

EFICIÊNCIA ENERGÉTICA NO CONTROLE DA VAZÃO EM SISTEMAS DE BOMBAMENTO DE ÁGUA – USO DE VÁVULA E CONTROLE DE VELOCIDADE.



Autor: João Batista de Azevedo Dutra
Engenheiro Eletricista
Engenharia Elétrica – Consultoria & Treinamento

PARAÍBA DO SUL, AGOSTO DE 2005

AGRADECIMENTOS:

[1] Homero Zacaro Filho

KSB Bombas Hidráulicas S.A. Av. Nilo Peçanha, 50 . Sala 3007 - Rio de Janeiro / RJ -
CEP: 20020-100 - Tel: (21) 2220-2548 - Fax: (21) 2220-4273 - E-Mail: rio@ksb.com.br

[2] Sr. Aurélio Brichesi

BRAUMAT EQUIPAMENTOS HIDRÁULICOS LTDA. - -
Estrada Francisco da Cruz Nunes, 495 • Cantagalo- Niterói-RJ • CEP: 24310-340 -
aurelio@braumat.com.br

[3] Loja das Bombas Ltda

- R Barão do Amazonas, 314 - Centro - Niterói - RJ - Tel: (21) 2622-1171
Representante da DANCOR - Bombas e Filtros S.A

[4] Henrique Bastos Filho – Empreendimentos Imobiliários – R Visconde da Paraíba 97 –
Paraíba do Sul – RJ

Resumo. Este trabalho apresenta um resumo da análise e projeto de sistemas elevatórios de água, abordando suas características básicas, para, a partir desse conhecimento apresentar dois métodos de controle da vazão. Os métodos abordados são o controle de vazão por válvula e controle da vazão pela velocidade da bomba. No primeiro caso, controle por válvula, ficaram evidentes o aumento da energia consumida quando reduzimos a vazão. Ficou evidente, no controle da vazão pela rotação da bomba, a economia significativa de energia elétrica. Os processos para controlar a vazão pela rotação da bomba, como inversores de frequência ou mesmo o uso de motores d'alander não foram abordados, por não serem o objetivo deste trabalho.

1. INTRODUÇÃO

Até meados dos anos 70 o uso da energia não era problema para projetistas e consumidores. A crise do petróleo deu início a necessidade de utilização de formas alternativas energéticas juntamente com a eliminação dos desperdícios e o aumento da eficiência dos equipamentos.

Com a energia elétrica aconteceu o mesmo. No Brasil, com a geração preponderantemente hidrelétrica, pensava-se que isto era sinônimo de uma fartura inesgotável. O tempo mostrou que isto não era verdade. A exploração predatória e descontrolada dos recursos naturais teve como resposta a incapacidade da natureza de repor o que se consome.

Hoje, não somente no Brasil, mas no mundo, a preocupação com o controle da produção energética, aumentando os rendimentos, e a busca por formas alternativas de energia são preocupações constantes.

De fato o aumento dos rendimentos nas transformações energéticas, com a conseqüente redução das perdas, pode ser vista como uma forma de geração virtual e de conseqüências sociais, onde os investimentos em geração podem ser reduzidos e transferidos para a saúde, educação e outros setores sociais. Isto em termos de Países.

Para as empresas os investimentos em eficiência energética traduzem preços competitivos, maior produtividade, ou, até mesmo, decidem a sobrevivência da empresa.

Este trabalho trata especificamente da otimização de consumo de energia elétrica, no controle da vazão, com uso de válvula de retenção ou controle de velocidade da bomba.

Para as empresas do setor de abastecimento de água, em geral empresas públicas, o principal insumo energético é a eletricidade, que representa uma grande fatia de seu custo de produção.

Na maioria das vezes a operação de bombeamento, em sistemas de abastecimento de água, ocorre sem interrupção. Isto mostra que a redução das perdas, com o aumento do

rendimento, proporciona vantagem econômica, pois energia elétrica cobrada depende, não somente, da potência elétrica mas também do número de horas de operação do sistema.

Em geral os acionamentos das bombas são feitos por motores elétricos de indução trifásicos. A explicação para o uso deste tipo de motor esta na sua construção robusta, onde não há o uso de escovas, sendo indicados para sistemas de acionamento contínuo.

Dentre os fatores que contribuem para o custo da energia elétrica, em sistemas de bombeamento, podemos destacar:

1. Ultrapassagem da demanda contratada;
2. Baixo fator de potência, o que leva a cobrança de energia reativa excedente. A energia reativa industrial é cobrada quando o fator de potência fica abaixo de 0,92.
3. Consumo elevado em horários de pico, entre 17:30 h e 20:30 h. Neste intervalo horário e energia chega ao custo de e vezes a tarifa normal;
4. Equipamentos antigos, nos quais ocorre a dificuldade de manutenção e adaptação às normas tecnológicas atuais;
5. Baixo rendimento das instalações de bombeamento, ocasionando maior consumo de energia elétrica.

Para melhor entender as possibilidades de redução das perdas, em sistemas de bombeamento, precisamos conhecer seus elementos básicos e sua operação. A divisão em partes deste estudo, facilita a compreensão do assunto. Estas duas partes interligadas fornecerão o ponto de operação do projeto de bombeamento, sua vazão e altura estática total.

2. PARTES DE UM SISTEMA DE BOMBEAMENTO

1. Sistema elevatório;
2. Estudo do bombeamento ou bomba.

Os elementos do sistema elevatório (figura: 1) ou sistema representam as características físicas encontradas para o transporte da água de um nível para outro, basicamente teremos os seguintes dados a serem levantados:

1. Desnível entre os reservatórios de sucção e de descarga ou recalque;
2. Vazão do sistema;
3. Comprimento e diâmetro da tubulação;
4. Quantidade de acessórios como curvas, joelhos, válvulas etc.

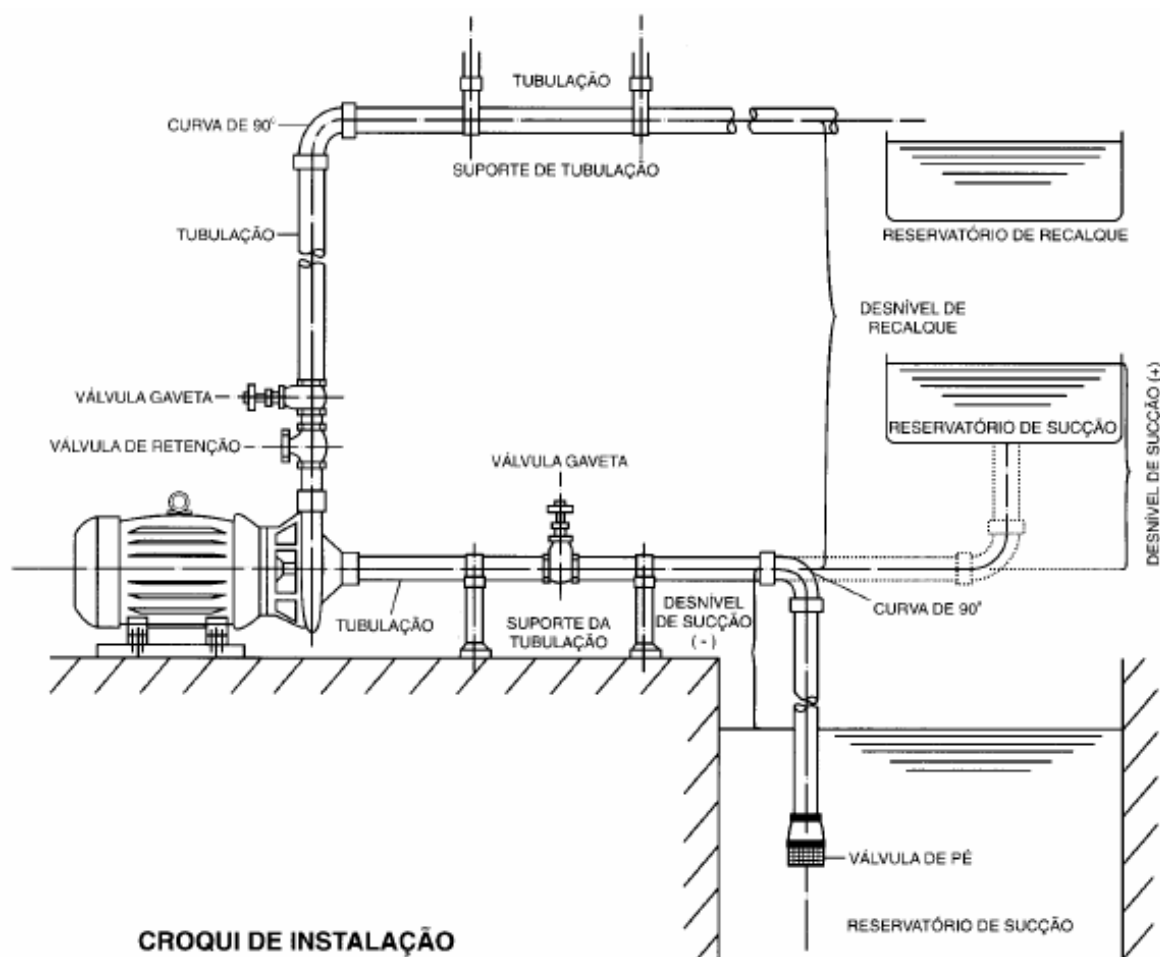


Figura 1 : Componentes básicos de um sistema de bombeamento - Fonte: Manuais KSB

O objetivo do sistema de bombeamento é coletar a água do reservatório inferior, ou reservatório de sucção, e transporta-la até o reservatório superior, ou reservatório de recalque. A função da bomba é fornecer a energia ao líquido, vencendo as resistências do encanamento, seus acessórios e o desnível entre os reservatórios.

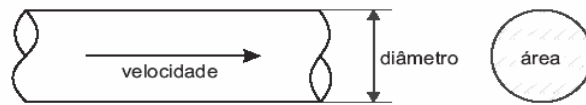
Os parâmetros do projeto são a vazão pretendida e a altura manométrica total do sistema H . A bomba deverá ter a potência necessária para superar o desnível e as resistências da tubulação, alcançando a vazão de projeto.

3. SISTEMA ELEVATÓRIO

O levantamento do desnível entre reservatórios, comprimento da tubulação, diâmetro, quantidade de curvas, joelhos e válvulas nos permite dimensionar o sistema de bombeamento. O desnível entre os reservatórios recebe no nome de altura estática de elevação e sua unidade é o metro (m). Representa a quantidade de energia por unidade de massa que a bomba precisa adicionar ao líquido para uma determinada vazão.

As resistências, ou perdas na tubulação, são proporcionais ao quadrado da velocidade do fluido, sua unidade também é o metro (m). É a energia, por unidade de massa, que o fluido

necessita para vencer as resistências, permitindo, a vazão especificada. A relação entre a velocidade do fluido, área da seção da tubulação e a vazão pode se verificada pela expressão:



$$Q = v \cdot A \rightarrow v = \frac{Q}{A}$$

Q → vazão volumétrica
 v → velocidade do escoamento
 A → área da tubulação
 D → diâmetro interno da tubulação
 π → pi = 3,14...

Logo a curva do sistema é uma parábola do 2º grau, tendo a seguinte representação característica:

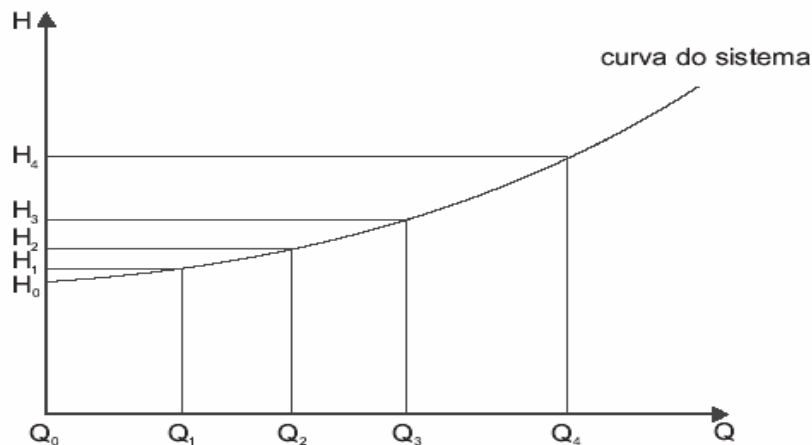


Figura 2: Curva típica de um sistema de recalque – Fonte manuais KSB

Na figura, representação típica de um sistema de bombeamento, as variações da vazão, em m^3/h , $Q_1, Q_2 \dots Q_4$, estão relacionadas às perdas de carga em H_n , em metros, que ocorrem. Note que se não houver resistências na tubulação, então teremos apenas a vazão Q_0 . A altura H_0 é o desnível entre os reservatórios, que apresenta pequenas variações com o nível dos reservatórios de sucção e de descarga.

O levantamento das características do sistema de bombeamento é o ponto de partida para dimensionar o tipo de bomba e a potência do motor do acionamento.

4. CARACTERÍSTICAS DA BOMBA

Agora analisaremos a curva típica da bomba, envolvendo as perdas de carga a ser vencida e a vazão resultante da energia fornecida ao fluido, no caso a água. A curva $H \times Q$, da bomba, que descreve seu comportamento, para a vazão Q_n e a altura manométrica total H_n . A altura manométrica total H , é a carga total que a bomba precisa vencer para obter vazão Q .

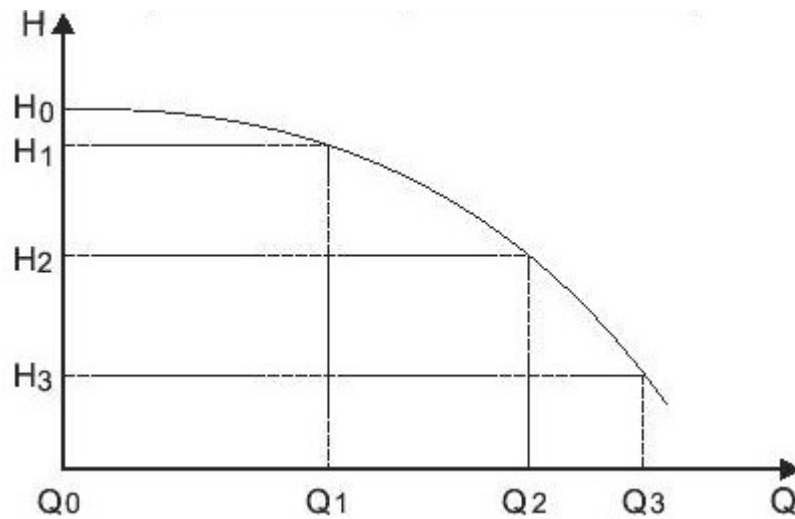


Figura3: Curva vazão Q e perda de carga H da bomba – Fonte Manuais KSB

Podemos notar que com o aumento da vazão a perda de carga que a bomba pode vencer diminui, ou seja são parâmetros inversamente proporcionais. Isto quer dizer que a energia cedida ao fluido, pela bomba, pode vencer uma resistência menor quando aumentamos a vazão.

4.1 RENDIMENTO DA BOMBA

A bomba é um dispositivo que tem a função de transformar a energia mecânica no seu eixo em energia hidráulica cedida ao fluido. Como todo o processo de transformação energética existem as perdas, ou seja nem toda energia mecânica é transformada em energia hidráulica. O rendimento da bomba é a relação entre a potência mecânica, fornecida a bomba pelo motor, e a potência hidráulica cedida ao fluido.

Rendimento da bomba = η

$$\eta = \frac{\text{Potência hidráulica}}{\text{Potência consumida}} \longrightarrow \eta = \frac{Ph}{P}$$

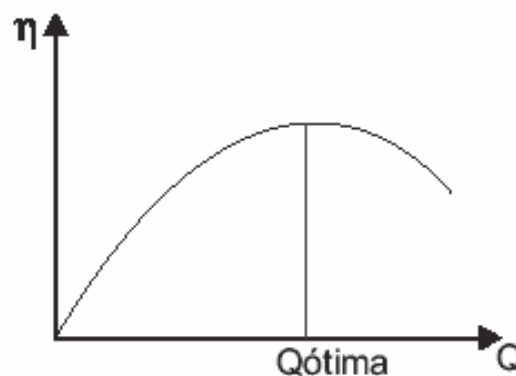


Figura 4: Curva do rendimento e Vazão, da bomba

Notamos a ocorrência de um rendimento máximo, a partir do qual o aumento da vazão decresce o rendimento. Ou seja a partir deste ponto a energia mecânica cedida a bomba é cada vez menos transformada em energia hidráulica e as perdas aumentam.

4.2 POTÊNCIA HIDRÁULICA

$$P_h = \frac{\gamma \cdot Q \cdot H}{270}$$

Ph = potência hidráulica, em CV
 γ = peso específico do fluido, em kgf/ L
 Q = vazão, em m³ /h
 H = altura manométrica, em m
 270 = fator de conversão

4.3 POTÊNCIA CONSUMIDA PELA BOMBA

Para calcularmos a potência consumida, ou potência mecânica fornecida a bomba pelo motor, basta conhecer o rendimento da bomba, para as condições de vazão (Q) e altura manométrica (H). Os fabricantes fornecem as curvas características da bomba, onde encontramos o rendimento e a potência consumida.

$$P = \frac{\gamma \cdot Q \cdot H}{270 \cdot \eta}$$

5. RENDIMENTO MOTOR BOMBA

Como já mencionado, nem toda potência mecânica fornecida a bomba pelo motor se transforma em potência hidráulica. O mesmo acontece com o motor elétrico que aciona a bomba. O motor elétrico tem a função de transformar a energia elétrica em energia mecânica. O rendimento do motor elétrico é a relação entre a potência elétrica consumida e a potência mecânica no seu eixo, geralmente em Kilowatts (KW) e Cavalos (CV) .

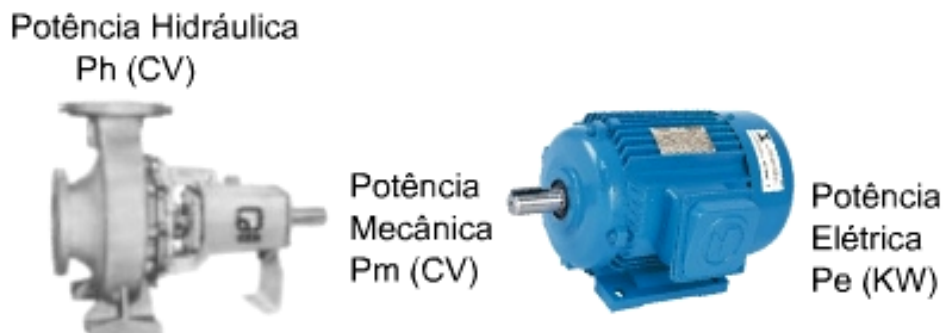


Figura 5: Transformação energética no conjunto motor bomba.

Rendimento total motor – bomba pode ser determinado conforme as relações dos rendimentos do motor e da bomba.

$$\eta_m = \frac{P_m}{P_e} \text{ (Rendimento do motor)} \quad \eta_b = \frac{P_h}{P_m} \text{ (Rendimento da bomba)}$$

$$\eta_m \cdot \eta_b = \frac{P_h}{P_e} \text{ (Rendimento motor-bomba)}$$

O rendimento total do conjunto motor-bomba é o produto do rendimento do motor e da bomba.

6. RENDIMENTO DO MOTOR TRIFÁSICO

A transformação da energia elétrica em energia mecânica, no motor de indução trifásico, varia com a carga mecânica em seu eixo. Ou seja o rendimento do motor varia com a potência de saída. Com o motor operando abaixo de 50% de sua carga nominal as perdas aumentam bruscamente e o rendimento também diminui bruscamente.

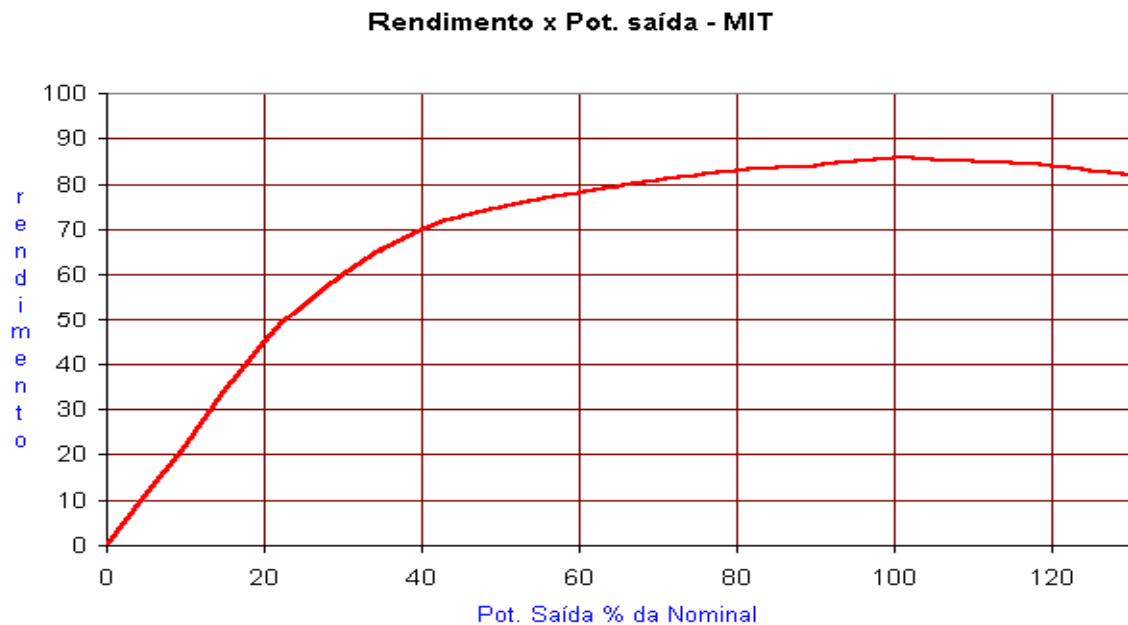


Figura 6: Rendimento do motor de indução e potência de saída

Tabela 1: Faixa de operação do motor e o rendimento

CARGA NO EIXO DO MOTOR	CONDIÇÃO DO RENDIMENTO
Abaixo de 50% da Potência Nominal	Aumento acentuado das perdas
Entre 50% a 75% da Potência nominal	Pouca variação do rendimento
Entre 75% a 100% da potência nominal	Rendimento próximo ao nominal
Acima de 100% da potência nominal	SOBRECARGA, com queda do rendimento

Na medida em que a carga do motor diminui, em relação carga nominal, as perdas elétricas $R \cdot I^2$ aumentam pois o fator de potência do motor diminui. Isto significa que a corrente aumenta provocando o aumento das perdas elétricas. O fator de potência de um motor sem carga, a vazio, pode chegar a 0,25.

Concluimos então que motores superdimensionados ou sem carga representam desperdício de energia elétrica.

7. CURVAS DA BOMBA FORNECIDAS PELO FRABRICANTE:

Em geral os fabricantes fornecem as características da bomba, como o rendimento e potência absorvida, representados em curvas. São famílias de curvas que variam pelo diâmetro do rotor da bomba. A partir do rendimento podemos calcular a potência consumida pela bomba ou, na curva da potência consumida, obtemos essa potência diretamente.

KSB Meganorm 80 - 250 - IV pólos (1750 rpm)

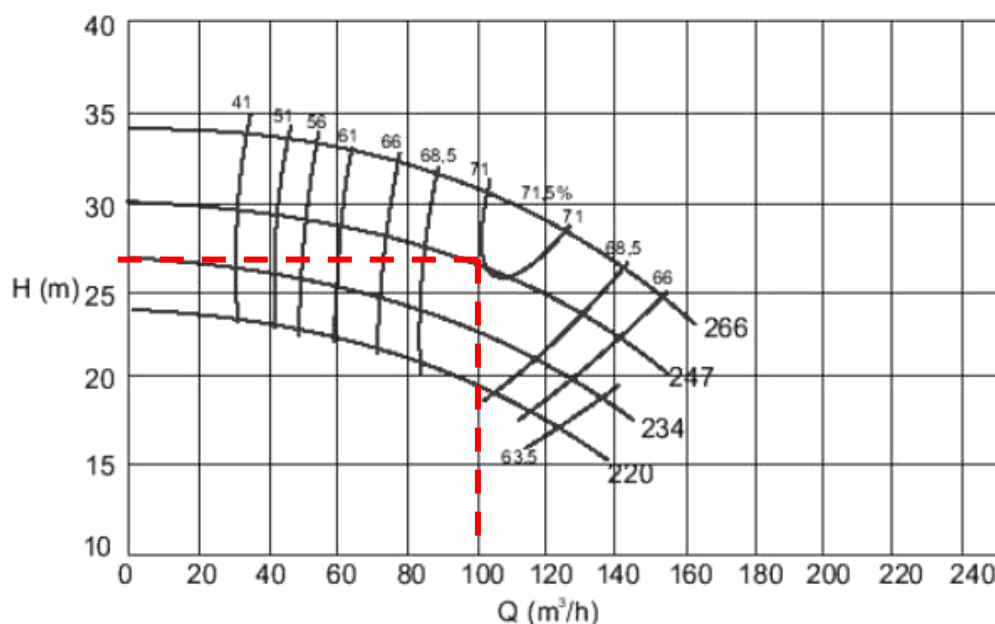


Figura 7: Curva de iso rendimento da bomba – Diâmetro do rotor de 247 mm

Na curva de rendimento, figura 7, com rotor de 247 mm de diâmetro, para uma vazão de $100 \text{ m}^3/\text{h}$, a bomba pode vencer uma perda de carga de 27 m, com rendimento de 70%. A potência consumida em CV, será:

$$P = \frac{\gamma \times Q \times H}{270 \times \eta}$$

Portanto $P = \frac{1 \times 100 \times 27}{270 \times 0,70} = 14,28 \text{ CV}$ (Potência consumida para a vazão de $100 \text{ m}^3/\text{h}$,

Obtida, a partir da curva de rendimento da bomba)

Este resultado também poderá ser obtido diretamente na curva de potência consumida.

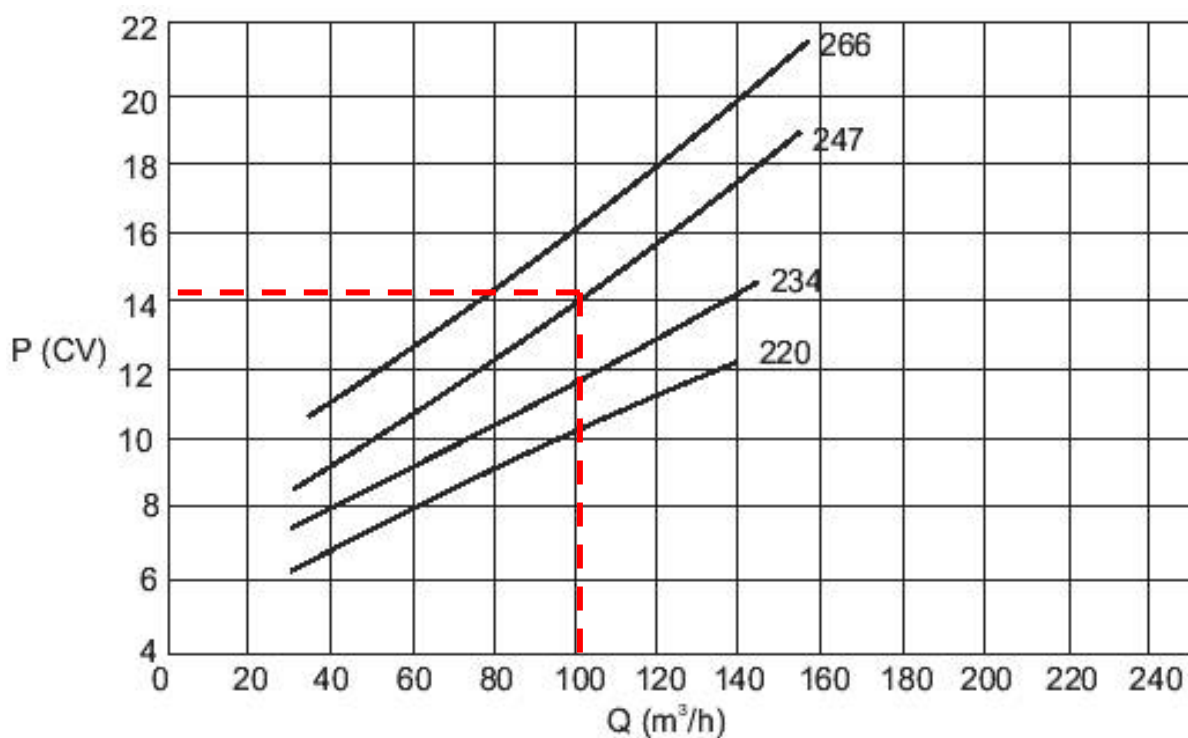


Figura 8: Curva da potência consumida e vazão – Rotor com 247 mm de diâmetro

Na figura 8, potência consumida e vazão, com diâmetro do rotor de 247 mm e vazão de $100 \text{ m}^3/\text{h}$, a potência consumida pela bomba será de 14 CV. Este resultado é muito próximo ao do valor calculado com a curva de rendimentos

8. PONTO DE OPERAÇÃO DO SISTEMA E DA BOMBA

Considerando as características do sistema e da bomba, representadas por suas curvas, o ponto de operação do bombeamento será a interseção das duas curvas. Neste ponto a bomba cede energia ao fluido para vencer a altura H (m) com a vazão Q (m^3/h).

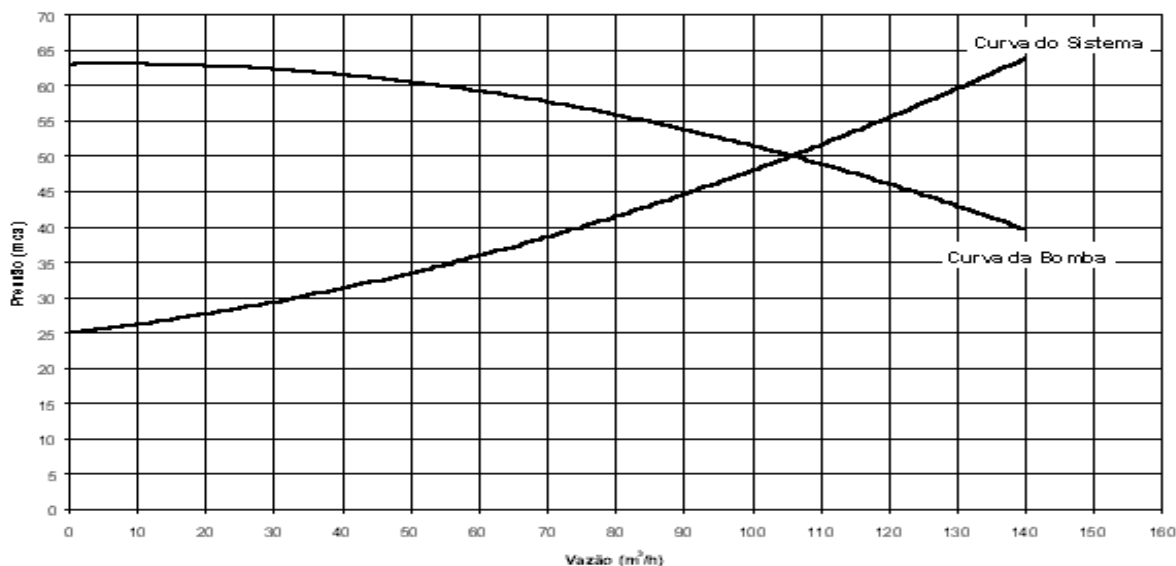


Figura 9: Ponto de operação sistema bomba

Para o bombeamento representado pelas curvas do sistema x curva da bomba, O ponto de interseção é a vazão $Q = 105 m^3/h$ e altura manométrica $H = 50 m$.

9. CONTROLE DA VAZÃO

O controle da vazão pode-se dar por dois processos basicamente, existindo outras alternativas não muito usuais. Os métodos mais usados são:

1. Controle da vazão por válvula de estrangulamento;
2. Controle da rotação da bomba.

Existem outras possibilidades de controlar a vazão como a recirculação ou a mudança do diâmetro do rotor da bomba

9.1 CONTROLE DA VAZÃO POR VÁLVULA

Inicialmente vejamos os fatores que alteram a curva característica do sistema:

1. Natureza do líquido bombeado (peso específico, densidade);
2. Temperatura do líquido;
3. Variação da altura estática;
4. Pressão dos reservatórios de sucção e descarga;
5. Características ou alterações na tubulação ou acessório.

No processo de controle da vazão, após a saída da bomba, inserimos uma válvula, cuja função é alterar a vazão pela redução do diâmetro e conseqüente aumento da resistência, na curva do sistema. A rotação da bomba fica inalterada e a potência consumida aumenta para suprir o aumento de carga.

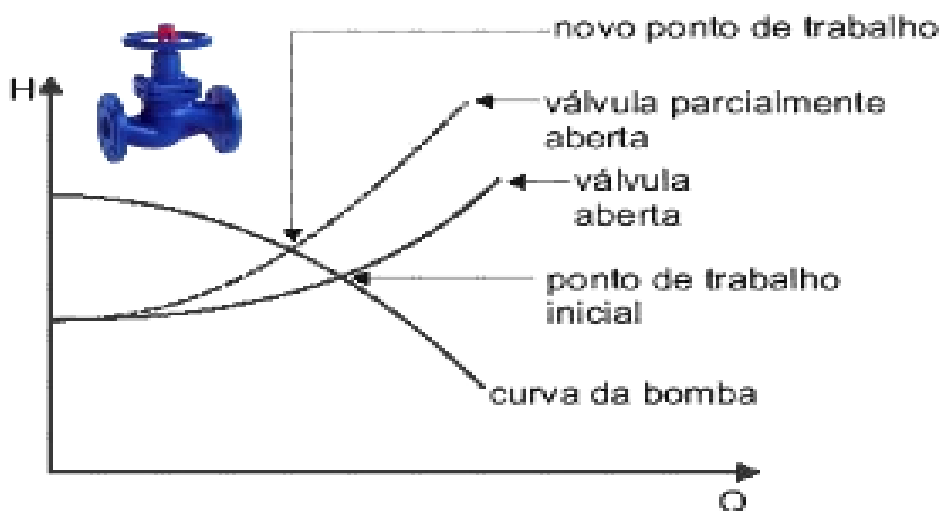


Figura 10: Controle da vazão por válvula

Merece destaque, observando as curvas da bomba e do sistema, que ocorre mudança apenas no sistema, pelo aumento da carga, representada pela altura H_f . A vazão inicial Q_i varia até o novo ponto de trabalho Q_f e a altura H_i varia até H_n . A diferença $H_f - H_i$, representa o aumento de carga e conseqüente aumento de potência consumida pela bomba. O processo resulta num aumento da energia consumida pela bomba para o controle da vazão.

9.2 CONTROLE DA VAZÃO PELA ROTAÇÃO DA BOMBA

As modificações da curva da bomba são obtidas de dois modos mais usuais:

1. Variar a rotação da bomba N (RPM);
2. Variar o diâmetro do rotor da bomba.

Na medida em que a rotação da bomba varia surge um conjunto de curvas paralelas, que representam a operação da bomba para a velocidade resultante daquela rotação. Isto em nada afeta a curva do sistema.

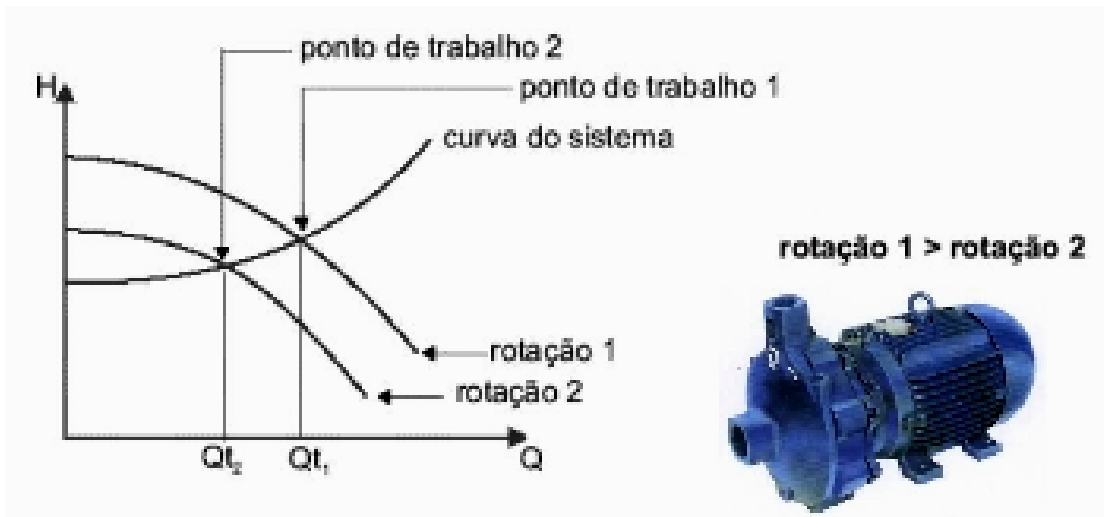


Figura 11: mudança de rotação na curva da bomba

Observamos que não há acréscimo na a perda de carga representada pela altura H. Ao contrário, a resistência para a vazão Q_2 é menor.

Existe uma relação de proporcionalidade entre a rotação N, da bomba, a vazão (Q), altura manométrica total (H) e a potência consumida pela bomba.

10. RELAÇÕES ENTRE A VAZÃO (Q), ALTURA MANOMÉTRICA TOTAL (H) E POTÊNCIA ABSORVIDA (H) E A ROTAÇÃO DA BOMBA (N)

$$\frac{Q}{Q_1} = \frac{N}{N_1}$$

A rotação é diretamente proporcional à rotação

$$\frac{P}{P_1} = \left(\frac{N}{N_1} \right)^3$$

A potência consumida é proporcional ao cubo da rotação

$$\frac{H}{H_1} = \left(\frac{N}{N_1} \right)^2$$

A perda de carga é proporcional ao quadrado da rotação

10.1 POTÊNCIA CONSUMIDA E A VELOCIDADE

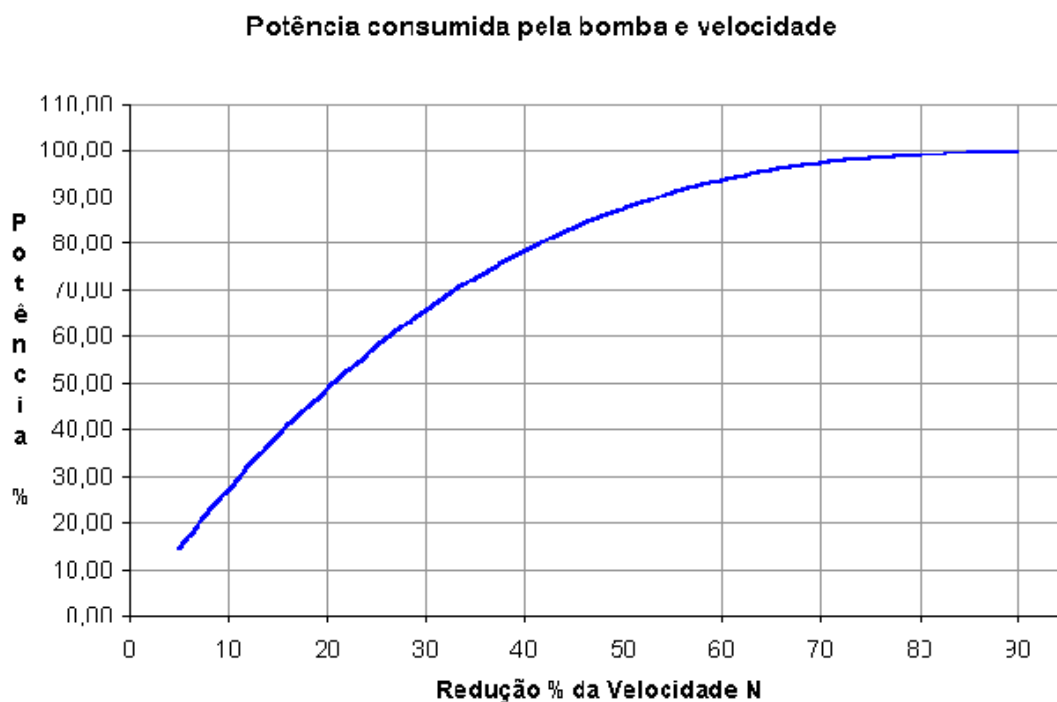


Figura 12: Potência consumida pela bomba e variação da velocidade

A potência consumida pela bomba varia com o cubo da rotação, afetando o motor que aciona a bomba em seu rendimento. Quanto menor a rotação menor a potência no eixo da bomba e menor a potência de saída do motor.

Tabela 2: Redução da velocidade da bomba e potência consumida

Velocidade N %	Potência P%
5	14,26
10	27,10
15	38,59
20	48,80
25	57,81
30	65,70
35	72,54
40	78,40
45	83,36
50	87,50

Uma redução de 10% na velocidade da bomba acarreta uma diminuição de 27% na potência consumida pela bomba. A vazão, diretamente proporcional à velocidade teria a mesma redução percentual da velocidade, 10%.

11. EXEMPLO

Um sistema elevatório com vazão nominal de $100 \text{ m}^3 / \text{h}$, necessita operar com a metade de sua vazão nominal. Calcule a diferença de consumo de energia elétrica, com o emprego de válvula de retenção ou com controle da velocidade, com os seguintes dados complementares:

1. Horas ano de funcionamento = 2500 hs/ano
2. Desnível entre os reservatórios = 25 m
3. Tarifa de energia elétrica = R\$ 120,00/ MWh
4. Peso específico da água = Kgf/ L
5. $1 \text{ CV} = 0,736 \text{ Watts}$
6. Rendimento do motor :

Motor de 30 CV – 3530 RPM nominais: dados do fabricante		
Controle da vazão	Carga do motor	Rendimento (%)
1 – Uso da válvula	Carga 75% da nominal	91,90
2 – Redução da velocidade	Carga 50% da nominal	90,0
Valor médio do rendimento adotado para o motor = 91,00 %		

$$P_h = \frac{\gamma \cdot Q \cdot H}{270}$$

Potência hidráulica:

Representação do controle da vazão pelos dois processos:

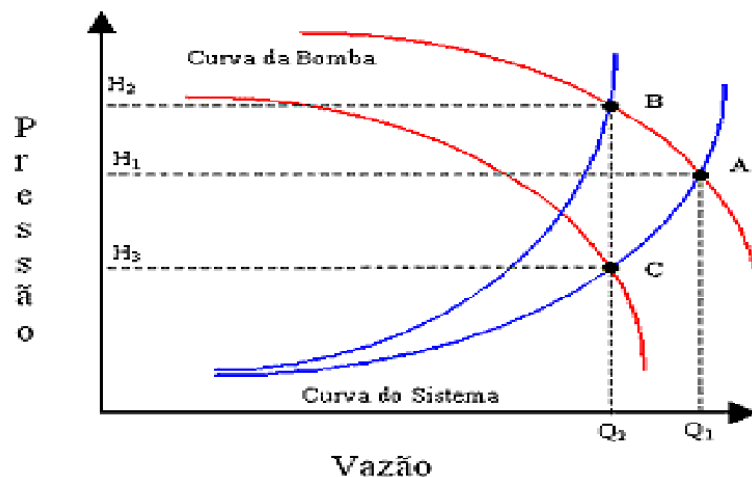


Figura 13: Redução da vazão por válvula e pela velocidade

A figura 11 representa os dois processos de controle. A vazão varia de Q_1 até Q_2 .

Redução da vazão com uso da válvula:

As curvas em azul representam o uso da válvula. Neste caso o ponto de operação passa de A para B e a vazão Q_1 diminui até o valor Q_2 . A curva da bomba não é alterada e o aumento da carga é a diferença de altura manométrica $H_2 - H_1$.

Mudança na rotação da bomba:

A curva em vermelho representa a mudança na rotação da bomba. A curva do sistema, em azul, não sofre alteração. Com a redução da velocidade, o ponto de operação passa do ponto A para o ponto C, onde a vazão diminui de Q_1 para Q_2 . A redução da carga está representada pela diferença de alturas manométricas $H_1 - H_3$.

A diferença de perda de carga, e conseqüente consumo de energia, entre os dois métodos de redução da vazão é a diferença entre as alturas $H_2 - H_3$.

Energia consumida com o uso da válvula: Dados retirados de curvas do fabricante							
Ponto	Q (m ³ /h)	H (m)	P _h (m)	η_b	P _m (CV)	P _e (KW)	
A	100	52	19,26	80,00	24,08	19,47	
B	50	61	11,30	69,00	16,38	13,25	

Energia consumida com a mudança de rotação: Dados retirados de curvas do fabricante							
Ponto	Q (m ³ /h)	H (m)	P _h (m)	η_b (%)	P _m (CV)	P _e (KW)	
A	100	52	19,26	80,00	24,08	19,47	
C	50	33	6,11	75,00	8,15	6,60	

Diferença de consumo para 2500 horas/ano

$$E = (13,25 - 6,60) \times 2500 = 16625 \text{ KWh}$$

Ou seja, teremos uma redução no consumo de 50%

12. CONCLUSÃO

A otimização do consumo de energia elétrica em sistemas de bombeamento hidráulico, passa primeiramente , pelo estudo das características do sistema de elevatório. Ou seja, as cotas de elevação, tubulações e acessórios.

Os demais parâmetros como a vazão de projeto e horas de horas de utilização da bomba, são elementos que indicarão o tipo de bomba e os custos de operação do sistema completo. Em resumo temos os seguintes aspectos a observar:

1. Dimensionar as tubulações de modo a reduzir as perdas de carga;
2. Especificar a bomba para operar próximo ao rendimento máximo;
3. Evitar o super dimensionamento do motor;
4. Para o controle da vazão não usar válvula;

Levando em conta a vazão e perdas de carga do projeto, a bomba a ser especificada deverá operar nas proximidades de seu rendimento máximo. O motor , que tem como carga à potência consumida pela bomba, deverá trabalhar na região de pouca variação de seu rendimento, entre 75% a 100% de sua carga nominal.

O bom desempenho do sistema motor bomba, otimizando o rendimento de ambos, acarretará o resultado esperado , como a redução do consumo de energia elétrica do sistema completo.

O controle de vazão por meio de válvula deve ser evitado, pois aumenta a carga da bomba e o consumo de energia elétrica. Por analogia, é o que ocorre quando controlamos a intensidade luminosa de uma lâmpada incandescente com resistor em série.

13. REFERÊNCIAS

- [1] Matos, Edson Ezequiel.: Bombas Industriais, 2ª edição, Rio de Janeiro: Interciência, 1998.
- [2] KSB, Bombas Hidráulicas S.A. , Catálogo Eletrônico , Versão 1.1, Várzea Paulista (SP), 2000.
- [3] Filipo Filho, Guilherme.: Motor de Indução, São Paulo: Érica, 2000.
- [4] DANCOR, Bombas e Filtros S. A . , Catálogo, Campo Grande (RJ), 1999

14. Sobre o autor:

João Batista de Azevedo Dutra – Av Bento Gonçalves Pereira 530 – Paraíba do Sul – RJ
 CEP 25850-000 – Tel (24) 22631150
 e-mail: eng.joao@uol.com.br - HOME : www.webeficienciaenergetica.kit.net