

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA**  
**FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA**  
**CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA – SISTEMAS DE POTÊNCIA**

**JUSTRIANO XIMENES DE OLIVEIRA**

**ECONOMIA DE ENERGIA ELÉTRICA DE UM SISTEMA DE BOMBEAMENTO  
TIPICAMENTE INDUSTRIAL**

**Uberlândia**  
**Dezembro de 2020**

**JUSTRIANO XIMENES DE OLIVEIRA**

**ECONOMIA DE ENERGIA ELÉTRICA DE UM SISTEMA DE BOMBEAMENTO  
TIPICAMENTE INDUSTRIAL**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao  
Curso de Engenharia Elétrica da Universidade  
Federal de Uberlândia como requisito à obtenção  
do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Antonio Carlos Delaiba

---

Assinatura do orientador

**JUSTRIANO XIMENES DE OLIVEIRA**

**ECONOMIA DE ENERGIA ELÉTRICA DE UM SISTEMA DE BOMBEAMENTO  
TIPICAMENTE INDUSTRIAL**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao  
Curso de Engenharia Elétrica da Universidade  
Federal de Uberlândia como requisito à obtenção  
do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

**Banca examinadora**

---

Prof. Dr. Antonio Carlos Delaiba

---

Prof. Dr. Sérgio Ferreira de Paula e Silva

---

Prof. Dr. Helder de Paula

Dedico este trabalho de conclusão de curso para meus pais Justino Ximenes, Sebastiana da Costa e aos meus três irmãos, meus avós e todas as famílias.

## AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, dou graças à Deus, por ajudar-me a ultrapassar os obstáculos enfrentados ao longo do meu trabalho.

Aos Meus pais, Justino e Sebastiana, que sempre me motivaram durante a minha formação pessoal e profissional.

Aos meus irmãos Egildo, Ralia e Fernanda, que me incentivaram para ser uma pessoa melhor e compreensiva.

Aos meus dezoito amigos Timorenses, vocês como primeira família no texto da nossa cultura e sempre me inspiraram.

Os meus amigos Diogo, Masete, João e os outros amigos que não mencionam os seus nomes, vocês são minha segunda família e sempre me motivaram e me inspiraram nos momentos difíceis.

Ao meu orientador Prof. Dr. António Carlos Delaiba, pelos conselhos, paciência e a sua ajuda na correção desse trabalho.

A Universidade Federal de Uberlândia (UFU) e a Faculdade de Engenharia Elétrica (FEELT) pela oportunidade da conclusão de minha graduação

Ao Ministério da Educação através do ministério do ensino superior, que financiou os meus estudos desde o seu início até a etapa final.

*Sofrendo é a chave do sucesso.*

*Autor desconhecido*

## RESUMO

Sabe-se que, no meio industrial, o consumo de energia elétrica corresponde a uma alta parcela das despesas anuais. Sendo assim, um estudo que otimiza o processo industrial, reduzindo os custos com a energia elétrica, se mostra extremamente importante. Neste cenário, este trabalho terá como principal objetivo a realização de uma análise financeira da troca de um sistema de bombeamento acionado por um motor IR1 (linha padrão ou convencional) e operando com controle de vazão via válvulas de estrangulamento, por um sistema de bombeamento acionado por um motor IR2 (alto rendimento) que realiza o controle de vazão através de conversores de frequência. Essa análise financeira leva em conta o custo de todos os equipamentos novos a serem adquiridos, a economia anual gerada pela troca dos sistemas, bem como o tempo de vida útil de cada equipamento utilizado. Para isso, fez-se a análise para dois casos: Primeiramente, para um caso hipotético, e posteriormente, outra análise para motores e equipamentos reais disponíveis no Laboratório de Eficiência Energética da Universidade Federal de Uberlândia (LEFE-UFU). Os resultados obtidos foram satisfatórios, uma vez que apontaram uma economia anual da ordem de até 60% da conta de energia elétrica. Portanto, mais uma vez salienta-se a importância deste trabalho, pois, além de apresentar uma grande oportunidade de economia ao processo industrial, também possui um viés sustentável, uma vez que o sistema proposto apresenta menor consumo energético.

**Palavras-chave:** Sistemas de Bombeamento, Conversor de Frequência, Válvula de Estrangulamento, Economia, Sustentabilidade.

## ABSTRACT

It is known that, in the industrial environment, electricity consumption corresponds to a high share of annual expenses. Therefore, a study that optimizes the industrial process, reducing electricity costs, is extremely important. In this scenario, this work will have as main objective the realization of a financial analysis of the exchange of a pumping system driven by an IR1 engine (standard or conventional line) and operating with flow control via throttle valves, for a pumping system driven by an IR2 motor (high performance) that controls the flow through frequency converters. This financial analysis takes into account the cost of all new equipment to be purchased, the annual savings generated by the replacement of the systems, as well as the useful life of each equipment used. For this, the analysis was made for two cases: First, for a hypothetical case, and later, another analysis for real engines and equipment available at the Energy Efficiency Laboratory of the Federal University of Uberlândia (LEFE-UFU). The results obtained were satisfactory, since they indicated an annual savings of up to 60% of the electric bill. Therefore, once again the importance of this work is emphasized, because, in addition to presenting a great opportunity for saving the industrial process, it also has a sustainable bias, since the proposed system presents less energy consumption.

**Keywords:** Pumping Systems, Frequency Converter, Choke Valve, Economy, Sustainability.

## LISTAS DAS FIGURAS

Figura 2.1-Conjunto de moto-bomba .....	19
Figura 3.1:Bomba instalada em cima do nível de reservatorio inferior .....	22
Figura 3.2: Bomba instalada em baixo do nível de reservatorio inferior .....	23
Figura 3.3: Conjunto típica do sistema de bombeamento da água .....	24
Figura 3.4: Bombas associadas em série .....	28
Figura 3.5: Curva caraterística.....	29
Figura 3.6: Bombas associadas em paralelo .....	30
Figura 3.7: Curva caraterística.....	30
Figura 3.8: Variação de rotação variara também a curva característica .....	32
Figura 3.9: A curva do sistema.....	33
Figura 3.10: Plotar a curva do sistema .....	34
Figura 3.11: Tipos das curvas características .....	35
Figura 3.12:Curva característica QxH.....	36
Figura 3.13:Curva característica QxP.....	36
Figura 3.14:Curva característica Qx $\eta$ .....	37
Figura 3.15: Controle da vazão por meio de válvulas de estrangulamento .....	38
Figura 3.16: Análise qualitativa da potência consumida em diferentes pontos de operação utilizando válvulas de estrangulamento para o controle da vazão .....	39
Figura 3.17: Influência da variação da rotação na curva característica da bomba .....	39
Figura 3.18: Análise qualitativa da potência consumida em diferentes pontos de operação utilizando variação da velocidade de rotação para o controle da vazão .....	40
Figura 3.19: Comparação qualitativa do consumo da potência gasta para operação ao utilizar métodos diferentes no controle da vazão.....	41
Figura 5.1: Pontos de operação com válvula de estrangulamento.....	46
Figura 5.2: Pontos de operação com conversor de frequência .....	47
Figura 6.1: Bancada do laboratório .....	50
Figura 6.2: Válvula de estrangulamento.....	51
Figura 6.3: Motores de indução trifásico da linha padrão e de alto rendimento .....	52
Figura 6.4: Vista interna do painel .....	54
Figura 6.5: Conversor de frequência .....	55
Figura 6.6: Painel de controle.....	55

Figura 6.7: Tela inicial do sistema supervisório.....	56
Figura 6.8: Tela de escolha sistemas industriais disponíveis .....	56
Figura 6.9: Bancada da bomba centrífuga .....	57
Figura 6.10: Tela dos comandos.....	57
Figura 6.11: Tela de PID .....	58
Figura 6.12: Histórica de medições .....	59
Figura 6.13: Pontos da válvula de estrangulamento .....	61
Figura 6.14: Pontos de conversor de frequência.....	61
Figura 6.15: Curva característica da bomba .....	62
Figura 6.16: Curva característica do sistema.....	62
Figura 6.17: Curva característica do motor .....	63
Figura 6.18: Curva característica da potência com a válvula de estrangulamento.....	64
Figura 6.19: Curva característica do rendimento da bomba.....	65
Figura 6.20: Curva característica da potência com conversor de frequência .....	66
Figura 6.21: Curva característica do rendimento com conversor de frequência .....	66
Figura 6.22: Curva característica da pressão em função da frequência.....	67
Figura 6.23: Curva característica da frequência com a vazão .....	68
Figura 7.1: Evolução dos motores elétricos.....	73

## LISTAS DAS TABELAS

Tabela 3.1: Valor de “C” .....	26
Tabela 2.2: Valor de “K” .....	27
Tabela 5.1: Ciclos de trabalho .....	45
Tabela 5.1: Resultados da operação com válvulas de estrangulamento e motor IR1 .....	47
Tabela 5.3: Resultados da operação com válvulas de estrangulamento e motor IR2 .....	48
Tabela 5.4: Resultados da operação com conversor de frequência e motor IR1 .....	48
Tabela 5.5: Resultados da operação com conversor de frequência e motor IR2 .....	48
Tabela 6.1: Valores medidos com válvula de estrangulamento .....	60
Tabela 6.2: Valores medidos com conversor de frequência .....	60
Tabela 6.3: Valores calculados com válvula de estrangulamento .....	64
Tabela 6.4: Valores calculados com conversor de frequência .....	65
Tabela 6.5: Válvula de estrangulamento .....	68
Tabela 6.6: Conversor de frequência .....	69

## LISTA DAS ABREVIACÕES

$\rho$	Massa específica
$\gamma$	Peso específica
$p$	Pressão
$Q$	Vazão
$V$	Volume
$t$	Tempo
$h_p$	Perda de carga distribuída
$L$	Comprimento da tubulação
$C$	Estado de conservação das paredes internas da tubulação
$D$	Diâmetro
$h_L$	Perda de carga localizada
$K$	Coefficiente da perda de carga localizada
$g$	Gravidade
$P_H$	Potência hidráulica
$P_{EB}$	Potência no eixo da bomba
$P_{EM}$	Potência no eixo do motor
$P_E$	Potência elétrica
$\eta_B$	Rendimento da bomba
$\eta_M$	Rendimento do motor
$\eta_{AC}$	Rendimento do acoplamento
$W$	Watt
$CV$	Cavalo vapor
$C$	Consumo energético
$MWh$	Megawatt hora
$H$	Altura manométrica total
$H_G$	Altura estática ou geométrica
$h_v$	Carga de velocidade

$Z_s$	Altura geométrica de sucção
$Z_D$	Altura geométrica de descarga
$h_D$	Perda de carga total na descarga
$h_S$	Perda de carga total na sucção
$n$	Rotação(velocidade)
$m$	Metro
$t_{RS}$	Tempo de retorno simples
$\Delta C$	Custo de investimento
$Eco_{RS}$	Economia em mensal ou anual
$t_{RC}$	Tempo de retorno capitalizado
$i$	Taxa de juros em porcentagem
$i_L$	Taxa líquida de juros em porcentagem
$i_e$	Taxa do aumento do custo energia em porcentagem
$V_U$	Vida útil do equipamento em anos.
$m^3$	Metro ao cubo
$s$	Segundos
$mca$	Metro de coluna de água
$h$	Hora
$RPM$	Rotação por minuto
$l$	Litros
$G$	Gravidade
$Eco_{VU}$	Energia economizada ao longo da vida útil
$Eco_{Ano}$	Energia economizada anualmente
$P$	Pressão
$F$	Força
$A$	Área

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>16</b>
1.1. Considerações Iniciais .....	16
1.2. Objetivos .....	16
1.3. Motivação .....	17
1.4. Dificuldades encontradas no desenvolvimento deste trabalho .....	17
1.5. Estrutura do trabalho.....	17
<b>2. CONCEITOS BÁSICOS.....</b>	<b>19</b>
2.1. Cálculo dos fluxos de Potências envolvidas nos sistemas de bombeamentos .....	19
<b>3. SISTEMAS DE BOMBEAMENTO .....</b>	<b>22</b>
3.1. Característica do sistema de bombeamento .....	22
3.2. Alturas manométricas .....	23
3.3. Perda de carga .....	25
3.4. Associação das bombas .....	28
3.4.1. Associação em série.....	28
3.4.2. Associação em paralelo .....	29
3.5. Leis de similaridade .....	31
3.6. As curvas características .....	32
3.6.1. A curva do sistema hidráulico .....	32
3.6.2. A curva da bomba.....	34
3.7. Tipos das curvas.....	34
3.8. Três curvas características típicas de bombas.....	35
3.8.1. Vazão x altura manométrica .....	35
3.8.2. Vazão x potencia .....	36
3.8.3. Vazão x rendimento.....	37
3.9. Métodos de controle de vazão.....	37
3.9.1. Controle da vazão por válvula de estrangulamento.....	37
3.9.2. Controle da vazão pela variação da velocidade da rotação .....	39
3.9.3. Comparação entre os métodos de controle da vazão: variação da rotação e válvula de estrangulamento .....	40
<b>4. ANÁLISE FINANCEIRA.....</b>	<b>42</b>

4.1.	Introdução .....	42
4.2.	Tempo de retorno simples.....	42
4.3.	Tempo de retorno capitalizado .....	42
4.4.	Vida útil de um equipamento.....	43
4.5.	Energia economizada ao logo da vida útil do equipamento .....	44
<b>5.</b>	<b>EXEMPLO DE APLICAÇÃO .....</b>	<b>45</b>
5.1.	Exemplo .....	45
5.2.	Considerações Finais .....	49
<b>6.</b>	<b>ENSAIOS EXPERIMENTAIS.....</b>	<b>50</b>
6.1.	Descrição da bancada do sistema de bombeamento do laboratório de eficiência energética da FEELT-UFU.....	50
6.2.	Etapas para iniciar a realização experimental.....	55
6.3.	Análise dos resultados .....	59
6.3.1.	Caso 1 – Válvula de estrangulamento .....	59
6.3.2.	Caso 2- Conversor de frequência.....	60
6.3.3.	Levantamento da curva da bomba e do sistema .....	60
6.3.4.	Obtenção do rendimento da bomba, utilizando-se a válvula de estrangulamento 63	
6.3.5.	Obtenção do Rendimento da bomba, utilizando-se o conversor de frequência..	65
6.4.	Análise financeira .....	68
<b>7.</b>	<b>ÍNDICE DE RENDIMENTO DOS MOTORES ELÉTRICOS .....</b>	<b>72</b>
7.1.	Consideração iniciais .....	72
7.2.	Evolução de índice do rendimento.....	72
<b>8.</b>	<b>CONCLUSÕES FINAIS .....</b>	<b>74</b>
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>75</b>
	<b>ANEXOS UTILIZADOS NO TRABALHO .....</b>	<b>77</b>

# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1. Considerações Iniciais

O sistema de bombeamento é a conversão da energia mecânica em hidráulica para transportar os líquidos de um reservatório inferior para o reservatório superior através de um conjunto de moto-bomba. O sistema é composto basicamente pelos reservatórios, um conjunto de moto-bomba e com os acessórios tais como: tubulações, válvulas e os outros componentes necessários para o abastecimento de água.

Neste trabalho o foco principal é de controlar as vazões através de dois métodos. Primeiramente o controle de vazão é realizado utilizando-se das válvulas de estrangulamento. Posteriormente, o controle de vazão é realizado com a utilização de conversores de frequência o qual irá proporcionar uma grande economia de energia elétrica. Dentro deste contexto, a expectativa deste trabalho é atender às seguintes contribuições (FERREIRA, 2007):

- Conhecer o comportamento da carga mecânica e sua resposta às variações de velocidade;
- Aplicação de uma metodologia de ensaio de eficiência energética a sistemas de bombeamento;
- Apresentação e aplicação do controle da vazão, baseando-se na variação da velocidade de rotação;
- Análise do comportamento elétrico em sistemas de bombeamento que utilizam válvulas de estrangulamento para o controle da vazão (método convencional);
- Análise do comportamento elétrico em sistemas de bombeamento, que utilizam variação de velocidade para o controle da vazão;
- Comparação entre os métodos e justificativas que implicam na escolha de um deles.

## 1.2. Objetivos

Analisar a economia de energia elétrica de um sistema de bombeamento, tomando-se como base o controle das vazões do sistema, em duas situações distintas, ou seja: controle da vazão por estrangulamento de válvula e pela utilização de conversores de frequência.

### **1.3.Motivação**

O escolha pela realização deste trabalho de conclusão de curso, foi motivada pelos seguintes argumentos:

- Sou estudante de internacionalização, ou seja minha nacionalidade é do País **TIMOR-LESTE**, e acredito que este tema eu vou poder realizar no meu país de origem;
- O tema é atual, moderno e de fácil implementação nos sistemas industriais;
- Permite uma economia significativa do custo da energia elétrica.

### **1.4.Dificuldades encontradas no desenvolvimento deste trabalho**

Cita-se abaixo, três dificuldades encontradas durante a realização deste trabalho.

- Como sou aluno procedente de um outro País **TIMOR-LESTE**, tenho dificuldades na compreensão e na redação da língua portuguesa;
- Outro fator fundamental foi a pandemia da COVID-19, pois a orientação foi realizada somente remotamente;
- Também devido a pandemia, não foi possível utilizar o laboratório de Eficiência Energética da Faculdade de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia. Os resultados apresentados neste trabalho foram obtidos durante as minhas aulas de graduação na disciplina de eficiência energética que realizei com o Prof. Dr. Sérgio Ferreira de Paula e Silva.

### **1.5. Estrutura do trabalho**

Diante das aspirações mencionadas, o desenvolvimento deste trabalho de conclusão de curso está fundamentado na estrutura apresentada a seguir (FERREIRA, 2007):

#### **CAPÍTULO 2 - CONCEITOS BÁSICOS**

Este capítulo tem por objetivo revisar os principais conceitos básicos e formulações matemáticas envolvidos em um sistema de bombeamento.

#### **CAPÍTULO 3 - SISTEMAS DE BOMBEAMENTO**

Este capítulo apresenta algumas questões referentes à operação de bombas centrífugas.

## **CAPÍTULO 4 - ANÁLISE FINANCEIRA**

Neste capítulo será abordado os aspectos associados com análise financeira envolvendo os dois processos de controle das vazões.

## **CAPÍTULO 5- EXEMPLO DE APLICAÇÃO**

Neste capítulo apresenta-se um exemplo numérico, objetivando mostrar o desenvolvimento da metodologia analítica proposta neste trabalho de conclusão de curso.

## **CAPÍTULO 6 - ENSAIOS EXPERIMENTAIS**

Nesta etapa serão reunidas as informações referentes ao sistema ensaiado, como a descrição e esquema da bancada de cada ensaio, dados de operação, etc....

Deve-se salientar que também apresenta-se os resultados obtidos na fase experimental, os quais serão organizados em forma de tabelas, gráficos relativos a cada caso ensaiado, bem como a comparação dos valores encontrados.

## **CAPÍTULO 7- ÍNDICE DE RENDIMENTO DOS MOTORES ELÉTRICOS**

Neste capítulo apresenta algumas informações sobre a evolução dos índices de rendimentos dos motores elétricos.

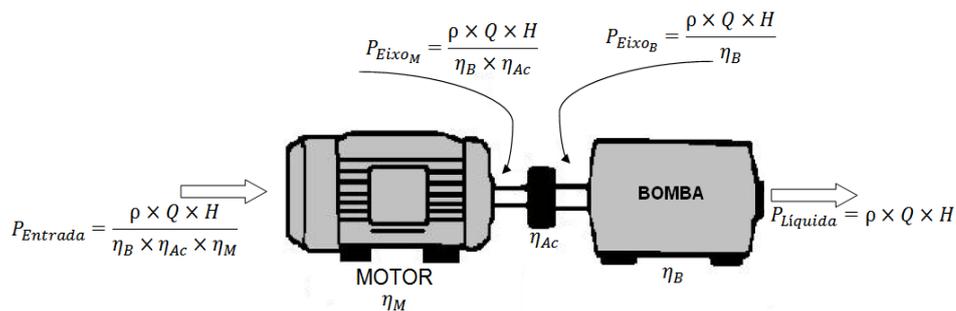
## **CAPÍTULO 8 - CONCLUSÕES FINAIS**

## 2. CONCEITOS BÁSICOS

### 2.1. Cálculo dos fluxos de Potências envolvidas nos sistemas de bombeamentos

Na figura 2.1 mostra o conjunto de um sistema de bombeamento típico realizado através de um acoplamento indireto. Nesta figura indica-se a equação das potências na saída da bomba, no eixo da bomba, no eixo de motor e na entrada do motor.

Figura 2.1: Conjunto de moto-bomba



Fonte: SILVA, 2018

- **Potência hidráulica**

É a potência disponibilizada ao fluido pela bomba, obtida pela multiplicação entre altura manométrica total, peso específico e a vazão volumétrica.

$$P_H = \rho \times g \times Q \times H \text{ Em (W)} \quad 2.1$$

$$P_H = \frac{\rho \times g \times Q \times H}{3600} \text{ Em (W)} \quad 2.2$$

Na equação 2.1, a vazão volumétrica for dada em metro ao cubo por segundo. Se, no caso contrário, a vazão for dada em metro ao cubo por hora, utiliza-se a equação 2.2.

Deve-se salientar que,  $\gamma = \rho \times g$ , então  $P_H = \gamma \times Q \times H$

- **Potência no eixo da bomba**

A potência no eixo da bomba é obtida pela razão entre a potência hidráulica saída da bomba dividido pelo seu rendimento.

$$P_{EB} = \frac{P_H}{\eta_B} \text{ Em (W)} \quad 2.3$$

Para água, podemos expressar também como:

$$P_{EB} = \frac{Q \times H \times 2,725}{\eta_B} \text{ Em (W)} \quad 2.4$$

- **Potencia no eixo do motor**

A conexão entre os eixos do motor e da bomba é realizado através de acoplamentos. Quando a velocidade da bomba for próxima a do motor, o acoplamento é chamado de acoplamento direto. Com esta situação geralmente indica um investimento de aquisição mais econômico e também redução nas perdas de energia. Por outro, quando existe valores diferentes das velocidades da carga mecânica e do motor, há necessidade de se utilizar acoplamentos indiretos, tais como, polias, engrenagens e etc..... Naturalmente, nesta situação há um custo de aquisição maior comparado com o caso anterior e também há um consumo maior de energia elétrica para realizar o acionamento. Dentro deste contexto, mostra-se abaixo as equações envolvidas no processo de bombeamento, utilizando-se os acoplamentos direto e indireto.

Caso 1: No acoplamento direto, tem-se:

$$P_{EM} = P_{EB} \text{ Em (W)} \quad 2.5$$

Caso 2: Acoplamento indireto

$$P_{EM} = \frac{P_{EB}}{\eta_{AC}} \text{ Em (W)} \quad 2.6$$

$$P_{EM} = \frac{P_H}{\eta_B \times \eta_{AC}} \text{ Em (W)} \quad 2.7$$

- **Potência entrada do motor**

É a potência fornecida pela rede elétrica ao motor, ou seja, a razão entre a potência hidráulica com os rendimentos do motor, do acoplamento e da bomba, ou seja:

$$P_E = \frac{P_H}{\eta_M \times \eta_B \times \eta_{AC} \times 3600} \text{ Em (W)} \quad 2.8$$

Onde, as variáveis são:

$$Q = \text{Vazão volumétrica} \left( \frac{m^3}{h} \right)$$

$$\gamma = \text{Peso específico do líquido bombeado} \left( \gamma = 9.800 \frac{N}{m} \right);$$

$\rho$  = Massa específica  $\left( \rho = 1000 \frac{kg}{m^3} \right)$ ;

$g$  = Gravidade  $\left( g = 9,8 \frac{m}{s^2} \right)$ ;

$H$  = Altura manométrica total ( $m$ );

$P_H$  = Potência hidráulica em ( $W$ );

$P_{EB}$  = Potência no eixo da bomba em ( $W$ );

$P_{EM}$  = Potência no eixo do motor em ( $W$ );

$P_E$  = Potência entrada em ( $W$ );

$\eta_B$  = Rendimento da bomba;

$\eta_{AC}$  = Rendimento do acoplamento;

$\eta_M$  = Rendimento do motor.

- **Energia consumida e o custo de energia**

A energia consumida é dada pela a potência elétrica ativa vezes o tempo de funcionamento. O consumo energético pode ser calculado mensalmente ou anualmente e pode ser expresso como:

$$Energia = \frac{P_E \times t}{10^3} \quad 2.9$$

Onde:

Energia Elétrica consumida em ( $kWh$ );

$t$  = Tempo de funcionamento em ( $h$ ).

De posse da energia consumida, calcula-se o custo total da energia consumida, ou seja:

$$Custo = Energia \times \text{Custo de energia} \quad 2.10$$

Onde:

Custo = R\$;

Energia elétrica = kWh;

Custo de energia = R\$/KWh.

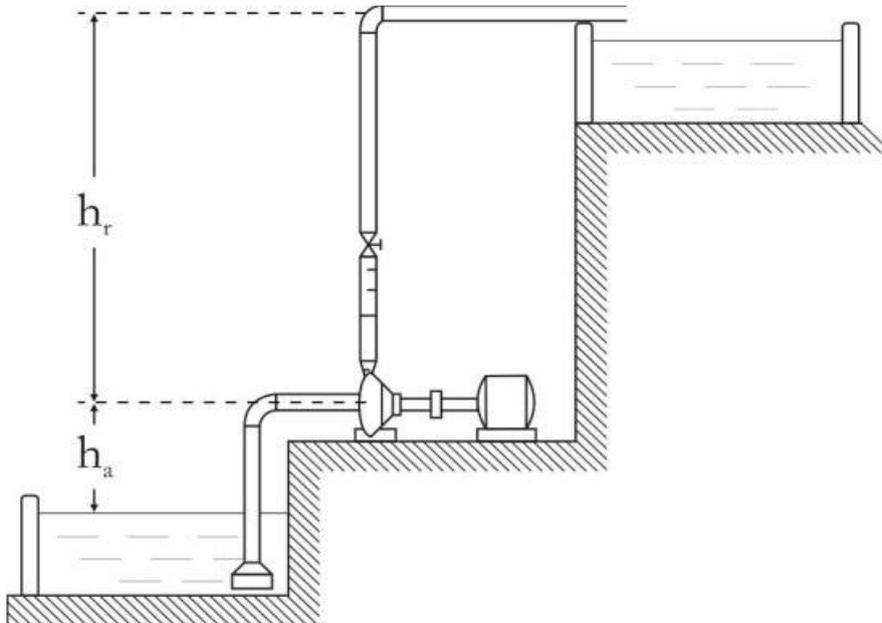
### 3. SISTEMAS DE BOMBEAMENTO

#### 3.1. Característica do sistema de bombeamento

Em geral, um sistema típico de bombeamento é composto basicamente por: uma tubulação de sucção, um conjunto motor-bomba e uma tubulação de recalque (GOMES; CARVALHO, 2012).

As duas instalações de bombeamento utilizadas para abastecimento de água são mostradas nas figuras 3.1 e 3.2. Na primeira figura a bomba é instalada acima do nível de reservatório inferior da água, enquanto que na outra figura a bomba é instalada no reservatório inferior de água ou também chamada de bomba afogada (GOMES; CARVALHO, 2012).

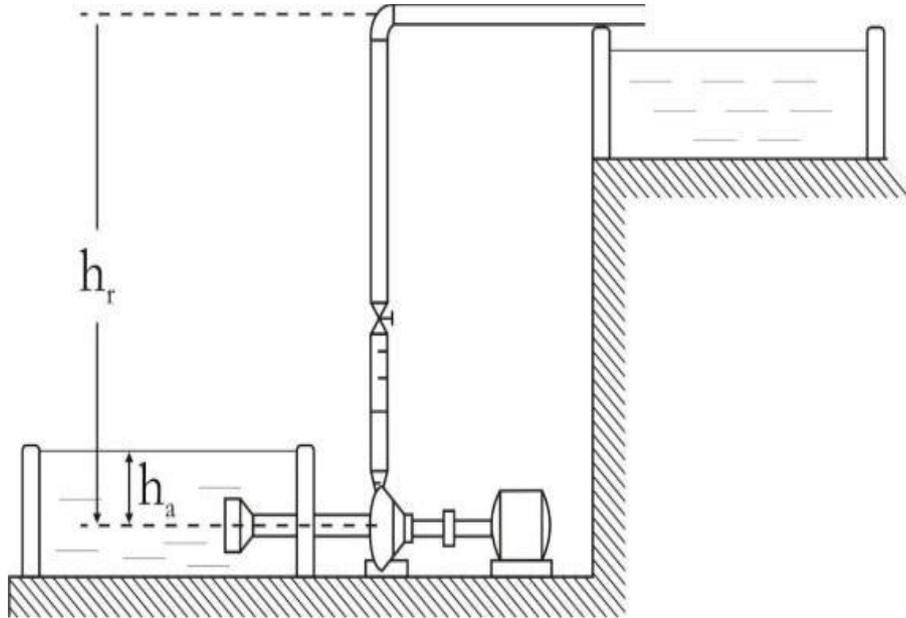
Figura 3.1: Bomba instalada em cima do nível de reservatório inferior



Fonte: GOMES; CARVALHO, 2012

Na figura 3.2 a bomba instalada abaixo do reservatório inferior tem como maior vantagem pois não ocorre a formação de bolhas de ar (GOMES; CARVALHO, 2012).

Figura 3.2: Bomba instalada em baixo do nível de reservatório inferior

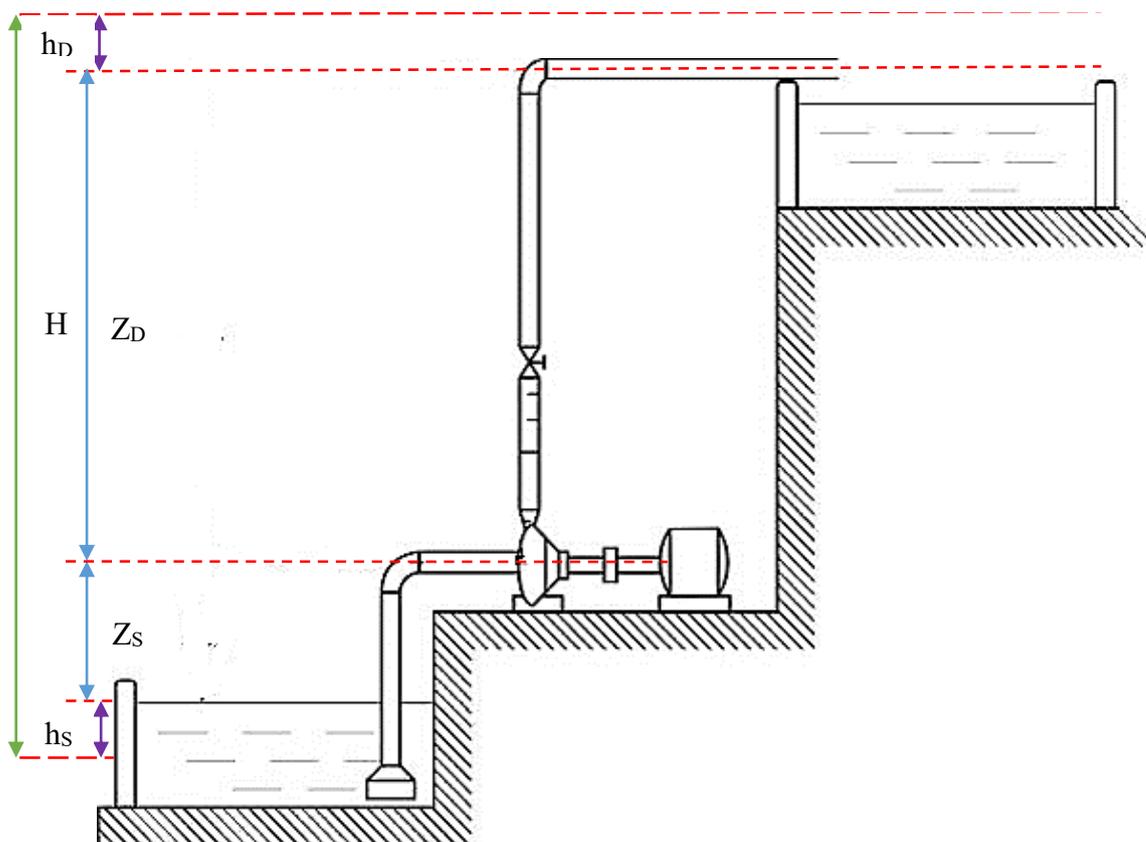


Fonte: GOMES; CARVALHO, 2012

### 3.2. Alturas manométricas

A altura manométrica é a energia que a bomba deve ceder ao fluido à transportar uma determinada vazão desejada do reservatório inferior até o reservatório superior (GOMES; CARVALHO, 2012).

Figura 3.3: Conjunto típica do sistema de bombeamento da água



Fonte: Figura modificado pelo autor

Na figura 3.3 mostrou as partes mais detalhadas das bombas instaladas acima do nível do reservatório inferior que começa no reservatório até a tubulação de descarga. Assim, a altura manométrica pode ser expressa pelas seguintes equações:

$$H = H_G + h_v + h_p + h_L \quad 3.1$$

$$H_G = Z_S + Z_D \quad 3.2$$

$$h_p + h_L = h_D + h_S \quad 3.3$$

Onde:

$H$  = Altura manométrica total: Somatória de todas as alturas e as perdas.

$H_G$  = Altura estática ou geométrica: A diferença entre altura geométrica de sucção e a de descarga.

$h_v$  = Carga de velocidade, quase sempre desprezível.

$h_p$  = Perda de carga distribuída

$h_L$  = Perda de carga localizada

$Z_s$  = Altura geométrica de sucção: Desnível entre o centro do rotor da bomba até o reservatório inferior.

$Z_D$  = Altura geométrica de descarga: Desnível entre o centro do rotor da bomba até o reservatório superior.

$h_D$  = Perda de carga total na descarga: Somatória das perdas localizadas e distribuídas da bomba até o final da tubulação de descarga.

$h_s$  = Perda de carga total na sucção: Somatória das perdas localizadas e distribuídas da bomba até o início da tubulação de sucção.

### 3.3. Perda de carga

O escoamento de líquido de um ponto ao outro sofrem uma perda de energia no interior de uma adutora (MONACHESI, 2005). Esta perda é influenciada principalmente pelo atrito de fluido no interior das paredes de um duto.

#### Perda de carga distribuída

Segundo (MONACHESI, 2005) a perda de carga que ocorre no interior de um duto retilíneo provoca diminuição gradativamente da pressão distribuída ao longo do comprimento da adutora, a qual é dada por:

Equação por Hazen-Williams

$$h_p = \frac{10,65 \times Q^{1,852} \times L}{C^{1,852} \times D^{4,87}} \quad 3.4$$

Onde, tem-se:

$h_p$  = Perda de carga distribuída ao longo da tubulação;

$$Q = \text{Vazão} \left( \frac{m^3}{s} \right);$$

$L$  = Comprimento da tubulação ( $m$ );

$C$  = Representa o estado de conservação das paredes internas da tubulação;

$D$  = Diâmetro da tubulação ( $m$ ).

Na tabela 3.1 são mostradas as características para a obtenção dos valores de “C”.

Tabela 3.1: Valor de “C”

<b>TIPO DE TUBO</b>	<b>25 mm</b>	<b>75 mm</b>	<b>150 mm</b>	<b>300 mm</b>
Ferro fundido novo cimento	-	129	133	138
Água moderadamente agressiva-30 anos	-	83	90	97
Água moderadamente agressiva-60 anos	-	69	79	85
Água moderadamente agressiva-100 anos	-	61	70	78
Condições severas-30 anos	-	41	50	58
Condições severas-60 anos	-	30	39	48
Condições severas-100 anos	-	21	30	39
Aço galvanizado novo	120	129	133	-
PVC novo	134	142	145	147

Observação: Quando no interior de uma tubulação a parede interna for muito rugosa ocorrerá uma grande resistência ao escoamento, isto faz com que, o coeficiente “C” possui um valor baixo. Se, as paredes internas de um tubo são muito lisas, as perdas de carga irão diminuir, assim “C” possui o valor mais alto.

### **Perdas de carga localizada**

Neste tipo de perda de carga ocorre nos diversos acessórios de canalização (válvulas, curvas, reduções etc.) que utilizados tanto à montagem da tubulação quanto ao controle de escoamento do líquido (GOMES; CARVALHO, 2012).

A equação 3.5 apresenta a estimativa do cálculo da perda de carga localizada, ou seja:

$$h_L = K \times \frac{8 \times Q^2}{g \times D^4 \times \pi^2} \quad 3.5$$

Onde, tem-se;

$h_L$  = Perda de carga localizada nas peças;

$K$  = Coeficiente da perda de carga localizada;

$$Q = \text{Vazão da tubulação} \left( \frac{m^3}{s} \right);$$

$$g = \text{Gravidade} \left( g = 9.8 \frac{m}{s^2} \right);$$

$$D = \text{Diâmetro da tubulação} (m);$$

Na tabela 3.2 são apresentadas as características para escolher os valores de “K”

Tabela 3.2: Valor de “K”

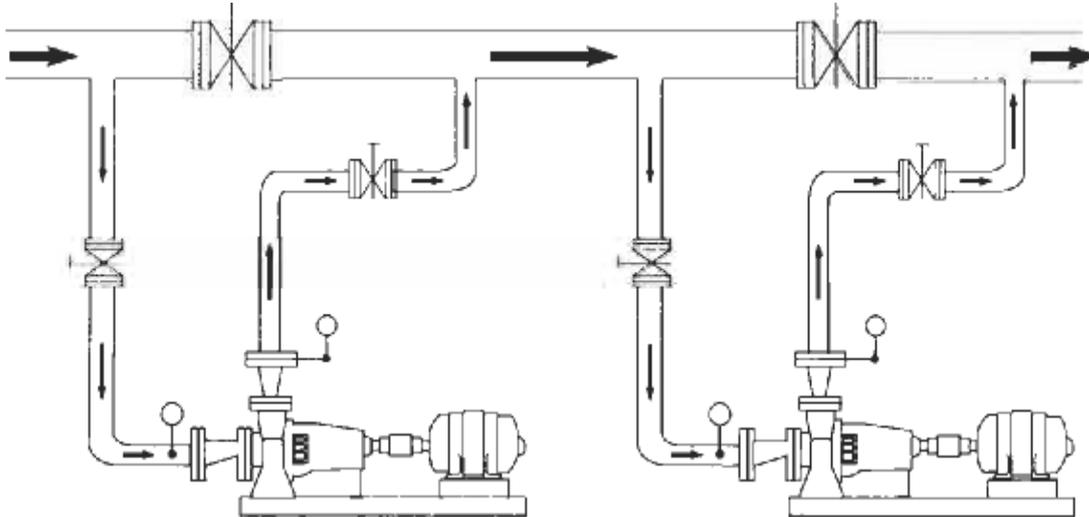
<b>TIPO DE PEÇA</b>	<b>Valor de “K”</b>
Implicação gradual (velocidade na seção menor)	0,3
Bocais	2,75
Comporta aberta	1
Cotovelo de 90 graus	0,9
Cotovelo de 45 graus	0,4
Crivo	0,75
Curva de 90 graus	0,4
Curva de 45 graus	0,2
Entrada normal em canalização	0,5
Registro de Gaveta aberto	0,2
Registro de Globo aberto	10
Tê passagem direta	0,6
Tê saída de lado	1,3
Válvula de pé	1,75
Válvula de retenção	2,5

### 3.4.Associação das bombas

#### 3.4.1. Associação em série

Afigura 3.4 ilustra um desenho esquemático de dois sistemas de bombeamento em série.

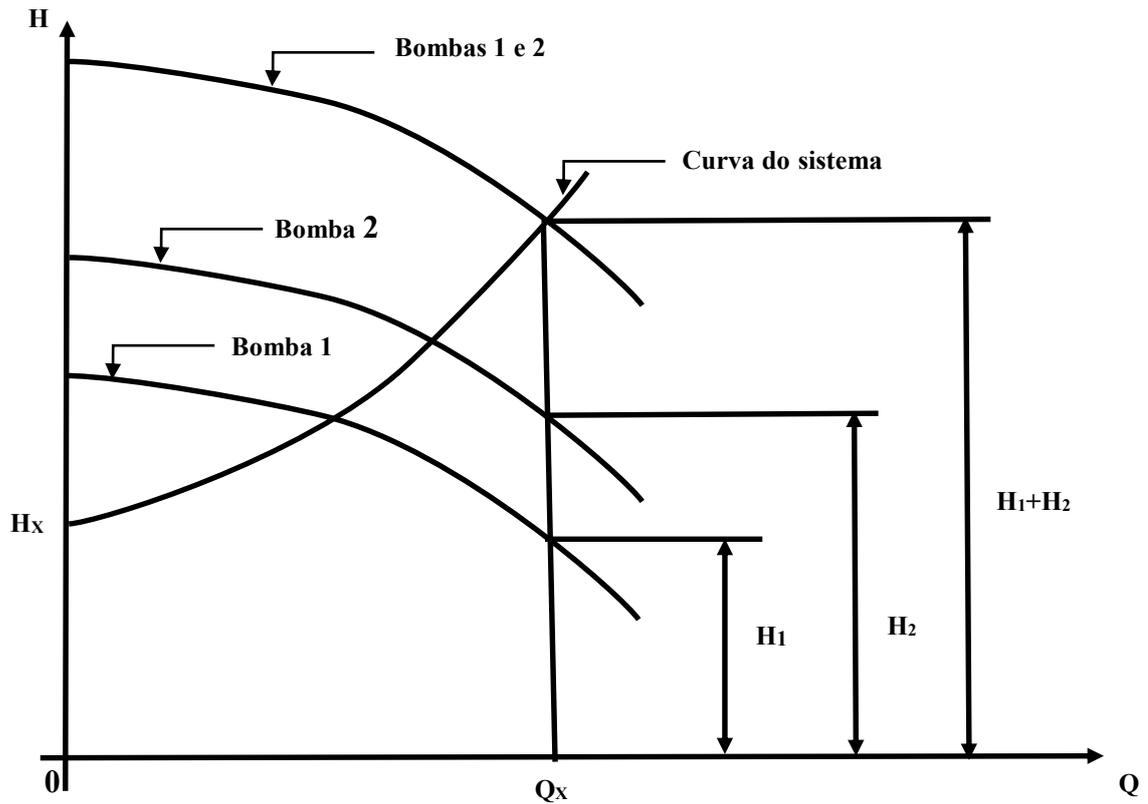
Figura 3.4: Bombas associadas em serie



Fonte: GOMES; CARVALHO, 2012

Uma bomba associa-se com outra bomba em série, quando a descarga da primeira unidade é idêntico com a sucção da segunda, repetindo este procedimento para demais bombas associadas. Desta forma, somando-se as alturas manométricas individuais para cada bomba, numa mesma vazão. Nas figuras 3.4 e 3.5, mostram-se a associação das bombas e as suas respectivas curvas características, ou seja  $H= f(Q)$ .

Figura 3.5: Curva característica

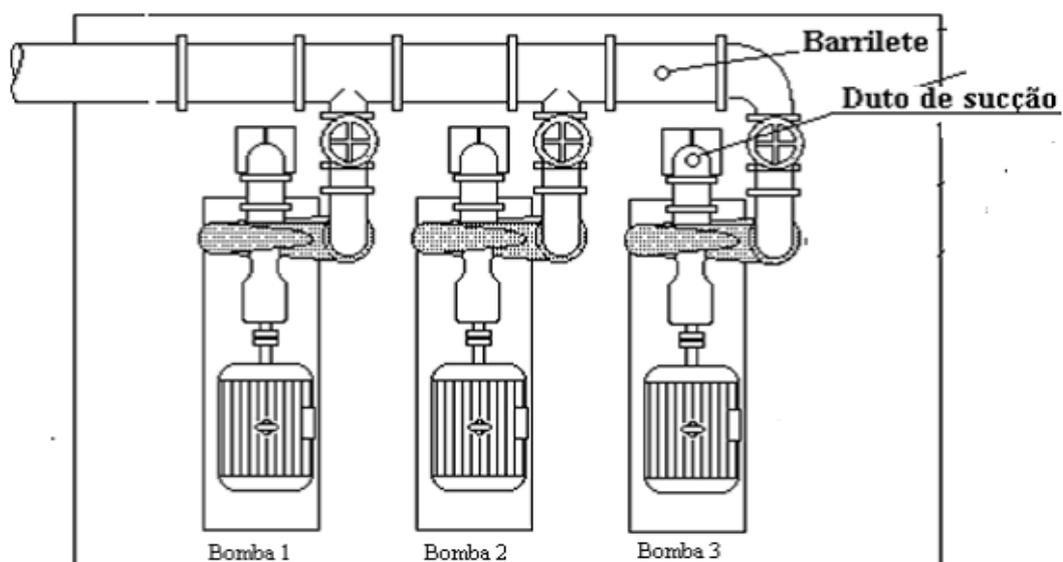


Fonte: Autor

### 3.4.2. Associação em paralelo

Duas ou mais bombas estão associadas em paralelo, quando está aspirando a água do mesmo reservatório em uma única tubulação e ao mesmo tempo (MONACHESI, 2005). Nas figuras 3.6 e 3.7, mostra-se a associação das bombas em paralelo e as suas curvas características.

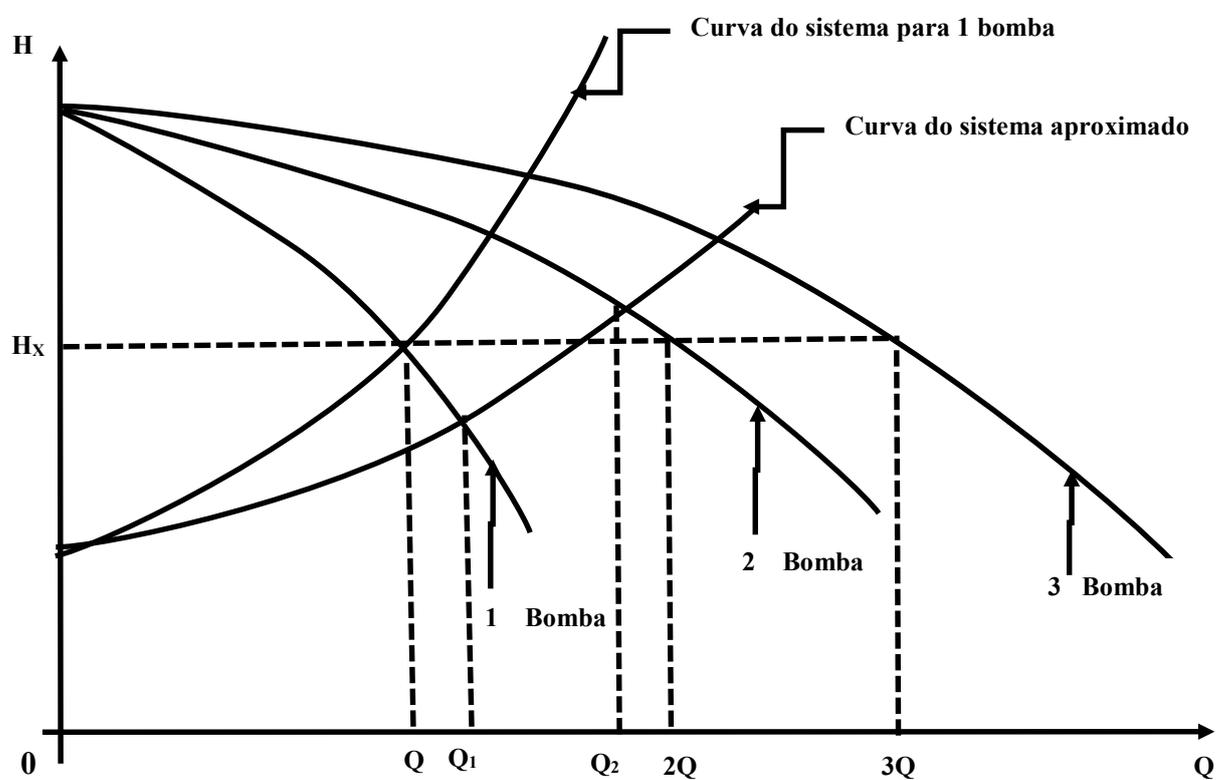
Figura 3.6: Bombas associadas em paralelo



Fonte: GOMES; CARVALHO, 2012

Assim, na figura 3.7 da curva característica as bombas operam com as mesmas alturas manométricas, e a vazão total é a soma de vazão individual para cada bomba (GOMES; CARVALHO, 2012)

Figura 3.7: Curva característica



Fonte: Autor

Observa-se que na figura 3.7 na medida em que o aumento da instalações das bombas em paralelo implicará em redução da vazão, ao em vez de uma única bomba em paralelo produz a maior vazão. Por isso quanto mais bombas associadas se daria a redução das vazões.

### 3.5. Leis de similaridade

Esta lei de similaridade ou afinidade tem por finalidade analisar o comportamento da bomba pela variação da sua rotação ou do diâmetro do rotor (MONACHESI, 2005).

Os equacionamentos que fazem parte da lei de afinidade relaciona a rotação com a vazão, a altura manométrica total e a potência hidráulica ou seja na saída da bomba. Assim tem-se que:

#### a) Vazão

A relação entre as vazões é diretamente proporcional a relação de velocidades da bomba.

$$\frac{Q_2}{Q_1} = \frac{n_2}{n_1} \quad 3.6$$

#### b) Altura manométrica

A relação entre as alturas manométricas varia com o quadrado da relação das velocidades da bomba.

$$\frac{H_2}{H_1} = \left( \frac{n_2}{n_1} \right)^2 \quad 3.7$$

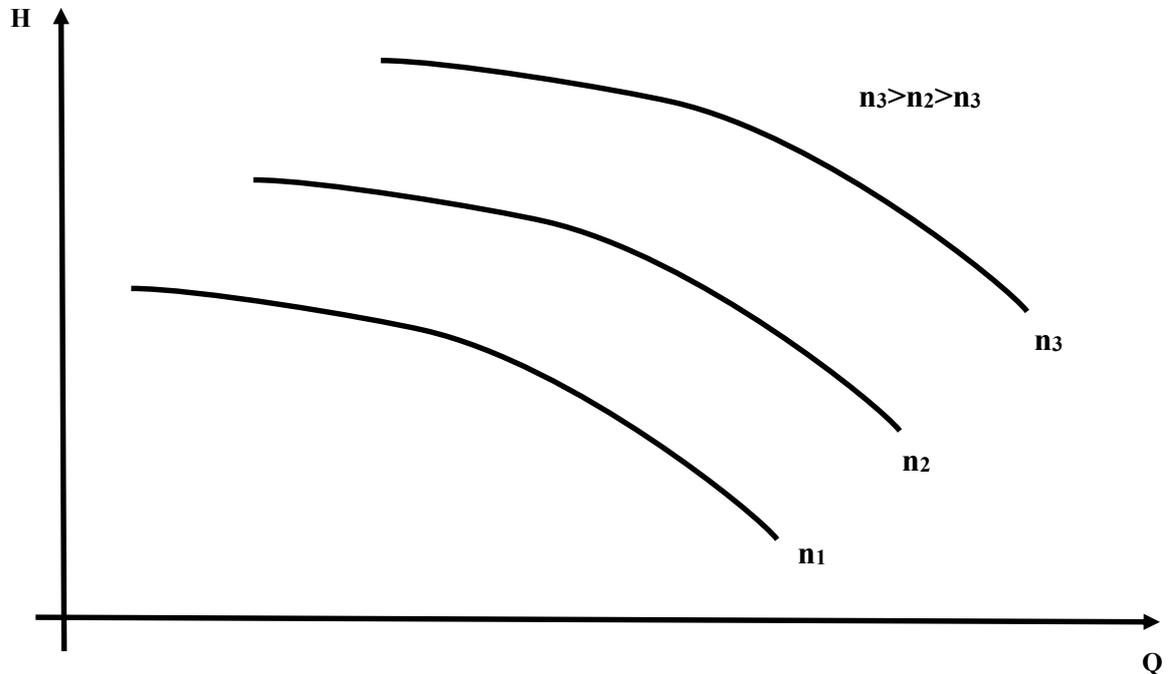
#### c) Potência

A relação entre as potência de saída da bomba varia com o cubo da velocidade da bomba.

$$\frac{P_2}{P_1} = \left( \frac{n_2}{n_1} \right)^3 \quad 3.8$$

Assim, se houver variação da rotação(velocidade) de uma bomba, a sua curva característica também variará. Na figura 3.8, mostra-se o comportamento da curva característica em função da variação de sua velocidade.

Figura 3.8: Variação de rotação variara também a curva característica



Fonte: Autor

As relações acima também podem ser fornecidas em função dos diâmetros da bomba, as quais são dadas pelas equações de 3.9, 3.10 e 3.11.

$$\frac{Q_2}{Q_1} = \frac{d_2}{d_1} \quad \text{Vazão} \quad 3.9$$

$$\frac{H_2}{H_1} = \left(\frac{d_2}{d_1}\right)^2 \quad \text{Altura manométrica total} \quad 3.10$$

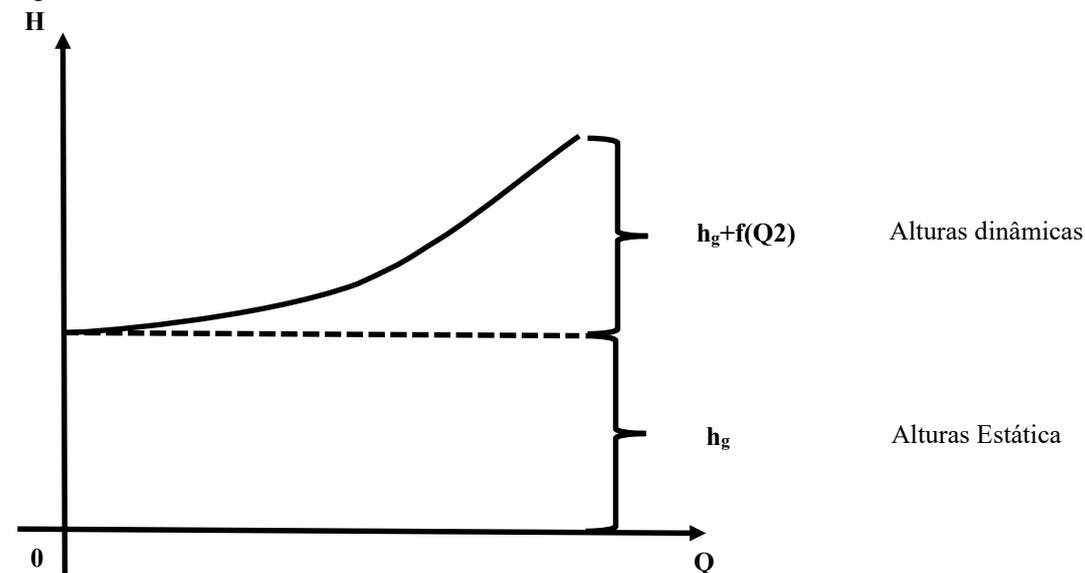
$$\frac{P_2}{P_1} = \left(\frac{d_2}{d_1}\right)^3 \quad \text{Potência} \quad 3.11$$

### 3.6.As curvas características

#### 3.6.1. A curva do sistema hidráulico

A altura manométrica total varia com o quadrado da vazão do sistema, ou seja:  $H = h_g + f(Q^2)$ . Na figura 3.9 ilustra a característica da curva do sistema (GOMES; CARVALHO, 2012).

Figura 3.9: A curva do sistema



Fonte: Autor

### Plotar a curva do sistema

Segundo (GOMES; CARVALHO, 2012) há três passos para plotar a curva do sistema:

Primeiro passo:

A partir da vazão desejada do projeto, calcula-se as perdas localizadas e as perdas distribuídas e soma-se com a altura geométrica;

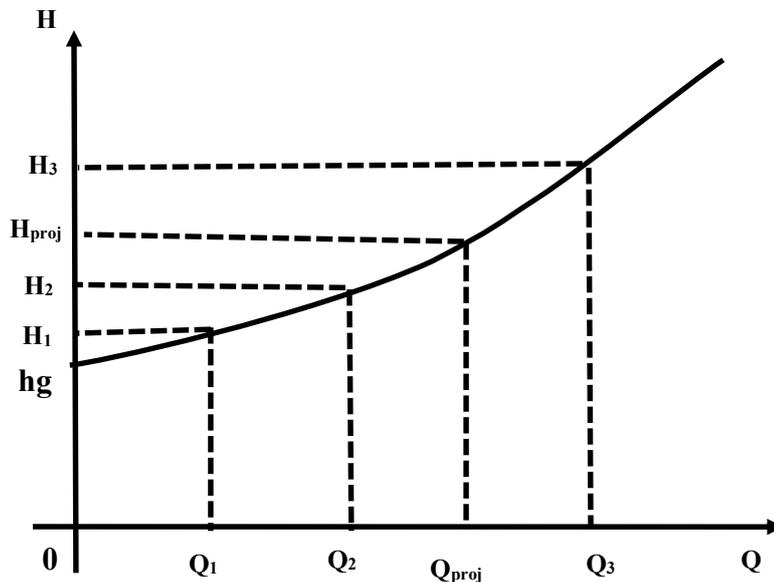
Segundo passo:

Repetindo-se o primeiro passo para pelo menos mais três vazões diferentes, sendo um deles superior a vazão do projeto e os outros dois inferiores à vazão do projeto;

Terceiro passo:

Plotar os gráficos a partir dos valores da vazão e altura manométrica calculadas.

Figura 3.10: Plotar a curva do sistema



Fonte: Autor

### 3.6.2. A curva da bomba

A característica de uma curva da bomba é representada, tomando-se como base principalmente pelos seus valores das alturas manométricas e as vazões. Esta curva característica, normalmente oferecido pelos fabricantes, são obtidas através de ensaios nos laboratórios (GOMES; CARVALHO, 2012).

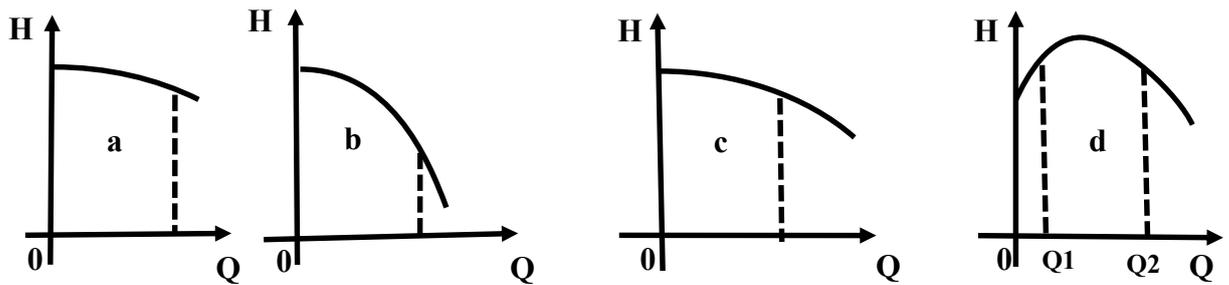
### 3.7. Tipos das curvas

Há quatro tipos de curvas características, Assim:

- Plana(*flat*): A variação da altura manométrica em relação com a vazão é muito pequena.
- Com muito inclinação (*step*): A altura manométrica declina muito rapidamente em relação a vazão.
- Padrão (*rising*): Este curva possui a característica intermediário entre o tipo (a) e tipo (b) mostradas abaixo.

- Instável (*drooping*): A vazão nula (shutt-off) é inferior da altura manométrica total. O sistema opera em duas vazões diferentes intermediárias das alturas manométricas e pode ocorrer a instabilidade no sistema em relação com vazão (GOMES; CARVALHO, 2012).

Figura 3.11: Tipos das curvas características



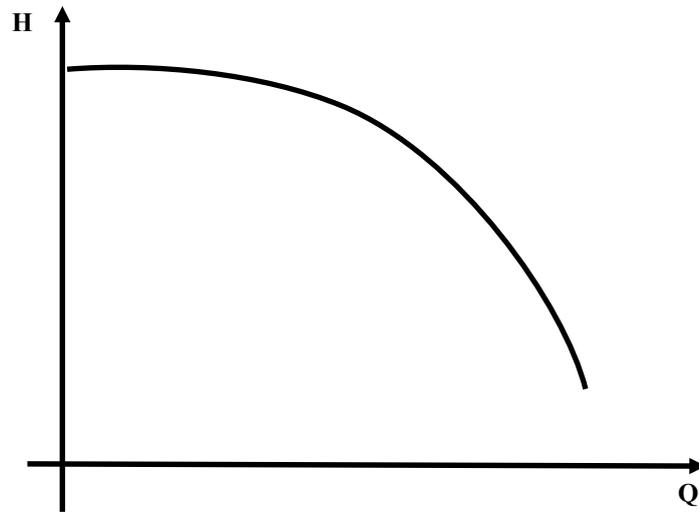
Fonte: Autor

### 3.8. Três curvas características típicas de bombas

#### 3.8.1. Vazão x altura manométrica

A curva característica típica de uma bomba pode ser representada pela vazão recalçada e a altura manométrica total (MONACHESI, 2005). A figura 3.12, ilustra a curva típica de uma bomba.

Figura 3.12: Curva característica QxH



Fonte: Autor

### 3.8.2. Vazão x potência

Esta curva mostra a variação da potência em função da vazão. A figura 3.13 ilustra a curva característica mencionada (MONACHESI, 2005).

Figura 3.13: Curva característica QxP

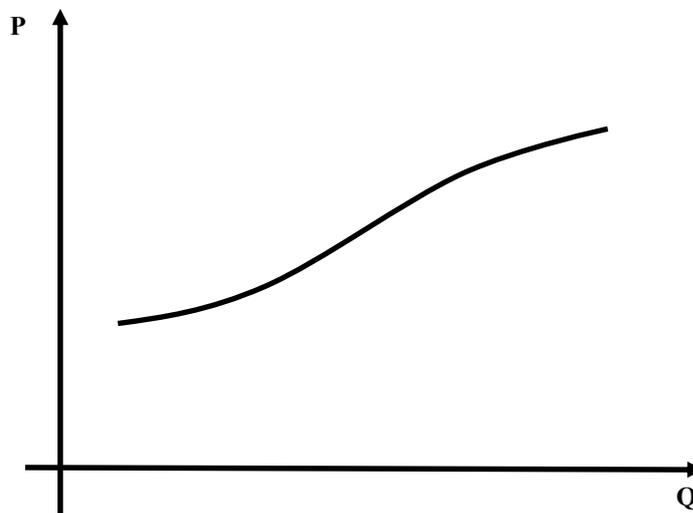
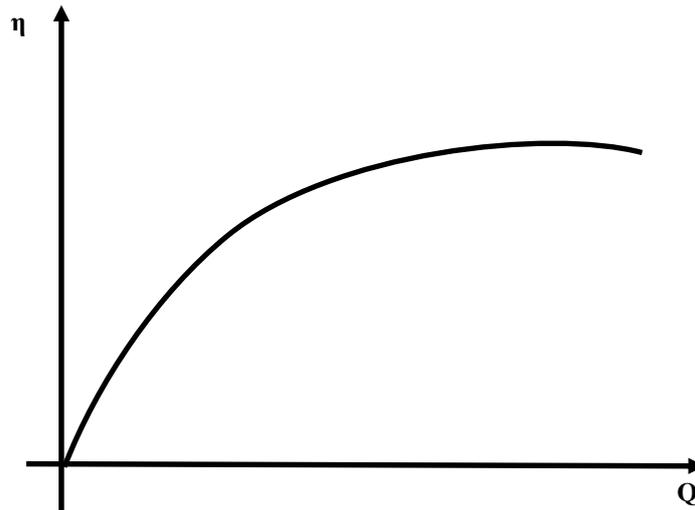


Figura: Autor

### 3.8.3. Vazão x rendimento

Esta curva característica é a relação entre o rendimento e a vazão bombeada. Esta curva mostra também o melhor rendimento da bomba para um valor desejado da vazão (MONACHESI, 2005).

Figura 3.14: Curva característica  $Q \times \eta$



Fonte: Autor

## 3.9. Métodos de controle de vazão ( FERREIRA, 2007)

### 3.9.1. Controle da vazão por válvula de estrangulamento

O método da inserção de válvulas de estrangulamento ao longo da tubulação utiliza o conceito de perda de carga, uma vez que a presença de válvulas provoca o aumento da perda de carga à medida que a válvula é fechada. Portanto, a vazão requerida é atingida com a mudança da curva característica do sistema, ou tubulação.

O sistema proposto a seguir ilustra o controle da vazão por intermédio de válvulas de estrangulamento.

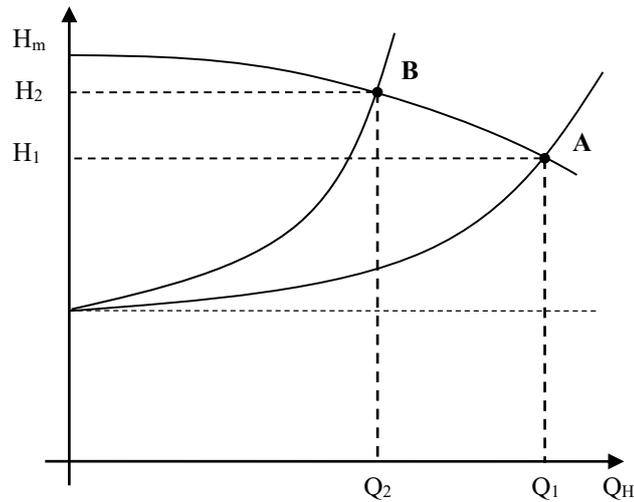


Figura 3.15: Controle da vazão por meio de válvulas de estrangulamento.

Com o fechamento da válvula de estrangulamento, a curva do sistema passa a interceptar a curva da bomba no ponto B( $Q_2; H_2$ ) e, a subtração ponto a ponto das duas curvas do sistema representa o aumento da perda de carga proveniente do fechamento da válvula.

A curva característica do sistema que passa por A ( $Q_1; H_1$ ), desconsiderando-se o desnível geométrico, pode ser descrita por:  $h_t = k_1 Q^2$ .

Já a curva do sistema que passa pelo ponto B, é uma função do tipo:  $h_t = k_2 Q^2$ , sendo:  $k_2 > k_1$ .

A potência elétrica (hidráulica) requerida pela bomba é proporcional ao produto da vazão pela pressão, ou seja, é proporcional a área de um retângulo formado entre os eixos do gráfico e o ponto de operação.

Dessa forma, uma análise qualitativa da potência elétrica de acionamento da bomba pode ser verificada a partir da associação das curvas do sistema e da bomba.

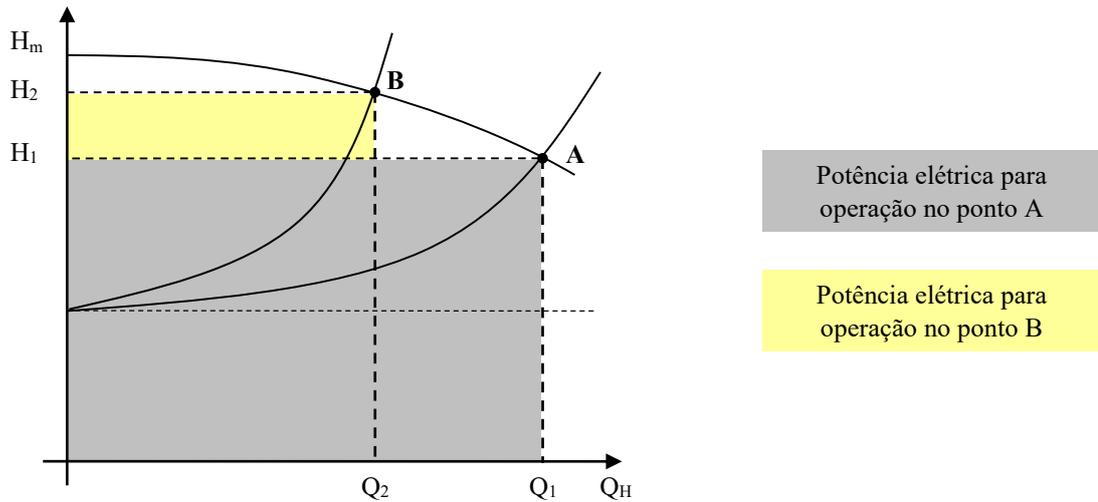


Figura 3.16: Análise qualitativa da potência consumida em diferentes pontos de operação utilizando válvulas de estrangulamento para o controle da vazão.

### 3.9.2. Controle da vazão pela variação da velocidade da rotação

Diferentemente do método da válvula de estrangulamento, o método da variação da rotação influencia na curva característica da bomba e não na curva do sistema.

De acordo com as equações (3.6) e (3.7), podemos observar na curva característica de uma bomba a influência causada ao modificarmos sua velocidade de rotação. A diminuição da velocidade de rotação faz com que a bomba, para um mesmo valor de vazão, entregue menos energia de pressão ao líquido, conforme mostra a Figura 3.17.

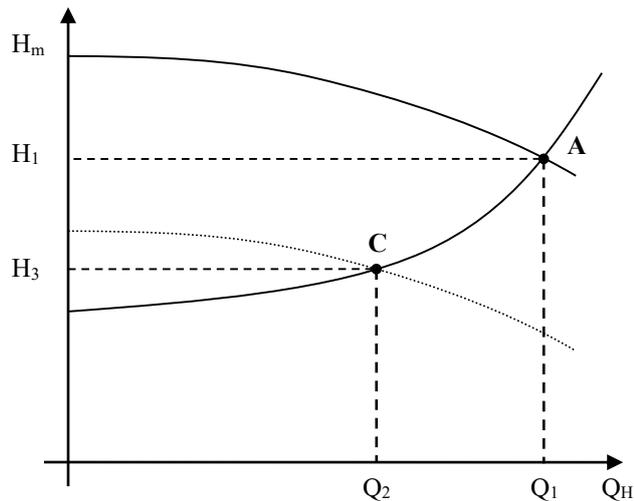


Figura 3.17: Influência da variação da rotação na curva característica da bomba.

Pode-se visualizar na figura acima que, para uma vazão diferente da vazão de projeto, a curva da bomba foi deslocada de modo que interceptasse a curva do sistema no ponto da vazão desejada.

Assim, a mesma análise da potência elétrica consumida, feita anteriormente, pode ser efetuada também para o caso do controle da vazão pela variação da velocidade de rotação.

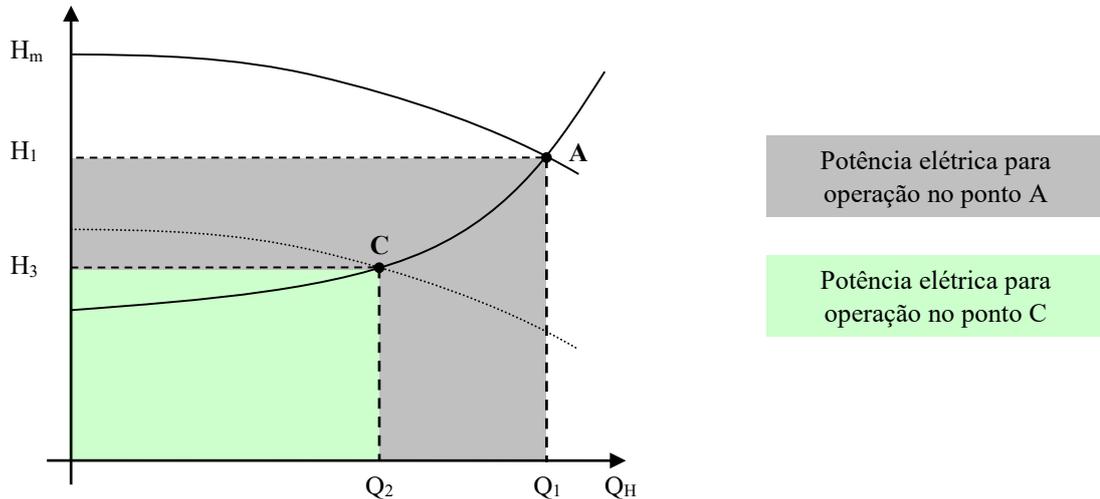


Figura 3.18: Análise qualitativa da potência consumida em diferentes pontos de operação utilizando variação da velocidade de rotação para o controle da vazão.

### 3.9.3. Comparação entre os métodos de controle da vazão: variação da rotação e válvula de estrangulamento

No âmbito da eficiência energética, é fácil observar que o método da variação da velocidade de rotação da bomba é mais apropriado, pois demanda de uma menor parcela de energia para operar e desempenha bem a função de controle da vazão.

Ao analisar os gráficos das curvas características, tanto do método de controle por válvulas, como o controle por variação da rotação, é possível observar que a área preenchida na cor verde é notoriamente menor se comparada à área preenchida na cor amarela. Este fato implica que a potência necessária para desenvolver a operação no ponto C é, por sua vez, menor que a potência necessária para se trabalhar no ponto B. Esta explicação é melhor fundamentada com o auxílio da figura 3.19 que se segue.

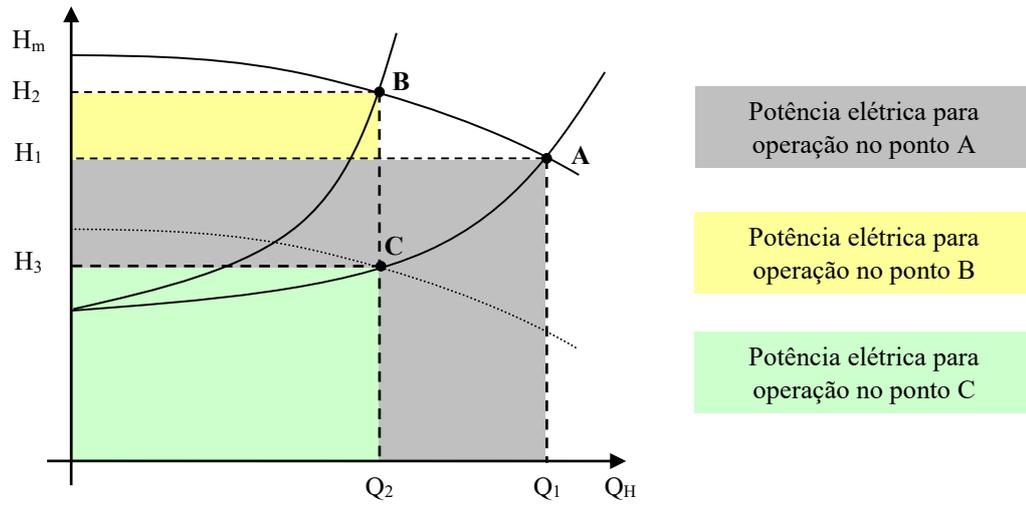


Figura 3.19: Comparação qualitativa do consumo da potência gasta para operação ao utilizar métodos diferentes no controle da vazão.

## 4. ANÁLISE FINANCEIRA

### 4.1.Introdução

Há vários fatores que influenciam na análise financeira, estes estudos devem ser realizados com o intuito de buscar o melhor investimento. Estes em si englobam vários parâmetros econômicos a fim de que a melhor decisão possa ser tomada. Os fatores que determinam as análises financeiras são: tempo de retorno investimento simples e capitalizado, economia mensal, custo operacional de investimento dentre outros (GUIMARÃES, 2008).

### 4.2.Tempo de retorno simples

Este tempo de retorno é calculado com o intuito de que o capital investido apresenta retorno numa forma de redução no custo operacional. Tempo de retorno simples não inclui a taxa de juros (GUIMARÃES, 2008). Assim, esta grandeza pode ser expressa por:

$$t_{RS} = \frac{\Delta C}{Eco_{RS}} \quad 4.1$$

$$\Delta C = C_{a2} - C_{a1} \quad 4.2$$

Onde:

$t_{RS}$  = tempo de retorno simples em meses;

$\Delta C$  = custo de investimento;

$Eco_{RS}$  = economia em mensal;

$C_{a2}$  = custo de investimento 2;

$C_{a1}$  = custo de investimento 1.

### 4.3.Tempo de retorno capitalizado

O tempo de retorno capitalizado leva em consideração a taxa de juros numa forma de parcela da economia (GUIMARÃES, 2008). Há duas formas de tempo de retorno capitalizado como, tempo de retorno capitalizado, desconto que não considera o aumento do custo da energia elétrica (BELINOVSKI, 2011). Este valor pode ser expresso pela seguinte equação:

$$t_{Rc} = \frac{\log\left(\frac{Eco_{R\$mensal}}{Eco_{R\$mensal} - \Delta C \times \frac{i}{100}}\right)}{\log\left(1 + \frac{i}{100}\right)} \quad 4.3$$

Onde:

$t_{Rc}$  = Tempo de retorno capitalizado;

$i$  = Taxa de juros em percentagem.

Por outro lado, há o cálculo do tempo de retorno capitalizado, o qual considera o aumento do custo de energia elétrica (BELINOVSKI, 2011). Inicialmente, deve-se calcular a taxa líquida de juros, a qual pode ser dada pela equação abaixo:

$$i_L = \left[ \left( \frac{1 + \frac{i}{100}}{1 + \frac{ie}{100}} \right) - 1 \right] \times 100 \quad 4.4$$

Onde:

$i_L$  = Taxa líquida de juros em percentagem;

$i_e$  = Taxa do aumento do custo da energia elétrica em percentagem.

Logo, o tempo de retorno capitalizado pode ser expresso por:

$$t_{Rc} = \frac{\log\left(\frac{Eco_{R\$mensal}}{Eco_{R\$mensal} - \Delta C \times \frac{i_L}{100}}\right)}{\log\left(1 + \frac{i_L}{100}\right)} \quad 4.5$$

#### 4.4. Vida útil de um equipamento

Para conhecer a sobre a vida útil de um equipamento não existe uma equação específica. Nos motores especificamente, a sua vida útil varia de acordo com sua potência nominal, a qual

é obtida em função das informações estatísticas mostradas no anexo C. Em geral para este estudo, a vida útil dos motores está sendo considerado como sendo de aproximadamente de 13,3 anos (BELINOVSKI, 2011).

No caso de inversores de frequência, a vida útil estimadas pelos seus fabricantes varia entre 50 e 100 mil horas, que equivale aproximadamente entre 5,7 e 14 anos. Assim, adota-se neste estudo a vida útil média de 10 anos para inversores de frequência (BELINOVSKI, 2011).

#### **4.5. Energia economizada ao longo da vida útil do equipamento**

A energia economizada ao longo da vida útil do equipamento pode ser calculada pela equação 4.6.

$$Eco_{V_U} = Eco_{Ano} \times V_U \quad 4.6$$

Onde:

$Eco_{V_U}$  = Energia economizada ao longo da vida útil em (KWh);

$Eco_{Ano}$  = Energia economizada anualmente (KWh);

$V_U$  = Vida útil do equipamento em anos.

## 5. EXEMPLO DE APLICAÇÃO

### 5.1.Exemplo

A título de ilustração, apresenta-se a seguir um exemplo de aplicação, numérico, de um sistema de bombeamento, mostrando a eficácia da metodologia apresentada.

#### a. Parâmetros do acionamento

A instalação de bombeamento, objeto de análise do presente exemplo de aplicação, possui as seguintes características:

- ▶ Vazão nominal = 100 m<sup>3</sup>/h;
- ▶ Tempo de funcionamento = 8000 horas;
- ▶ Custo da energia elétrica = R\$ 120,00 / MWh;
- ▶ Densidade do fluido = 1 g/cm<sup>3</sup> (água);
- ▶ Motor 30 cv;
- ▶  $\eta_{\text{motor}} = 93,1\%$  (Motor de Alto Rendimento) e 83,3% (Motor da Linha Padrão);
- ▶ Bomba – Tipo KSB meganorm 50 - 160;
- ▶ Ciclo de trabalho (Tabela 5.1);

Tabela 5.1 – Ciclos de trabalho

Nº.	Vazão [m <sup>3</sup> /h]	Horas de funcionamento
1	30	3000
2	50	2500
3	70	1500
4	100	1000

#### b. Estudo de caso

Para realizar uma comparação dentre os métodos de controle, bem como a influência de outros parâmetros que contribuem para a eficiência do sistema, como o rendimento do motor, por exemplo, o conjunto é ensaiado segundo os seguintes casos:

#### CASO 01

Neste primeiro caso, o controle da vazão é estabelecido através de válvula de estrangulamento para os ciclos de trabalho mencionados na tabela 5.1, utilizando, ora motor da

linha padrão (IR1), ora motor de alto rendimento (IR2). As curvas características da bomba e tubulação, obtidas no Caso 01, podem ser observadas na figura 5.1.

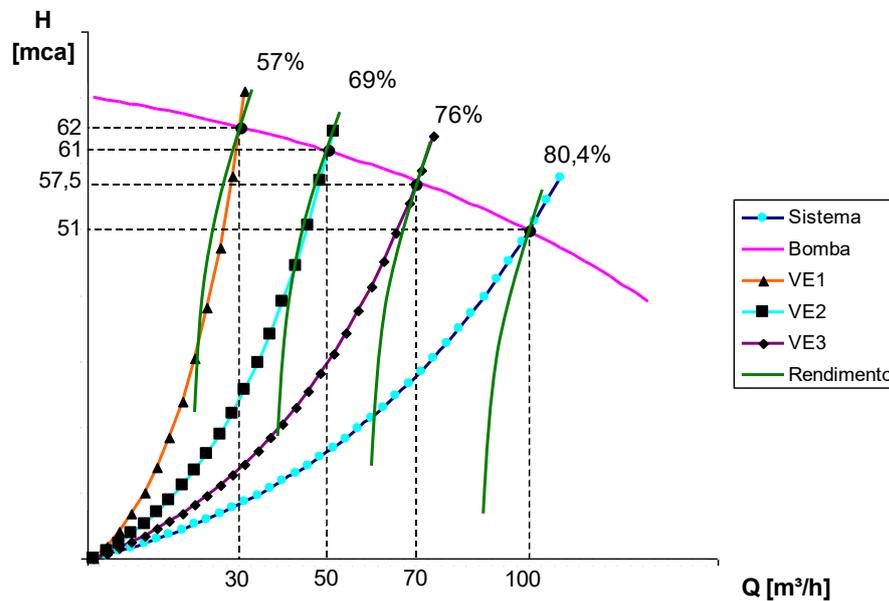


Figura 5.1: Pontos de operação com válvula de estrangulamento.

## CASO 02

Da mesma forma que o caso anterior, o segundo caso trabalha com a variação da velocidade de rotação da bomba centrífuga como forma de controle da vazão. O sistema, também, opera segundo a tabela 5.1 com ambos os motores, o motor IR2 e o motor IR1.

O conversor de frequências foi utilizado, neste caso, para possibilitar o controle da velocidade de rotação.

A figura 5.2 representa as curvas para este caso.

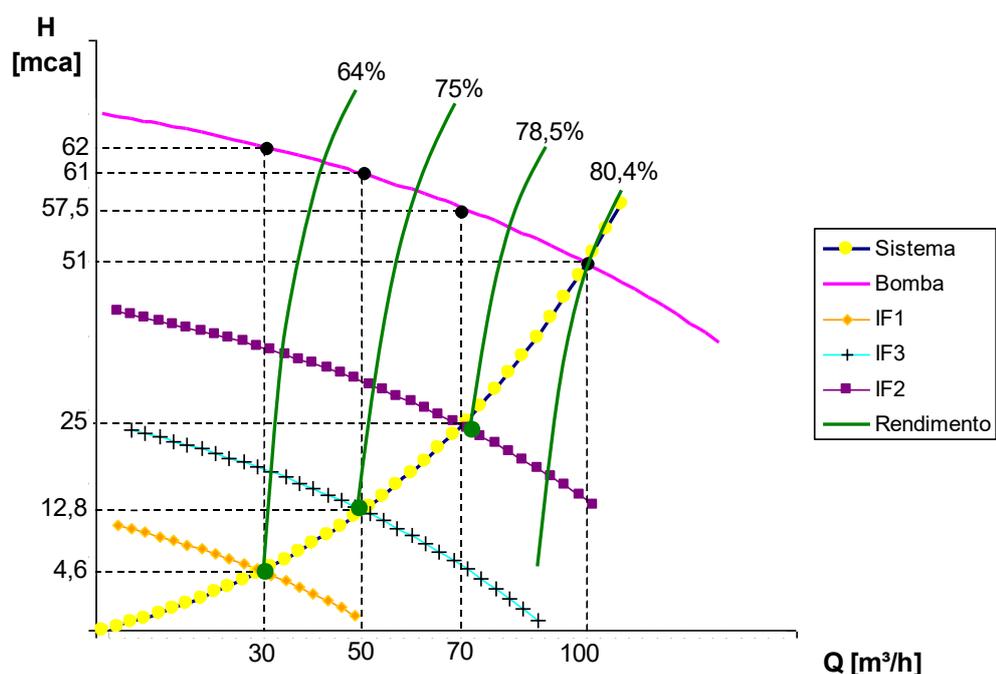


Figura 5.2: Pontos de operação com conversor de frequência.

### c. Resultados obtidos

A partir da observação das curvas apresentadas nas figuras 5.1 e 5.2, e com o auxílio da metodologia de cálculo da energia elétrica consumida apresentada, têm-se os seguintes resultados:

#### CASO 01: válvula de estrangulamento

A tabela 5.2 representa os valores obtidos quando a bomba é acionada por um motor IR1. Já a tabela 5.3 faz referência aos resultados obtidos para acionamento da bomba via motor IR2.

Tabela 5.2 – Resultados da operação com válvulas de estrangulamento e motor IR1.

Ciclo	Motor	Pressão (mca)	WHP (HP)	$\eta$ bomba (%)	BHP (HP)	PHP (HP)	Energia (MWh)	Custo (R\$/ano)
1	L.P.	62,0	6,79	57,0	11,91	14,34	32,11	3.853,46
2		61,0	11,13	69,0	16,13	19,49	36,24	4.349,93
3		57,5	14,69	76,0	19,33	23,28	26,05	3.127,05
4		51,0	18,61	80,4	25,15	27,89	20,80	2.496,93
<b>Total</b>		-----					<b>115,22</b>	<b>13.827,36</b>

Tabela 5.3 – Resultados da operação com válvulas de estrangulamento e motor IR2.

Ciclo	Motor	Pressão (mca)	Ph (HP)	$\eta$ bomba (%)	BHP (HP)	Pe (HP)	Energia (MWh)	Custo (R\$/ano)
1	A.R.	62,0	6,79	57,0	11,91	12,79	28,63	3.435,41
2		61,0	11,13	69,0	16,13	17,33	32,32	3.878,02
3		57,5	14,69	76,0	19,33	20,76	23,23	2.787,81
4		51,0	18,61	80,4	25,15	24,87	18,55	2.226,05
<b>Total</b>		-----					<b>102,73</b>	<b>12.237,30</b>

### **CASO 02: conversor de frequência**

Da mesma forma, os resultados apresentados na tabela 5.4 estão relacionados com a operação do motor cIR1e, a tabela 5.5, com o motor IR2.

Tabela 5.4 – Resultados da operação com conversor de frequência e motor IR1.

Ciclo	Motor	Pressão (mca)	Ph (HP)	$\eta$ bomba (%)	BHP (HP)	Pe (HP)	Energia (MWh)	Custo (R\$/ano)
1	L.P.	4,6	0,50	64	0,78	0,94	2,11	254,08
2		12,8	2,32	75	3,10	3,73	6,97	836,47
3		25,0	6,38	78,5	8,13	9,79	10,96	1315,76
4		51,0	18,61	80,5	23,12	27,85	20,78	2493,82
<b>Total</b>		-----					<b>40,83</b>	<b>4900,13</b>

Tabela 5.5 – Resultados da operação com conversor de frequência e motor IR2.

Ciclo	Motor	Pressão (mca)	Ph (HP)	$\eta$ bomba (%)	BHP (HP)	Pe (HP)	Energia (MWh)	Custo (R\$/ano)
1	A.R.	4,6	0,50	64	0,78	0,84	1,88	226,51
2		12,8	2,32	75	3,10	3,33	6,21	745,73
3		25,0	6,38	78,5	8,13	8,73	9,77	1173,02
4		51,0	18,61	80,5	23,12	24,83	18,52	2223,28
<b>Total</b>		-----					<b>36,40</b>	<b>4368,54</b>

#### **d. Conclusão prévia**

De acordo com a metodologia de cálculo e com as Leis de Afinidade pode-se constatar, com base neste exemplo de aplicação, que ao se comparar as tabelas 5.2, 5.3, 5.4 e 5.5, a instalação do acionamento eletrônico para o controle de vazão, considerando o uso do motor IR2, possibilita uma economia de energia anual de 66,33 MWh, gerando uma redução na conta de energia de 64,56% por ano. Estes números comprovam ser mais eficiente um sistema de bombeamento cujo controle de vazão se dá por meio eletrônico.

Além disso, o tempo necessário para o retorno simples do investimento gasto na compra de um acionamento eletrônico capaz de acionar um motor de 30 cv – com uma tensão de 380 volts (em torno de R\$ 8.000,00), seria aproximadamente de um ano, ou seja devido à grande parcela de economia de energia elétrica, a utilização de conversores de frequência em sistemas de bombeamento torna-se viável.

No entanto, ao se optar pelo acionamento eletrônico deve-se atentar para alguns efeitos indesejáveis causados por ele, tais como: como a injeção de correntes harmônicas no sistema elétrico de potência.

## **5.2.Considerações Finais**

A metodologia de ensaio, atrelada às Leis de Afinidade, possibilita analisar algebricamente a eficácia do controle da vazão por meio da variação de rotação, conforme apresentado pelo exemplo teórico.

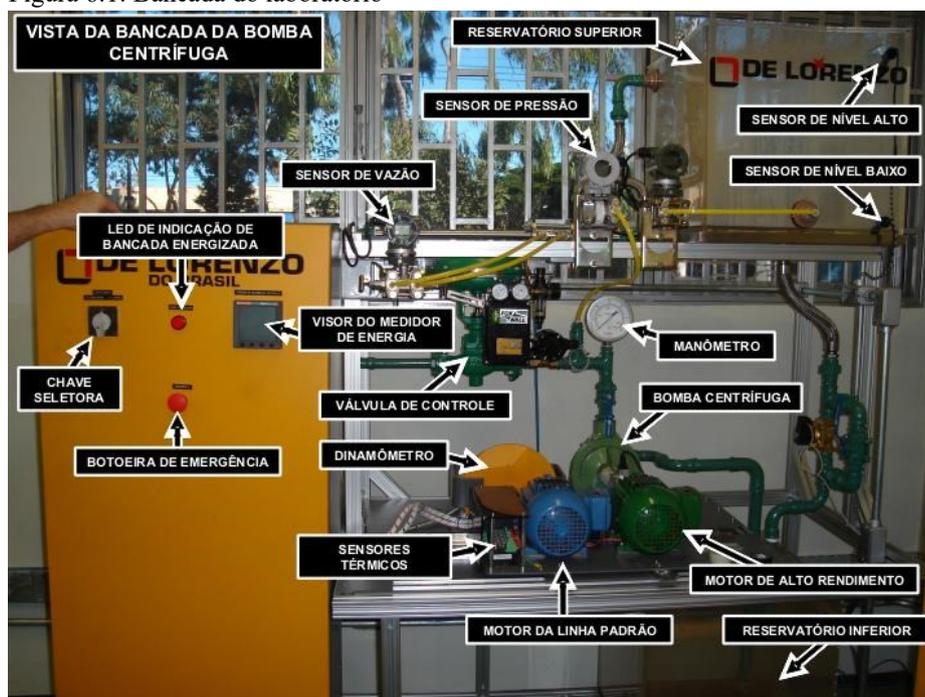
Contudo, a viabilidade de se obter uma grande economia de energia elétrica, conforme vislumbrado pelas Leis de Afinidade, serve de incentivo à verificação prática da metodologia de eficiência energética possibilitando a comprovação econômica desta técnica de controle de vazão.

## 6. ENSAIOS EXPERIMENTAIS

### 6.1. Descrição da bancada do sistema de bombeamento do laboratório de eficiência energética da FEELT-UFU

Na figura 6.1, mostra-se a bancada do laboratório da eficiência energética da Faculdade de Engenharia Elétrica (FEELT) da Universidade Federal de Uberlândia (UFU), o qual é composto pelos seguintes componentes: reservatórios superior e inferior, bomba centrífuga, válvulas, motores elétricos de indução trifásicos, painel de manobra, proteção e controle, sensores de vazão e de pressão, e também outros equipamentos necessários para a realização dos ensaios experimentais propostos.

Figura 6.1: Bancada do laboratório



Fonte: ALMEIDA, 2010

#### Reservatórios

Na bancada mostrada acima é composto por dois reservatórios (inferior e superior), cada reservatório com a capacidade de 100 litros.

#### Bomba centrífuga

A bomba centrífuga no laboratório de eficiência energética é do fabricante Schneider Motorbombas, com as seguintes informações: modelo 92 SHA, 3450 rpm e 1,5 cv.

## **Válvula de estrangulamento**

Na figura 6.2 ilustra a válvula de estrangulamento que foi utilizado para o ensaio, a qual é responsável pelo controle das vazões pelo método do estrangulamento da válvula.

Figura 6.2: Válvula de estrangulamento



Fonte: GUIMARÃES, 2008

Na bancada do laboratório foi utilizada a válvula na fabricação Fox Wall, linha Global controle com o modelo de C52-3/4-150-RF-CB-N-T-SI-3/4-316/D33/602F.

## **Motores de indução trifásico da linha padrão e de alto rendimento**

Os dois motores que foram utilizados na bancada para realizar o acionamento da bomba centrífuga foram: motor de linha ou convencional em cor azul e o motor de alto rendimento está com identificado com a cor verde.

Figura 6.3: Motor da indução trifásica de linha e motor de alto rendimento



Fonte: Autor

Descrição das características de placa dos motores de indução trifásicos mencionados

❖ **Motor da linha padrão - cor azul**

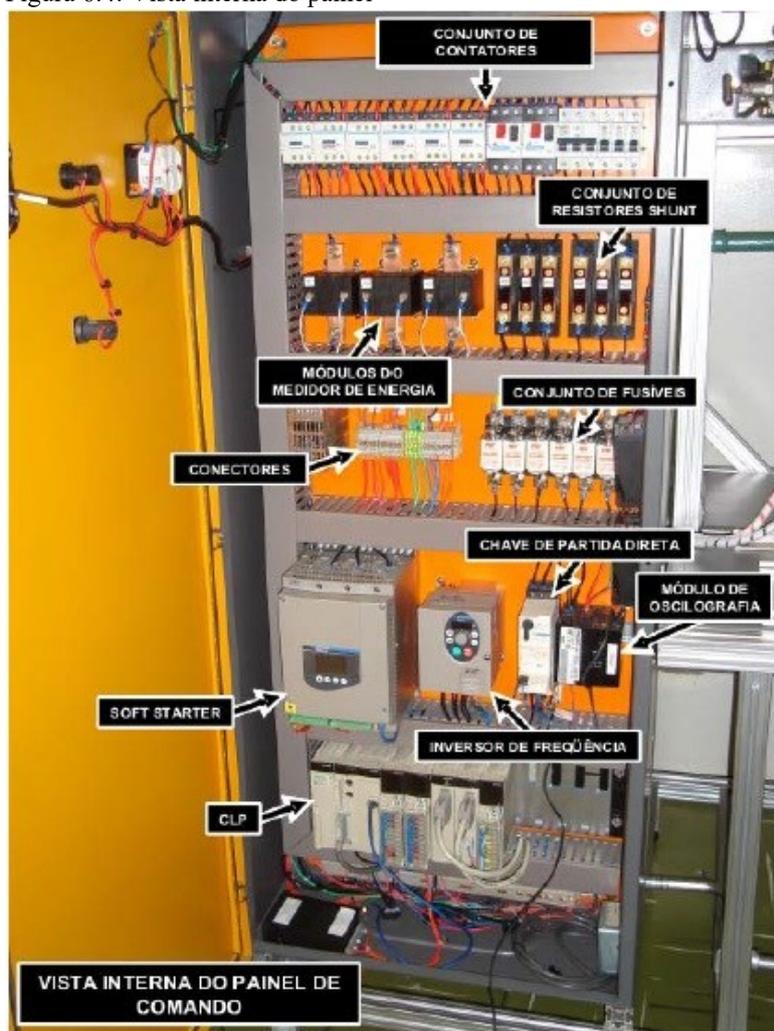
- Modelo: E36350;
- Grau de proteção: IP55;
- Isolação: B;
- Regime: S1;
- Potência nominal: 1,5CV;
- Tensões nominais: 220/380 V;
- Correntes nominais: 4,27/2,47 A;
- Frequência nominal: 60 Hz;
- Velocidade de rotação nominal: 3370rpm;
- Razão entre corrente de partida e corrente nominal ( $I_p/I_n$ ): 7,5;
- Categoria de desempenho: N;
- Fator de serviço: 1,15;
- Rendimento nominal: 78,6;
- Fator de potência nominal: 0,86.

#### ❖ Motor de alto rendimento - cor verde

- Modelo: G192961;
- Grau de proteção: IP55;
- Isolação: F;
- Regime: S1;
- Potência nominal: 1,5CV;
- Tensões nominais: 220/380 V;
- Correntes nominais: 4,02/2,33 A;
- Frequência nominal: 60 Hz;
- Velocidade de rotação nominal: 3390rpm;
- Razão entre corrente de partida e corrente nominal ( $I_p/I_n$ ): 7,5;
- Categoria de desempenho: N;
- Fator de serviço: 1,15;
- Rendimento nominal: 82,5;
- Fator de potência nominal: 0,87.

Na figura 6.4, mostra outros detalhes sobre a vista interna do quadro de baixa tensão de manobra, proteção e controle. Este painel é basicamente composto por uma chave geral de ligar ou desligar, uma chave botoeira de emergência e um sistema de medição dos parâmetros elétricos que é constituído por um multimedidor digital das grandezas elétricas de acordo com o modelo de PM 850, de fabricação Schneider. A comunicação tanto para estes equipamentos, quanto também para acionamentos dos motores como: partida direta, partida suave e o conversor de frequência, é realizado através da rede de comunicação do módulo de controle (CLP-Controlador Logico Programável).

Figura 6.4: Vista interna do painel



Fonte: GUIMARÃES, 2008

### Partida direta

A partida direta é realizada através da utilização de um disjuntor conhecido como TeSys de fabricação Telemecanique.

### Partida suave

O acionamento dos motores para o controle de vazão com a válvula de estrangulamento, utilizou-se chave **soft-starter**, cujo modelo é Altistart 48 – ATS 48D1Q, para controle de equipamento com a potência até 4 KW.

### Conversor de frequência

Dentro do painel de comando há também um conversor de frequência que foi utilizado nos ensaios, o qual é de fabricação da Telemecanique da linha Altivar 31-ATV 31HU11M3XA.

Figura 6.5: Conversor de frequência



Fonte: BELINOVSKI, 2011

## 6.2. Etapas para iniciar a realização experimental

Para iniciar a realizar do experimento na bancada do laboratório da eficiência energética foram necessários os seguintes procedimentos:

Primeiramente verifica-se se o painel de controle identificado pela figura 6.6 está conectado corretamente à rede. Posteriormente, liga-se o comando geral do painel.

Figura 6.6: Painel de controle



Fonte: Autor

Assim, liga-se o computador e o monitor. Na figura 6.7, aparecerá a tela inicial do supervisor.

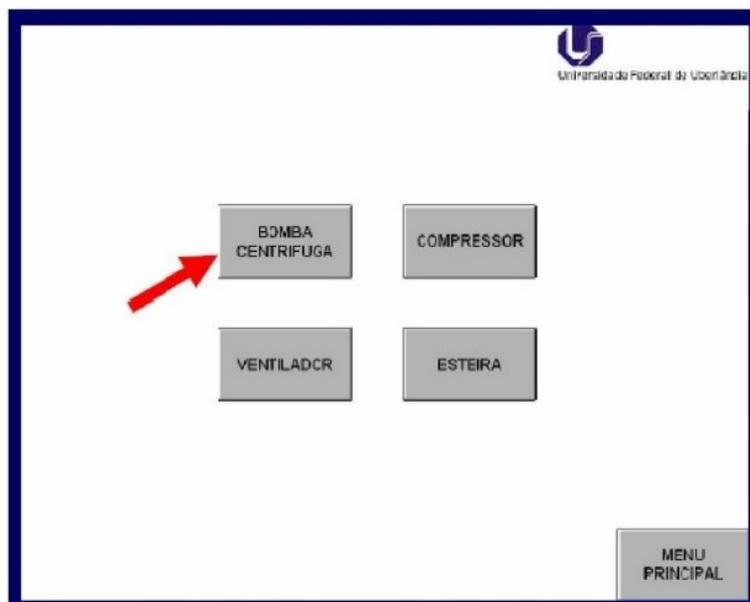
Figura 6.7:Tela inicial do sistema supervisório



Fonte: BELINOVSKI, 2011

Depois de aparecer a janela na figura mencionada, pode-se clicar na chave que está no canto superior para log on com o nome e a senha. Assim, o sistema mostra ao o usuário todos os sistemas industriais disponíveis, os quais estão identificados na figura 6.8.

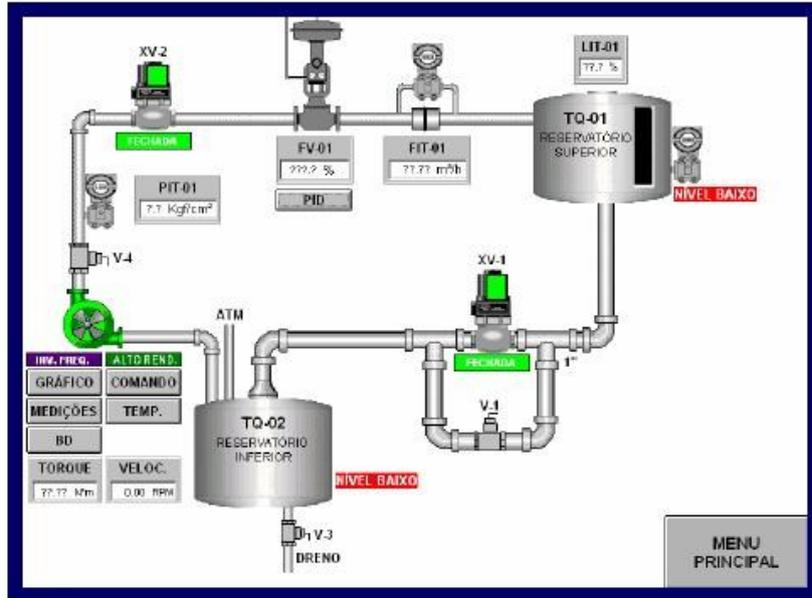
Figura 6.8:Tela de escolhe sistemas industriais disponíveis



Fonte: GUIMARÃES, 2008

Portanto, o usuário pode optar um dos sistemas industriais apresentados. Neste trabalho de conclusão de curso a escolha recaiu sobre a bomba centrífuga. Desta forma, a figura 6.9, identifica os equipamentos envolvidos na bancada da bomba centrífuga.

Figura 6.9: Bancada da bomba centrífuga



Fonte: GUIMARÃES, 2008

Na janela das bombas, um dos motores podem ser acoplados. No fluxograma descrito, pode – se clicar no comando que vai originar a tela ilustrada pela figura 6.10.

Figura 6.10: Tela dos comandos



Fonte: GUIMARÃES, 2008

Isto posto, seleciona-se, um dos tipos das partidas que estão dispostos na figura 6.10. Observando-se que, quando selecionar ATV31 inversor de frequência, aparecerá o tempo de aceleração e desaceleração e a necessidade de variar esses valores. Por outro lado, caso a

escolha recaia na partida direta, não é necessário ajustar o de tempo de aceleração e desaceleração.

Dentro deste contexto, o controle da vazão pode ser obtida pela utilização do método com a válvula de estrangulamento ou com a utilização do inversor de frequência. Ao clicar o PID na tela do fluxograma da figura 6.11, aparecerá a nova tela do PID.

Figura 6.11:Tela de PID



Fonte: GUIMARÃES, 2008

Na tela do PID, clicar a opção Manual e digitar os valores no MV. Se no MV o valor é 100%, isto é, a válvula totalmente aberta. Haverá necessidade de alterar o valor de MV em porcentagem, caso a escolha para a seleção seja realizada manualmente.

Logo;

Antes de ligar o motor, deve-se verificar os seguintes itens:

- TQ-02-Cheio de líquido;
- V-1-Fechada manualmente;
- V-3-Fechada manualmente;
- V-4-aberta manualmente;
- TQ-01-Vazio;
- XV-2-Fechada pelo sistema;
- XV-1-Fechada pelo supervisor.

Onde: TQ é tanque e V é a válvula.

Escolhendo-se a partida direta como foi citado na figura 6.10, tem-se:

Ligar o motor no comando da figura 6.10. A bomba centrífuga começa a ser acionada. A válvula XV-2 é aberta automaticamente pelo sistema e faz a água no TQ-2 começar encher a TQ-1, e fica sendo monitorada pelo medidor de nível (LIT-01).

Nota: Caso queira esvaziar o tanque TQ-1, é só selecionar a válvula XV-1 na opção manual e abrir a válvula. Assim, pode-se obter as grandezas medidas nos experimentos, as quais estão ilustradas na figura 6.9. Na figura 6.12, mostra-se um histórico de medições.

Figura 5.12: Histórica de medições

ID	Data	Hora	Tensão RS	Tensão ST	Tensão TR	Tensão Média	Corrente R	Corrente S
1	14/06/2007	08:27:49	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
2	14/06/2007	08:27:49	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
3	14/06/2007	08:27:49	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
4	14/06/2007	08:27:50	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
5	14/06/2007	08:27:50	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
6	14/06/2007	08:27:50	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
7	14/06/2007	08:27:50	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
8	14/06/2007	08:27:51	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
9	14/06/2007	08:27:51	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
10	14/06/2007	08:27:51	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
11	14/06/2007	08:27:51	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
12	14/06/2007	08:27:52	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
13	14/06/2007	08:27:52	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
14	14/06/2007	08:27:52	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
15	14/06/2007	08:27:52	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
16	14/06/2007	08:27:53	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
17	14/06/2007	08:27:53	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
18	14/06/2007	08:27:53	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
19	14/06/2007	08:27:53	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000

Fonte: GUIMARÃES, 2008

### 6.3. Análise dos resultados

#### 6.3.1. Caso 1 – Válvula de estrangulamento

Dentro do exposto, no primeiro caso para este experimento, utilizou-se a partida a plena tensão, para analisar o consumo de energia elétrica, utilizando-se a válvula de estrangulamento com diferentes aberturas a fim de obter a vazão desejada. Na tabela 6.1, estão os valores hidráulicos e elétricos obtidos para a situação mencionada no caso 1.

Tabela 6.1: Valores medidos com válvula de estrangulamento

$Q\left(\frac{m^3}{h}\right)$	$P\left(\frac{kgf}{cm^2}\right)$	$P(mca)$	$P_E(W)$	Abertura (%)
0,80	2,60	26,00	834,00	45,00
1,30	2,30	23,00	894,00	60,00
1,80	2,50	25,00	940,00	70,00
2,20	2,30	23,00	983,00	80,00
2,60	2,20	22,00	1022,00	90,00
3,00	2,10	21,00	1048,00	100,00

Fonte: Autor

### 6.3.2. Caso 2- Conversor de frequência

Neste caso 2 o sistema de bombeamento foi realizado pela utilização do conversor de frequência, objetivando variar a vazão do sistema pela variação da rotação do motor. Neste sentido, a tabela 6.2, apresenta os valores hidráulicos e elétricos obtidos para o caso 2 apresentado.

Tabela 6.3: Valores medidos com conversor de frequência

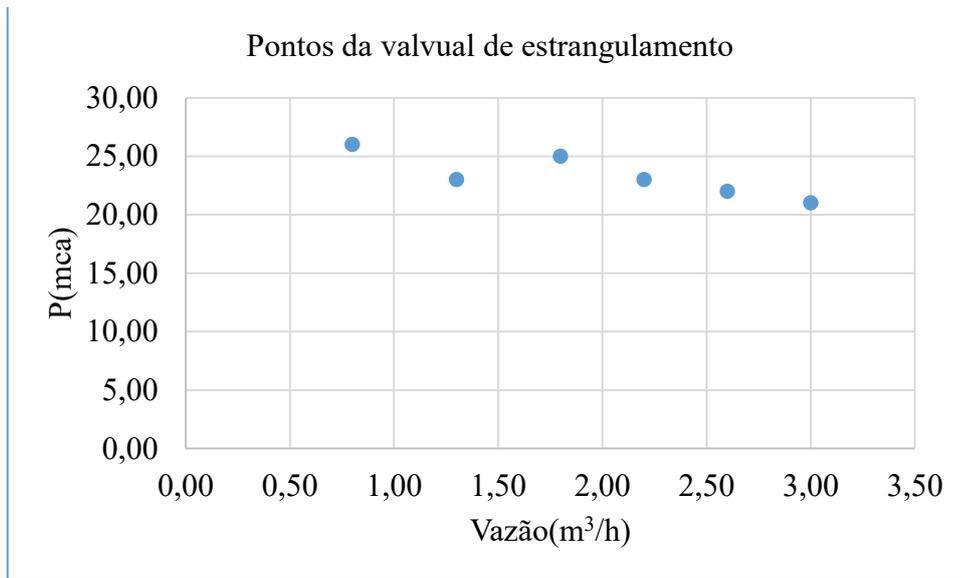
$Q\left(\frac{m^3}{h}\right)$	$P\left(\frac{kgf}{cm^2}\right)$	$P(mca)$	$P_E(W)$	Frequência (Hz)
0,00	0,14	1,40	110,00	21,00
1,50	0,30	3,00	218,00	30,00
2,00	0,70	7,00	360,00	38,00
2,40	1,00	10,00	522,00	44,00
2,90	1,60	16,00	830,00	52,00
3,30	2,10	21,00	1211,00	60,00

Fonte: Autor

### 6.3.3. Levantamento da curva da bomba e do sistema

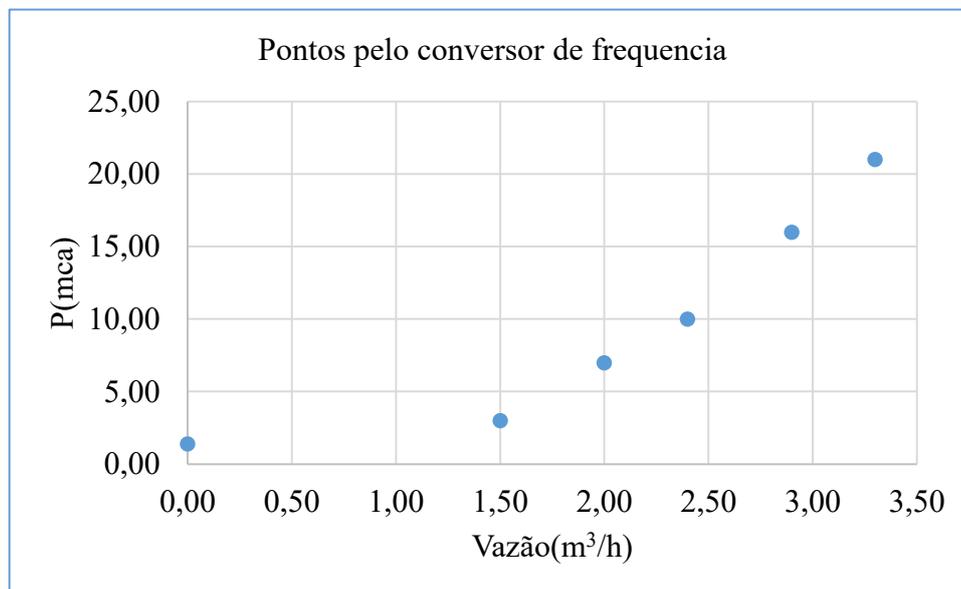
Então, tomando-se como base os valores das vazões e das alturas manométricas obtidas nos ensaios experimentais, pode-se traçar os pontos correspondentes para a obtenção da curva  $Q = f(Q)$  para o sistema utilizando-se a válvula de estrangulamento ou a aplicação com o conversor de frequência, as quais estão identificadas, respectivamente, nas figuras 6.13 e 6.14.

Figura 6.13: Pontos da válvula de estrangulamento



Fonte: Autor

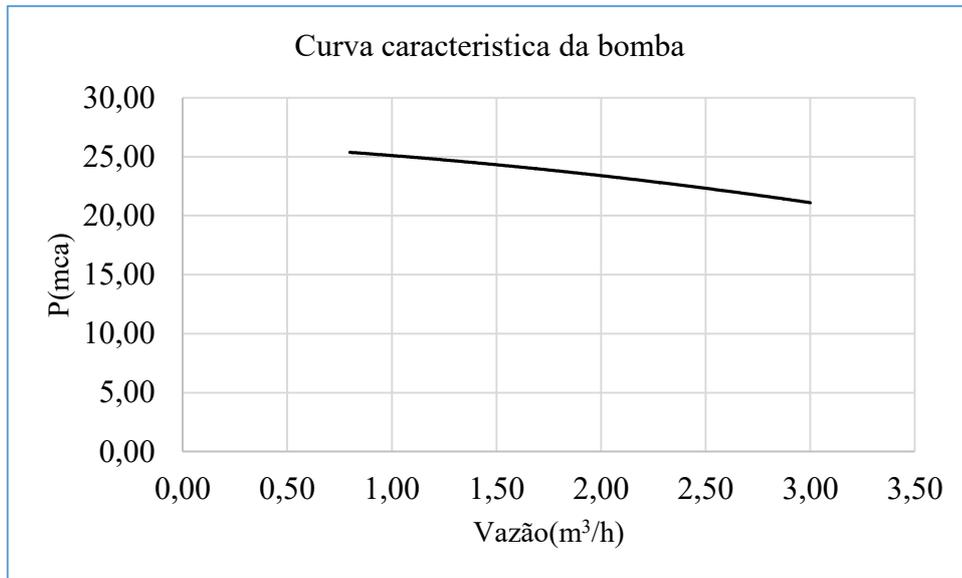
Figura 6.14: Pontos de conversor de frequência



Fonte: Autor

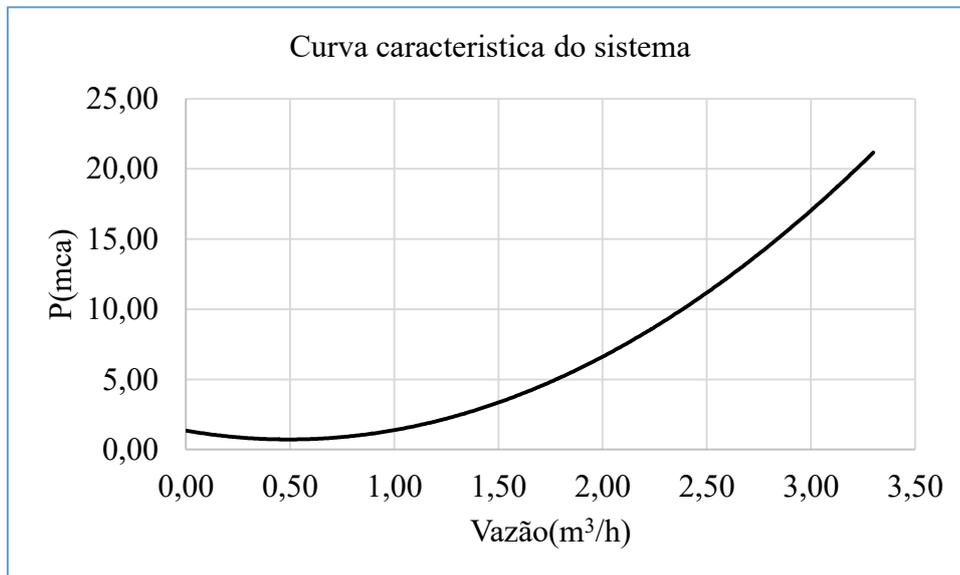
Sabendo-se que a curva da bomba pode ser representada matematicamente por uma função quadrática, e utilizando-se a regressão polinomial de segundo grau, pode-se plotar as curvas características da bomba e do sistema.

Figura 6.15: Curva característica da bomba



Fonte: Autor

Figura 6.16: Curva característica do sistema



Fonte: Autor

Logo, obtém-se matematicamente pelo método da regressão polinomial, as equações das curvas características da bomba e do sistema, as quais estão ilustradas pelas expressões 6.1 e 6.2.

$$H(Q) = -0,2925Q^2 - 0,8273Q + 26,222 \quad 6.1$$

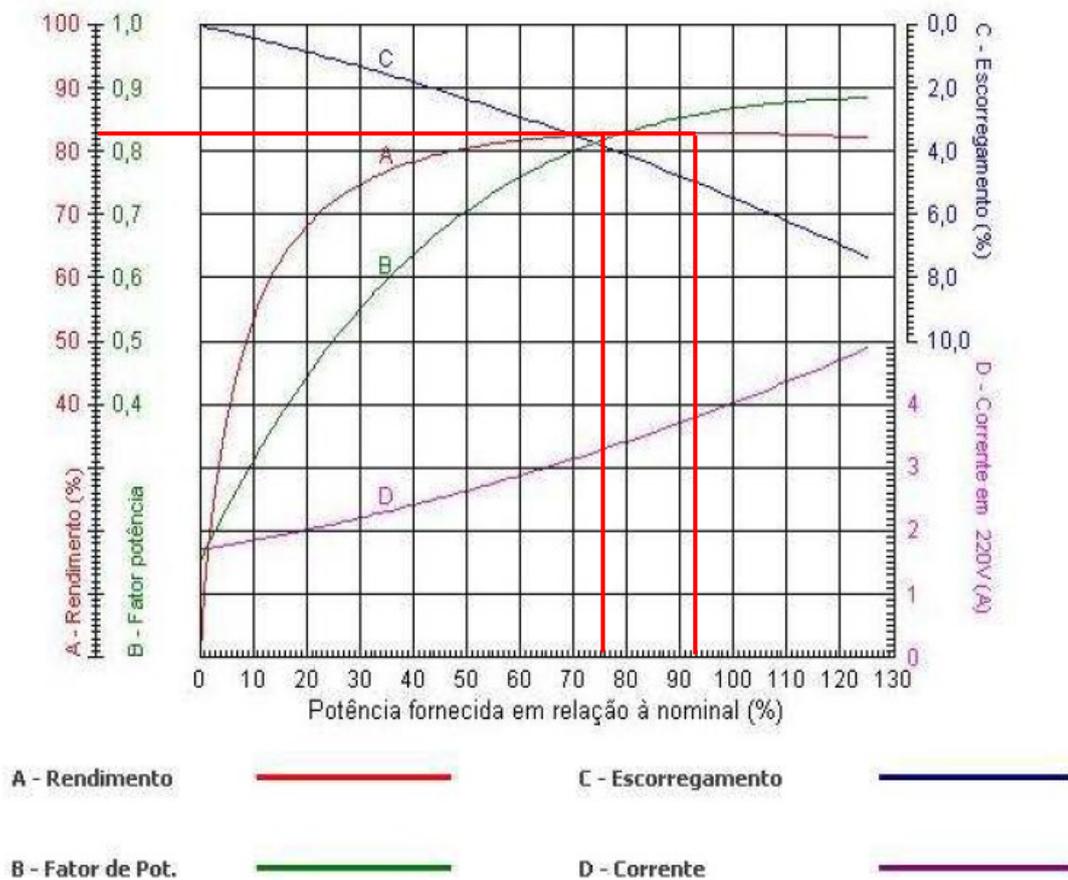
$$H(Q) = 2,5961Q^2 - 2,5595Q + 1,3478$$

6.2

### 6.3.4. Obtenção do rendimento da bomba, utilizando-se a válvula de estrangulamento

Tomando-se como base os valores medidos no sistema motor-bomba, utilizando-se a válvula de estrangulamento, as potências ativas ficaram entre 834 W e 1048 W. A potência nominal mecânica do motor de alto rendimento é de 1,5 cv, que equivale a 1104 W. Nestas situações operacionais descritas, tem-se os valores de carregamento do motor, respectivamente, de 75,54% e 93,94%. Utilizando-se as curvas características do motor, obtém-se o rendimento da máquina ficou entre 0,82 e 0,83 A figura 6.17 identifica o procedimento descrito.

Figura 6.17: Curva característica do motor



Fonte: BELINOVSKI, 2011

Com base nos valores medidos experimentalmente identificados na tabela 6.1, com vazão e pressão, pode-se calcular a potência de saída da bomba conforme a equação 2.2. Pela curva característica do motor adota-se o rendimento de 0,82 e pode-se calcular a potência no

eixo do motor que é a mesma potência no eixo da bomba. Desta forma, calcula-se o rendimento da bomba. A tabela 6.3 indica os valores de rendimento da bomba para cada situação de vazão e pressão.

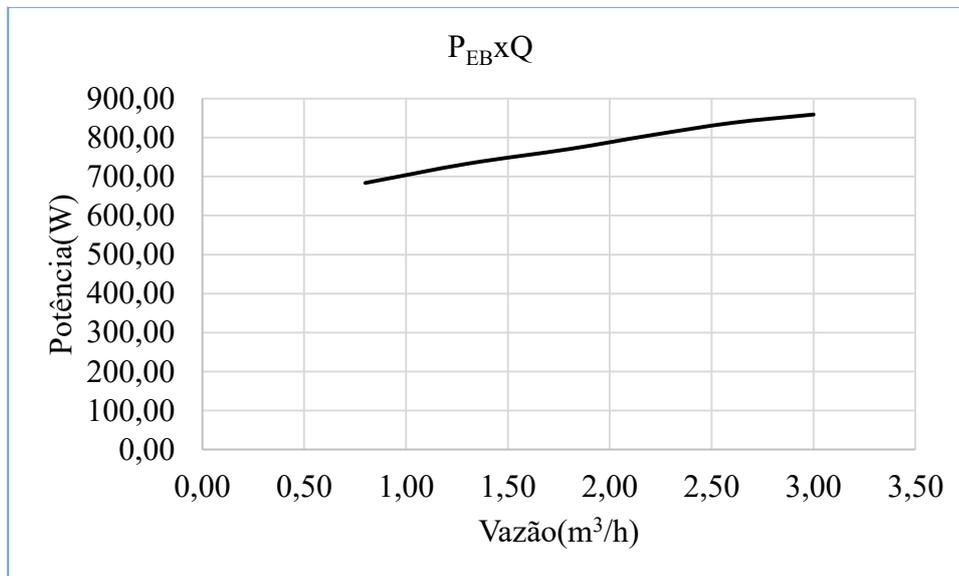
Tabela 6.3: Valores calculados com válvula de estrangulamento

$Q\left(\frac{m^3}{h}\right)$	$P(mca)$	$P_E(W)$	$\eta_M(\%)$	$P_{EB}(W)$	$P_{SB}(W)$	$\eta_B(\%)$
0,80	26,00	834,00	82	683,88	56,68	8,29
1,30	23,00	894,00	82	733,08	81,48	11,11
1,80	25,00	940,00	82	770,80	122,63	15,91
2,20	23,00	983,00	82	806,06	137,89	17,11
2,60	22,00	1022,00	82	838,04	155,87	18,60
3,00	21,00	1048,00	82	859,36	171,68	19,98

Fonte: Autor

A partir dos valores obtidos na tabela 6.3, é possível plotar o gráfico da potência mecânica no eixo da bomba em função da vazão fornecida, a qual está identificada na figura 6.18.

Figura 6.18: Curva característica da potência com a válvula de estrangulamento

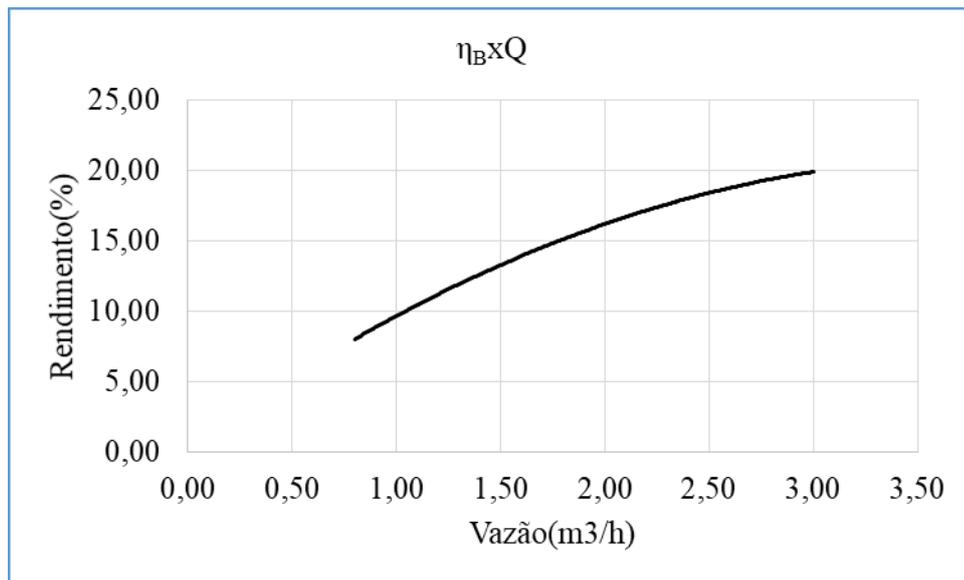


Fonte: Autor

Para os valores dos rendimentos e das vazões, indicados na figura 6.19, pode notar que o rendimento da bomba varia na forma quadrática. Utilizando-se a regressão polinomial da segunda ordem, obtém-se a expressão 6.3.

$$\eta_{B\%}(Q) = -1,4221Q^2 + 10,822Q + 0,2649 \quad 6.3$$

Figura 6.19: Curva característica do rendimento da bomba



Fonte: Autor

### 6.3.5. Obtenção do Rendimento da bomba, utilizando-se o conversor de frequência

Analogamente ao item anterior, chega-se a tabela 6.4, onde mostra-se os valores calculados para a obtenção dos rendimentos do motor e da bomba.

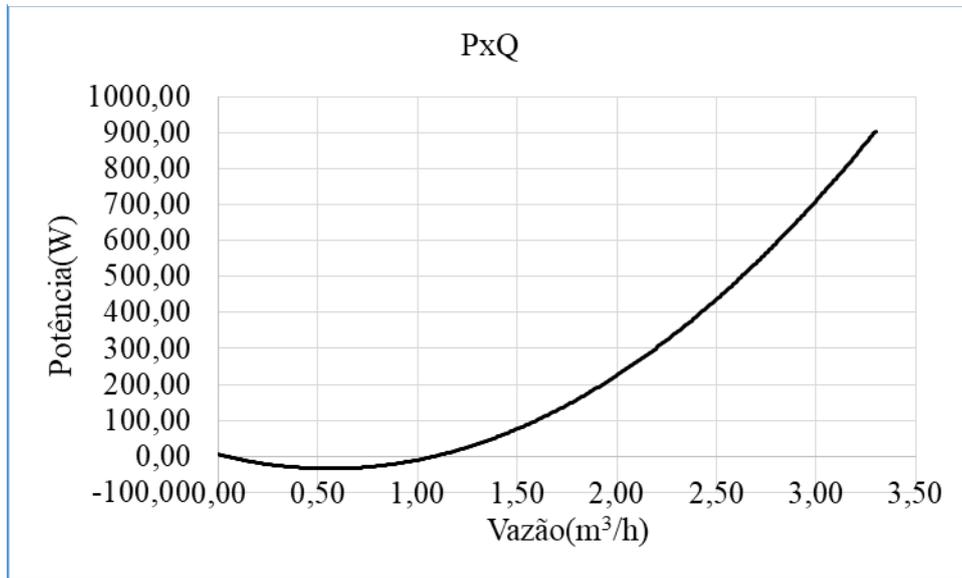
Tabela 6.4: Valores calculados com inversor de frequência

$Q \left( \frac{m^3}{h} \right)$	$P(mca)$	$P_E (W)$	$\eta_B (\%)$	$P_{EB} (W)$	$P_{SB} (W)$	Carregamento (%)	$\eta_M (\%)$
0,00	1,40	110,00	0,26	0,00	0,00	9,96	52
1,50	3,00	218,00	13,30	92,22	12,26	19,75	68
2,00	7,00	360,00	16,22	235,20	38,15	32,61	75
2,40	10,00	522,00	18,05	362,41	65,40	47,28	80
2,90	16,00	830,00	19,69	642,19	126,44	75,18	82
3,30	21,00	1211,00	20,49	921,59	188,84	109,69	81

Fonte: Autor

Assim, com os valores calculados na tabela 6.4, plota-se o gráfico da potência no eixo da bomba em função da vazão imposta.

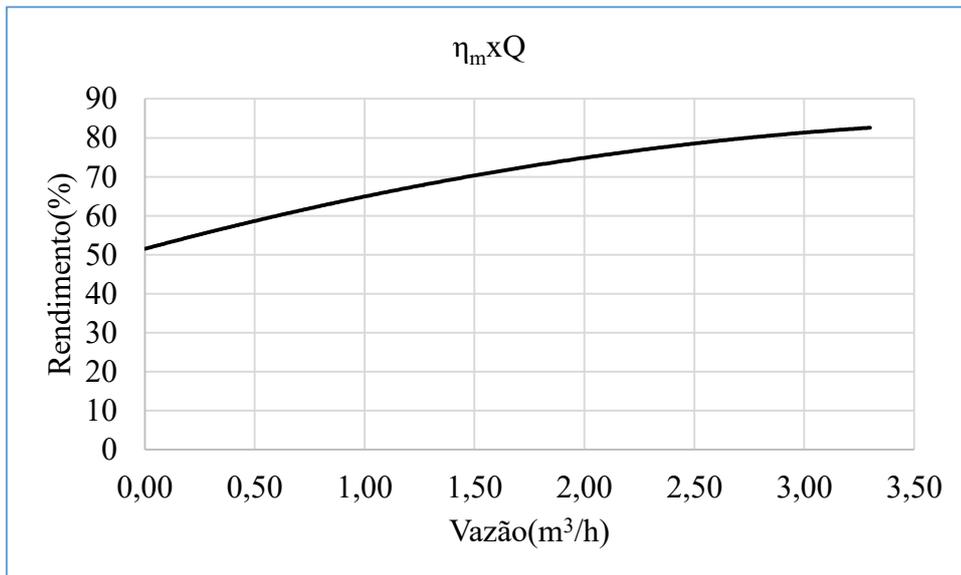
Figura 6.20: Curva característica da potência com conversor de frequência



Fonte: Autor

Na figura 6.21, e com os valores calculados na tabela 6.4, plota-se a curva característica do rendimento do motor em função das vazões.

Figura 6.21: Curva característica do rendimento com conversor de frequência



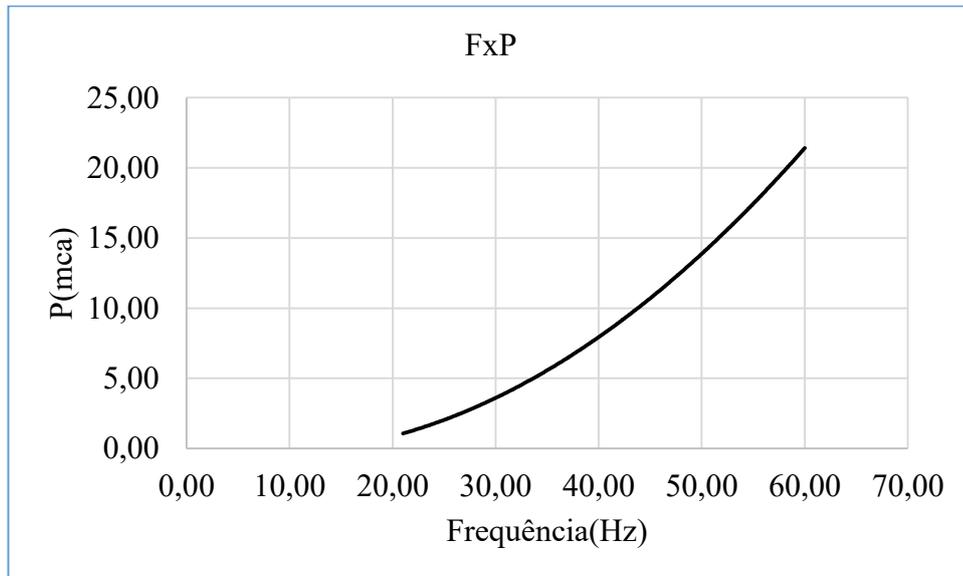
Fonte: Autor

Aplicando-se a regressão polinomial, obtém-se matematicamente a expressão do rendimento da bomba em função da vazão, a qual é indicada pela equação 6.4.

$$\eta_{M\%}(Q) = -5,0637Q^2 + 40,968Q - 1,1052 \quad 6.4$$

Complementarmente, com os valores medidos na tabela 6.2, e aplicando-se a lei da afinidade, pode-se plotar os gráficos da pressão em função da frequência e da vazão em função da frequência, as quais estão indicados nas figuras 6.22 e 6.23.

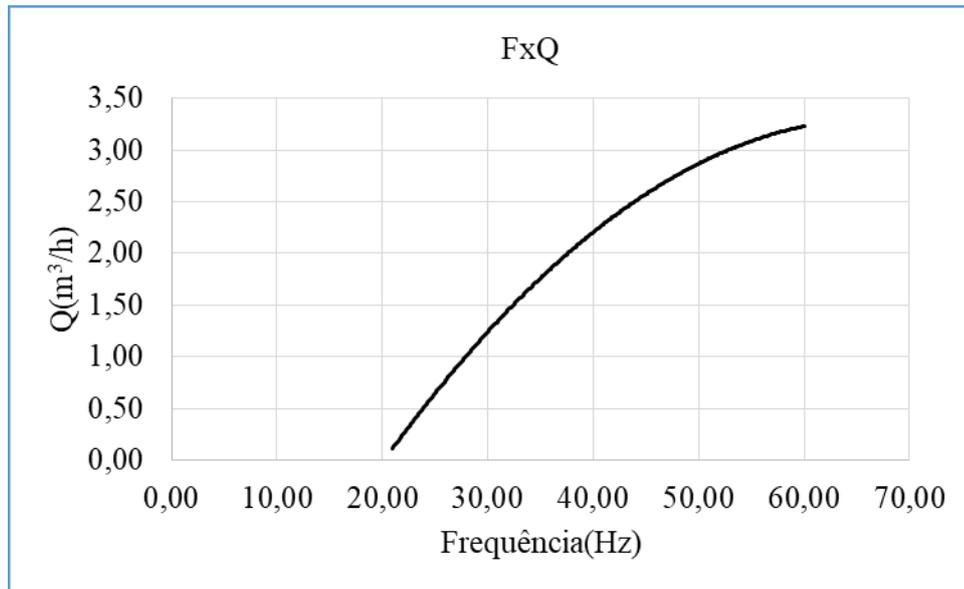
Figura 6.22: Curva característica da pressão em função a frequência



Fonte: Autor

Percebendo-se, pela lei de afinidade a altura manométrica varia com ao quadrado em relação com a frequência. E na figura 6.23 a frequência varia praticamente linear em relação com a vazão conforme a lei de afinidade.

Figura 6.23: Curva característica da frequência com a vazão



Fonte: Autor

Percebe-se que a vazão varia diretamente proporcional a frequência e a pressão varia com o quadrado da frequência, resultados que também são obtidos, aplicando-se a lei de afinidade.

#### 6.4. Análise financeira

Conforme a metodologia analítica mostrada anteriormente, chega-se a montar as tabelas 6.5 e 6.6, respectivamente para a situação com válvula de estrangulamento e com a utilização de conversores de frequência. Desta forma, pode-se analisar economicamente para o motor que trabalha 4000 horas por ano, se é viável ou não troca de motores com inversor de frequência. A tarifa utilizada no cálculo é referente a categoria B3 – Baixa Tensão, onde o valor de referência para os cálculos foi de R\$= 0,62833/KWh.

Tabela 6.5: Válvula de estrangulamento

$P_E (W)$	Tempo (h)	Energia (KWh)	Custo (R\$ 0,62833/ KWh)
834,00	1200	1000,80	R\$ 628,83
894,00	900	804,60	R\$ 505,55
940,00	700	658,00	R\$ 413,44
983,00	550	540,65	R\$ 339,71
1022,00	400	408,80	R\$ 256,86
1048,00	250	262,00	R\$ 164,62
Total		3674,85	R\$ 2309,02

Fonte: Autor

Tabela 6.6: Conversor de frequência

$P_E (W)$	Tempo (h)	Energia (KWh)	Custo (R\$ 0,62833/ KWh)
110,00	1200	132,00	R\$ 82,94
218,00	900	196,20	R\$ 123,28
360,00	700	252,00	R\$ 158,34
522,00	550	287,10	R\$ 180,39
830,00	400	332,00	R\$ 208,61
1211,00	250	302,75	R\$ 190,23
Total		1502,05	R\$ 943,78

Fonte: Autor

Portanto, pelos cálculos analíticos, a economia de energia anual é aproximadamente de 2172,80 KWh, o que equivale a uma quantia economizada anual de R\$ 1365,24.

Para o cálculo do payback, considerou-se os seguintes valores no mercado atual, ou seja:

- A taxa de juros com o retorno de um investimento no tesouro direto de 6,87% anual;
- A taxa do aumento da tarifa de energia elétrica de 4,27%;
- Motor de indução trifásico- 2 polos-220/380V - R\$ 920,00.
- Inversor de Frequência Telemecanique - 220V - R\$ 1200,00.
- Então, o tempo de retorno simples é igual a:

Sendo:

$$\Delta C = R\$1200 + R\$920 = R\$2120$$

$$\Delta E_{R\$anual} = R\$1365,24$$

$$\Delta E_{R\$mensal} = R\$113,77$$

- Tempo de retorno simples

$$t_{RS} = \frac{\Delta C}{Eco_{RS}}$$

$$t_{RS} = \frac{2120}{1365,24}$$

$$t_{RS} = 1,55 \quad \text{Anos}$$

$$t_{RS} = 18,63 \quad \text{Meses.}$$

- Por outro lado, o tempo de retorno capitalizado, desprezando o aumento no custo da energia elétrica é igual a:

$$t_{Rc} = \frac{\log\left(\frac{Eco_{R\$Anual}}{Eco_{R\$Anual} - \Delta C \times \frac{i}{100}}\right)}{\log\left(1 + \frac{i}{100}\right)}$$

$$t_{Rc} = \frac{\log\left(\frac{1365,24}{1365,24 - 2120 \times \frac{6,87}{100}}\right)}{\log\left(1 + \frac{6,87}{100}\right)}$$

$$t_{Rc} = 1,69$$

Anos

$$t_{Rc} = 20,37$$

Meses.

- Deve-se salientar que, o tempo de retorno capitalizado considerando aumento do custo de energia elétrica é igual a:

$$i_L = \left[ \left( \frac{1 + \frac{i}{100}}{1 + \frac{ie}{100}} \right) - 1 \right] \times 100$$

$$i_L = \left[ \left( \frac{1 + \frac{6,87}{100}}{1 + \frac{4,27}{100}} \right) - 1 \right] \times 100$$

$$i_L = 2,49\%$$

$$t_{Rc} = \frac{\log\left(\frac{Eco_{R\$Anual}}{Eco_{R\$Anual} - \Delta C \times \frac{i_L}{100}}\right)}{\log\left(1 + \frac{i_L}{100}\right)}$$

$$t_{Rc} = \frac{\log\left(\frac{1365,24}{1365,24 - 2120 \times \frac{2,49}{100}}\right)}{\log\left(1 + \frac{2,49}{100}\right)}$$

$$t_{Rc} = 1,60 \quad \text{Anos}$$

$$t_{Rc} = 19,23 \quad \text{Meses.}$$

- Assim, o cálculo da energia elétrica economizada ao longo da vida útil do sistema de bombeamento é:

$$Eco_{VU} = Eco_{Ano} \times V_U$$

$$Eco_{VU} = 1365,24 \times 13,3$$

$$Eco_{VU} = 18,157.692 KWh$$

Nota-se que para o cálculo de investimento com o tempo 19,23 meses para um sistema de bombeamento em que a sua vida útil média de 13,3 anos, economizará um consumo de energia elétrica ao longo da sua vida foi de aproximadamente de 19,0 MWh. Deve-se salientar que se o tempo de retorno capitalizado, o qual considera um aumento do custo de energia elétrica, a taxa de juros é menor. Assim, o tempo de retorno também diminuirá.

## **7. ÍNDICE DE RENDIMENTO DOS MOTORES ELÉTRICOS**

### **7.1. Consideração iniciais**

O setor industrial brasileiro consome aproximadamente 40% do consumo da energia elétrica do país. Deve-se citar que, 70% do consumo de energia elétrica utilizada nas indústrias são consumidas pelos motores elétricos. A partir disso, foi em 2009 entrou em vigor da portaria nº 553 com a iniciativa de estabelecer os níveis mínimos de rendimentos para maquinas e equipamentos, com o intuito de reduzir o consumo de energia elétrica.

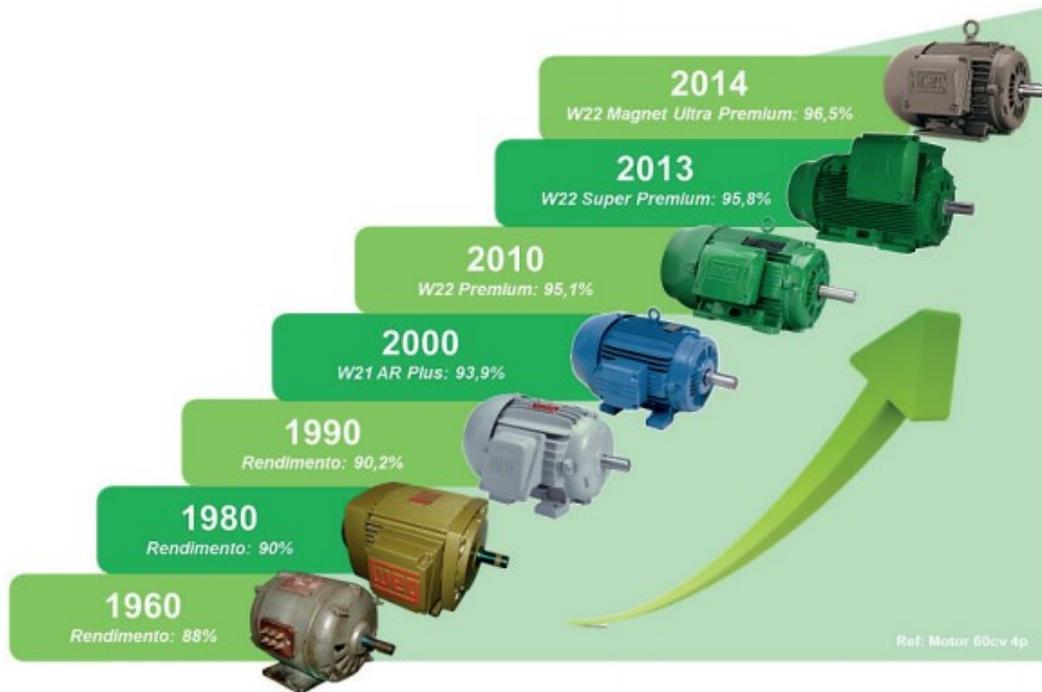
### **7.2. Evolução de índice do rendimento**

No Brasil, os motores elétricos classificados como motor de IR1 (linha padrão ou convencional) e motor de IR2 (alto rendimento) foram fabricados somente até em 2010. O motor de IR1 (linha padrão ou convencional), foi permitido para a fabricação até em 2009. Depois de 2010 os motores elétricos com eficiências iguais ou superiores a motor de IR2 (alto rendimento), perante das especificações regulamentadas, podem ser fabricadas e importados no Brasil. Em 2013, conforme a norma ABNT NBR 17094 – 1 foram especificados os valores mínimos de rendimentos para os dois motores elétricos como são: motor de IR2 (alto rendimento) e motor de IR3 Premium. O motor de IR2 (alto rendimento) foi permitido até em Agosto de 2019.

Após agosto de 2019 começou a adotar o motor elétrico IR3 Premium, que garante mais eficiência, economia e competitividade para a indústria nacional. O motor IR3 Premium, foi anunciado pelo Governo Federal em 2017, mas a nova regra entrou em vigor em Agosto de 2019. Através da portaria interministerial nº 1, de 29 de junho de 2017, foi publicada no Diário Oficial da União em 30 de agosto de 2017, tornando válido e público o programa de metas para motores elétricos trifásicos de indução. Este motor elétrico possui a faixa de potência entre 0,16 cv até 500 cv e os polos de 2 a 8. Além de IR3, a Lei exigiu que fossem disponibilizadas as outras duas linhas que são: IR4 Super Premium que supera em um nível os rendimentos mínimos e IR5 Ultra Premium que supera em dois níveis os rendimentos mínimos exigidos pela legislação vigente. Na américa latina, o Brasil passa a ser pioneiro na admissão de um nível mínimo de rendimento dos motores elétricos.

Na figura abaixo mostra a evolução dos motores elétricos com os rendimentos para um motor de 60 cv e 4 polos.

Figura 7.1: Evolução dos motores elétricos



Fonte: Weg

## 8. CONCLUSÕES FINAIS

O sistema de bombeamento de água são compostos basicamente dos seguintes componentes: reservatórios tanto inferiores como superiores, conjunto de motor-bomba, tubulação de sucção e tubulação de recalque. Este sistema possui duas instalações típicas para a bomba, a bomba pode ser instalada em cima do reservatório inferior e também pode ser instalar em baixo do reservatório inferior dependendo do projetista. Além, das instalações haverá associação das bombas como associação em série e em paralelo. Na associação das bombas em série é para um sistema com maior altura manométrica com mesma vazão volumétrica. Assim, ao contrário da associação em paralelo, esta associação é utilizada para mesmas alturas manométrica, porém obtém-se uma maior vazão.

Os dois métodos para controlar as vazões ao longo deste trabalho são o controle da vazão com a válvula de estrangulamento e do conversor de frequência.

O controle da vazão com a válvula de estrangulamento, observa-se através da curva da bomba que ao reduzir da vazão do líquido, implicará no aumento da altura manométrica. Este método de controle permite controlar a vazão através de abertura e fechamento das válvulas. A desvantagem deste método é o maior consumo de energia elétrica. Por outro lado, o controle da vazão com conversor da frequência depende da variação da rotação.

A partir de toda a análise realizada na etapa de desenvolvimento para motores e equipamentos reais disponíveis no Laboratório de Eficiência Energética da Universidade Federal de Uberlândia (LEFE-UFU), pelos cálculos analíticos, a economia de energia anual é aproximadamente de 2172,80 KWh com uma quantia economizada anual de R\$ 1365,24 e considerando o aumento da taxa de energia elétrica, o retorno será a partir de 20 meses. Para um sistema de bombeamento em que a sua vida útil média de 13,3 anos, economia no consumo de energia elétrica ao longo da sua vida foi de aproximadamente de 19,0 MWh. Observando-se que, para o caso hipotética (Capítulo 5) gerou uma redução na conta de energia elétrica de 64,56% e no caso experimental (Capítulo 6) a redução foi aproximadamente de 60% na fatura de energia elétrica por ano.

Portanto, no âmbito da eficiência energética comparando-se os dois métodos de controle das vazões, o método de variação da velocidade de rotação da bomba é mais apropriado, pois o consumo de energia elétrica é menor.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

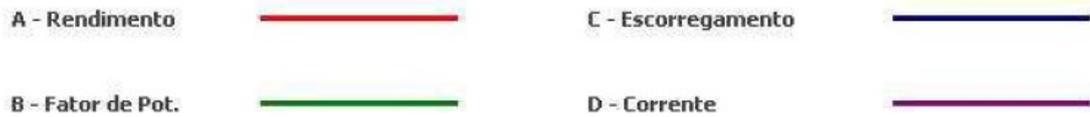
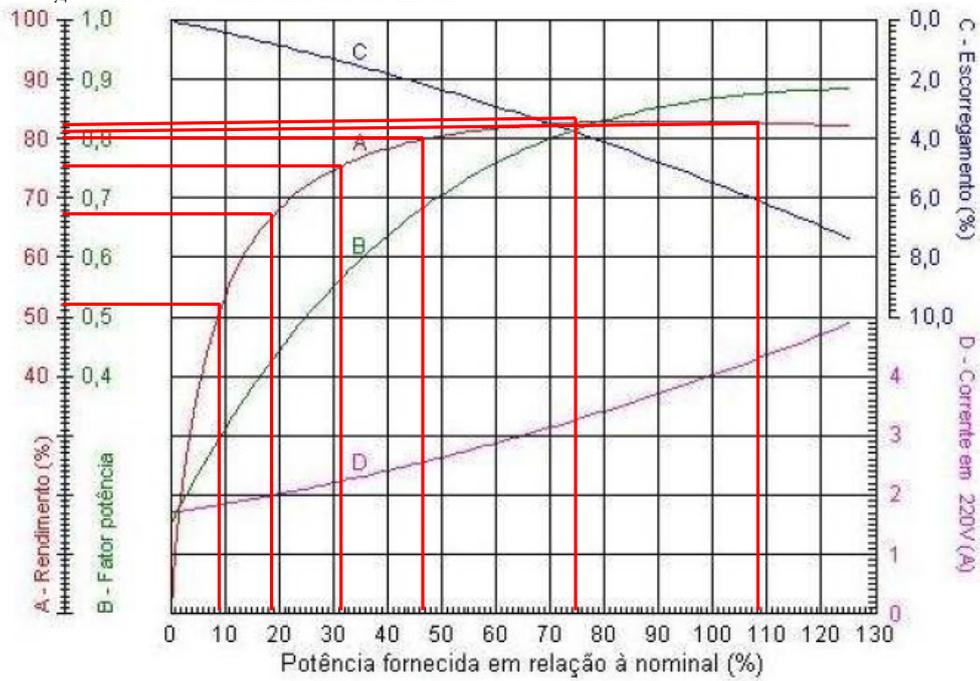
1. FERREIRA, R. A. Utilização de controladores de velocidade em sistemas de bombeamento sob o enfoque da eficiência energética. Iniciação Científica: IC: Convênio: Procel-Eletróbrás-UFU-FAU. Faculdade de Engenharia elétrica da Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia, 2007.
2. GOMES, H.P; CARVALHO, P.S.O. MANUAL DE SISTEMAS DE BOMBEAMENTO: Eficiência Energética. 1ª edição. João Pessoa: Editora Universitária – UFPB, 2012.
3. MONACHESI, M.G. CENTRAIS ELÉTRICAS BRASILEIRAS, FUPAI/EFFICIENTIA: Eficiência energética em sistemas de bombeamento. Rio de Janeiro: Eletróbrás, 2005.
4. GUIMARÃES. R. Comportamento elétrico, mecânico e hidráulico de um sistema de bombeamento sob o enfoque da qualidade de energia elétrica e eficiência energética. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia, 2008.
5. BELINOVSKI, K.D. Uma contribuição ao estudo de eficiência energética em sistemas industriais de ventilação. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia, 2011.
6. ALMEIDA, B.P. Comportamento elétrico, mecânico e hidráulico de um sistema de bombeamento sob o enfoque da qualidade de energia elétrica e eficiência energética[manuscrito]. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia, 2010.
7. DELAIBA, A.C. Material de aula: Instalações industriais.
8. SILVA, S.F.P. Material da aula de Eficiência Energética.
9. <https://www.investimentosenoticias.com.br/noticias/investimentos/tesouro-direto-confira-as-taxas-e-precos-hoje-12-08-2020>, acesso: 03/11/2020.
10. <http://www.jrubens.eng.br/download/tarifas.pdf>, acesso: 4/11/2020.

11. <https://diariodocomercio.com.br/economia/aneel-aprova-reajuste-tarifario-medio-de-427-para-a-cemig/>, acesso: 03/11/2020.
12. <https://www.weg.net/institutional/BR/pt/solutions/energy-efficiency/efficiency-index#:~:text=Em%20agosto%20de%202019%20entrou,comercializados%2C%20sejam%20novos%20ou%20usados.> Acesso: 13/12/2020.
13. <https://www.autservice.com.br/admin/assets/repositorio/767242d99a4425222e6652f5b7ba00e5.pdf>, acesso 13/12/2020.

# ANEXOS UTILIZADOS NO TRABALHO

## Anexo A

Figura A: Curva característica do motor



## Anexo B

Tabela B: Tarifas Cemig(2020) – Bandeira tarifária verde

<b>Grupo B – Baixa Tensão</b>			
<b>Tarifa convencional</b>			
Subgrupo Tarifa	Preço (R\$/kWh)		
B1-Residencial	0,62833		
B2-Rural	0,47753		
B3-Demais classes	0,62833		
B1-iluminacao publica	0,34559		
<b>Tarifa Branca</b>			
Subgrupo tarifa	Ponta	Intermediário	Fora ponta
B1-Residencial	1,19806	0,76971	0,51894
B2-Rural	0,95232	0,61006	0,40276
B3-Demais classes	1,24205	0,79610	0,52774
<b>Grupo A – media tensão</b>			
<b>Tarifa VERDE</b>			
Subgrupo tarifário	Demanda		
	Preço (R\$/kWh)		
A3a (30 kV a 44 kV)	13,95		
A4 (2,3 kV a 25 kV)	13,95		
A5 (subterrânea)	13,75		
Subgrupo Tarifário	Energia		
	Ponta	Fora ponta	
	Preço (R\$/kWh)	Preço (R\$/kWh)	
A3a (30 kV a 44 kV)	1,59969	0,35666	
A4 (2,3 kV a 25 kV)	1,59969	0,35666	
A5 (subterrânea)	2,29256	0,39420	
<b>Tarifa AZUL</b>			
Subgrupo Tarifário	Demanda		
	Ponta	Fora ponta	
	Preço (R\$/kWh)	Preço (R\$/kWh)	
A2 (88 kV a 138 kV)	9,81	3,70	
A3 (69 kV)	20,16	6,68	
A3a (30 kV a 44 kV)	43,85	13,95	
A4 (2,3 kV a 25 kV)	43,85	13,95	
A5 (subterrânea)	70,83	13,75	
Subgrupo Tarifário	Energia		
	Ponta	Fora ponta	
	Preço (R\$/kWh)	Preço (R\$/kWh)	
A2 (88 kV a 138 kV)	0,51005	0,33246	
A3 (69 kV)	0,52219	0,34460	
A3a (30 kV a 44 kV)	0,53425	0,35666	
A4 (2,3 kV a 25 kV)	0,53425	0,35666	
A5 (subterrânea)	0,57179	0,39420	

## Anexo C

Tabela C: Dados da vida útil dos motores elétricos

<b>Potencia (HP)</b>	<b>Tempo de vida (anos)</b>	<b>Vida media (anos)</b>
Menor que 1	10 a 15	12,9
1 a 5	13 a 19	17,1
5 a 20	16 a 20	19,4
21 a 50	18 a 26	21,8
51 a 125	24 a 33	28,5
Maior que 125	25 a 38	29,3