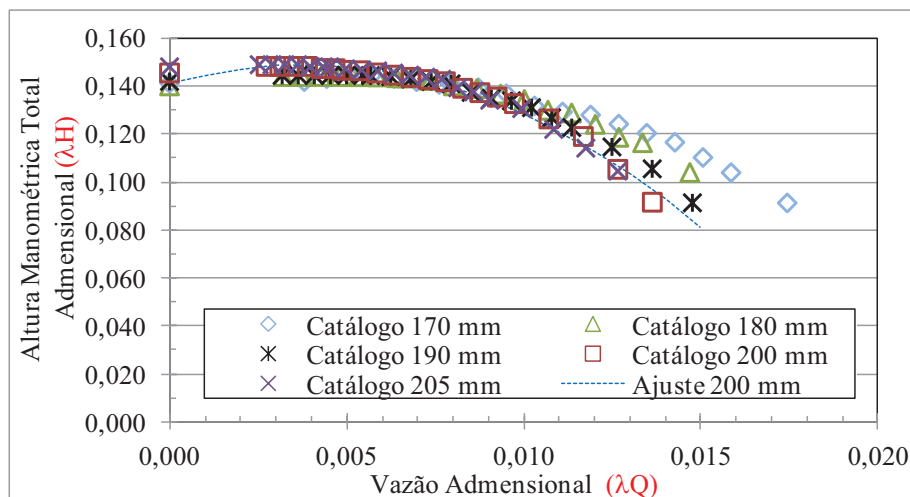


Figura 23 Valores adimensionais de vazão e altura manométrica total correspondentes aos valores dimensionais obtidos em curvas do catálogo da bomba KSB-ETA65/20

Os coeficientes do polinômio de segundo grau que foi ajustado ($R^2 = 0,979$) aos valores adimensionais da curva vazão versus altura manométrica total da bomba KSB-ETA65/20, trabalhando com o rotor de 200 mm com 3.500 rpm, são mostrados na equação abaixo:

$$\lambda H_{65/20C} = 1,411 \times 10^{-1} + 4,0738\lambda Q - 5,3772 \times 10^2 \lambda Q^2 \quad (35)$$

Vinte e seis pares de valores adimensionais de vazão e altura manométrica total, correspondentes aos respectivos pares de valores dimensionais obtidos durante três ensaios distintos, que foram realizados com a bomba KSB-ETA 80/20 sendo por um motor elétrico trifásico de 7,5 cv (5,51 kW), são mostrados na Figura 24.

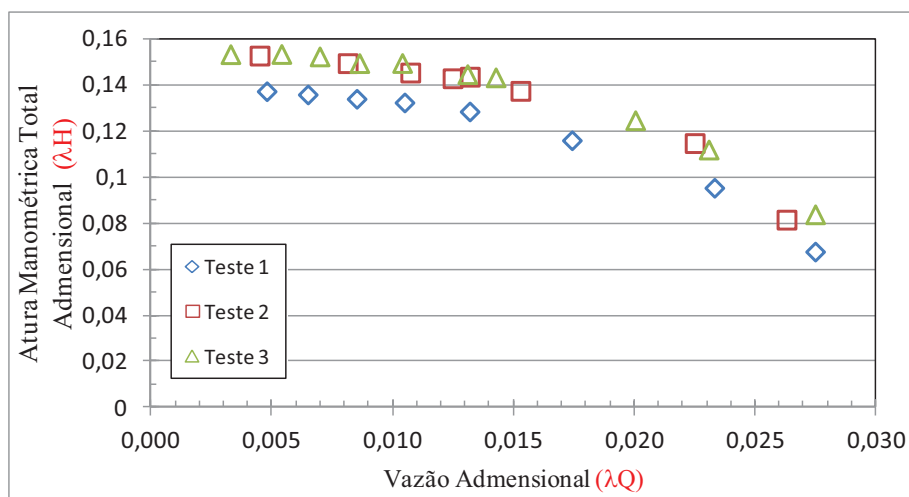


Figura 24 Valores adimensionais de vazão e altura manométrica total obtidos em três ensaios de laboratório da bomba KSB-ETA80/20

Cento e oitenta pares de valores adimensionais de vazão e altura manométrica total, correspondentes aos respectivos pares de valores dimensionais, obtidos ao longo de seis ensaios, realizados com a bomba KSB-ETA65/20, são mostrados na Figura 25. Durante esses ensaios, a bomba KSB-ETA65/20 foi acionada por um motor elétrico trifásico de 40 cv controlado por um inversor de frequência, permitindo a coleta de dados sob os seis valores distintos de rotação do eixo do conjunto motobomba que são mostrados na Figura 25.

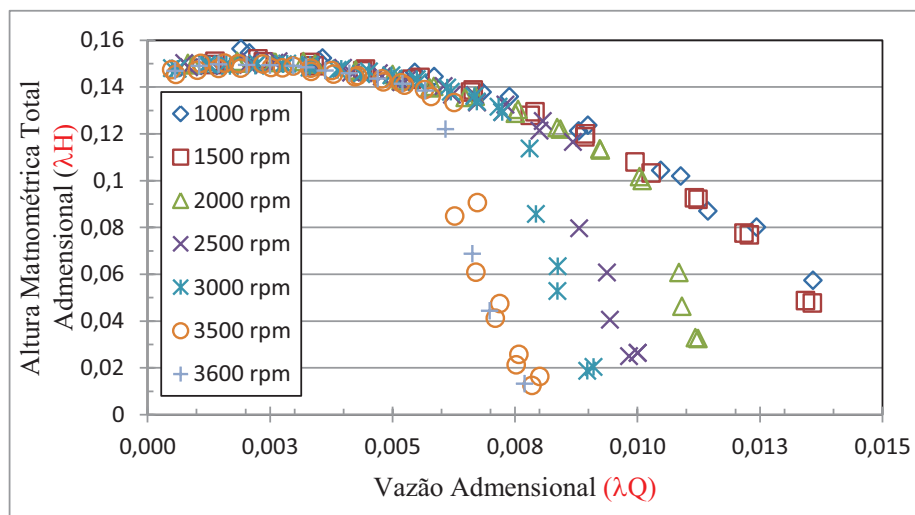


Figura 25 Valores adimensionais de vazão versus altura manométrica total obtidos de ensaios da bomba KSB-ETA80/20 conduzidos sob seis diferentes valores de rotação

Na figura 26, é possível inferir que para os maiores valores de vazão, dos ensaios conduzidos com as maiores rotações (3.500, 3.000 e 2.500 rpm), as condições de instalação da bomba KSB-ETA65/20 não permitiram a obtenção de valores de HMT isentos dos efeitos de cavitação da bomba.

Visando ajustar os coeficientes das curvas adimensionais das bombas KSB-ETA80/20 KSB-ETA65/20 a partir de um conjunto de pares de valores de vazão e altura manométrica determinados em laboratório, livres de alterações provocadas por cavitação e, também, limitados à faixa de valores de vazão na qual o catálogo da bomba apresenta valores de rendimento, apenas 22 dos 26 pares de valores obtidos em laboratório com a bomba KSB-ETA80/20, e apenas 106 dos 180 valores obtidos com a bomba KSB-ETA65/20, foram considerados no processo de ajuste.

Nas Figuras 26 e 27 são apresentados os pares adimensionais de vazão e altura manométrica, obtidos em laboratório, que foram utilizados no processo de

ajuste dos polinômios de segundo grau que representam os dados de laboratório das bombas KSB-ETA80/20 ($R^2 = 0,908$) e KSB-ETA65/20 ($R^2 = 0,987$), resultando nas seguintes equações:

$$\lambda H_{80/20C} = 1,2786 \times 10^{-1} + 3,5405\lambda Q - 1,9768 \times 10^2 \lambda Q^2 \quad (36)$$

$$\lambda H_{65/20C} = 1,4251 \times 10^{-1} + 4,6011\lambda Q - 8,1749 \times 10^2 \lambda Q^2 \quad (37)$$

Nas Figuras 26 e 27, é também possível observar as diferenças entre as curvas ajustadas com valores de catálogo e as curvas ajustadas com valores de laboratório. Tais diferenças podem ser atribuídas ao desgaste das bombas.

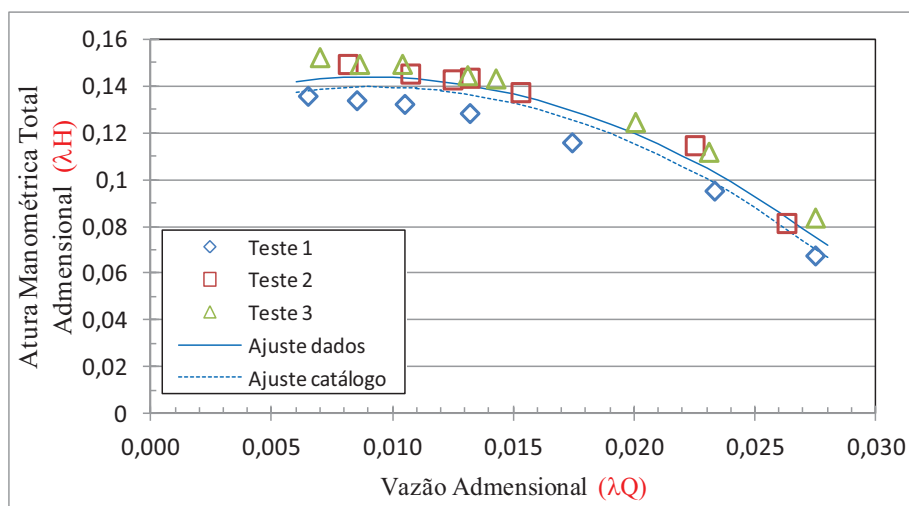


Figura 26 Curvas adimensionais da bomba KSB-ETA80/20 ajustadas com valores de catálogo e com valores de laboratório (pontos amostrados)

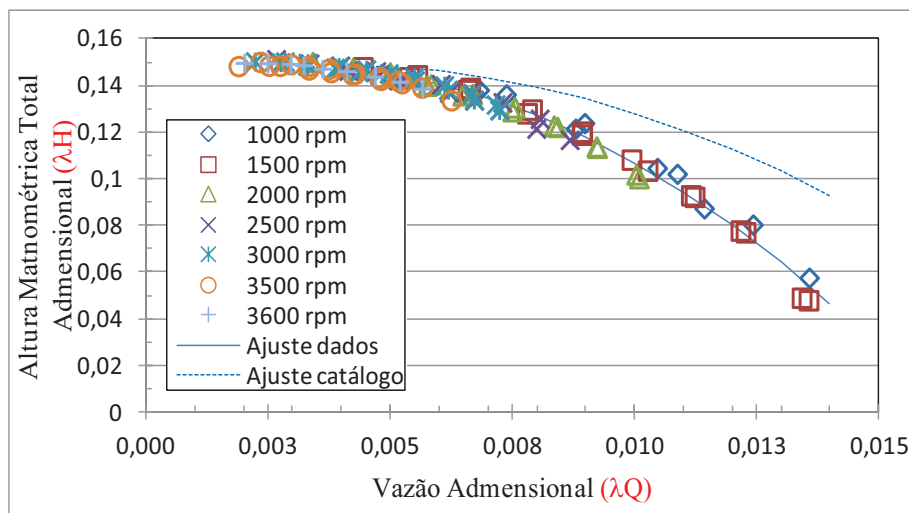


Figura 27 Curvas adimensionais da bomba KSB-ETA65/20 ajustadas com valores de catálogo e com valores de laboratório (pontos amostrados)

4.2 Curva adimensional de vazão versus rendimento da bomba

A adequação do procedimento de adimensionalização, baseado na Equação 1, para representação matemática das curvas de vazão versus rendimento fornecidas nos catálogos das bombas KSB-ETA80/20 e KSB-ETA65/20 (Figuras 7 e 14), pode ser avaliada por meio da análise representada nas Figuras 28 e 29. Nestas Figuras, é possível observar que, apesar da dispersão em torno do diâmetro de rotor considerado, os valores de rendimento tendem a se agrupar em torno de uma curva. Visando eliminar a dispersão dos valores de rendimento decorrente dos diferentes diâmetros de rotor considerados, conforme mostrada nas Figuras 28 e 29, somente os dados referentes ao diâmetro de rotor de cada uma das bombas ensaiadas (170 mm, para a 80/20, e 200 mm para a 65/20) foram considerados no processo de ajuste dos coeficientes dos polinômios de segundo grau que representam as curvas de vazão adimensional-rendimento.

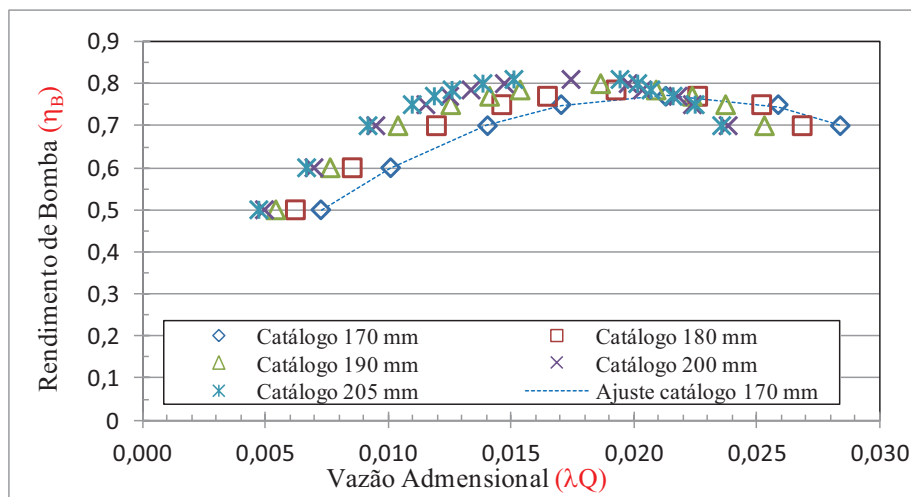


Figura 28 Curvas adimensionais de rendimento da bomba KSB-ETA80/20 ajustadas com valores de catálogo (pontos amostrados)

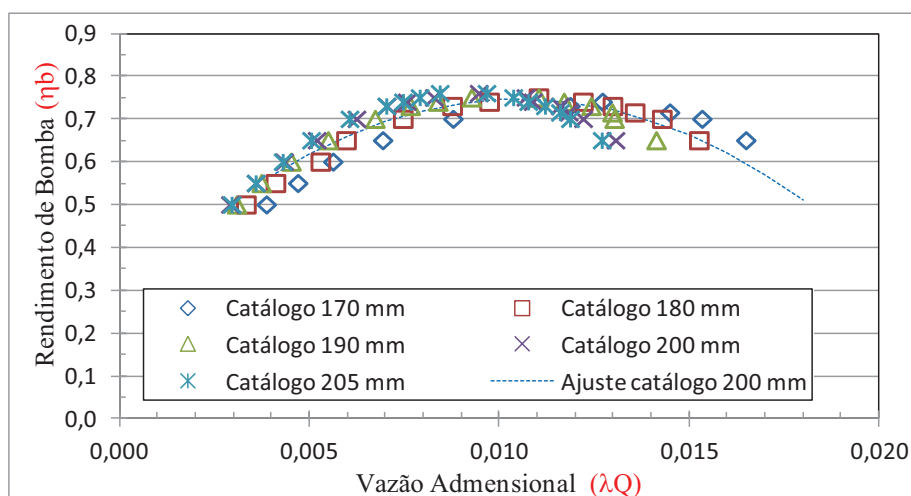


Figura 29 Curvas adimensionais de rendimento da bomba KSB-ETA65/20 ajustadas com valores de catálogo (pontos amostrados)

Os coeficientes dos polinômios de segundo grau ajustados aos valores adimensionais da curva vazão adimensional-rendimento da bomba KSB-

ETA80/20 ($R^2 = 0,999$), trabalhando com o rotor de 170 mm, e da bomba KSB-ETA65/20 ($R^2 = 0,997$), trabalhando com o rotor de 200 mm com 3500 rpm, são mostrados nas Equações 38 e 39:

$$\eta_{B_{80/20C}} = 1,4332 \times 10^{-1} + 5,9212 \times 10^1 \lambda Q - 1,3906 \times 10^3 \lambda Q^2 \quad (38)$$

$$\eta_{B_{65/20C}} = 2,7644 \times 10^{-1} + 8,9063 \times 10^1 \lambda Q - 4,2234 \times 10^3 \lambda Q^2 \quad (39)$$

4.3 Caracterização dos motores

As Equações 40 e 41, que foram estabelecidas através dos valores de potência nominal, frequência nominal e rotação nominal declarados nas plaquetas dos motores dos conjuntos avaliados (Figuras 6 e 13), foram utilizadas, respectivamente, para o cálculo da potência disponível no eixo do motor, em kW, do Conjunto 1 e do motor do Conjunto 2:

$$P_{ME1} = 5,5162 \cdot \frac{1800 - N_e}{90} \cdot \frac{N_e}{1710} \quad (40)$$

$$P_{ME2} = 29,420 \cdot \frac{3600 - N_e}{60} \cdot \frac{N_e}{3540} \quad (41)$$

Os parâmetros da equação de rendimento do motor elétrico foram ajustados com a ferramenta Solver do Excel levando em conta os pares de valores de carregamento e rendimento do motor atribuídos, para o motor do Conjunto 1 ($k = 1,0$, $\eta_M = 0,887$; $k = 0,75$, $\eta_M = 0,875$; $k = 0,5$, $\eta_M = 0,855$) e do motor do Conjunto 2 ($k = 1,0$, $\eta_M = 0,91$; $k = 0,75$, $\eta_M = 0,90$; $k = 0,5$, $\eta_M = 0,87$):

$$\eta_{M1} = 0,9018 (1 - e^{-6,0331K}) \quad (42)$$

$$\eta_{M2} = 0,8933 (1 - e^{-31,199K}) \quad (43)$$

4.4 Potência ativa do conjunto motobomba 1

Pares de valores de vazão e potência ativa, determinados durante os ensaios realizados no conjunto motobomba1 são mostrados na Figura 30. Estimativas obtidas com os três processos de cálculo são também apresentadas nesta figura. Os valores de catálogo de rendimento da bomba e de rendimento do motor resultaram em valores subestimados de potência ativa. O processo de ajuste de parâmetros de catálogo, objetivando reduzir diferenças entre os valores de potência no eixo estimados com base no rendimento da bomba e valores de potência no eixo estimados com base no escorregamento do motor, foi capaz de reduzir o erro destas estimativas. A redução no erro obtida comprova que o modelo utilizado é adequado, quando os valores corretos dos parâmetros são utilizados.

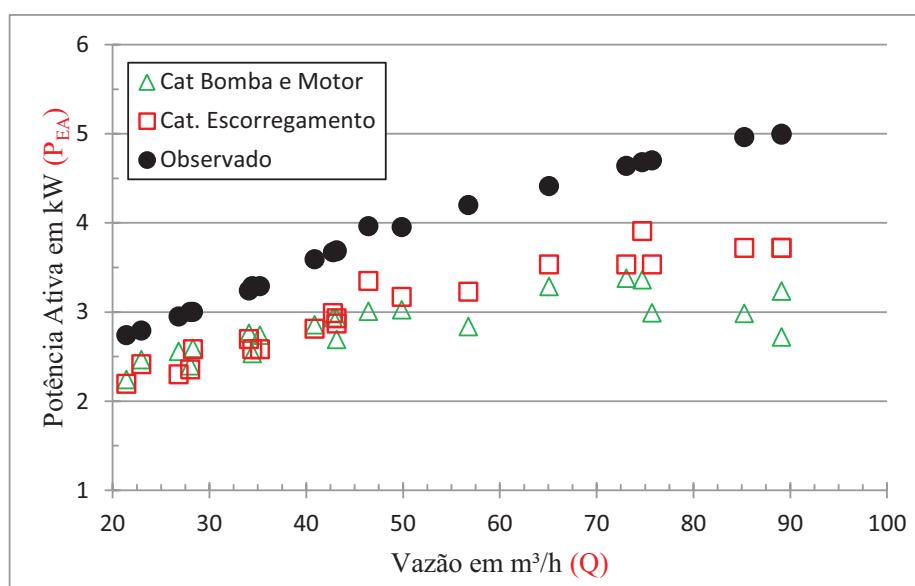


Figura 30 Valores estimados e observados de potência ativa requerida para acionamento do conjunto motobomba 1 em função da vazão bombeada

As equações com parâmetros ajustados de rendimento da bomba, de potência no eixo e de rendimento do motor do Conjunto 1, que foram utilizados no cálculo da serie “Ajustado” da Figura 30, são dadas a seguir:

$$\eta_B = 1,7250 \times 10^{-1} + 6,1168 \times 10^1 \lambda Q - 1,7312 \times 10^3 \lambda Q^2 \quad (44)$$

$$P_{ME} = 5,5159 \times \frac{1800 - N_e}{9,2023 \times 10^1} \times \frac{N_e}{9,2023 \times 10^1} \quad (45)$$

$$\eta_M = 6,7738 \times 10^{-1} (1 - e^{-7,6083k}) \quad (46)$$

As diferenças entre os valores previstos pelas equações com parâmetros ajustados (Equações 44, 45 e 46) e os valores previstos pelas equações com parâmetros de catálogo são ilustradas nas Figuras 31, 32 e 33.

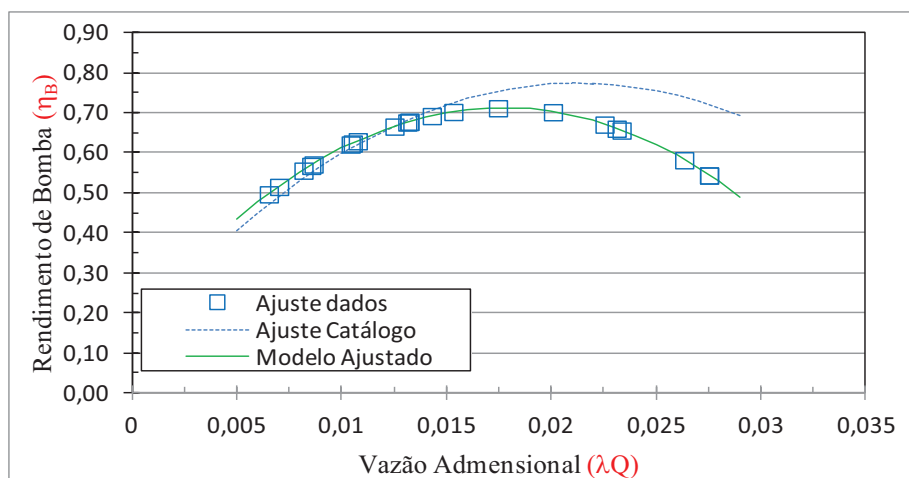


Figura 31 Curvas vazão-rendimento da bomba, obtidas com parâmetros ajustados e com parâmetros de catálogo

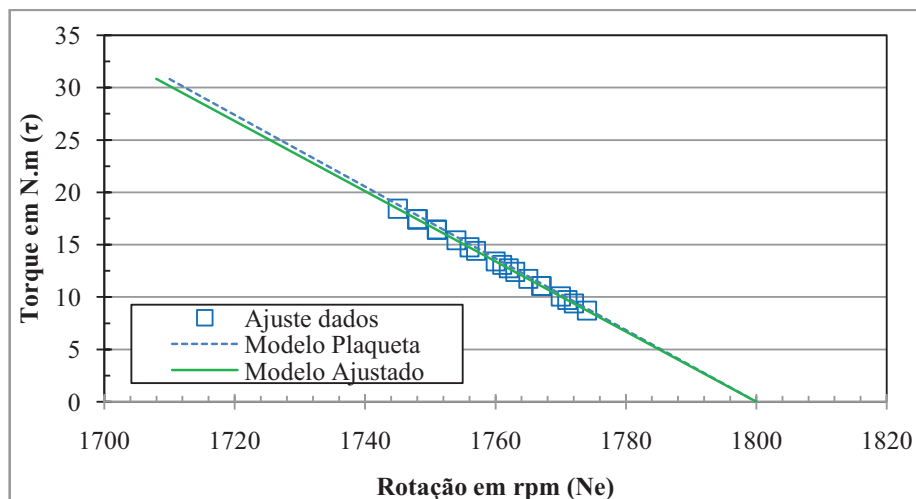


Figura 32 Curvas rotação-torque no eixo do motor, obtidas com parâmetros de plaquetas e com parâmetros ajustados

Os desvios mostrados na Figura 30, entre valores ajustados e valores observados de potência ativa, não foram minimizados pelo processo de ajuste porque, conforme descrito na metodologia, o processo de ajuste estabelecido através das Equações 44, 45 e 46 visava minimizar a diferença entre valores de potência mecânica no eixo de acionamento do conjunto. A adequação deste processo pode ser avaliada através da Figura 34 que mostra a relação entre os valores ajustados de potência no eixo.

Nas Figuras 34 e 35, é possível observar que o modelo com parâmetros ajustado reproduz o comportamento esperado durante o funcionamento de motores elétricos, resultando em aumento no escorregamento em função do aumento da carga solicitada em seu eixo e redução no rendimento do motor em função de uma redução excessiva no seu índice de carregamento.

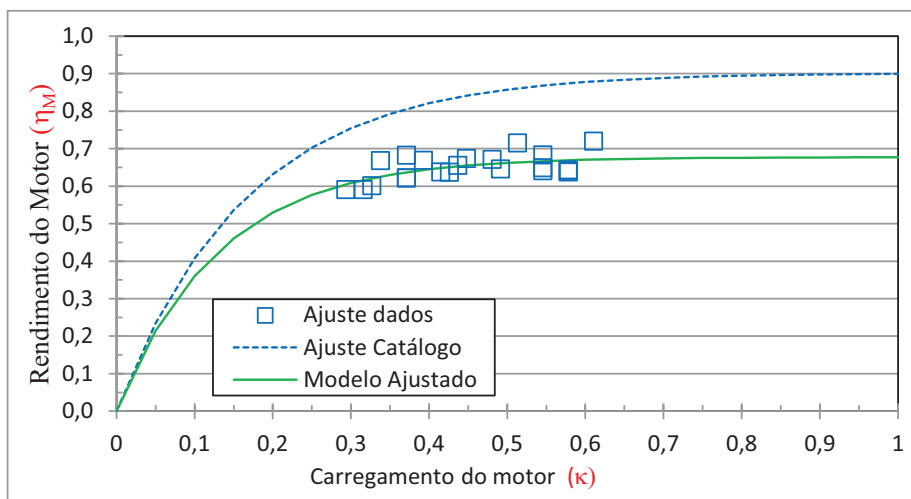


Figura 33 Curvas carregamento-rendimento do motor elétrico obtidas com parâmetros ajustados e com parâmetros de catálogo

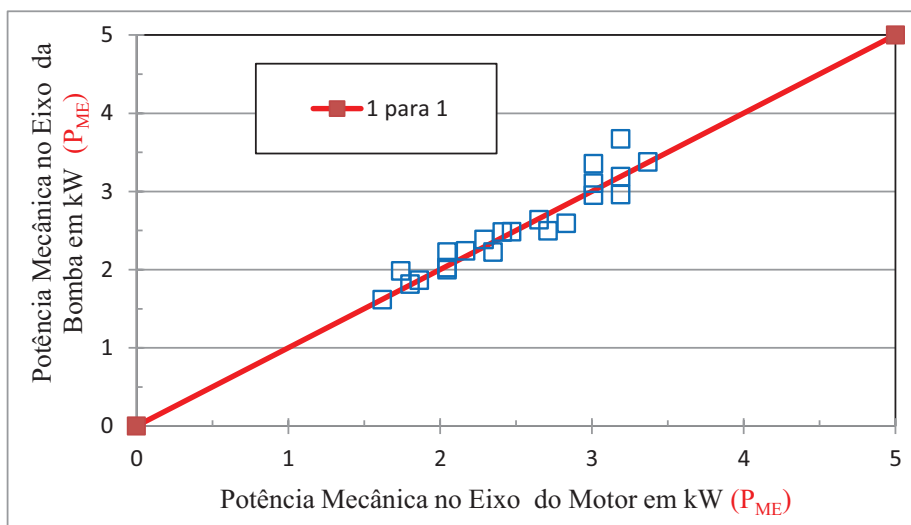


Figura 34 Relação entre valores de potência no eixo calculados com base no escorregamento do motor e valores de potência no eixo calculados com base no rendimento da bomba

4.5 Potência ativa do conjunto motobomba 2

Pares de valores de vazão e potência ativa, determinados durante os ensaios realizado no conjunto motobomba 2, são mostrados na Figura 35. Estimativas obtidas com os três processos de cálculo são também apresentadas nesta figura. No caso do Conjunto 2, os valores da Figura 34 indicam que, o processo de estimativa de consumo de energia através de valores de potência no eixo, estimados através do rendimento da bomba, subestimou a potência ativa requerida. O cálculo de consumo com base em parâmetros de catálogo do motor resultou valores sobrestimados de potência ativa. A exemplo do descrito anteriormente, o processo de ajuste de parâmetros de catálogo resultou na redução no erro das estimativas de potência ativa.

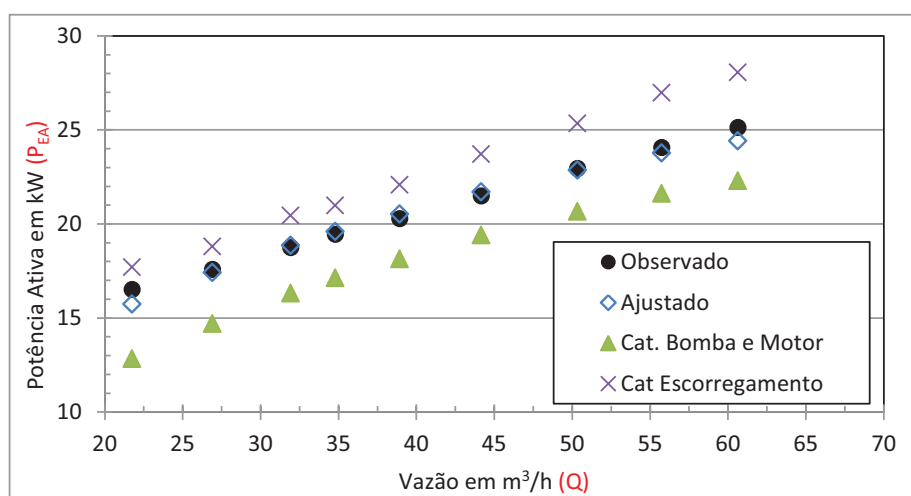


Figura 35 Valores estimados e observados de potência ativa requerida para acionamento do conjunto motobomba 2 em função da vazão bombeada

As equações com parâmetros ajustados de rendimento da bomba, de potência no eixo e de rendimento do motor elétrico do Conjunto 2, que foram utilizados no cálculo da série “Ajustado” da Figura 31, são dadas a seguir

$$\eta_B = 1,8831 \times 10^{-1} + 8,4123 \times 10^1 \lambda Q - 4,2234 \times 10^3 \lambda Q^2 \quad (47)$$

$$P_{ME} = 30,0477 \times \frac{3600 - N_e}{60} \times \frac{N_e}{60} \quad (48)$$

$$\eta_M = 1,0072 \times (1 - e^{-5,3259K}) \quad (49)$$

As diferenças entre os valores previstos pelas equações com parâmetros ajustados (Equações 47, 48 e 49) e os valores previstos pelas equações com parâmetros de catálogo são ilustradas nas Figuras 36, 37 e 38.

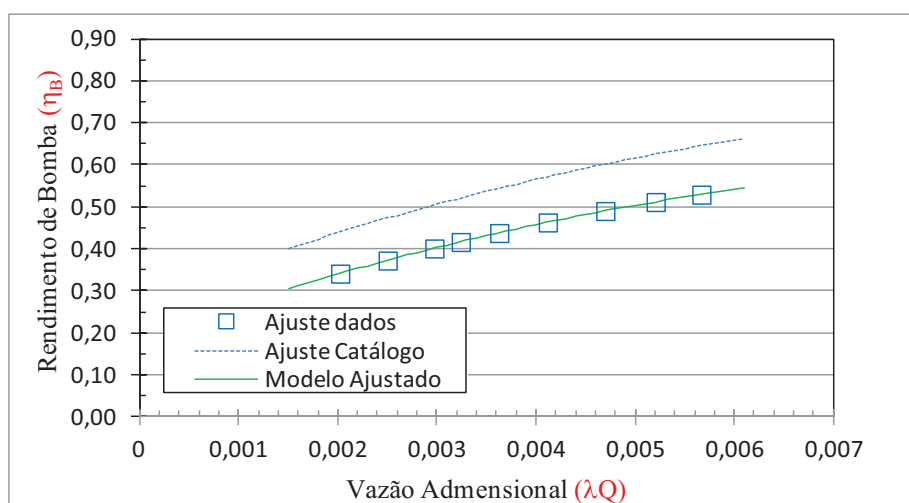


Figura 36 Curvas vazão-rendimento da bomba, obtidas com parâmetros ajustados e com parâmetros de catálogo

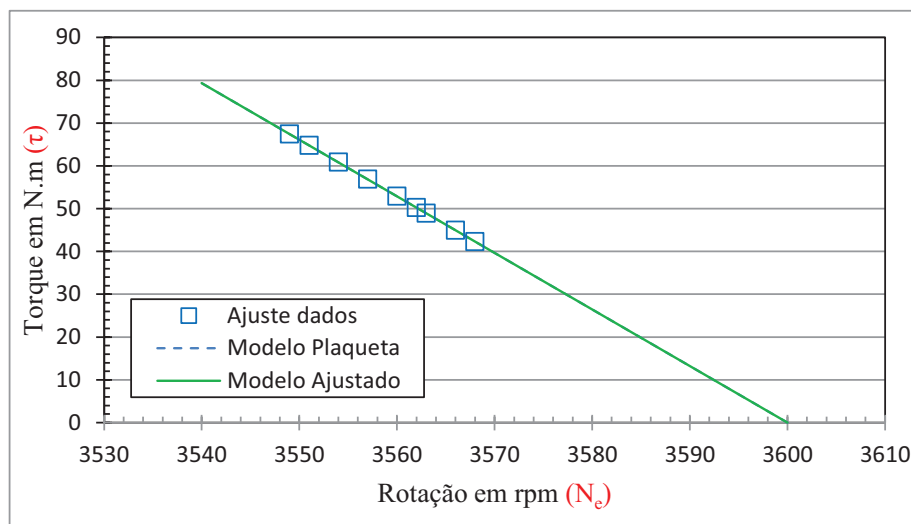


Figura 37 Curvas rotação-torque no eixo do motor, obtidas com parâmetros de plaqueta e com parâmetros ajustados

Nas Figuras 36, 37 e 38, é possível observar que o modelo com parâmetros ajustados reproduz o comportamento típico de motor elétrico assíncrono do tipo gaiola de esquilo, no qual se espera um aumento no escorregamento em decorrência do aumento da carga solicitada em seu eixo e uma redução no seu rendimento em decorrência de uma redução excessiva no seu índice de carregamento.

Finalmente, deve-se considerar que a potência ativa depende do rendimento global do conjunto, que é resultante do produto entre o rendimento do motor e o rendimento da bomba. Em decorrência disto, existem infinitas combinações de rendimento de bomba e rendimento de motor que satisfazem um mesmo rendimento global e, conseqüentemente, um mesmo valor de potência ativa. Desta forma, o processo de ajuste utilizado neste estudo não tem solução única. Os resultados apresentados aqui foram obtidos restringindo-se as variações dos parâmetros do motor a uma faixa limitada de valores, estabelecida

de acordo com as tolerâncias de escorregamento e potência nominal previstas em norma.

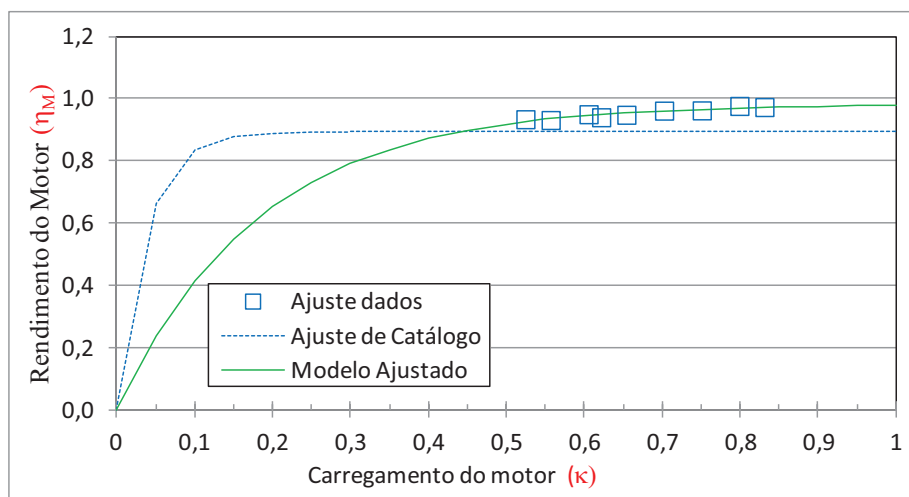


Figura 38 Curvas carregamento-rendimento do motor elétrico obtidas com parâmetros ajustados e com parâmetros de catálogos

4.6 Potência com inversor de frequência

Valores de potência ativa medidos na entrada do inversor de frequência WEG CFW5, que controlava a rotação de um motor de indução, de 40 cv (29 kW), marca GENERAL ELETRIC, modelo 26.3272.405, durante o acionamento de uma bomba KSB, ETA 65-20 operando com diferentes valores de vazão, são mostrados na Figura 39.

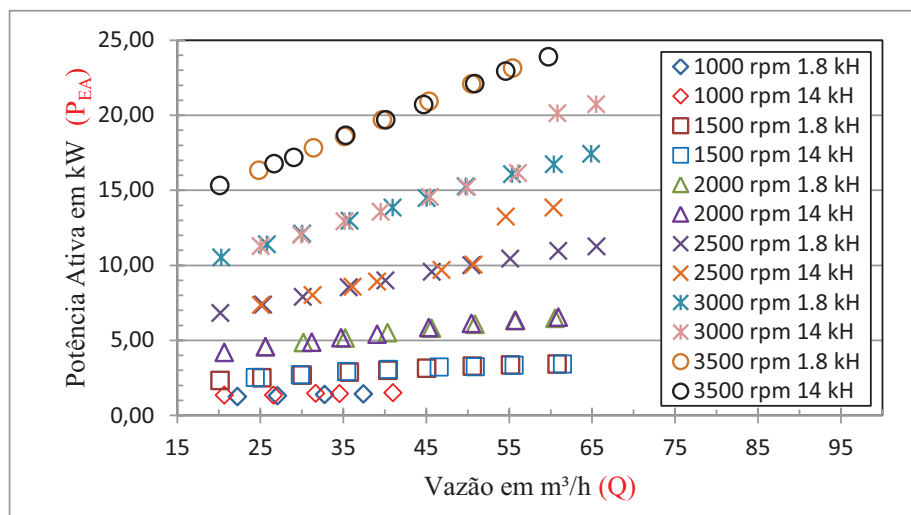


Figura 39 Potência ativa sob diferentes valores de vazão de uma bomba KSB/65/20 operando com diferentes valores de rotação e frequência de chaveamento do inversor (1,8 e 14 kHz)

Nesta figura é possível observar que, de uma forma geral a frequência de chaveamento do inversor não afetou de forma significativa o rendimento do conjunto inversor-motor.

Na Figura 40, são apresentados valores estimados de rendimento do motor, que foram calculados com base nos valores medidos de potência ativa e potência hidráulica e em estimativas de rendimentos da bomba dados pela Equação 39. Nessa figura, são também mostradas as curvas de rendimento deste mesmo motor operando sem inversor, conforme o modelo de catálogo (Equação 43) e o modelo ajustado de frequência (Equação 49). Os valores mostrados nestas figuras indicam que estimativas de consumo de energia de motores elétricos operando com inversores de frequência devem considerar a redução nos valores de rendimento associadas à redução no índice de carregamento do motor.

Na Figura 41, são apresentados valores medidos do fator de potência, correspondentes aos mesmos índices de carregamento da Figura 40.

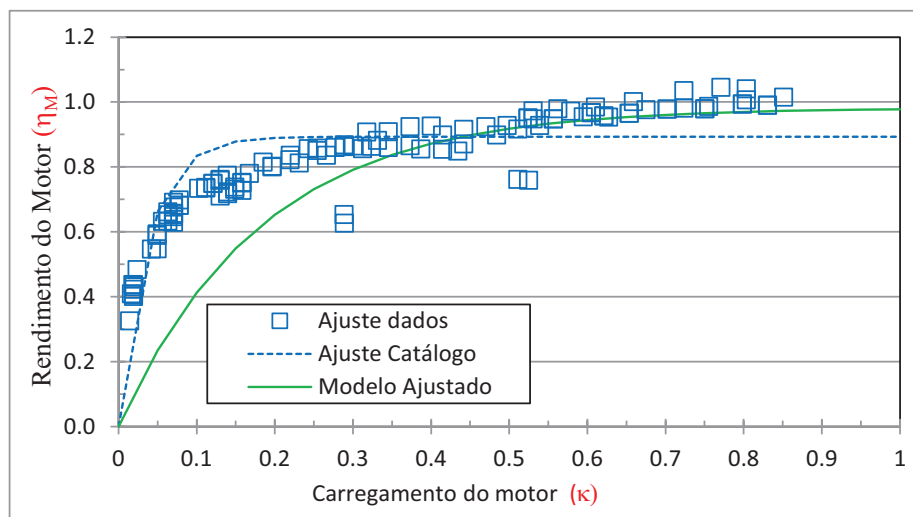


Figura 40 Estimativas de rendimento do motor operando sob controle de um inversor em relação às curvas de rendimento sem inversor: de catálogo e justada

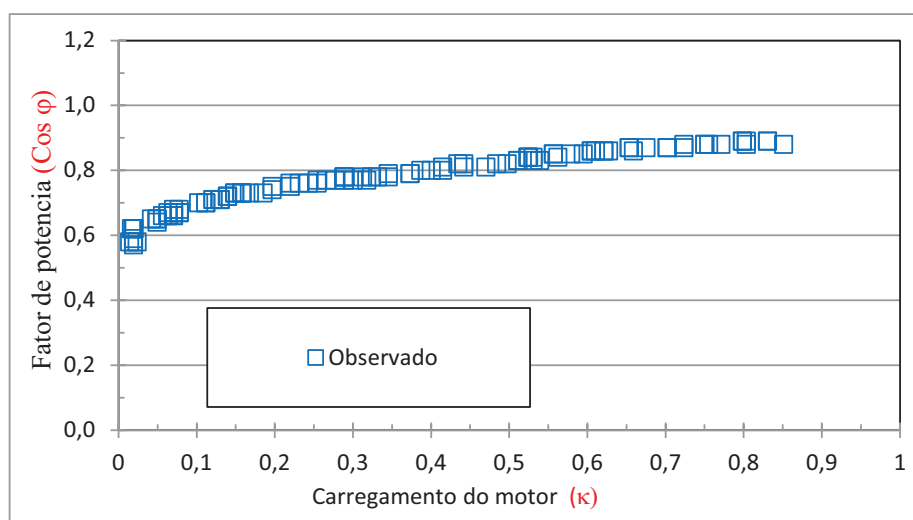


Figura 41 Fator de potência em função do índice de carregamento de um motor operando com inversor de frequência

5 CONCLUSÕES

O valor absoluto do erro médio das estimativas de potência ativa dos conjuntos motobomba, operando sem inversor de frequência, baseado em valores de catálogo, variou entre 23% (KSB80-20 com motor de 7,5 cv) e 12% (KSB65-20 com motor de 40 cv).

O valor absoluto do erro médio das estimativas de potência ativa dos conjuntos motobomba, operando sem inversor de frequência, baseado no modelo ajustado, variou entre 5% (KSB80-20 com motor de 7,5 cv) e 1,5% (KSB65-20 com motor de 40 cv).

A mudança da frequência de chaveamento do inversor de 1.8 para 14 kHz não causou alteração na relação vazão potência ativa.

No cálculo do consumo de energia de motores operando sob controle de um inversor de frequência, deve ser considerado a redução da eficiência do motor decorrente da redução do índice de carregamento do motor.

REFERÊNCIAS

ABADIA, R.; ROCAMORA, C.; VERA, J. Energy efficiency in irrigation distribution networks II: applications. **Biosystems Engineering**, London, v. 111, n. 4, p. 398-411, 2012.

AHONEN, T. et al. Centrifugal pump operation monitoring with motor phase current measurement. **International Journal of Electrical Power & Energy Systems**, New York, v. 42, n. 1, p. 188-195, 2012.

ALCANTRA, W. Estações de bombeamento. In: CONGRESSO NACIONAL DE IRRIGAÇÃO E DRENAGEM, 8., 1988, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis: Associação Brasileira de Irrigação e Drenagem, 1988. p.107-208.

AMERICO, M. **Sistemas motrizes: eficiência energética e técnicas de acionamento**. Niterói: UFF, 2003. Apresentações em Power-Point em curso CEPEL/SEBRAE-RJ/UFF.

AZEVEDO, E. B. **Viabilidade do uso de inversor de frequência em sistema de irrigação do tipo pivô central**. 2003. 77 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2003.

BERNIER, M. A.; BOURRET, B. Pumping energy and variable frequency drives. **Ashrae Journal**, Atlanta, v. 41, n. 12, p. 37-40, Dec.1999.

BRASIL. Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comercio Exterior. **Portaria nº455**, de 01 de dezembro de 2010. Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial-Inmetro. Brasília, 2010. Disponível em: <<http://www.inmetro.gov.br/legislacao/rtac/pdf/rtac001633.pdf>>. Acesso em: 10 mar. 2014.

BURT, C. M. et al. Electric motor efficiency under variable frequencies and loads. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, New York, v. 134, n. 2, p. 129-136, 2008.

CAMOIRANO, R.; DELLEPIANE, G. Variable frequency drives for MSF desalination plant and associated pumping stations. **Desalination**, Amsterdam, v. 182, n. 1, p. 53-65, 2005.

CARVALHO, J. A. de; OLIVEIRA, L. F. C. de. **Instalações de bombeamento para irrigação**. Lavras: UFLA, 2008. 354 p.

CHALLENGE, M. **Determining electric motor load and efficiency**: program of the US Department of Energy. Washington: USDE, 1997.

CHRISTMAN, K. D. **Methods for rapid estimation of motor input power in HVAC assessments**. 2010. 171 p. Thesis(Ph.D. in Mechanics Engineering)- Texas A&M University, Austin, 2010.

GARCIA, A. G. P. **Impacto da lei de eficiência energética para motores elétricos no potencial de conservação de energia na indústria**. 2003. 139 p. Tese (Doutorado em Engenharia) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2003.

GARCIA, A. G. P. et al. Energy-efficiency standards for electric motors in Brazilian industry. **Energy Policy**, Surrey, v. 35, n. 6, p. 3424-3439, June 2007.

GOPALAKRISHMAN, B.; CHAUDHARI, P.; PLUMMER, R. W. Dacilitation for load based energy savings in three-phase squierrel cage induction motors. **Energy Engineering: Journal of the Association of Energy Engineering**, Atlanta, v. 2008, p. 91-98, 2008.

GUIMARÃES, R. **Comportamento elétrico, mecânico e hidráulico de um sistema de bombeamento sob o enfoque da eficiência energética**. 2008. 55p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Energia) - Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2008.

HOLMQUIST, J. R.; ROOKS, J. A.; RICHTER, M. E. Practical approach for determining motor efficiency in the field using calculated and measured values. **IEEE Transactions on Industry Applications**, New York, v. 40, n. 1, p. 242-248, 2004.

KAYA, D. et al. Energy efficiency in pumps. **Energy Conversion and Management**, Oxford, v. 49, n. 6, p. 1662-1673, 2008.

LOBOSCO, O. S.; DIAS, L.P.C. **Seleção e aplicação de motores elétricos**. São Paulo: McGraw-Hill, 1988. 356 p.

MACINTYRE, A. J. **Bombas e instalações de bombeamento**. Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1978. 667 p.

MAHAR, P. S.; SINGH, R. P. Optimal design of pumping mains considering pump characteristics. **Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice**, Arlington, v. 5, n. 1, p. 40130101-40130106, 2014.

MARCHI, A.; SIMPSON, A. R. Correction of the EPANET inaccuracy in computing the efficiency of variable speed pumps. **Journal of Water Resources Planning and Management**, Reston, v. 139, n. 4, p. 456-459, 2013.

MORADI-JALAL, M.; MARINO, M. A.; AFSHAR, A. Optimal design and operation of irrigation pumping stations. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, New York, v. 129, n. 3, p. 149-154, 2003.

MORAES, M. J. D. et al. Gerenciamento do lado da demanda no bombeamento de água para perímetro irrigado. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 15, n. 9, p. 875-882, 2011.

MORENO, M. A. et al. Development of a new methodology to obtain the characteristic pump curves that minimize the total cost at pumping stations. **Biosystems Engineering**, London, v. 102, n. 1, p. 95-105, 2009.

OLIVEIRA FILHO, D. et al. Dimensionamento de motores para o bombeamento de água. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 30, n. 6, p. 1012-1022, nov./dez. 2010.

PEREIRA, P. H. C. **Sistema automatizado de irrigação por pivô central: uma proposta para melhoria da eficiência energética através do uso de controladores lógicos programáveis em conjunto com inversor de frequência e rede sem fio zigbee**. 2011. 132 p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2011.

PRADO, G.; SILVA, T. B. Avaliação de duas bombas centrífugas associadas em série e paralelo. **Revista Irriga**, Botucatu, v.18, n. 1, jan./mar. 2013.

QUINTELA, A. D. C. **Hidráulica**. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, 2002. 539 p.

RAMOS, M. C. E. S. **Metodologia para avaliação e otimização de motores elétricos de indução trifásicos visando a conservação de energia em aplicações industriais**. 2009. 246 p. Tese (Doutorado em Energia) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

SAIDUR, R. A. A. Review on electrical motors energy use and energy saving. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, San Diego, v.14, n. 3, p.877-898, Apr. 2010. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032109002494>>. Acesso em: 10 fev. 2014.

SCHMIDLIM JÚNIOR, C. R. **Operação do conjunto motobomba centrífuga, motor de indução trifásico e conversor de frequência visando a eficiência no uso da energia elétrica**. 2006. 119 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2006.

SILVA, M.C. Cálculo das perdas para diversas condições de carga. **Revista Eletricidade Moderna**, São Paulo, v.27, n.306, p.74-83, set. 1999.

SILVA, T. I.; SILVA, R.M.; CRUZ, W.L.V.M. Inversor de frequência para condicionadores de ar usados. In: JORNADA DE PESQUISA E EXTENSÃO, 1., 2013, Cuiabá. **Anais...** Cuiabá: IFMT, 2013. Disponível em: <<http://jornada.cba.ifmt.edu.br/jornadaojs/index.php/jornada/article/view/22/22>>. Acesso em: 13 fev. 2014.

SIMPSON, A. R.; MARCHI, A. Evaluating the approximation of the affinity laws and improving the efficiency estimate for variable speed pumps. **Journal of Hydraulic Engineering**, New York, v. 139, n. 12, p. 1314-1317, 2013.

SIRAKI, A. G.; PILLAY, P. An in situ efficiency estimation technique for induction machines working with unbalanced supplies. **IEEE Transactions on Energy Conversion**, New York, v. 27, n.1 p.85-95, 2012.

TSUTIYA, M. T. Eficiência hidráulica e energética em saneamento: utilização de inversores de frequência para diminuição de consumo de energia elétrica em sistemas de bombeamento. In: SEMINÁRIO IBEROAMERICANO SOBRE SISTEMAS DE ABASTECIMENTO URBANO DE ÁGUA, 6., 2008, João Pessoa. **Anais...**João Pessoa: SEREA, 2008. 1 CD-ROM.

ULANICKI, B.; KAHLER, J.; COULBECK, B. Modeling the efficiency and power characteristics of a pump group. **Journal of Water Resources Planning and Management**, Reston, v. 134, n. 1, p. 88-93, 2008.

WEG. **Motores elétricos**. Jaraguá do Sul, 2005. 157 p.

WEG. **Motores elétricos guia de especificação**. Jaraguá do Sul, 2013. Disponível em:<<http://ecatalog.weg.net/files/wegnet/WEG-guia-de-especificacao-de-motores-eletricos-50032749-manual-portugues-br.pdf>>. Acesso em: 10 ago. 2014.