



OTÁVIO PRADO BORGES DE ASSIS

EFICIÊNCIA GLOBAL E CONSUMO ESPECÍFICO DE ENERGIA DA BOMBA
CENTRÍFUGA KSB ETA 50-20

LAVRAS – MG

2022

OTÁVIO PRADO BORGES DE ASSIS

EFICIÊNCIA GLOBAL E CONSUMO ESPECÍFICO DE ENERGIA DA BOMBA
CENTRÍFUGA KSB ETA 50-20:

Monografia apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Colegiado de curso de Engenharia Ambiental e Sanitária para obtenção título de Bacharel.

Orientador

Prof. Dr. Victor Buono da Silva Baptista

LAVRAS – MG

2022

OTÁVIO PRADO BORGES DE ASSIS

EFICIÊNCIA GLOBAL E CONSUMO ESPECÍFICO DE ENERGIA DA BOMBA
CENTRÍFUGA KSB ETA 50-20:

GLOBAL EFFICIENCY AND SPECIFIC ENERGY USE OF A KSB ETA 50-20 PUMP

Monografia apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Colegiado de curso de Engenharia Ambiental e Sanitária para obtenção título de Bacharel.

APROVADO EM 16 DE SETEMBRO DE 2022

Msc. Thiago Henrique Burgarelli Teixeira – PPGRH/UFLA

Msc. Paulo Henrique Brito Júnior – Equilíbrio Soluções Ambientais

Prof. Dr. Victor Buono da Silva Baptista
Orientador

LAVRAS – MG

2022

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, que me incentivaram nos momentos difíceis e compreenderam a minha ausência enquanto eu me dedicava a graduação

Ao Prof. Victor Buono da Silva Baptista, por ter sido meu orientador e ter desempenhado tal função com dedicação e amizade.

Aos meus irmãos da República K-Zona, com quem convivi intensamente durante os últimos anos, pelo companheirismo e pela troca de experiências que me permitiram crescer não só como pessoa, mas também como formando.

A todos os meus amigos de curso, pelo ambiente amistoso no qual convivemos e solidificamos os nossos conhecimentos, o que foi fundamental na conclusão do meu curso.

E a todos os outros amigos que de alguma forma contribuíram pra esse trabalho.

RESUMO

O uso racional de energia para o transporte de água, tanto no meio urbano quanto no meio rural, é uma preocupação recorrente, ainda mais nos últimos anos devido as variações climáticas e ocorrências de secas nos reservatórios de água. Dessa forma, o objetivo deste trabalho foi analisar a variação do rendimento global e consumo específico de energia (CEE), através da comparação com dados experimentais de uma unidade de bombeamento antes e depois de passar uma manutenção corretiva. Para este estudo foi realizado o ensaio hidráulico e energético de uma unidade de bombeamento para obtenção das curvas características (vazão por altura manométrica (Q-HMT) e vazão por rendimento (Q- η)). A unidade de bombeamento é composta por (i) uma bomba KSB-ETA 50/20 e rotação nominal de 3450 rpm; (ii) um motor elétrico trifásico de 25cv, da marca WEG; (iii) um inversor de frequência marca WEG, modelo CFW5. As determinações de rendimento foram repetidas sob valores de diferentes frequências (60, 55, 50, 45, 40, 30 Hz). Em cada frequência, para diferentes pares vazão bombeada e altura manométrica total, foi determinada a potência elétrica ativa requerida para o acionamento do conjunto inversor-motor-bomba. Para os resultados nos diferentes valores de vazão (m^3/h) e altura manométrica total (m), foram determinados o consumo energético específico (kWh/m^3) e o rendimento global de unidade de bombeamento. No experimento de 2022, foram observados valores de rendimento global entre 23,93% e 54,46% (com média de 45,61%). No experimento de 2017, foram observados valores de rendimento global entre 23,36% e 46,85% (com média de 38,63%). Os valores observados no ensaio realizado em 2022 apresentaram desvio médio relativo de 16,43% em relação aos valores observados no ensaio realizado em 2017, para a mesma unidade de bombeamento. O resultado apresentado demonstra a influência de se implantar um programa de avaliações periódicas das unidades de bombeamento, que permita identificar a necessidade de reparos e/ou cálculos da viabilidade econômica da substituição de componentes desgastados. Como esperado, houve variação do consumo específico de energia (CEE), no entanto, é claro o alto consumo de energia quando há o fechamento do registro gaveta.

Palavras-chave: hidráulica, estação de bombeamento, modelagem hidráulica, curvas características, altura manométrica total.

ABSTRACT

The rational use of energy for water supply, both in urban and rural zones, is a recurring concern, even more so in recent years due to climatic variations and occurrences of droughts in water reservoirs. Thus, the objective of this work was to analyze the global efficiency and specific energy use (CEE) variation, through the comparison with experimental data of a pumping unit before and after undergoing corrective maintenance. For this study, the hydraulic and energy test of a pumping unit was carried out to obtain the characteristic curves (flow per head (Q-HMT) and flow per global efficiency (Q- η)). The pumping unit is composed (i) a KSB-ETA 50/20 pump with nominal speed of 3450 rpm; (ii) a 25cv three-phase electric motor, WEG brand; (iii) a WEG brand frequency inverter, CFW5 model. Efficiency determinations were repeated under different frequency values (60, 55, 50, 45, 40, 30 Hz). At each frequency, for different pairs pumped flow and total dynamic head, the active electric power required to drive the variable speed drive-motor-pump set was determined. For the results in the different values of flow (m^3/h) and total dynamic head (m), the specific energy use (kWh/m^3) and the global efficiency of the pumping unit were determined. In the 2022 experiment, global efficiency values between 23.93% and 54.46% (average of 45.61%) were observed. In the 2017 experiment, global efficiency values between 23.36% and 46.85% were observed (with an average of 38.63%). The values observed in the test accomplished in 2022 showed a relative average deviation of 16.43% in relation to the values observed in the test accomplished in 2017, for the same pumping unit. The result presented demonstrates the influence of implementing a program of periodic evaluations of the pumping units, which allows identifying the need for repairs and/or determinations of the economic viability of replacing worn components. As expected, there was variation in the specific energy use (CEE), however, it is clear the high energy use when the gate valve is partially closed.

Keywords: hydraulic, pump station, hydraulic modelling, characteristics curves, total dynamic head.

LISTA DE FIGURAS

Fig. 1 - Campo de aplicação para bombas centrífugas.....	12
Fig. 2 - Curva vazão por altura manométrica da bomba ETA 20-50.....	12
Fig. 3 – Representação de uma estação de bombeamento	15
Fig. 4 – Triângulo de potências.....	17
Fig. 6 – Analisador de qualidade de energia Fluke, modelo 435 – II conectado ao painel elétrico de alimentação	21
Fig. 7 - Medidor ultrassônico de vazão. (a) posicionamento dos captadores de sinal. (b) visor do datalogger.	22
Fig. 8 – (a) tensiômetro digital para medição de vácuo na entrada da bomba. (b) transdutor de pressão Lamon, modelo DMP – 01 DPP para medição da carga de pressão na saída da bomba.....	24
Fig. 09 – Diagrama de Moody	26
Fig. 10. Curva característica Q-HMT para diferentes valores de frequência	27
Fig. 11. Curva Q-HMT da bomba KSB 50-20 rotor de 203mm modelada no EPANET	28
Fig. 12 - Curva característica modelada da bomba KSB ETA 50-20.....	29
Fig. 13 – Comparação dos pares de valores $Q-\eta_G$ do ensaio da bomba KSB ETA 50- 20.....	30
Fig. 14 – Variação do consumo específico de energia e vazão durante o ensaio	31

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	9
2 REFERENCIAL TEÓRICO	11
2.1 Bombas Centrifugas	11
2.2 Determinação da altura manométrica	12
2.3 Estação de Bombeamento	15
2.4 Motores	16
2.5 Modelagem do conjunto motobomba	17
3 METODOLOGIA	20
3.1 Ensaio do conjunto	20
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	25
5 CONCLUSÃO	33
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	34

1 INTRODUÇÃO

A captação, condução e elevação de água, para qualquer fim, geralmente é realizada através do emprego de máquinas motoras de transformação de energia. No caso de bombas centrífugas, é realizada através da transformação de energia mecânica, advinda da potência transmitida por um motor à bomba, em energia hidráulica. De acordo com as características das bombas centrífugas, seus usos mais comuns são relacionados ao abastecimento de água, também podendo ser empregadas na indústria ou para irrigação. Sendo capazes de fornecer grandes alturas manométricas através do acréscimo de pressão para vazões relativamente baixas (CARVALHO, 2004).

Para o transporte de água, tanto no meio urbano quanto no meio rural, a alta demanda de energia é uma preocupação recorrente, ainda mais nos últimos anos com as variações climáticas e ocorrências de secas nos reservatórios de água para a geração de energia elétrica. Nesse sentido, aponta-se a necessidade do uso racional desse insumo para a sociedade, pois conforme se desenvolve, aumenta o requisito energético, enfrentando problemas de geração de energia, que não se desenvolve na mesma proporção.

Nesse sentido, é necessário o estudo de formas para aumentar a eficiência global das unidades de bombeamento. Manutenções preventivas e preditivas são uma forma eficaz de manter a eficiência global, além de sempre manter a unidade de bombeamento operando próximo ao ponto de operação de maior eficiência.

Após anos de uso de uma unidade de bombeamento, existe a probabilidade da variação do ponto ótimo de operação da bomba, ou seja, do ponto de operação que fornece a maior eficiência global, aumentando o consumo de energia deste tipo de equipamento. De forma, análoga, manutenções periódicas na unidade de bombeamento, como troca de rolamentos, retentores e gaxetas, tendem a manter a bomba operando na curva de catálogo, ou seja, no ponto de maior eficiência possível.

Dessa forma, o objetivo deste trabalho foi analisar a variação do rendimento global e consumo específico de energia (CEE), através da comparação com dados experimentais de uma unidade de bombeamento antes e depois de uma manutenção corretiva. Para este estudo foi realizado o ensaio hidráulico e energético de uma unidade de bombeamento para obtenção das curvas características (vazão por altura

manométrica (Q-HMT) e vazão por rendimento (Q- η). O uso da eficiência global se faz necessário pela dificuldade de se obter valores de eficiência de cada elemento da unidade de bombeamento, que são: bomba, motor, inversor de frequência e cabamentos.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Bombas Centrifugas

Em geral, bombas hidráulicas são dispositivos que transferem energia para a água, tornando possível o deslocamento no sentido contrário a um desnível topográfico (VIEIRA, 2014).

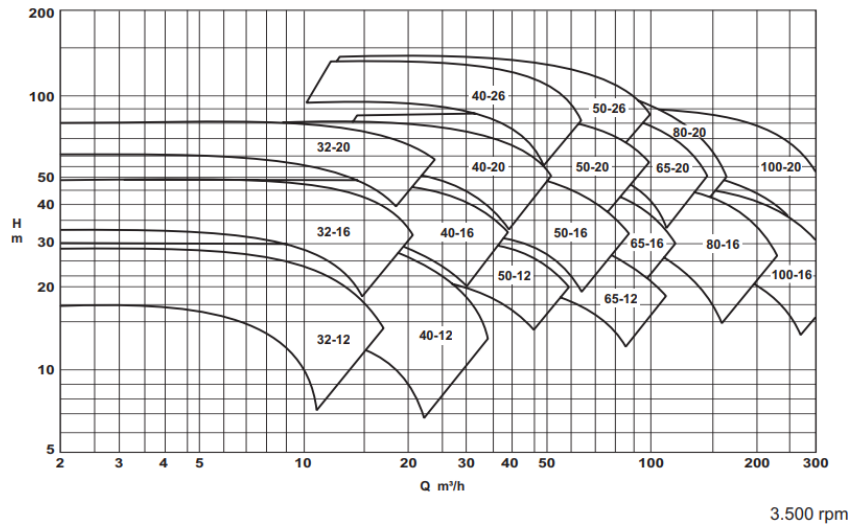
As bombas centrifugas são um tipo de bomba hidráulica onde a transformação de energia mecânica para energia cinética se dá através de um elemento chamado rotor, sendo a força centrífuga responsável pela maior parte da energia que a água recebe (MACINTYRE, 1987). Podendo essas serem classificadas conforme:

- 1) Posição do eixo da bomba: Bomba centrífuga horizontal, vertical ou inclinada.
- 2) Número de rotores: Simples estágio (um rotor) e multiestágios (vários rotores).
- 3) Localização: Submersa e não submersa.
- 4) Sentido do fluxo: Radial, axial ou misto.

De acordo com as características das bombas centrifugas, seus usos mais comuns são relacionados ao abastecimento de água, tanto em meio urbano quanto no meio rural, também podendo ser empregadas na indústria ou para irrigação. Sendo capazes de fornecer grandes alturas manométricas através do acréscimo de pressão para vazões relativamente baixas (CARVALHO, 2004).

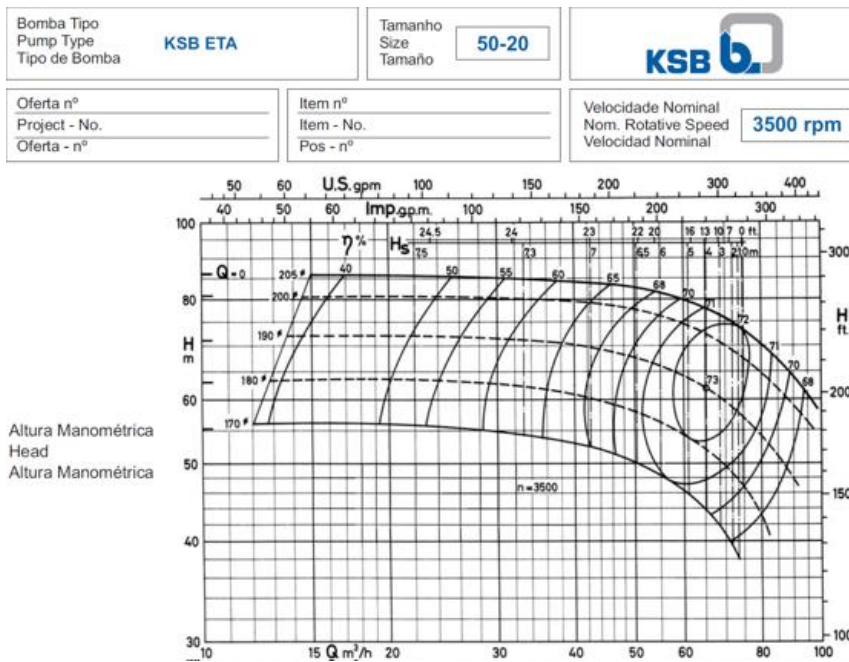
Segundo os catálogos disponibilizados pelos fabricantes de bombas, para seleção do equipamento que será adequado para as necessidades de um determinado projeto, os critérios mais adequados e frequentemente utilizados para essa seleção são relacionados através de curvas características que são demonstradas graficamente e em pares, sendo esses vazão por altura manométrica (Q-HMT) e vazão por rendimento (Q- η). Nas Fig. 1 e Fig. 2 abaixo é possível observar o campo de aplicação para alguns modelos de bombas do catalogo KSB, através da vazão e altura manométrica atendidas, e um exemplo de bomba ETA 50-20.

Fig. 1 - Campo de aplicação para bombas centrífugas



Fonte: adaptado do catalogo KSB (2014)

Fig. 2 - Curva vazão por altura manométrica da bomba ETA 20-50



Fonte: adaptado catalogo KSB (2014)

2.2 Determinação da altura manométrica

Em relação aos critérios de projeto, a bomba selecionada deve adequar-se à altura manométrica exigida, de forma que suporte o recalque necessário. O cálculo e definição da altura manométrica total (HMT) leva em consideração o desnível geométrico entre a bomba e o reservatório, as perdas de carga da tubulação de

sucção e recalque e se a bomba operará não afogada (sucção negativa, Eq.1) ou afogada (sucção positiva, Eq. 2)(CARVALHO, 2004).

Para bomba não afogada:

$$HMT = H_{\text{Recalque}} + H_{\text{Sucção}} + H_{fT} \quad 01$$

Para bomba afogada:

$$HMT = H_{\text{Recalque}} - H_{\text{Sucção}} + H_{fT} \quad 02$$

As perdas de carga contínuas podem ser determinadas utilizando a fórmula universal de Darcy Weissbach (Eq. 03) ou fórmulas empíricas, como por exemplo a de Hazen-Williams (Eq. 04) (CARVALHO, 2004).

$$hf = f \frac{v^2 L}{2g D} \quad 03$$

$$hf = 10,67 \left(\frac{Q}{CHW} \right)^{1.852} \frac{L}{D^{4.87}} \quad 04$$

Sendo:

f – fator de atrito da fórmula universal de Darcy-Weissbach, depende da rugosidade relativa (ϵ/D) e do número de Reynolds (Re) (Eq. 05), adimensional;

ϵ – rugosidade absoluta do material da tubulação, m;

v – velocidade da água no interior da tubulação, m/s;

L – comprimento linear da tubulação, m;

D – diâmetro interno da tubulação, m;

CHW – coeficiente de rugosidade da fórmula de Hazen-Williams, e depende da natureza do material, adimensional.

$$Re = \frac{v D}{\nu} \quad 05$$

Onde:

ν - viscosidade cinemática, $m^2 s^{-1}$, que depende da temperatura da água.

Para determinação das perdas de carga localizada, pode-se utilizar o método do comprimento equivalente (Eq. 06) (CARVALHO, 2004).

$$L_e = (\sum \text{peças especiais})D + L \quad 06$$

Neste caso, o comprimento linear das fórmulas de perda de carga é substituído pelo comprimento equivalente, e é determinada a perda de carga total (contínua + localizada) (Eq. 07).

$$hf_L = k \frac{v^2}{2g} \quad 07$$

Sendo que:

k – coeficiente que depende da peça (obtido experimentalmente), adimensional.

Quando se utiliza o método direto (Eq. 06), a perda de carga localizada é somada ao valor da perda de carga contínua.

Para os casos em que o conjunto motobomba está instalado, uma maneira de verificar a HMT, é através da soma dos valores medidos da carga de pressão na entrada (leitura do vacuômetro) e saída (leitura do manômetro) da bomba (Eq. 08).

$$HMT = P_{\text{Recalque}} + P_{\text{Sucção}} \quad 08$$

Sendo:

HMT = Altura Manométrica Total, m;

H_{recalque} = Cota Geométrica do Recalque, m;

$H_{\text{Sucção}}$ = Cota Geométrica da Sucção, m;

P_{Recalque} = Carga de pressão na saída da bomba, m;

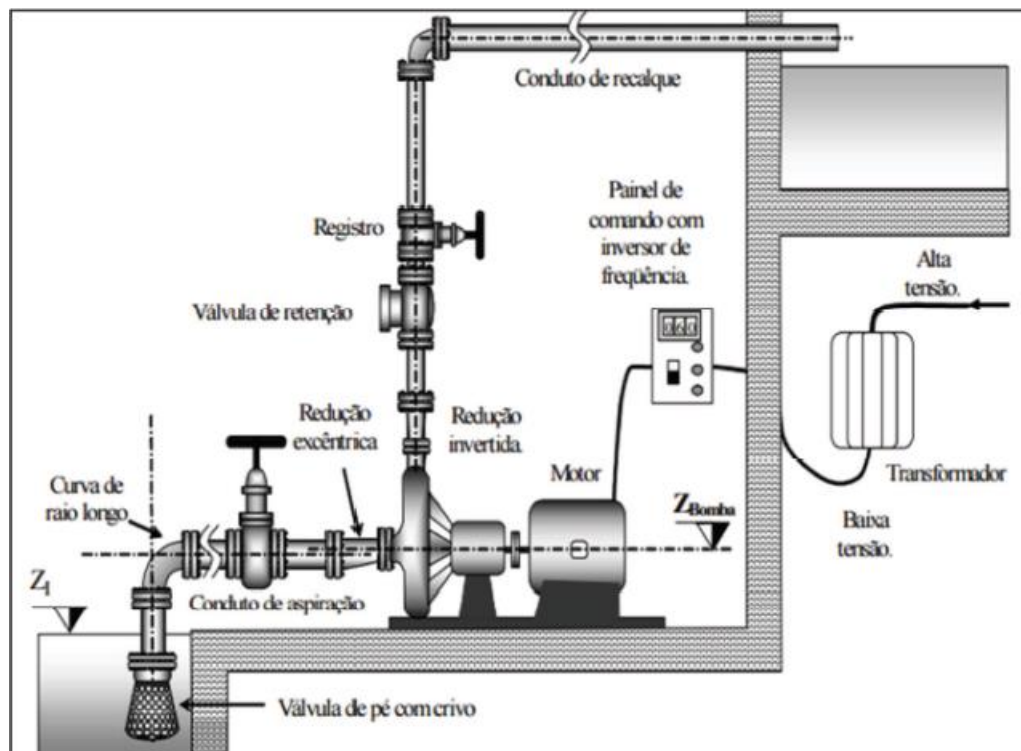
$P_{\text{Sucção}}$ = Carga de pressão na entrada da bomba, m;

H_{fT} = perda de carga total (contínua + localizada), na sucção e recalque, m.

2.3 Estação de Bombeamento

Segundo Gomes (2013, p. 158) “Um sistema de bombeamento é composto, basicamente, por uma tubulação de aspiração, um conjunto motobomba e uma tubulação de recalque” (Fig. 3).

Fig. 3 – Representação de uma estação de bombeamento



Fonte: Borges (2011).

De modo a reduzir as perdas de cargas, a tubulação de aspiração deve ser a mais curta possível, teoricamente menor que 10.33m (1 atm.) entretanto, na prática, os fabricantes indicam que seja menor que 5m, devendo ser verificada a altura máxima para cada modelo afim de evitar também os fenômenos de cavitação (AZEVEDO NETTO, 1998).

Referente à sucção, a instalação da válvula-de-pé com crivo ou filtros é atribuída como barreira física para impurezas, evitando a entrada para o interior da bomba e mantendo-a escorvada. Bolhas de ar devem ser evitadas com a instalação de dispositivos de redução excêntricos. Para bombas afogadas recomenda-se a utilização de válvula de gaveta na sucção de modo a impedir o fluxo para eventuais manutenções.

Para a tubulação de recalque, localizada depois do conjunto motobomba, responsável por escoar a vazão bombeada, é frequentemente associada a válvulas de retenção unidirecional, que impede o fluxo contrário do escoamento quando a bomba for desligada, evitando assim, a rotação contrária do motor que pode avariar o mesmo, e registro do tipo gaveta para regulação da vazão bombeada e possíveis reparos no conjunto.

2.4 Motores

Os motores são dispositivos que convertem energia em trabalho de eixo ou energia mecânica, sendo esses classificados conforme a energia utilizada para tal conversão: Motores elétricos, hidráulicos, a combustão interna, turbinas a vapor e a gás (GOMES, 2013).

Classificados em motores de corrente contínua (CC) ou de corrente alternada (CA), os motores elétricos são amplamente associados a estações de bombeamentos devido a suas vantagens, dessas podemos citar, o baixo custo de aquisição e manutenção, sendo escolhidos para completar a maioria dos conjuntos motobombas (GOMES, 2013).

Os motores elétricos de corrente alternada (CA) operam conforme a frequência estabelecida pela rede, no Brasil há predominância da rede em 60 Hz, já nos países europeus, predomina a rede em 50 Hz.

Fator de potência (FP) definido como o cosseno do ângulo de defasagem, relaciona-se com outras duas grandezas, que ajudam a entender qual fração da potência consumida realmente realiza trabalho mecânico, e essas são chamadas potência ativa e potência aparente sendo essas, respectivamente, a fração da potência que é convertida em trabalho e a fração que não participa da realização de trabalho. Essa relação está exposta abaixo com as equações 09 e 10:

$$FP = \cos(\varphi) \quad 09$$

$$\cos(\varphi) = \frac{Pot_{EA}}{Pot_{AP}} \quad 10$$

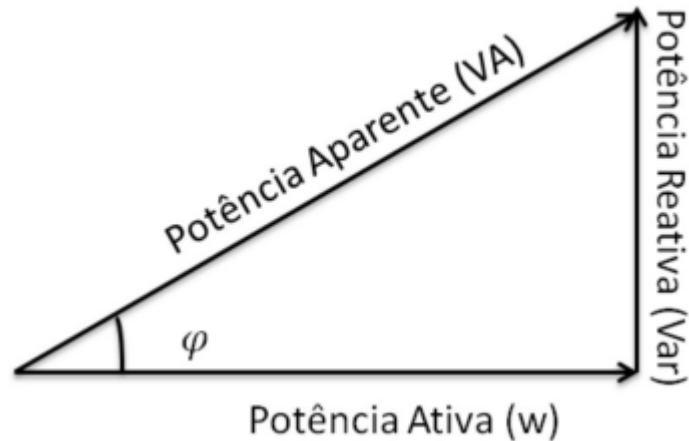
Sendo:

φ =ângulo de acordo com a Figura 4

Pot_{EA} = Potência elétrica ativa, W

Pot_{AP} = Potência elétrica aparente, VA

Fig. 4 – Triângulo de potências



Fonte: Adaptado de Neves & Munchow (2014).

2.5 Modelagem do conjunto motobomba

A modelagem das curvas vazão-altura manométrica (Q-HMT) e vazão-rendimento (Q- η_B) da bomba pode ser realizada através de um polinômio do 2º grau, conforme proposto por Moreno et al (2009), apresentado nas Eqs. 11 e 12.

$$HMT = a + b Q + c Q^2 \quad 11$$

$$\eta_B = e Q + f Q^2 \quad 12$$

Onde:

a, b, c, e, f são parâmetros do polinômio de 2º grau.

Pela dificuldade em se obter valores de rendimento de um motor separado da bomba, Bernier e Bourret (1999), apresentaram um modelo (Eq. 13) para determinar o rendimento de um motor (η_m) de até 150 cv.

$$\eta_m = 0.94187 * (1 - e^{-0.0904 * \left(\frac{Pot_{mec}}{Pot_{mec N}}\right)}) \quad 13$$

Em que:

Pot_{mec} – potência mecânica no eixo, kW

$Pot_{mec N}$ – potência mecânica nominal no eixo, kW

Para determinação do rendimento de inversores de frequência, Baptista (2019) apresentou um polinômio de 3º grau (Eq. 14) que depende apenas da relação entre a velocidade de rotação fixa e variável ($a = nv/nf$) da unidade de bombeamento.

$$\eta_{vi} = 70.126 - 232.47\alpha + 582.032\alpha^2 - 323.134\alpha^3 \quad 14$$

As curvas características do conjunto motobomba podem sofrer alterações devido a variação na velocidade de rotação do motor, tal grandeza pode ser controlada através de um conversor de frequência (inversor), que regula a frequência da tensão aplicada ao motor desde o zero até o valor máximo da rede, em Hertz, sendo que para a frequência máxima fornecida pela rede elétrica observa-se as rotações mais altas do motor (GUIMARÃES, 2008).

Através da variação da rotação do motor é possível exercer alterações sobre o ponto de trabalho do sistema, em que, através das equações de Rateaux (Eq. 15) pode-se estabelecer o novo ponto de trabalho, de forma que a mesma é diretamente aplicável quando os pontos de vazão e altura manométrica estiverem sobre a mesmas curvas de isoeffiência.

$$\alpha = \frac{Q_1}{Q_2} = \frac{n_1}{n_2} ; \frac{H_1}{H_2} = \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2 ; \frac{P_1}{P_2} = \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^3 \quad 15$$

Onde:

$\alpha = n1/n2$, relação da velocidade de rotação variável e fixa.

$Q =$ Vazão, m^3/h

$H =$ Altura Manométrica, m

$P =$ Potência, W

$n =$ rotação do motor em rpm

O rendimento global entendido também como o desempenho da unidade de bombeamento, é representado pelo produto dos rendimentos do conjunto motobomba, como expresso na Eq. 16

$$\eta_{(global)} = \eta_{(motor)} * \eta_{(bomba)} * \eta_{(inversor)} * \eta_{(cabamentos)} \quad 16$$

Onde:

η_{motor} = Rendimento do motor

η_{bomba} = Rendimento da bomba

$\eta_{inversor}$ = Rendimento do inversor

$\eta_{cabamentos}$ = Rendimento dos cabamentos

O rendimento global do conjunto e o consumo energético específico podem ser obtidos a partir das Eq. 17 e Eq. 18 abaixo:

$$\eta_{global} = \frac{PH}{Pea} = \frac{HMT * (\gamma * Q)}{Pea} \quad 17$$

Onde:

γ = peso específico da água em $\frac{N}{m^3}$; *aproximadamente* = $9\,806 \frac{N}{m^3}$

Pea = Potência elétrica ativa, kW

PH = Potência hidráulica, Kw

Q = Vazão, m^3/h

$$CEE = \frac{Pot_{EA}}{Q} \quad 18$$

Onde:

CEE = Consumo de energia específico kWh/ m^3 ;

Pot_{EA} – potência elétrica ativa, kW;

Q = Vazão, m^3/h

3 METODOLOGIA

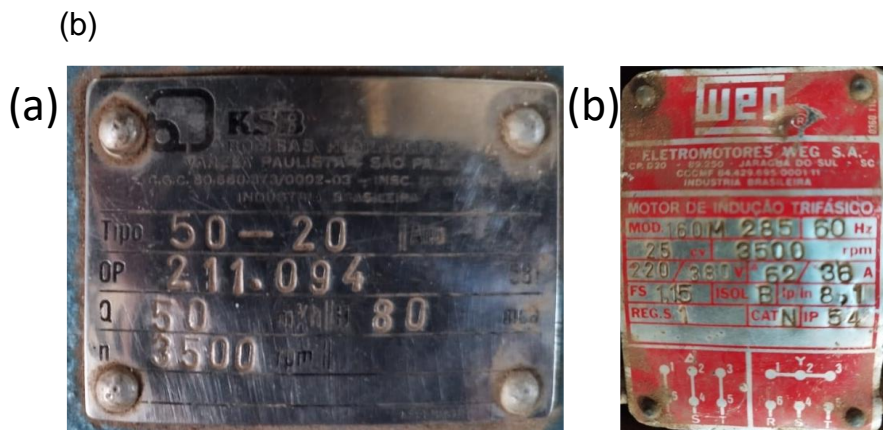
O ensaio do conjunto motobomba foi realizado durante o mês de julho de 2022, no laboratório de Irrigação do Departamento de Recursos Hídricos da Universidade Federal de Lavras em Minas Gerais, sendo os equipamentos, pertencentes ao respectivo laboratório. Os dados obtidos foram comparados aos ensaios realizados em 2017, seguindo a mesma metodologia de ensaio.

3.1 Ensaio do conjunto

O conjunto motobomba utilizado para o ensaio foi composto por uma bomba KSB modelo ETA 50-20, com rotor de 203 mm, alimentada por um motor de indução trifásico de 25cv (18.38 kW), da marca WEG, modelo 160M 285.

As informações referentes ao motor, que alimenta a bomba, mostram que o mesmo ligado à rede trifásica de 380V/60Hz necessita de 38A para manter a potência mecânica de 25cv no eixo e a rotação nominal de 3500 rpm sendo essa associada a vazão bombeada de 50 m³/h de água com altura manométrica total de 80 m, conforme plaqueta do motor e bomba, apresentados na Fig. 5.

Fig. 5 – Plaquetas da bomba KSB ETA 50-20 (a) e do motor WEB 160M 285



Fonte: do autor

A bomba KSB ETA 50-20 é acionada através de um inversor de frequência marca WEG, modelo CFW-05 possibilitando a variação da velocidade de rotação do motor. Os valores de velocidade de rotação do eixo da bomba, foram obtidas através de um tacômetro digital TRD – 100 da marca INSTRUTHERM.

A potência elétrica ativa (P_{TEA}) e fator de potência (FP), foram obtidas através de um analisador de qualidade de energia, da marca Fluke, modelo 435 – II conectado ao painel de alimentação elétrica do inversor de frequência (Fig. 6).

Desta forma, foram obtidos dados hidráulicos e energéticos da unidade de bombeamento para diferentes frequências: 60, 55, 50, 45, 40, 30 Hz.

Para cada frequência da rede do ensaio, foram realizadas as medidas dos parâmetros observados: velocidade de rotação do eixo da bomba, potência elétrica ativa e fator de potência da rede de alimentação, vazão bombeada, temperatura e cargas de pressão de entrada e saída da bomba.

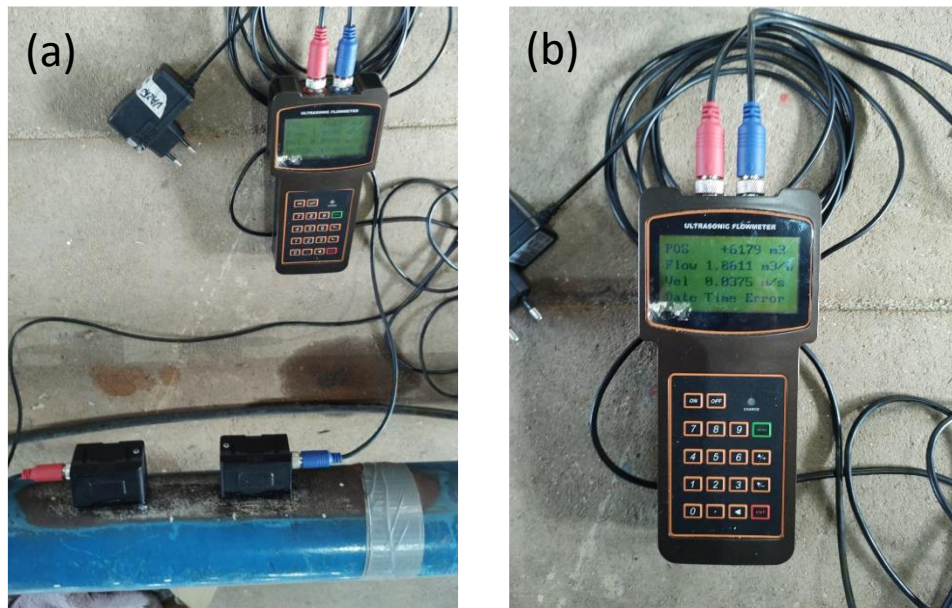
Fig. 6 – Analisador de qualidade de energia Fluke, modelo 435 – II conectado ao painel elétrico de alimentação.



Fonte: do autor

As vazões referentes ao ensaio da bomba KSB ETA 50-20 foram obtidas através do uso de um medidor de vazão ultrassônico UFM 175 com $\pm 1\%$ de erro associado a leitura, instalado sobre o revestimento externo, devidamente polido, da tubulação de recalque e indicado nas Fig. 7a e 7b, com seus devidos transdutores em posição.

Fig. 7 - Medidor ultrassónico de vazão. (a) posicionamento dos captadores de sinal. (b) visor do datalogger.



Fonte: do autor

Normalizados pela portaria 455 do INMETRO (INMETRO, 2010) os ensaios em unidades de bombeamento requerem que haja correção do peso específico da água, utilizado na conversão para carga de pressão, de acordo com a temperatura registrada no fluido durante o ensaio. Utilizou-se as Eq. 19 e Eq. 20 para determinação do peso e massa específica da água, a temperatura da água foi registrada com a utilização de um multímetro digital portátil, da marca INSTRUTHERM, modelo MD – 380.

$$\gamma = \rho g \quad 19$$

$$\rho = 1000.14 + 0,0094t + 0,0053t^2 \quad 20$$

Em que:

ρ = Massa específica, kg/m³

γ = Peso específico, N/m³

A viscosidade cinemática da água, que varia com a temperatura da água, foi determinada a partir da formulação proposta por Kell (1975) (Eqs. 21 a 27).

23

$$a = \frac{999,83952 + 16,945176 T - 7,9870401}{10^3 T^2} \quad 21$$

$$b = \frac{-44,170461}{10^6 T^3} + \frac{105,56306}{10^9 T^4} \quad 22$$

$$c = \frac{-280,54253}{10^{12} T^5} \quad 23$$

$$d = \frac{a+b+c}{1 + \frac{16,87985}{10^3 T}} \quad 24$$

$$e = 2,1482 [(T - 8,435) + (8078,4 + (T - 8,435)^2)^{0,5}] - 120 \quad 25$$

$$f = \frac{0,1}{e} \quad 26$$

$$v = \frac{f}{d} \quad 27$$

Onde:

T – Temperatura da água, °C;

v – Viscosidade cinemática m² s⁻¹

Para a obtenção dos valores de carga de pressão na entrada bomba, foi utilizado um tensiômetro digital com erro de 0,01kPa (Fig. 8a).

Para o caso das leituras de carga de pressão na saída da bomba, foi utilizado o medidor Lamon, modelo DMP – 01 DPP, com exatidão de 0,1% FS (Fig. 8b). Os valores registrados foram submetidos ao cálculo de altura manométrica total de acordo com a equação de Bernoulli (Eq. 28).

$$HMT = \frac{P_s}{\gamma} - \frac{P_e}{\gamma} + \Delta Z \quad 28$$

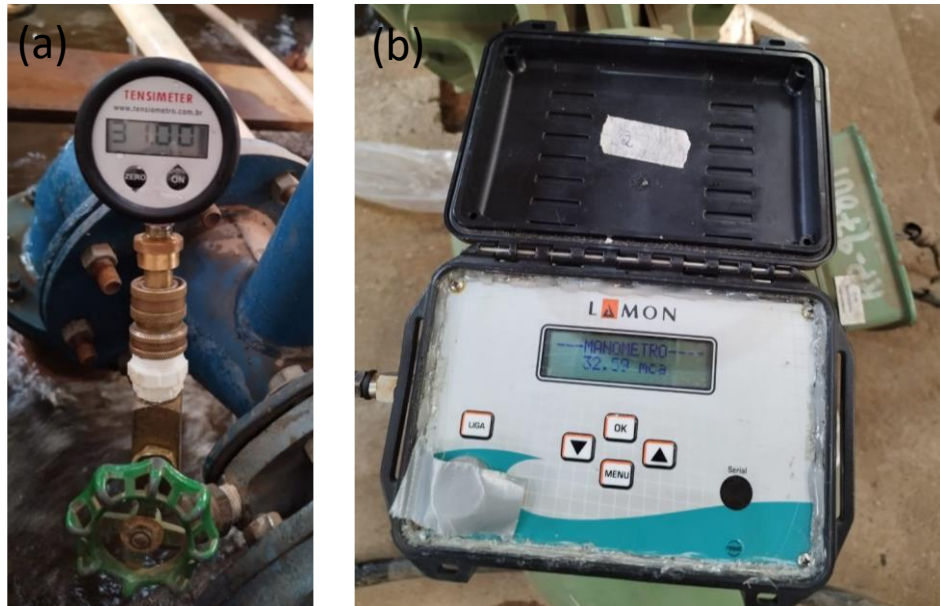
Em que:

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

ΔZ = desnível geométrico entre os sensores de pressão (m)

P_e = Pressão na entrada da bomba, N/m².

Fig. 8 – (a) tensiômetro digital para medição de vácuo na entrada da bomba. (b) transdutor de pressão Lamon, modelo DMP – 01 DPP para medição da carga de pressão na saída da bomba



Fonte: do autor

Em posse dos valores obtidos durante o ensaio foi possível realizar a determinação do rendimento global (η_G) e do consumo específico de energia (CEE), determinados através das Eq. 17 e Eq. 18, respectivamente.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para verificar a integridade dos dados experimentais obtidos, foram determinados os valores de rugosidade relativa (ϵ/D) na tubulação de sucção da unidade de bombeamento.

Através da leitura do vacuômetro, foi possível determinar a perda de carga na sucção (Eq.29) e conseqüentemente o fator de atrito (Eq. 30), que depende da variação vazão.

$$hf_s = \text{Leitura Vácuo} - \text{HGS} + \frac{v_s^2}{2g} \quad 29$$

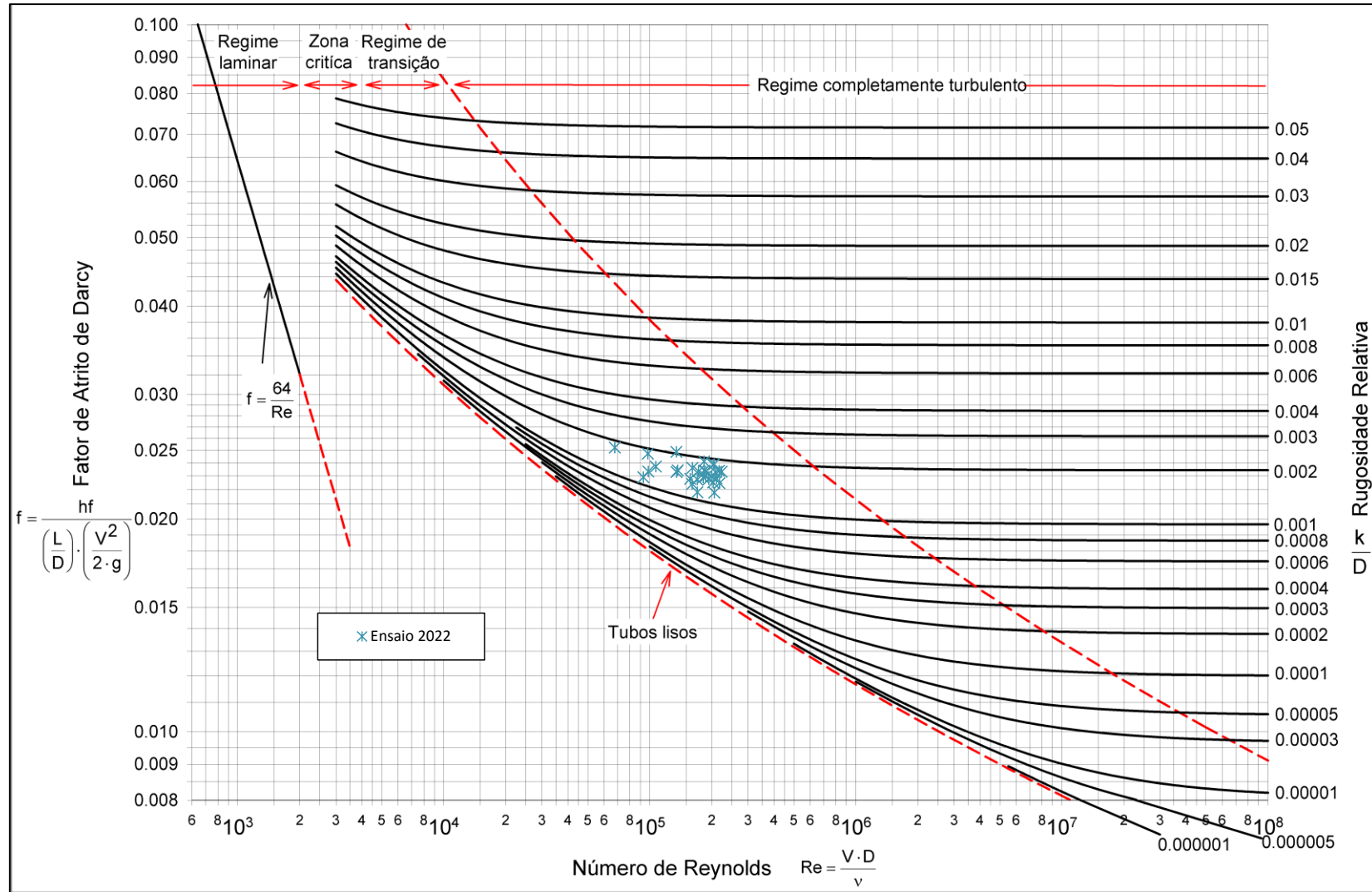
Onde: HGS é a altura geométrica de sucção, no caso deste experimento 0,60m.

$$f = \frac{\pi^2 g}{8} \frac{hf_s}{Q^2} \frac{D^5}{L_e} \quad 30$$

Para determinação do comprimento equivalente (L_e) utilizou-se um comprimento linear de 2m da tubulação de sucção com diâmetro interno de 100mm, uma válvula de pé com crivo, uma curva de 90° e uma redução excêntrica, valores de comprimento virtual em número de diâmetros de 350, 30 e 35, respectivamente.

Os valores de fator de atrito (f) e de número de Reynolds (Re) foram plotados no diagrama de Moody (Fig. 09).

Fig. 09 – Diagrama de Moody



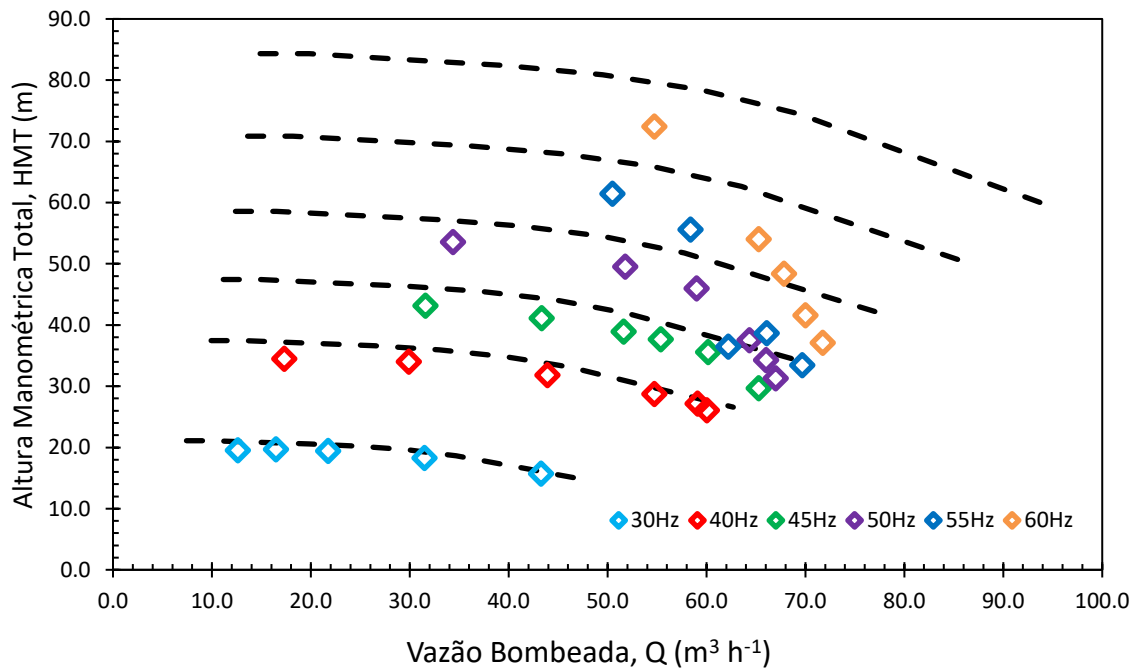
Fonte: do autor (2022)

Na Fig. 09, é possível observar que os valores plotados apresentaram uma rugosidade relativa entre 0,001 e 0,002, demonstrando a confiabilidade dos dados obtidos no ensaio. Sendo que o fator de atrito variou em torno de 0,025 e o número de Reynolds demonstrou um regime de escoamento turbulento.

Através dos dados obtidos de vazão e cargas de pressão na entrada e na saída da bomba, foi possível plotar as curvas Q-HMT (Fig. 10) para cada frequência utilizada no experimento (30, 40, 45, 50, 55 e 60 Hz).

Os dados obtidos foram plotados em cima das curvas de catálogo da bomba, obtidas através da lei de semelhança mecânica de Rateaux.

Fig. 10. Curva característica Q-HMT para diferentes valores de frequência



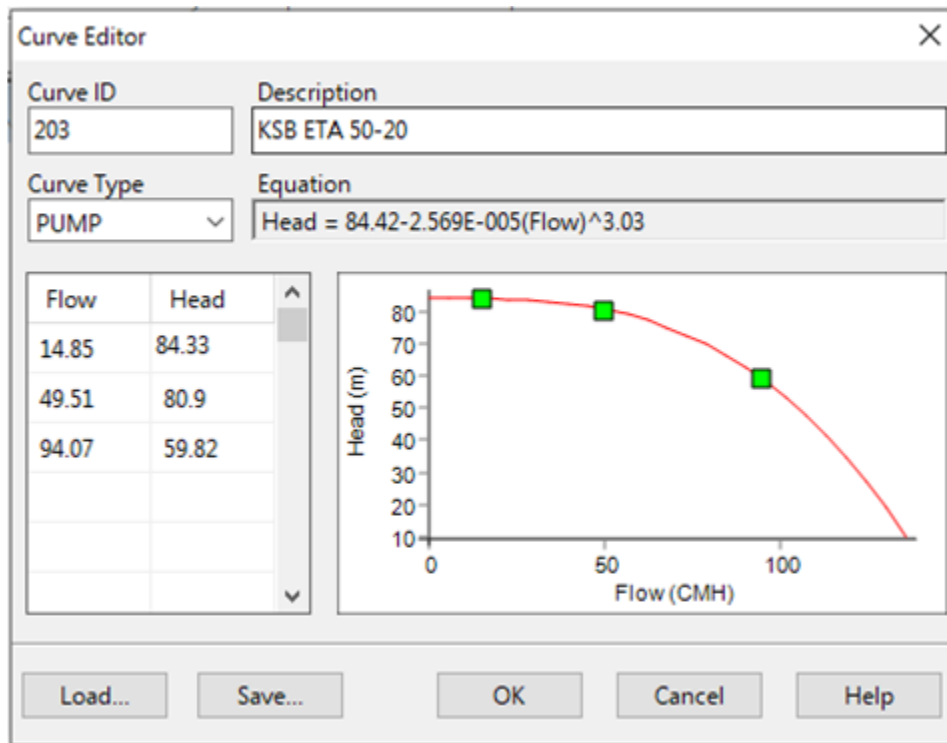
Fonte: do autor (2022)

Na Fig. 10, é possível observar o efeito da cavitação na curva característica da bomba, mais evidentes para as frequências de 50, 55 e 60 Hz. A cavitação ocorre quando a pressão interna na tubulação de sucção é superior a pressão de vapor da água, ocasionando a troca de fase líquido-vapor devido à variação de pressão. Este fenômeno é prejudicial à unidade de bombeamento, causando desgaste excessivo do rotor, diminuindo a transferência de energia da bomba para o líquido.

Para melhor avaliação dos dados obtidos no experimento, estes foram agrupados para a frequência de 60 Hz, pois a curva de catálogo é apresentada para essa frequência. Para isso, foi utilizado a lei de semelhança mecânica de Rateaux.

Os pares de valores de Q e HMT da curva de catálogo, foram modeladas utilizando dois métodos, um polinômio de 2º grau proposto por Moreno et al. (2009), e através do simulador hidráulico EPANET (Rossman, 2000) (Fig. 11). No EPANET, é realizada a modelagem da curva da bomba através de três pares de valores Q-HMT informados: vazão zero, ponto de operação e vazão máxima.

Fig. 11. Curva Q-HMT da bomba KSB 50-20 rotor de 203mm modelada no EPANET



Fonte: do autor (2022)

Na Fig. 11, pode-se observar que o EPANET modelou uma curva com os seguintes parâmetros (Eq. 31).

$$\text{HMT} = 84,42 - 0,00002569 Q^{3,03}$$

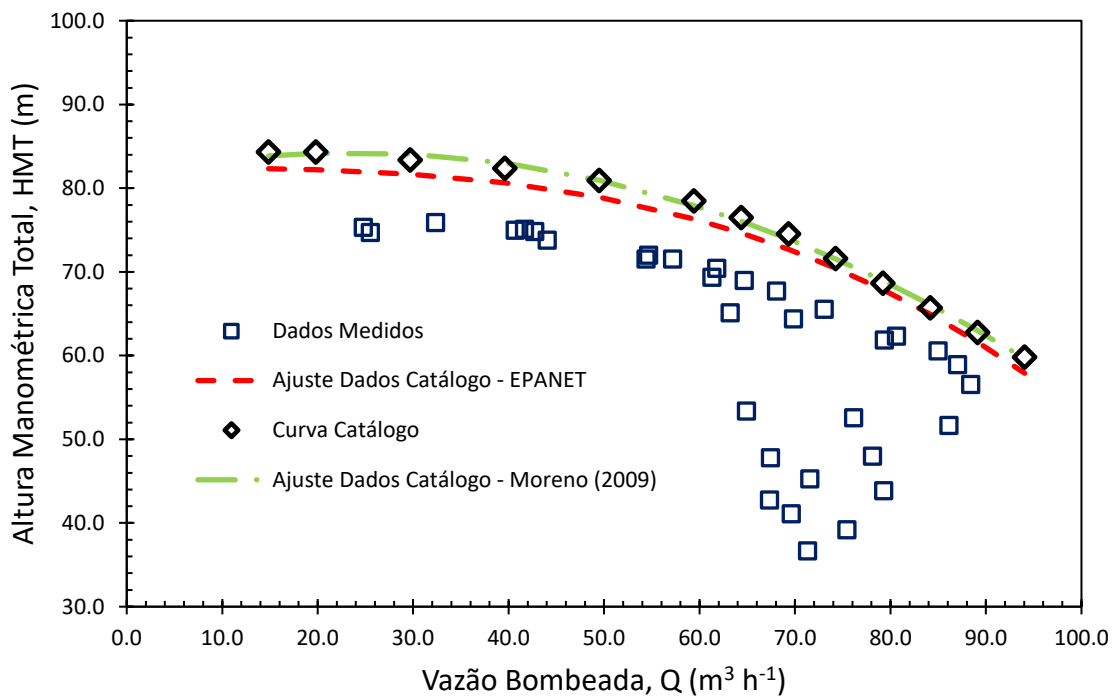
31

A modelagem utilizando o polinômio de 2º grau proposto por Moreno et al. (2009), apresentou a seguinte curva (Eq. 32):

$$\text{HMT} = 81,43 + 0,2374 Q - 0,00499 Q^2$$

A diferença entre os modelos pode ser observada na Fig. 12.

Fig. 12 - Curva característica modelada da bomba KSB ETA 50-20



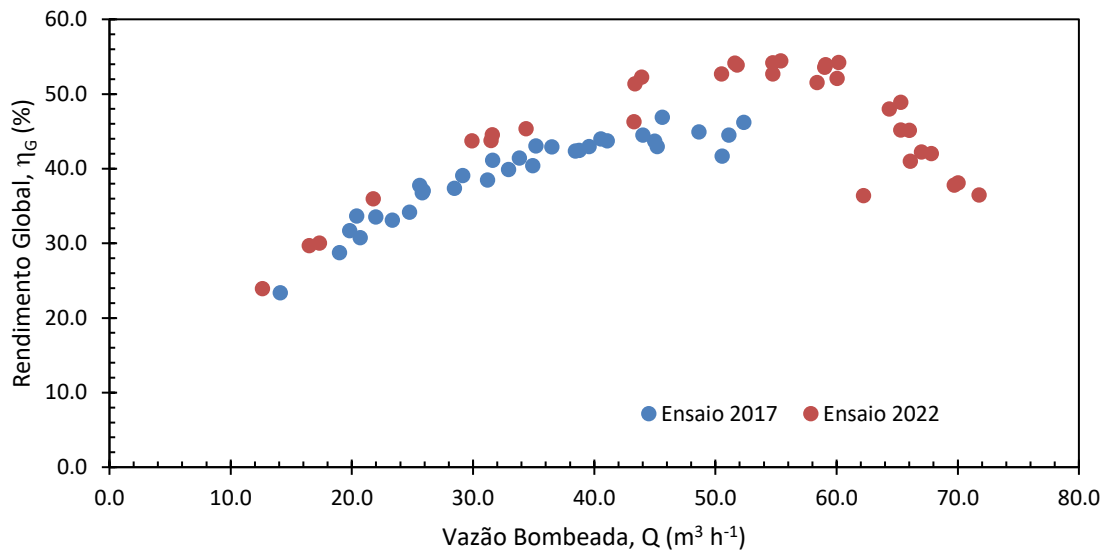
Fonte: do autor (2022)

Pode ser observado na Fig. 12, o mesmo comportamento de cavitação apresentado na Fig. 10, quando a vazão está acima da recomendada na plaqueta. Nota-se também que os dados obtidos estão abaixo da curva de catálogo para o rotor de diâmetro 203mm, estando mais próximos de um rotor com diâmetro de 196mm. Este resultado pode ser explicado devido à idade da bomba e o uso para aulas didáticas, onde se tem a necessidade de variar muito o ponto de operação.

Além da curva característica Q-HMT, outra curva que apresenta informações do desgaste da unidade de bombeamento é a curva vazão versus rendimento da bomba. No caso de um ensaio da unidade de bombeamento, pela facilidade em se obter os dados de potência elétrica ativa e a potência hidráulica da bomba, valores de rendimento global (motor + bomba + inversor + cabeamento) foram plotados na Fig. 13, comparados com dados de um ensaio realizado no ano de 2017 (ARAÚJO, 2017). Vale ressaltar que no intervalo de tempo entre os ensaios a unidade de bombeamento

passou por manutenção, sendo trocados os rolamentos, retentores, gaxeta, eixo e chaveta da bomba.

Fig. 13 – Comparação dos pares de valores Q - η_G do ensaio da bomba KSB ETA 50-20



Fonte: do autor (2022)

Pode-se observar na Fig. 13, que os dados obtidos no ensaio realizado em 2022 apresentaram valores superiores aos dados do ensaio realizado em 2017. Essa superioridade nos valores de rendimento global está diretamente ligada à manutenção realizada na unidade de bombeamento.

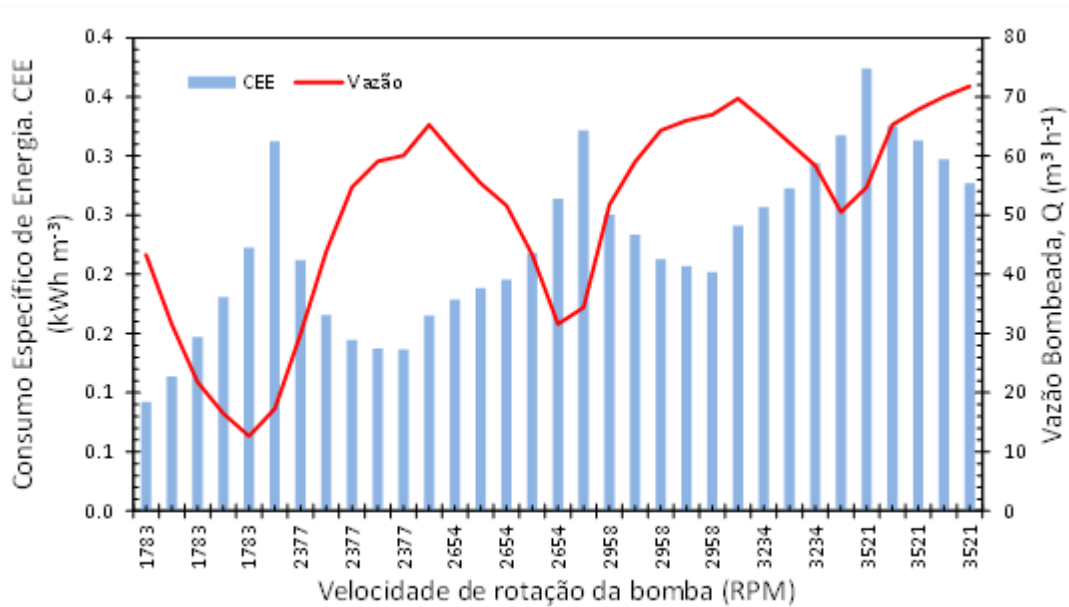
No experimento de 2022, foram observados valores de rendimento global entre 23,93% e 54,46% (com média de 45,61%). No experimento de 2017, foram observados valores de rendimento global entre 23,36% e 46,85% (com média de 38,63%). Os valores observados no ensaio realizado em 2022 apresentaram desvio médio relativo de 16,43% em relação aos valores observados no ensaio realizado em 2017, para a mesma unidade de bombeamento.

Na curva de catálogo, o rendimento máximo da bomba, para o rotor de 203mm é de 72%. Sabe-se que motores elétricos e inversores de frequência possuem rendimento na ordem de 90 a 95%, reduzindo o rendimento global para 64,8%. Dessa forma, a variação do rendimento global, considerando uma bomba nova, foi de aproximadamente 16%.

Dessa forma, o resultado apresentado demonstra a influência de se implantar um programa de avaliações periódicas das unidades de bombeamento, que permita identificar a necessidade de reparos e/ou cálculos da viabilidade econômica da substituição de componentes desgastados.

Outro importante parâmetro abordado para a questão energética é o consumo específico de energia (CEE), que leva em consideração a potência elétrica ativa na entrada da unidade de bombeamento e a vazão bombeada pelo sistema. Na Fig. 14, é apresentada a variação do CEE e da vazão em relação à velocidade de rotação da unidade de bombeamento.

Fig. 14 – Variação do consumo específico de energia e vazão durante o ensaio



Fonte: do autor (2022)

Na Fig. 14, é possível observar a variação do valor do consumo específico de energia para mesmos valores de vazão, mas para diferentes frequências (ou velocidades de rotação da unidade de bombeamento). Este resultado é esperado, pois a curva da bomba foi modificada através do ajuste do inversor de frequência.

Durante o ensaio, para haver a variação dos pontos de operação em uma mesma frequência de trabalho, um registro gaveta foi acionado, aumentando e diminuindo a vazão e perda de carga e conseqüentemente, aumentando e diminuindo a altura manométrica. Devido isso, é possível observar que em pontos de maior valor de CEE, há um pequeno de valor de vazão, e vice-versa. Esse comportamento é

comum em instalações de bombeamento onde a variação de vazão é através de um registro. Isto é uma operação equivocada, pois a alteração do ponto de operação se dá com a variação da curva do sistema (através do aumento da perda de carga), aumentando significativamente o CEE.

Em instalações onde a variação do ponto de operação é realizada através do inversor de frequência, o CEE é menor, pois a alteração do ponto de operação se dá com a variação da curva da bomba, permanecendo a curva do sistema inalterada.

5 CONCLUSÃO

A curva Q-HMT obtida no ensaio de 2022 está abaixo da curva de catálogo para o rotor de diâmetro 203mm, estando mais próximos de um rotor com diâmetro de 196mm.

Com relação ao rendimento global da unidade de bombeamento, os dados obtidos no ensaio realizado em 2022 apresentaram valores superiores aos dados do ensaio realizado em 2017. Essa superioridade nos valores de rendimento global está diretamente ligada à manutenção realizada na unidade de bombeamento.

No experimento de 2022, foram observados valores de rendimento global entre 23,93% e 54,46% (com média de 45,61%). No experimento de 2017, foram observados valores de rendimento global entre 23,36% e 46,85% (com média de 38,63%). Os valores observados no ensaio realizado em 2022 apresentaram desvio médio relativo de 16,43% em relação aos valores observados no ensaio realizado em 2017, para a mesma unidade de bombeamento.

Dessa forma, o resultado apresentado demonstra a influência de se implantar um programa de avaliações periódicas das unidades de bombeamento, que permita identificar a necessidade de reparos e/ou cálculos da viabilidade econômica da substituição de componentes desgastados.

Como esperado, houve variação do consumo específico de energia (CEE), no entanto, é claro o alto consumo de energia quando há o fechamento do registro gaveta.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARAÚJO, D. S. A. **Características hidráulicas e energética de uma unidade de bombeamento controlada por um inversor de frequência.** 2017. Monografia (Bacharelado em Engenharia Agrícola) – UFLA, 2017. 27 p.

BAPTISTA, V. B. S, CÓRCOLE, J. I., COLOMBO, A., MORENO, M. A. **Feasibility of the use of variable speed drives in center pivot systems installed in plots with variable topography.** *Water*, v. 11, n. 10, p. 2192, 2019.

BERNIER, M.A.; BOURRET, B. **Pumping energy and variable frequency drives.** *ASHRAE J.* 1999, 41, 37–40.

BORGES, A. **Apostila Máquinas Hidráulicas – Bombas.** Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 2011

BRASIL. Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior. Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial- **INMETRO Portaria n455, de 1 de dezembro de 2010.** Disponível em <http://www.inmetro.gov.br/legislacao/rtac/pdf/rtac001633.pdf>

CARVALHO, J. A. de; OLIVEIRA, L. F. C. de; **Instalações de bombeamento para irrigação.** Lavras: UFLA, 2008.354P.

GOMES, H. P.. **Sistemas de Irrigação: Eficiência Energética.** 1. ed. João Pessoa: Editora da UFPB, 2013. v. 1. 281p .

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.

KELL, G. S. **Density, thermal expansivity, and compressibility of liquid water from 0.deg. to 150.deg. Correlations and tables for atmospheric pressure and saturation reviewed and expressed on 1968 temperature scale.** *Journal of Chemical & Engineering Data* 1975 20 (1), 97-105. DOI: 10.1021/je60064a005

KSB, 2014- **Catálogo de Bombas Centrífugas-** Disponível em: http://www.ufrj.br/institutos/it/deng/daniel/Downloads/Material/Graduacao/IT%20503/MC_A2740_42_44_4P_E_S_5%5B1%5D.pdf. Acesso em: agosto de 2022.

MACINTYRE, A. J. **Bombas e instalações de bombeamento**. Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1987. 667 p.

MORENO, M.A.; PLANELLS, P.; CÓRCOLES, J.I.; TARJUELO, J.M.; CARRIÓN, P.A. **Development of a new methodology to obtain the characteristic pump curves that minimize the total cost at pumping stations**. Biosyst. Eng. 2008, 102, 95–105.

NETTO, Azevedo; Y FERNÁNDEZ, Miguel Fernández. **Manual de hidráulica**. Editora Blucher, 1998.

NEVES, E.G.C ; MUNCHOW, R. **Eletrotécnica Vol. 1, Capítulo 5**. Disponível em: http://minerva.ufpel.edu.br/~egcneves/biblioteca/caderno_elet/cap_05.pdf. Acesso em: Setembro/2022.

ROSSMAN, L. (2000). **EPANET 2 users manual**. Technical Report EPA/600/R-00/057, U.S. Environmental Protection Agency, National Risk Management Research Laboratory Cincinnati, OH 45268. Disponível em: <http://nepis.epa.gov/Adobe/PDF/P1007WWU.pdf>

VIEIRA, F. N. **Bombas centrífugas: conceitos e operação**. Rio de Janeiro, 2014 48p. Disponível em: <http://www.redebim.dphdm.mar.mil.br/vinculos/000004/0000044a.pdf>