

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA
PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA



ORIENTADOR: ANTÔNIO CARLOS DELAIBA, Dr

ORIENTANDO: RONALDO GUIMARÃES

24 de janeiro
2008

FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA
PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

**Comportamento elétrico, mecânico e hidráulico de
um sistema de bombeamento sob o enfoque da
eficiência energética**

Dissertação apresentada por Ronaldo Guimarães à Universidade Federal de Uberlândia como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Banca Examinadora:

Professor Antônio Carlos Delaiba, Dr. (UFU) – Orientador

Professor Paulo César Abreu Leão, Dr. (UFSJ)

Engenheiro Sérgio Ferreira de Paula Silva, Dr. (Quality)

Professor Décio Bispo, Dr. (UFU)

Uberlândia, 24 de Janeiro de 2008

Comportamento elétrico, mecânico e hidráulico de um sistema de bombeamento sob o enfoque da eficiência energética

Ronaldo Guimarães

Dissertação apresentada por Ronaldo Guimarães à
Universidade Federal de Uberlândia como parte dos
requisitos para obtenção do título de Mestre em
Engenharia Elétrica.

Prof^o Antônio Carlos Delaiba
Orientador

Prof^o Darizon Alves de Andrade
Coordenador do Curso de
pós-graduação

**Uberlândia
2008**

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

G963c Guimaraes, Ronaldo, 1969-
Comportamento elétrico, mecânico e hidráulico de um sistema de bombeamento sob o enfoque da eficiência energética / Ronaldo Guimaraes. - 2008.

172 f. : il.

Orientador: Antônio Carlos Delaiba.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Uberlândia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica.

Inclui bibliografia.

1. Sistemas de energia elétrica - Teses. 2. Energia elétrica - Consumo - Teses. 3. Inversores elétricos - Teses. I. Delaiba, Antônio Carlos. II. Universidade Federal de Uberlândia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica. III. Título.

CDU: 621.311

DEDICATÓRIA

***DEDICO ESTE TRABALHO AOS MEUS FAMILIARES,
EM ESPECIAL À MINHA ESPOSA MARTA, PELO
APOIO, MOTIVAÇÃO E PACIÊNCIA DURANTE O
TEMPO DEDICADO AO ESTUDO QUE GEROU ESTA
DISSERTAÇÃO.***

AGRADECIMENTOS

Ao **Prof. Antônio Carlos Delaiba**, pela valiosa orientação durante a execução dos trabalhos, pelas palavras sensatas, pela amizade e pela compreensão nos momentos difíceis.

Ao **Prof. Marcelo Lynce R. Chaves**, pela grande colaboração dada ao compartilhar comigo alguns dos seus conhecimentos em ATP.

Ao **Prof. Décio Bispo** e ao **Engenheiro Sérgio Ferreira de Paula Silva**, pela colaboração dada ao compartilhar comigo alguns dos seus conhecimentos sobre os equipamentos instalados no laboratório, pelo incentivo e pelas sugestões que engrandeceram este trabalho.

Aos demais professores e colegas de pós-graduação que sempre estiveram presentes nos momentos de aprendizado e que foram essenciais à conclusão deste trabalho.

À Eletrobrás que por meio do convênio do PROCEL/Indústria patrocinou a construção do Laboratório de Otimização de Sistemas Motrizes da Universidade Federal de Uberlândia, onde foi realizado este trabalho.

Ao **Engenheiro Carlos Aparecido Ferreira** (Eletrobrás) pela sua colaboração na montagem do laboratório.

À FAU pelo apoio financeiro.

RESUMO

Esta dissertação tem por objetivo apresentar uma metodologia de comparação do desempenho elétrico, mecânico e hidráulico, sob o enfoque da eficiência energética, de sistemas de bombeamento controlados por válvulas de estrangulamento ou por inversores de frequência. O acionamento é realizado pelos motores da linha padrão ou de alto rendimento. Neste sentido, este trabalho apresenta a simulação no domínio do tempo a partir de uma plataforma computacional denominada ATP (Alternative Transient Program). Complementando os aspectos anteriores, a validação da modelagem proposta, é realizada através da comparação entre os valores simulados e aqueles oriundos dos ensaios experimentais. Finalmente, deve-se destacar que os experimentos laboratoriais foram executados no laboratório de eficiência energética da Faculdade de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia.

Palavras Chave: Eficiência energética, Sistemas de bombeamento, Inversores de frequência, Consumo de Energia.

ABSTRACT

This thesis aims to present a methodology for comparing the performance electrical, mechanical and hydraulic under the focus of the energy efficiency of pumping systems controlled by valves of strangulation or by the frequency converters. The trigger is held by engines of the line standard or high efficiency. Therefore, this paper presents the simulation in domain of time from a computer platform called ATP (Alternative Transient Program). Complementing the aspects earlier, the validation of proposal modeling, is performed by comparing the simulated values and those from the tests. Finally, it should be emphasized that the laboratory experiments were performed in the laboratory for energy efficiency of the Faculty of Electrical Engineering of the Federal University of Uberlândia.

Key words: energy efficiency, pumping systems, frequency converters, consumption of Energy.

SUMÁRIO

1 – Introdução.....	1
1.1 – O panorama energético brasileiro	1
1.2 – Estrutura interna do trabalho	6
2 – Eficiência energética em sistemas de bombeamento.....	8
2.1 – Introdução	8
2.2 – O motor de indução	9
2.2.1 – A velocidade	10
2.2.2 - Curvas características	11
2.3 – O motor de alto rendimento	17
2.4 – O motor de indução submetido a variações na tensão de alimentação	19
2.5 – A manutenção do motor de indução trifásico	20
2.5.1 – O motor rebobinado	21
2.6 – O acoplamento motor-carga	23
2.7 – Sistema de bombeamento.....	27
2.7.1 – Principais componentes de um sistema de bombeamento	27
2.7.2 – Bomba hidráulica	28
2.8 – Bomba centrífuga	29
2.8.1 - Curvas características ou de desempenho	29
2.8.1.1 - Curvas da bomba	29
2.8.1.2 - Curva de carga do sistema	34
2.8.1.3 - Curva de conjugado da bomba <i>versus</i> rotação	36
2.8.2 – Estimativa do momento de inércia da carga (J_c)	38
2.9 – O controle de vazão por estrangulamento de válvula	39
2.9.1 – O efeito do estrangulamento de válvula na curva do sistema	40
2.10 – O inversor de frequência em sistemas de bombeamento	41
2.10.1 – O inversor de frequência	41
2.10.2 – Obtenção das curvas características para diversas rotações a partir da curva original.....	43
2.10.3 – Considerações sobre a utilização de inversores de frequência	45
2.11 – Comparação entre os métodos válvula de estrangulamento e controle de velocidade.....	46
2.12 – Possibilidades de economizar energia elétrica em sistemas de bombeamento	

.....	48
2.13 – Viabilidade econômica	49
2.13.1 – Tempo de retorno simples	50
2.13.2 – Tempo de retorno capitalizado	51
2.13.3 – Valor presente líquido (VPL)	51
2.13.4 – Exemplo de aplicação	52
2.14 – Considerações finais	55
3 – Descrição da estação de trabalho do sistema de bombeamento.....	56
3.1 – Introdução	56
3.2 – Estação de trabalho do LAMOTRIZ	56
3.2.1 – Características gerais da planta industrial	56
3.2.2 – Características específicas do sistema de bombeamento	60
3.2.3 – Os motores	63
3.2.4 – O dinamômetro	64
3.2.5. – A bomba centrífuga	65
3.2.6 – Detalhamento dos sensores e atuadores	67
3.3 – Painel de controle e acionamento	72
3.3.1 – Partida direta	75
3.3.2 – Partida suave	76
3.3.3 – Inversor de frequência	77
3.3.3.1 – Características de conjugado	78
3.3.3.2 – A ação do inversor em situações de falha	79
3.3.4 – O medidor de grandezas elétricas.....	80
3.3.4.1 – Funções de medição	81
3.3.4.2 – Captura de formas de onda	83
3.3.5 – Controlador Lógico Programável – CLP	83
3.4 – Sistema supervisório	85
3.4.1 – O controle de vazão via supervisório	89
3.5 – Dinamômetro	91
3.6 – Considerações finais	92
4 – Ensaio de laboratório realizados na estação de trabalho do sistema de bombeamento	93
4.1- Introdução	93
4.2 – O sistema de bombeamento	93

4.2.1 – Os motores: alto-rendimento e convencional	93
4.2.2 – Altura manométrica	95
4.2.3 – Curva de carga do sistema	99
4.2.4 – Determinação do NPSH e verificação de cavitação	99
4.2.5 – Potência absorvida (BHP) e rendimento (η)	101
4.2.6 – Os conjugados médios e o momento de inércia da carga	103
4.3 – A eficiência energética pela comparação entre os motores da linha padrão e de alto-rendimento utilizando a válvula de estrangulamento	105
4.4 – Comparação da eficiência energética utilizando inversores de frequência	107
4.5 – Estudo das leis de afinidade para cargas centrífugas	112
4.5.1 – As leis de afinidade aplicadas ao sistema de bombeamento do LAMOTRIZ	112
4.5.2 – Obtenção das curvas características para diversas velocidades a partir da curva para uma rotação conhecida	114
4.6 - Considerações finais	116
5 – Simulação computacional do sistema de bombeamento (LAMOTRIZ) na plataforma ATP.....	117
5.1 – Introdução	117
5.2 – O sistema de bombeamento	118
5.2.1 – A representação do motor de indução trifásico – MIT	118
5.2.2 – A representação do sistema de bombeamento.....	119
5.3 – A modelagem do sistema	120
5.3.1 – Representação do sistema no ATPDraw	120
5.3.2 – Representação do motor no ATPDraw.....	121
5.3.3 – Entrada de dados do motor de indução trifásico	122
5.3.4 – Entrada de dados da carga	123
5.4 – Simulações	124
5.4.1 – Ensaio a vazio	124
5.4.2 – Ensaio de rotor travado	127
5.4.3 – Ensaio com carga nominal	128
5.5 – Ensaio com carga acionada em 45 Hz	132
5.6 – Validação do modelo computacional	136
5.7 – Considerações finais.....	138
6 – Conclusão	139

6.1 – Trabalhos futuros	141
Referências Bibliográficas	142
Anexo	146

LISTA DE FIGURAS

1.1 - Consumo de energia elétrica no Brasil (1975-2005)	3
1.2 – Capacidade instalada de geração de energia elétrica no Brasil (1974-2005)	4
1.3 – Estrutura da oferta interna de energia elétrica no Brasil	4
2.1 – Curva conjugado x velocidade de um motor de indução	11
2.2 – Categorias dos motores de indução trifásicos	12
2.3 – Curva corrente x velocidade de um motor de indução	13
2.4 – Comparação entre diferentes métodos de partida	14
2.5 – Curva rendimento x carga de um motor de indução	15
2.6 – Curva fator de potência x carga de um motor de indução	16
2.7 – Curvas de desempenho de um motor de 10cv da linha padrão	17
2.8 – Diagrama representativo do acoplamento motor-carga	24
2.9 – Componentes de um sistema de bombeamento	27
2.10 – Tipos de curva H x Q	31
2.11 – Curva η x Q	31
2.12 – Curva P_m x Q	32
2.13 – Curva H x Q	35
2.14 – Curva de conjugado <i>versus</i> rotação	36
2.15 – Conjugados médios em função da rotação do sistema de bombeamento	37
2.16 – Efeito da ação de válvulas de estrangulamento	40
2.17 – Curva tensão <i>versus</i> frequência	42
2.18 – Variação da curva de trabalho de uma bomba centrífuga pela variação da velocidade	43
2.19 – Efeito da rotação nas curvas características	44
2.20 – Curva de conjugado x rotação da bomba para diversas velocidades	45
2.21 – Recomendação de torque em função da frequência para motores acionados a inversores de frequência	46
2.22 – Comparativo entre controle de vazão por estrangulamento de válvula e inversor de frequência	47
2.23 – A potência elétrica comparativa entre os dois métodos: válvula e inversor	48
2.24 – Balanço médio de energia em um sistema hidráulico	48
2.25 – Tela de retorno de investimento do <i>software</i> BDMotor	54
3.1 – Visão geral da bancada do sistema de bombeamento	57

3.2 – Equipamentos de informática	58
3.3 – Rede de comunicação da bancada da bomba centrífuga	59
3.4 – Conjunto motor-bomba fixos na bancada	60
3.5 – Diagrama orientativo da bancada da bomba centrífuga	61
3.6 – Reservatório superior da bancada de bombeamento	62
3.7 – Dispositivo eletromagnético de frenagem e simulação de carga	65
3.8 – Curva vazão x altura x rendimento %	65
3.9 – Curva vazão x potência	66
3.10 – Curva vazão x NTSH	67
3.11 – Fluxograma simplificado da bancada de bombeamento	67
3.12. – Chaves de nível tipo bóia magnética	68
3.13 – Transmissor de pressão diferencial YOKOGAWA	69
3.14 – Válvulas solenóide	69
3.15 – Manômetro petroquímico	70
3.16. – Transdutor de pressão diferencial capacitivo	71
3.17 – Válvula de estrangulamento tipo globo de contorno Fox Wall	71
3.18 – Vista da parte interna do painel de comando	73
3.19 – Esquema unifilar do sistema de comando	74
3.20 – Desenho esquemático da chave de partida suave	77
3.21 – Curvas de conjugado para o inversor de frequência	79
3.22 – Representação do multimedidor	80
3.23 – Tela inicial do sistema supervisório	85
3.24 – Apresentação da bancada da bomba centrífuga na tela do supervisório	86
3.25 – Tela de comando	86
3.26 – Janela de medições de grandezas elétricas	87
3.27 – Banco de dados do sistema supervisório	88
3.28 – Tela de apresentação de parâmetros x tempo	88
3.29 – Janela de apresentação das temperaturas do motor	89
3.30 – Indicações de PID na tela de fluxograma da bancada didática da bomba centrífuga	89
3.31 – Janela PID do sistema de bombeamento	90
3.32 – Tela do dinamômetro no supervisório	91
4.1 – Sistema hidráulico da estação de bombeamento	95
4.2 – Curva de carga do sistema de bombeamento do LAMOTRIZ	99

4.3 – Curva vazão x NPSH	101
4.4 – Curva que relaciona altura manométrica e vazão com o rendimento.....	103
4.5 – Curva de conjugado mecânico x velocidade angular da bomba centrífuga.....	104
4.6 – Efeitos causados pela variação de velocidade e pelo estrangulamento de válvula para um sistema acionado pelo motor LP	110
4.7 – Efeitos causados pela variação de velocidade e pelo estrangulamento de válvula para um sistema acionado pelo motor AR.....	110
4.8 – Potência <i>versus</i> vazão utilizando o motor LP.....	111
4.9 – Potência <i>versus</i> vazão utilizando o motor AR	111
4.10 – Relação vazão <i>versus</i> carga de pressão	115
4.11 – Relação potência elétrica em função da vazão	115
5.1 – Circuito elétrico equivalente para o motor	119
5.2 – Curva do sistema de bombeamento.....	120
5.3 – O sistema de bombeamento representado no ATP.....	120
5.4 – O motor representado no ATP	121
5.5 – Janela de atributos do motor	122
5.6 – Janela de atributos do resistor não-linear NLINRES	123
5.7 – Curva de resistência representativa da carga mecânica	124
5.8 – Correntes a vazio	125
5.9 – Torque mecânico durante a operação do motor com o rotor livre	126
5.10 – Velocidade do motor com o rotor livre	126
5.11 – Correntes do motor com o rotor travado	127
5.12 – Torque de rotor bloqueado	127
5.13 – Velocidade do motor com o rotor bloqueado	128
5.14 – Tensões na partida	128
5.15 – Correntes na partida	129
5.16 – Torque mecânico no eixo do motor	130
5.17 – Torque de carga mecânica do sistema	131
5.18 – Velocidade do conjunto motor-carga	131
5.19 – Formas de onda da potência elétrica	132
5.20 – Potência mecânica no eixo do MIT	132
5.21 – Tensões fase-fase no motor em 45Hz	133
5.22 – Correntes do motor em 45Hz	134
5.23 – Torque no motor em 45Hz	134

5.24 – Torques do motor e do sistema em 45Hz	135
5.25 – Velocidade do motor em 45Hz	135
5.26 – Potência elétrica em 45Hz	136
5.27 – Potência mecânica em 45Hz	136

LISTA DE TABELAS

2.1 – Comparação entre as perdas em motores	18
2.2 – Motor de indução submetido a variações de tensão	20
2.3 – Grandezas antes do reparo	22
2.4 – Grandezas após o reparo	22
2.5 – Rendimentos para alguns tipos de acoplamento	26
3.1 – Componentes presentes na estação de bombeamento	63
3.2 – Componentes utilizados no CLP	84
4.1 – Valores de comprimento equivalente para as conexões presentes na bancada	96
4.2 – Valores de perda de carga nas tubulações	97
4.3 – Pressão atmosférica para determinadas altitudes	100
4.4 – Pressão de vapor da água para determinadas temperaturas	100
4.5 – Valores elétricos do motor da linha padrão	105
4.6 – Valores elétricos do motor de alto-rendimento	105
4.7 – Comparação de consumo de energia entre motores LP e AR	106
4.8 – Variação de velocidade em função da vazão com um motor LP	107
4.9 – Variação de velocidade em função da vazão com um motor AR	108
4.10 – Comparação de consumo entre inversor de frequência e válvula de estrangulamento no controle de vazão com a utilização do motor LP	108
4.11 – Comparação de consumo entre inversor de frequência e válvula de estrangulamento no controle de vazão com a utilização do motor AR	109
4.12 – Relações das leis de afinidade em um motor convencional	113
4.13 – Relações das leis de afinidade em um motor de alto-rendimento	113
5.1 – Dados de placa do MIT	118
5.2 – Ensaio a vazio	118
5.3 – Ensaio de rotor bloqueado	119
5.4 – Parâmetros para o circuito equivalente	119
5.5 – Valores de corrente encontrados via simulação	125
5.6 – Valores de torque encontrados via simulação.....	126
5.7 – Valores de tensão utilizados na simulação	129
5.8 – Valores de corrente encontrados via simulação para carga nominal	129
5.9 – Valores de torque encontrados via simulação com carga nominal	130
5.10 – Valores medidos em laboratório para 45Hz	133

5.11 – Valores de tensão utilizados na simulação em 45Hz	133
5.12 – Valores de corrente obtidos na simulação em 45Hz	134
5.13 – Grandezas elétricas medidas e simuladas com motor a vazio	137
5.14 – Grandezas elétricas medidas e simuladas para o motor com rotor bloqueado .	137
5.15 – Grandezas elétricas e mecânicas, medidas, simuladas e de placa referentes a 60Hz	138
5.16 – Grandezas elétricas e mecânicas, medidas e simuladas referentes a 45Hz	138

Capítulo 1

Introdução

1.1) O panorama energético brasileiro

As recentes mudanças no setor elétrico brasileiro, ocorridas nos anos 90, demonstraram que a energia elétrica é um insumo valioso e, dessa forma, deve ser usada de maneira racional. No país, com a ocorrência de privatizações nas concessões de distribuição de energia e, em menor escala, de geração, houve a necessidade da criação de um órgão regulador para esse setor. A Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), criada pela **Lei 9.427 de 26 de Dezembro de 1996**, surgiu com a função de fiscalizar e estabelecer normas sobre o uso da energia elétrica no Brasil. Por último, houve a crise de abastecimento que assolou o país no ano de 2001 e que, em 2008 volta a assombrar os setores industrial e de transporte à medida que, um alerta do governo ameaça racionar o fornecimento de gás na busca de garantir o abastecimento das usinas termelétricas. Essas transformações indicam que há uma necessidade do uso eficiente da energia nos mais diversos ramos de atividade da sociedade.

Outra importante iniciativa foi a criação do PROCEL - Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica, cujo principal objetivo é promover a racionalização da produção e do consumo de energia elétrica, na busca da eliminação dos desperdícios e na redução dos custos e dos investimentos setoriais. Criado em dezembro de 1985 pelos Ministérios de Minas e Energia e da Indústria e Comércio, em 1991, o PROCEL foi transformado em Programa de Governo, tendo sua abrangência e responsabilidade

ampliadas. Entre suas iniciativas destaca-se o Prêmio Nacional de Conservação e Uso Racional de Energia, instituído em 1993, como forma de reconhecer publicamente o empenho e os resultados obtidos nas várias categorias, como transportes, setor energético, edificações, imprensa, micro e pequenas empresas e indústria. O prêmio, distribuído anualmente, contempla aqueles que se destacaram pelo uso racional de energia elétrica e o combate ao seu desperdício. Merece destaque, ainda, o selo PROCEL de economia de energia, que tem por objetivo orientar o consumidor na compra de eletrodomésticos, indicando os produtos que apresentam os melhores níveis de eficiência energética dentro de cada categoria [1].

O uso eficiente de energia, que pode ser entendido como a utilização da menor quantidade possível da mesma para realizar um trabalho sem que haja perda da qualidade e segurança na realização, tem como campo de atuação os mais diversos ramos de atividade da sociedade. Utilizar a energia com responsabilidade, sem desperdício, constitui um novo parâmetro a ser considerado no exercício da cidadania.

Segundo o Gerente de Utilização de Energia da Companhia Energética de Minas Gerais - CEMIG ações que objetivem o uso racional e eficiente de energia correspondem a construção de uma usina virtual de energia [2]. Embasando tal opinião, Howard Steven Geller, um dos consultores cujo trabalho acabou originando o Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica (Procel), relata: a economia de energia elétrica, em 1998, permitiu que as concessionárias brasileiras evitassem implementar aproximadamente 1560 MW de nova capacidade geradora, o que significou cerca de 3,1 bilhões de investimentos evitados [3]. Ainda segundo o mesmo autor, ao se comparar os custos com a energia economizada e os custos para a geração da mesma quantidade houve um coeficiente de custo-benefício global de aproximadamente 12:1 [4].

O setor industrial, segundo o Balanço Energético Nacional – BEN de 2006, consumiu 175,4 TWh o correspondente a 46,75% dos 375,2 TWh consumidos no país no mesmo período [5]. Ainda no que se refere ao cenário industrial, a CEMIG informa, em seu *site* que: no Brasil, os motores elétricos de indução são responsáveis por cerca de 50% das cargas elétricas industriais, chegando a 70% em determinadas regiões [6].

O Ministério de Minas e Energia (MME), através de empresas conveniadas produziu um Plano Decenal de Expansão de Energia Elétrica 2006-2015 (PDEE). Neste plano foram avaliados três cenários de crescimento de carga para o país: primeiro considerando uma trajetória alta de mercado estimou-se um crescimento de 5,1% de carga

por ano e uma variação média do Produto Interno Bruto (PIB) em 4,5%; uma segunda possibilidade avaliou a trajetória de referência de mercado e, prevê o acréscimo de carga instalada de 4,9% até 2010 e um acréscimo médio de riqueza de 4% até 2010; por último o estudo analisou a possibilidade de trajetória de baixa de mercado na qual admitiu o aumento da carga em 3,9% para um PIB médio de 3% anual [7].

Segundo estudos do professor Ivan Camargo, da Universidade de Brasília (UNB), a trajetória de crescimento de consumo médio nos últimos 20 anos, exceto o ano de 2001 devido ao racionamento de energia elétrica, foi de 4,5% e deve se manter nos próximos anos [7]. O panorama do consumo brasileiro está evidenciado na figura 1.1.

(Fonte: BEN – 2006)

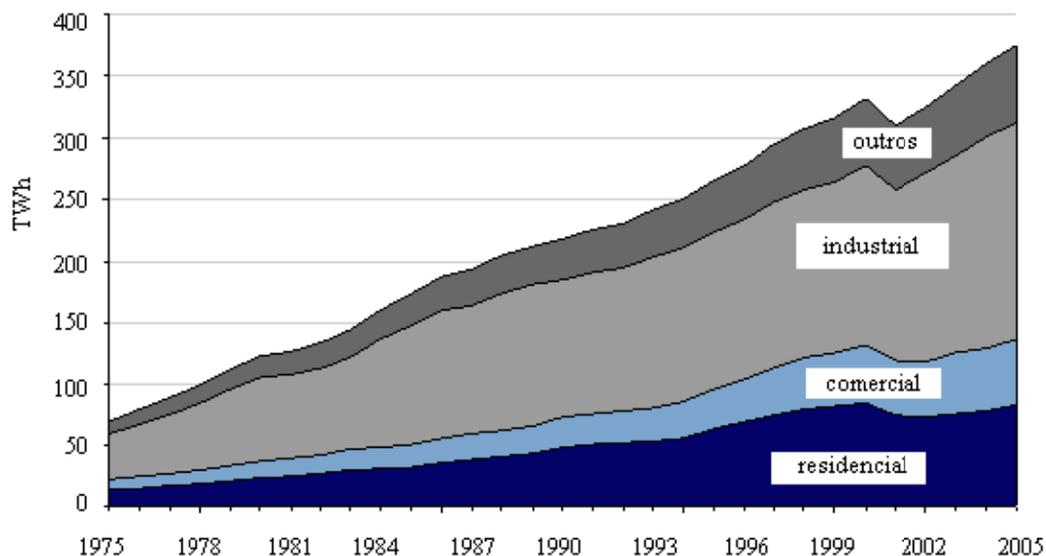


Figura 1.1 – Consumo de energia elétrica no Brasil (1975 -2005)

A figura 1.2 aponta o perfil da produção elétrica no Brasil, a predominância da geração por fontes hidráulicas é evidente, como o é também, o aumento da utilização das termelétricas, a partir do ano 2000. Se, até o advento do “apagão” em 1999 o Brasil, praticamente produzia a eletricidade que consumia por meios próprios (a importação se limitava a uma parte da energia paraguaia vinda de Itaipu), o combustível das termelétricas era, em grande parte, o gás boliviano.

(Fonte: BEN – 2006)

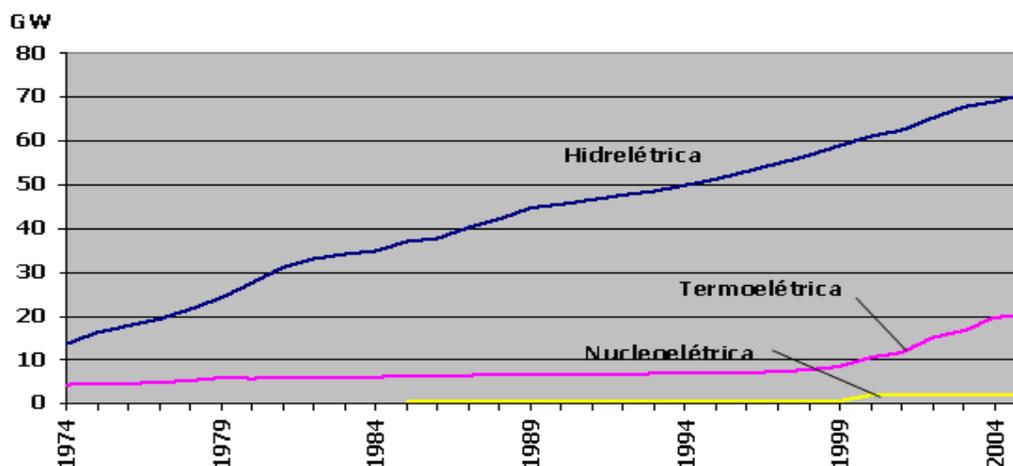


Figura 1.2 – Capacidade instalada de geração de energia elétrica no Brasil (1974 -2005)

A estrutura da oferta interna de energia está indicada na figura 1.3 e, como esperado tem características semelhantes àquelas trazidas na figura 1.2.

(Fonte: BEN – 2006)

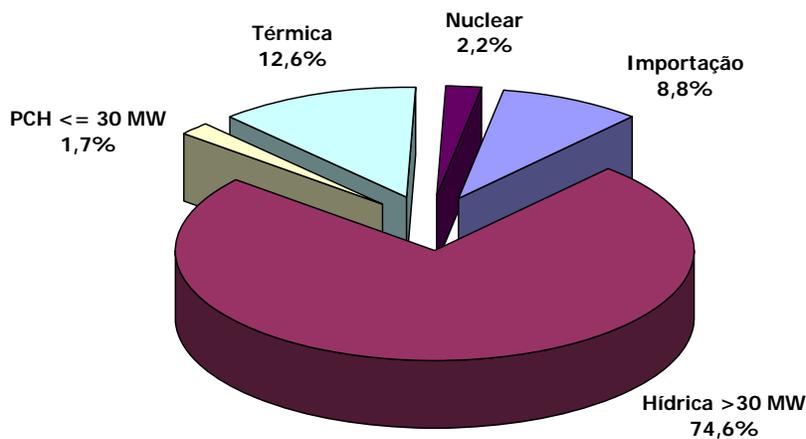


Figura 1.3 - Estrutura da oferta interna de energia elétrica no Brasil

Segundo cálculos da Eletrobrás, se toda a energia possível de ser economizada o fosse, o ganho seria de R\$ 3,859 bilhões. Este cálculo é parte de um estudo do Programa Nacional de Conservação de Energia (Procel) que é feito há 22 anos, e que diz ter economizado cerca de 22 milhões de megawatts (MW), o suficiente para abastecer por um ano todo o estado do Rio Grande do Sul [8].

A energia elétrica voltou ao centro das atenções em colóquios sobre sustentabilidade, devido, entre outros fatores, ao problema do aquecimento global. No Brasil, ganhou ênfase com o Programa de Aceleração do Crescimento (PAC), conjunto de

medidas que visa aumentar investimentos públicos e privados no setor produtivo. Alertas para o risco de um novo "apagão", que poderia inibir o crescimento econômico do país alcançou o Senado Brasileiro, em março de 2007. Na cerimônia, que contou com a presença de ministros de Estado, a preocupação com relação ao abastecimento de energia elétrica nos anos que se seguem foi mencionada.

O problema social causado pela geração de energia elétrica é evidenciado pela necessidade de criação de organizações como o Movimento dos Atingidos por Barragens (MAB). Esse movimento lança perguntas pertinentes, tais como: qual é a real demanda de eletricidade no Brasil? É de fato necessária a geração de cada vez mais energia? Esse é o caminho a ser seguido? Enquanto perguntas como essas não podem ser respondidas, a eficiência é o melhor rumo a se tomar [7].

O impacto ambiental também deve ser considerado, o quanto mais a natureza comporta a exploração de seus recursos energéticos é pergunta extremamente pertinente. Neste contexto, a Agenda Elétrica Sustentável, lançada em setembro de 2006 pela *World Wildlife Found* (WWF), estima que *as metas de expansão para 2020 podem ser reduzidas em até 38% se o país utilizar fontes alternativas com mais vigor*. Outro estudo da WWF quantificou os ganhos com a troca de equipamentos e reparação nos parques produtores de energia das 57 usinas hidrelétricas com mais de 20 anos de funcionamento, segundo este, com o mesmo volume de água, seria possível gerar mais 8 mil kWh de energia [7].

Dentro do exposto, o objetivo deste trabalho foi o de apresentar teorias, modelagens computacionais, ensaios laboratoriais e aspectos econômicos que envolvem o estudo de sistemas de bombeamento na busca da eficiência energética. Bem como, a maioria dos eventos e possibilidades que podem, efetivamente, influenciar no consumo final de energia elétrica da instalação foi abordada em seus aspectos técnicos e construtivos.

Finalmente, deve-se salientar que este trabalho está inserido no convênio ECV 2004, firmado entre a UFU e a Eletrobrás. Desta forma, este convênio exige a publicação de sete iniciações científicas e dois mestrados, associados com o tema eficiência energética. Por isso, alguns dos assuntos neste documento estão resumidos, pois irão existir outros trabalhos que, com certeza, enriquecerão alguns dos aspectos discutidos nesta dissertação. Os outros trabalhos mencionados que estão relacionados com esse tema e essa dissertação estão identificados no final deste documento através das referências bibliográficas.

1.2) Estrutura interna do trabalho

Esta dissertação é composta de seis capítulos, que além deste introdutório, têm os outros assim dispostos:

Capítulo 2 – Eficiência Energética em Sistemas de Bombeamento

Neste capítulo buscou-se apresentar a teoria envolvida no estudo da eficiência energética em sistemas de bombeamento. Avaliando componentes do sistema na busca do conhecimento da melhor maneira de se obter uma determinada vazão com o mínimo de energia possível. Foram abordados estudos sobre motores (construção e manutenção), bombas centrífugas, acoplamentos, válvulas de estrangulamento, acionamentos que de alguma forma possam influenciar no consumo final de energia elétrica da instalação. Contempla também o estudo da viabilidade econômico-financeira aplicado ao capital investido em função de implementações associadas com a eficiência industrial.

Capítulo 3 – Descrição da Estação de Trabalho do Sistema de bombeamento

O objetivo desta etapa é demonstrar a funcionalidade dos equipamentos instalados na estação de trabalho, tais como: medidores de grandezas elétricas e mecânicas; atuadores de vazão, pressão, etc; acionamentos com partida suave, partida direta e inversor de frequência; todos desenvolvidos para aplicação de comando e controle industrial.

Capítulo 4 – Ensaio de Laboratório realizados na Estação de trabalho do Sistema de Bombeamento

O principal objetivo deste capítulo é mostrar a metodologia de comparação do desempenho de sistemas de bombeamento controlados por válvulas de estrangulamento e a utilização de inversores de frequência no controle da vazão. Adicionalmente, identificar a redução do consumo de energia elétrica bem como as justificativas para a escolha de um sistema em detrimento do outro.

Capítulo 5 – Simulação em ATP do Sistema de Bombeamento

Este capítulo apresenta a simulação no domínio do tempo a partir da plataforma computacional ATPDraw (EMTP), aplicada no sistema de bombeamento do Laboratório de Sistemas Motrizes – LAMOTRIZ da Universidade Federal de Uberlândia. Complementando os aspectos anteriores, esta etapa busca a validação da modelagem

proposta, através da comparação entre os valores simulados e aqueles encontrados nos ensaios experimentais.

Capítulo 6 – Conclusão

Neste capítulo buscou-se sintetizar o trabalho exibido durante a dissertação. Além de fornecer comentários sobre os prós e contras das situações encontradas.

Capítulo 2

Eficiência Energética em Sistemas de Bombeamento

2.1) Introdução

A utilização de sistemas de bombeamento é indispensável assim como a energia elétrica o é para o acionamento dos motores que os fazem funcionar. Como é cada vez mais necessário evitar a degradação ambiental causada pela exploração irracional dos recursos energéticos, importante contribuição consiste em utilizar com a máxima eficiência a energia que se tem disponível.

O objetivo deste capítulo é apresentar em linhas gerais a teoria que envolve o estudo da efficientização energética em sistemas de bombeamento. Tomando os principais componentes deste sistema e, procedendo de forma analítica e teórica, buscar o conhecimento da melhor maneira de se obter uma determinada vazão com o mínimo de energia elétrica possível. Desta forma, serão abordados, motores da linha padrão e de alto rendimento, bombas centrífugas, acoplamentos, válvulas de estrangulamento, rebobinamentos, acionamentos e todos os componentes que de alguma forma possam influenciar no consumo final de energia elétrica da instalação. Complementando os aspectos anteriores, este capítulo engloba também o estudo da viabilidade econômico-financeira visando determinar um ganho financeiro associado ao capital investido em função das implementações direcionadas à efficientização industrial.

2.2) O motor de indução

Segundo registros históricos, em 1885, Galileu Ferraris construiu um motor de corrente alternada. Em uma perspectiva do próprio Ferraris, essa tecnologia de construção de motores permitiria a obtenção de, no máximo, 50% de rendimento em relação a potência de entrada. Em 1887, Nikola Tesla desenvolveu, um motor de indução com rotor em curto-circuito, que apesar do baixo rendimento teve sua patente vendida para a empresa norte-americana Westinghouse por um milhão de dólares [9].

Porém, só em 1889 a firma AEG, de Berlim, entrou com o pedido de registro de patente de um motor trifásico com rotor de gaiola de esquilo. Este motor apresentava um rendimento aproximado de 80% em relação a potência de entrada, uma evolução fantástica, quando comparado àquele produzido por Galileu Ferraris quatro anos antes [9].

Construtivamente o motor de indução pouco evoluiu. O principal avanço, desde então, se encontra na tecnologia dos materiais empregados na construção do motor. Inicialmente, construiu-se motores com materiais compactos, posteriormente foram usadas chapas de aço laminado e, recentemente estuda-se a utilização de materiais magnéticos sinterizados, obtidos pelos processos da metalurgia do pó (M/P). Estuda-se tanto a fabricação de ímãs permanentes, de altas retentividade e coercitividade magnéticas, para substituírem os enrolamentos de campo, como também, a construção de núcleos magnéticos para serem utilizados no lugar das chapas laminadas. Experiências recentes que utilizam processos de metalurgia do pó indicam que esta tecnologia reduzirá as perdas aumentando o rendimento dos motores elétricos [10].

No Brasil, desde 1993, existe um processo de melhoria dos rendimentos nominais dos motores no âmbito do PBE – Programa Brasileiro de Etiquetagem. Os fabricantes nacionais de motores, além do Inmetro, Procel e Ministério de Minas e Energia – MME estabelecem, por consenso, metas de melhoria dos rendimentos. Porém, somente em 2002, foi regulamentada a Lei de Eficiência Energética (Lei no 10.295/2001 – BRASIL, 2001b) para motores elétricos de indução trifásicos, na qual se estabelecem tabelas de rendimentos mínimos de motores de linha padrão e alto rendimento. Nestas tabelas foram contemplados os melhores índices de rendimento já obtidos por fabricantes no país. Estes índices podem ser utilizados como parâmetros para uma gradual substituição de máquinas menos eficientes disponíveis no mercado [11].

Deve-se salientar ainda que, não basta a melhoria do motor por aspectos construtivos e tecnológicos, a utilização adequada deste é de suma importância para garantir que, de fato, se retirou do motor sua máxima eficiência [12]. O percentual de perdas internas no motor de indução pode ser aumentado significativamente, quando este não opera em condições favoráveis. Assim, máquinas nas quais as perdas elétricas variam, em média, 5% a 20%, podem chegar a ter um rendimento de 40%.

Alguns dos principais fatores, a serem considerados como aplicação inadequada de motores, estão associados com os seguintes itens: superdimensionamento, reparo inadequado (rebobinamentos), motores de baixo rendimento, acoplamento motor-carga de baixa eficiência, entre outros. Pode-se citar ainda, como operação ineficiente, por exemplo, o uso de métodos dissipativos para alteração de velocidades, ou seja, alteração de resistência de rotor por meio de resistência externa na busca de variar a sua velocidade. [12].

Além das limitações construtivas, devem-se considerar também, as limitações práticas de se obter a máxima eficiência destes equipamentos. A dificuldade de se especificar sistemas com motores adequados, em função da carga mecânica, está na impossibilidade de conseguir valores com potências fracionárias. Assim, o projetista deverá buscar um motor de potência ligeiramente maior para determinada carga mecânica e, em consequência reduzir o fator de potência e o rendimento. [13].

2.2.1) A velocidade

O motor de indução tem como característica básica, o comportamento semelhante ao de um transformador. Enquanto os enrolamentos do estator são alimentados pela rede elétrica, no rotor, que tem seus enrolamentos curto-circuitados, a corrente circulante é induzida. Essa característica provoca um defasamento (escorregamento) entre a velocidade do campo girante produzido pela rede elétrica no estator e a velocidade mecânica obtida no eixo do motor. Essa diferença de velocidade faz com que o campo eletromagnético no estator seja adiantado relativamente ao do rotor provocando um conjugado entre esses campos.

Em geral, encontram-se em motores de indução escorregamentos que variam de 0,8% a 5%. Matematicamente, o escorregamento relaciona a velocidade síncrona (n_s) e de regime (n) pela seguinte equação:

$$S = \frac{(n_s - n)}{n_s} \quad (2.1)$$

Onde:

s = escorregamento;

n_s = velocidade síncrona;

n = velocidade de regime.

2.2.2) Curvas características:

a) Torque x Velocidade

A figura 2.1 mostra, graficamente, a característica conjugado versus velocidade para um motor de indução. A equação (2.2) relaciona o conjugado, a potência mecânica e a velocidade para o regime permanente.

$$C_m = \frac{9,55 \cdot P_m}{n} \quad (2.2)$$

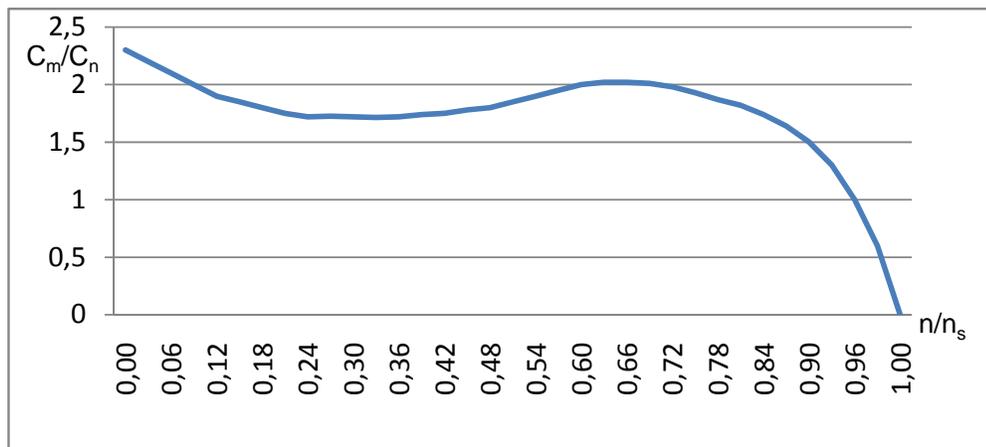


Figura 2.1 – Curva conjugado x velocidade de um motor de indução

Onde:

C_m = conjugado mecânico no eixo do motor;

C_n = conjugado mecânico nominal no eixo do motor;

P_m = potência mecânica no eixo do motor;

C_{max} = conjugado máximo no eixo do motor.

A norma brasileira ABNT NBR-7094 [14] fixou valores mínimos de torques (partida, máximo e mínimo) a serem atendidos pelos motores de indução, dividindo em categorias, os motores de indução trifásicos de rotor em gaiola, associadas à valores de resistência de rotor. Estas categorias são designadas por N, H e D e as características de torque correspondentes são mostradas na figura 2.2. Assim, por exemplo, um motor de categoria D possui uma resistência de rotor maior enquanto o motor N apresenta menor resistência, quando comparados motores de mesma potência e números de pólos das demais categorias. A ABNT NBR-7094, determina ainda que, para que os motores sejam enquadrados em alguma das categorias acima, eles devem satisfazer valores de torque tabelados estabelecidos e aceitos em comum acordo por todos os fabricantes.

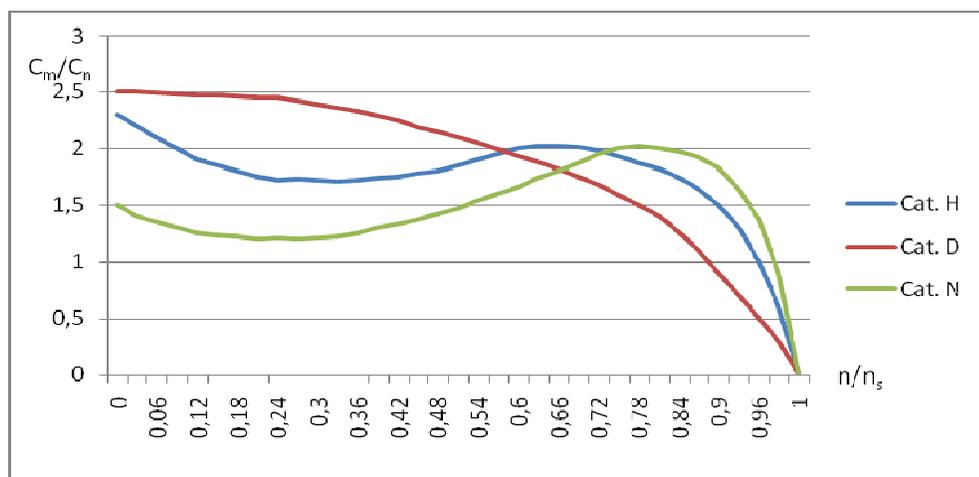


Figura 2.2 – Categorias dos motores de indução trifásicos

Os motores da categoria N devem ser usados no acionamento de cargas que possuem um baixo conjugado resistente na partida, como bombas centrífugas, ventiladores, exaustores, entre outras, por possuírem baixo conjugado de partida comparado às duas outras categorias. Os motores de categoria D são indicados para o acionamento de cargas de grande impacto como as prensas ou máquinas de corte que exigem um elevado conjugado de operação e que operam em regimes intermitentes. Os motores de categoria H são aplicados em situações intermediárias entre a categoria N e D e são muito usados no acionamento de ventiladores de grande potência e elevada inércia [15]. Deve-se destacar também que as curvas características mostradas anteriormente são necessárias para estimar o tempo de partida do acionamento, principalmente quando há uma troca de motores.

b) Corrente x Velocidade

A corrente sofre uma variação em função da rotação do motor, essa característica está evidenciada na figura 2.3. Observa-se que durante o período de partida o motor necessita de um alto valor de corrente, denominada de corrente de partida. Dentre os principais efeitos estão: provocar estresse térmico e mecânico e ocasionar quedas de tensão na rede de alimentação, podendo provocar até desligamentos e operação indevida de alguns acionamentos, principalmente os sistemas elétricos que possuem cargas sensíveis como, por exemplo, um CLP (Controlador Lógico Programável).

A norma brasileira (NBR 7094) exige que motores com potência inferior a 315 kW e para tensão menor que 1000 volts devem suportar uma sobrecorrente de 50% por no mínimo dois minutos. Porém, de uma maneira geral, o tempo de partida de um motor com carga mecânica tem uma duração de aproximadamente entre três a cinco segundos.

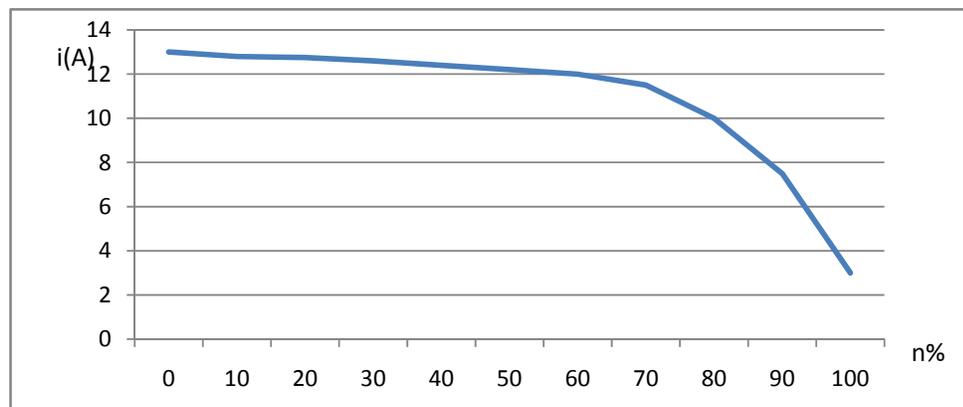


Figura 2.3 – Curva corrente x velocidade de um motor de indução

A figura 2.3 representa a corrente de partida em um motor acionado por partida direta, essa é limitada a motores de baixas potências. Atualmente, nos modernos acionamentos de motor de indução, são utilizados dispositivos de partida suave que, através de comando microprocessado, controlam a tensão aplicada ao estator do motor, reduzindo a corrente de partida. Nesse sentido, diminuindo os valores dos conjugados de partida e máximo do motor de indução, reduz o estresse térmico e mecânico, conseqüentemente diminui as quedas de tensão. Tem, ainda, como vantagens evitar picos de corrente, incorporar parada suave e proteções. Durante as partidas reduz esforços sobre acoplamentos e dispositivos de transmissão, contribuindo assim para o aumento da vida útil do motor e equipamentos mecânicos da máquina acionada, devido à eliminação de choques mecânicos.

Algumas das principais características e vantagens de *soft-starters* são:

- Ajuste da tensão de partida por um tempo pré-definido;
- Pulso de tensão na partida para cargas com alto conjugado de partida;
- Redução rápida de tensão a um nível ajustável, (redução de choques hidráulicos em sistemas de bombeamento);
- Proteção contra falta de fase, sobrecorrente e subcorrente, etc.

A figura 2.4 representa um comparativo entre três dos principais tipos de partida. O *soft-starter* mostrou-se o melhor entre os demais por ser capaz de controlar a potência do motor no instante da partida, bem como sua frenagem, ao contrário dos métodos convencionais utilizados para essa mesma função [16].

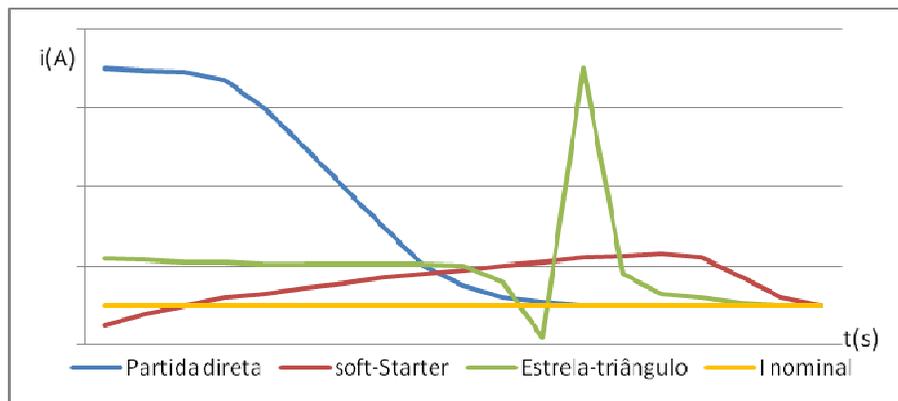


Figura 2.4 – Comparação entre diferentes métodos de partida

c) Rendimento x Carga

O rendimento pode ser definido como a relação percentual entre a potência mecânica fornecida no eixo e a potência elétrica absorvida pelo motor.

Rendimento nominal é aquele que o motor apresenta quando opera sob carga, tensão, frequência e elevação de temperatura nominais, dependendo ainda da altitude e da umidade relativa, etc. Este rendimento é função do projeto e da tecnologia empregada na fabricação do motor, variando com a carga mecânica aplicada no eixo como indicado na figura 2.5.

A curva típica, rendimento versus carga, mostra que o motor obtém o maior rendimento dentro da faixa de operação entre 75% a 125% da carga nominal, porém, deve-se respeitar o limite de 100% de carga. Para cargas abaixo de 75% e acima de 125% os valores de rendimento diminuem acentuadamente.

Matematicamente o rendimento pode ser descrito como indicado na equação (2.3):

$$\eta(\%) = \frac{100.P_m}{P_e} \quad (2.3)$$

Onde:

P_e = potência elétrica na entrada do motor

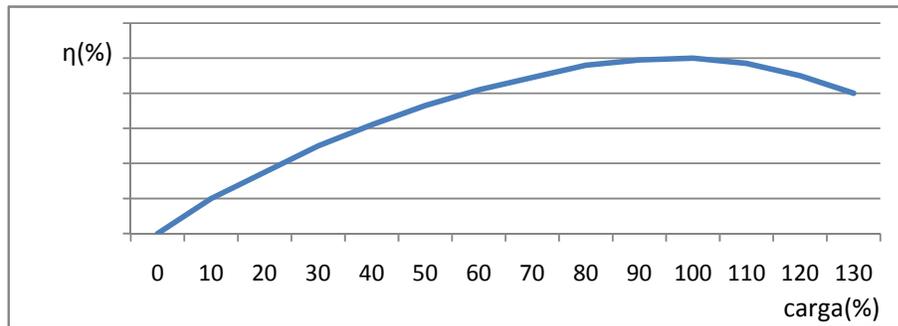


Figura 2.5 – Curva rendimento x carga de um motor de indução

O rendimento máximo é determinado pelos materiais utilizados na fabricação e pelas dimensões do motor. Em geral, quanto maior em dimensões e potência, maior o rendimento do motor, alcançando valores próximos de 95% para grandes motores (acima de 500 CV). Em contrapartida, motores de baixa potência apresentam rendimentos em torno de 75% [9].

d) Fator de Potência x Carga

A curva típica mostrada na figura 2.6 indica que o motor obtém melhor fator de potência quando opera dentro da faixa entre 75% e 100% de carga nominal. Desta forma, deve-se evitar que o motor trabalhe com carga muito inferior à sua potência nominal, uma vez que isto reduz o fator de potência, podendo acarretar em maiores custos operacionais e de aquisição do motor, além de contribuir para que o fator de potência global da instalação seja reduzido, podendo até não respeitar a portaria vigente, qual seja, a portaria 456 da ANEEL.

A equação (2.4) relaciona as potências ativa, reativa, aparente e o fator de potência:

$$FP = \frac{P_e}{S} \quad (2.4)$$

Onde:

S = potência aparente

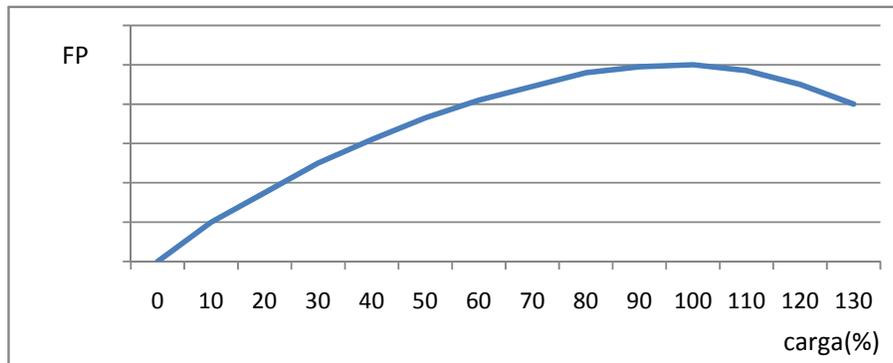


Figura 2.6 – Curva fator de potência x carga de um motor de indução

d) Curvas de desempenho

A título de ilustração, na figura 2.7 observam-se as características de desempenho de um motor de 10 cv da linha padrão. Na figura estão representadas curvas em função da carga mecânica, da corrente elétrica, do rendimento, do fator de potência e da rotação do eixo. Esse tipo de curva permite a visualização do comportamento do motor sob diferentes condições de carga.

Freqüentemente são encontrados motores acionando carga bem abaixo da sua capacidade nominal na maioria das aplicações industriais, provocado por vários motivos, dentre os quais, pode-se destacar:

- Desconhecimento das características da carga;
- Desconhecimento de métodos de especificação de motores;
- Expectativa de aumento de carga;
- Falta de motores de mesma potência para substituição ou;
- Opção do projetista como garantia de funcionamento para cargas vitais ao processo.

Os efeitos do superdimensionamento podem ser acompanhados pela análise da figura 2.7, com carregamento abaixo de 50% há uma diminuição de rendimento e de fator de potência. A redução de rendimento pode ser traduzida como aumento de perdas e conseqüentemente maior custo operacional, a redução do fator de potência pode exigir a instalação de maiores equipamentos de correção enquanto a maior corrente de partida

acarreta em maiores custos com a rede elétrica e com proteção. Outro efeito produzido pelo superdimensionamento de motor é o maior custo, volume e peso do próprio motor [17].

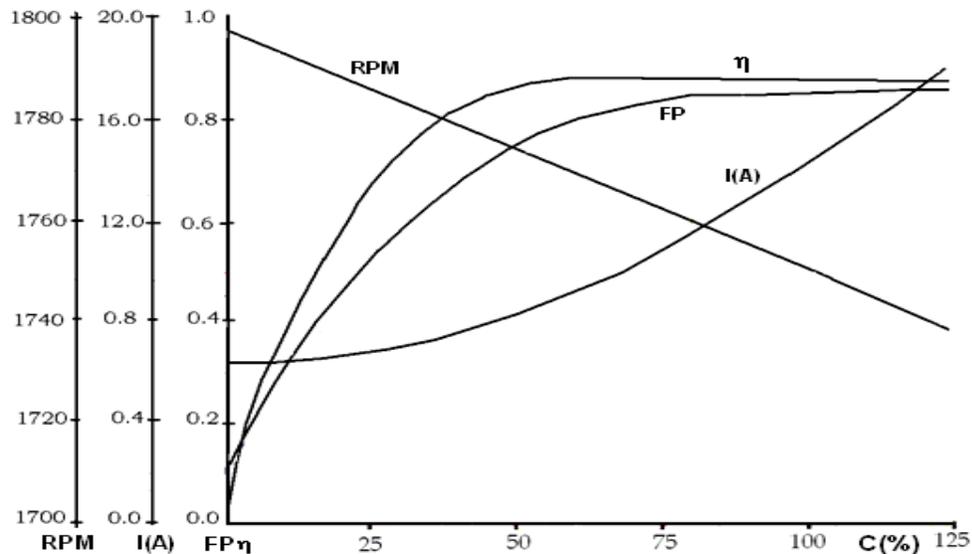


Figura 2.7 – Curvas de desempenho de um motor de 10 cv da linha padrão

2.3) O motor de alto-rendimento

Tecnologicamente, a melhoria na eficiência dos motores segue, principalmente, a linha dos avanços obtidos em materiais como: chapas de menor relutância, que utilizam, por exemplo, ligas de ferro-silício, maior preenchimento das ranhuras, maiores condutores no rotor, melhorias no entreferro, nas cabeças de bobina, na ventilação e nos mancais. Assim, a seguir estão listados os principais avanços obtidos e utilizados na construção do motor de alto rendimento:

- Chapas magnéticas de melhor qualidade: aço com maior teor de silício, que tem maior suscetibilidade, reduzindo as perdas no ferro;
- Maior volume de cobre: reduz as perdas por efeito Joule no estator, reduzindo a temperatura de regime e aumentando a vida útil do motor;
- Enrolamentos especiais: reduzem as perdas no estator;
- Chapas do núcleo tratadas termicamente: reduz as perdas suplementares;
- Desenho mais eficiente de ranhuras: permitindo um maior preenchimento, facilitando a dissipação de calor;

- Melhores métodos de ventilação;
- Redução do entreferro: melhoria de projeto de rotor.

O projeto do motor também proporciona melhoria, porém, este deve ser fruto de um detalhado balanço dos vários tipos de perdas presentes no motor. Uma vez, que todas essas perdas se inter-relacionam, um aumento no número de lâminas, por exemplo, na busca por redução nas perdas por correntes parasitas, exigirá um aumento no comprimento dos condutores o que provocará aumento nas perdas joule.

As características dos motores das linhas padrão e alto-rendimento são técnica, elétrica e mecanicamente similares e atendem ao acionamento da carga sem que sejam necessárias adequações. A aquisição de um motor de alto rendimento, neste sentido, deve levar em conta o custo de aquisição, em média 30% mais caro que o motor da linha padrão, e o menor custo operacional devido a sua maior eficiência. A substituição, todavia, requer uma avaliação técnico-econômica, de modo a saber se a economia de energia obtida é suficiente para pagar a diferença de preço em tempo razoável.

A tabela 2.1 ilustra os valores comparativos entre as perdas presentes em motores de 50 HP de quatro pólos, da linha padrão e de alto-rendimento. Pode-se perceber que houve redução de perdas em quase todos os quesitos enumerados, porém, nas perdas joule no rotor houve acréscimo. A tendência apontada pela tabela 2.1 vai de encontro ao que foi citado anteriormente. A redução de perdas, mais acentuada, no núcleo e nas perdas suplementares, aponta para a adoção de materiais, tecnologicamente, mais avançados [18].

Tabela 2.1 – Comparação entre as perdas em motores

Perdas	Motor Convencional		Motor de Alto Rendimento		Redução de Perdas		Redução percentual	
	kW	%	kW	%	kW	%		
Nos núcleos	0,725	18,5	0,18	7,7	0,545		75,17	
Mecânicas	0,373	9,5	0,281	12	0,092		24,66	
No estator	1,319	33,7	0,911	38,9	0,408		30,93	
No rotor	0,646	16,5	0,668	28,6	-0,022		-3,4	
Suplementares	0,852	21,8	0,299	12,8	0,553		64,9	
Total	3,0915	100	2,339	100	1,576		40,26	

FONTE: Módulo Motor Elétrico Procel

Vale observar que, embora o acréscimo de rendimento seja, aparentemente pequeno, a redução de perdas é significativa, afinal, é necessária uma redução de 11% nas perdas para elevar o rendimento de um motor de 90% para 91%, por exemplo.

Outro fato a se destacar, diz respeito ao menor escorregamento, ou seja, um pequeno aumento da velocidade para o motor de alto rendimento verificado estatisticamente no banco de dados do *software* BDMotor. Exemplificando, motores de 10 cv de um mesmo fabricante podem apresentar velocidades à plena carga de 3510 rpm ou 3500 rpm, para motores de linha padrão e de alto rendimento respectivamente [19]. Quando um motor de alto-rendimento é utilizado em cargas centrífugas, como bombas e ventiladores por exemplo, tanto a potência quanto o consumo de energia sobem. Isso anula uma parte da economia obtida com a substituição do motor de indução de linha padrão pelo de alto rendimento. Como a potência requerida por estas cargas é multiplicada pelo cubo da razão entre as velocidades de ambos os motores, há um acréscimo do consumo final e uma consequente redução de economia de energia elétrica.

Deve-se ainda considerar que, mesmo tendo uma relação custo-benefício, quase sempre, favorável para motores que permanecem em funcionamento por várias horas diárias, estudos mostram que o mercado para motores de alto rendimento ainda é pequeno, cerca de 10% do total fabricado no país. Aparentemente, sua relutante aceitação pelos consumidores deve-se, entre outros fatores, aos motores utilizados em equipamentos de produção, que na sua fabricação levam em conta apenas o custo inicial. Este é um problema que programas de etiquetagem, como o PBE, podem ajudar a corrigir.

2.4) O motor de indução submetido a variações na tensão de alimentação

Ao serem submetidos a variações sustentadas de tensão, o motor de indução tenderá a manter potência mecânica constante no eixo. Esta característica implica em que a corrente deverá sofrer variação de forma inversamente proporcional à tensão. Na tabela 2.2, um motor de 70 cv e 4 pólos e 380 V, com carga nominal, foi submetido a variações sustentadas de tensão [18]. É possível verificar que o motor submetido à sub-tensão conservou o seu rendimento, ao passo que, com sobre-tensão houve perda de rendimento. O fator de potência em tensões mais baixas teve uma melhora considerável enquanto, para maiores valores de tensão a queda no fator de potência foi acentuada. Entretanto, há que se

salientar que o aumento da corrente, observável em baixas tensões, é responsável pelo aumento da temperatura interna do motor e, sua conseqüente redução de vida útil.

Tabela 2.2 – Motor de indução submetido a variações de tensão

Tensão	RPM	FP %	Rend%	Torque	Pot.Ent.	Perdas	Corrente
320	1759,2	90,5	91,7	162,9	32203,7	2773,7	67,2
330	1762,2	90,7	91,6	162,6	32177,6	2710,1	62,2
340	1767,8	90,2	91,7	162,3	32082,6	2662,6	60,7
350	1767	89,9	91,8	162,2	32062,2	2637,3	58,9
360	1769,1	89,7	91,8	162	32057,7	2621,2	57,5
370	1770,9	88,7	91,8	161,7	32032,5	2620,8	56,7
380	1772,5	87,8	91,8	161,7	32071,5	2670,7	55,5
390	1777	86,8	91,7	161,6	32122,1	2676,7	57,8
400	1775,7	85,5	91,5	161,6	32187,9	2728,3	57,3
410	1776,6	87	91,3	161,5	32263,3	2798,6	57,1
420	1777,7	82,7	91,1	161,3	32329,8	2887,5	57
430	1778,8	80,5	90,7	161,2	32777	3001,6	57,1
470	1779,9	78,6	90,7	161,1	32583,9	3171,5	57,7

2.5) A manutenção do motor de indução trifásico

Motores freqüentemente são expostos a ambientes agressivos, operações impróprias, entre outras. A ocorrência de falhas incipientes (barras quebradas, rolamentos danificados, curto-circuito, etc.) e falhas externas (sobrecarga mecânica, desequilíbrio de fase, subtensão, sobretensão, rotor bloqueado, etc.) é inevitável. Além disso, a degradação do isolamento dos motores elétricos operando dentro de ambientes agressivos pode ser acelerada, tornando-os ainda mais susceptíveis a defeitos [20].

Devido a isso é necessária a criação de uma cultura de manutenção rotineira em motores, adotando medidas como: desobstrução dos dutos de ventilação; secagem periódica de bobinas de motores submetidos a ambientes poluídos e úmidos; verificação de rolamentos e mancais; inspeção de conexões elétricas; verificação das condições de

correias e polias, tanto no sentido de alinhamentos como da avaliação dos esforços radiais e axiais de modo a evitar esforços de tração além do necessário.

Outras medidas, de caráter mais minucioso podem ser tomadas como, por exemplo, a observação de:

- Vibrações ou ruídos: deve-se observar a existência de vibrações anormais ou ruídos estranhos ao motor em perfeito estado de funcionamento. Elas podem indicar problemas de origem elétrica e mecânica;
- Temperatura dos mancais: Para bom desempenho de suas funções a temperatura do mancal de máquinas rotativas deve ser a prevista pelo fabricante. Assim, é conveniente verificá-la através de termômetro;
- Superfície do estator e do rotor: Inspeção visual para determinar a presença de alguma contaminação ou ferrugem, bem como lascas, borbulhas e arranhões.

2.5.1) O Motor rebobinado

Quando o isolamento (esmalte ou verniz em baixas tensões e papel em altas tensões) entre as espiras de uma mesma bobina se rompe ou, entre duas bobinas de diferentes fases ou, ainda entre uma bobina e o núcleo, popularmente, diz-se que houve a queima do motor. O motor que sofreu o efeito de “queima” pode ser recuperado pelo processo de rebobinagem, ou seja, a retirada das bobinas danificadas e a substituição por outras com as mesmas características. Quando é observado grande rigor técnico na realização do procedimento de rebobinagem, o motor pode alcançar características próximas às originais.

Estudos realizados em 1999 [21] apontaram como fator preponderante na preservação do rendimento do motor após o reparo, a qualidade da oficina. É possível, como ficou demonstrado nas tabelas 2.3 e 2.4, até um aumento no rendimento global do motor, quando comparado o antes e o depois do reparo. Nesse estudo não foi feita a comparação de rendimento entre motor reparado e novo. Entretanto, estudos da General Electric sobre motores de 3 a 150 HP determinaram que as perdas no motor se incrementam de, em média, 18%, isso é dizer que a eficiência reduz entre 1,5% e 2,5% [22].

Tabela 2.3 - Grandezas antes do reparo

Motor	P_m (cv)	P_{av}	P_{hf+av}	P_{je}	P_{jr}	η
1	5	0,042	0,573	0,294	0,139	80,1
2	5	0,045	0,328	0,335	0,173	80,7
3	10	0,059	0,484	0,411	0,179	84,7
4	10	0,093	0,455	0,407	0,138	86,8
5	10	0,036	0,402	0,402	0,177	86,3
6	10	0,142	0,419	0,455	0,196	81,4
7	15	0,104	0,778	0,501	0,204	86,3
8	15	0,046	0,56	0,567	0,286	86,8

Tabela 2.4 - Grandezas após do reparo

Motor	P_m (cv)	P_{av}	P_{hf+av}	P_{je}	P_{jr}	η
1	5	0,041	0,351	0,279	0,128	82,1
2	5	0,061	0,351	0,298	0,179	80,8
3	10	0,056	0,485	0,357	0,164	85,5
4	10	0,049	0,444	0,413	0,122	87,5
5	10	0,023	0,403	0,393	0,174	86,3
6	10	0,084	0,455	0,528	0,193	81,7
7	15	0,08	0,725	0,643	0,204	85,4
8	15	0,0319	0,496	0,555	0,316	86,5

Onde:

P_{av} = perdas por atrito e ventilação

P_{hf} = perdas por histerese e Foulcalt

P_{je} = perdas por efeito joule no estator

P_{jr} = perdas por efeito joule no rotor

Observam-se, em algumas ocasiões, que práticas utilizadas afetam o desempenho dos motores após o reparo, dentre elas pode-se citar:

- O emprego de materiais de baixa qualidade, sobretudo em isolantes;

- A utilização de maçarico para remoção das espiras danificadas, o que pode causar alteração, tanto nas propriedades eletromagnéticas do núcleo como no isolamento entre as chapas aumentando as perdas parasitas;
- Utilização de condutores de cobre de bitola diferente do original propiciando alteração das perdas no cobre;
- Número de espiras em desacordo com o do projeto original;
- Alteração do diâmetro externo do rotor que altera as condições de entreferro e pode aumentar consideravelmente a corrente de magnetização.

Conclui-se que o rendimento médio dos motores após o rebobinamento pode até aumentar, quando verificado o antes e o depois da ocorrência do defeito. Nos poucos casos onde existiram grandes variações nas perdas por histerese e Foucault pode-se considerar o fato de que, devido à natureza do defeito (queima por sobrecarga) ou ao método utilizado na retirada das bobinas defeituosas (aplicação de maçarico), possam ter influenciado nas características magnéticas do material do núcleo.

Como a estrutura do motor não foi alterada, o pacote magnético, o formato e a disposição das ranhuras e o rotor permanecem os mesmos, a redução nas perdas por atrito e ventilação após o rebobinamento, pode ser devida à limpeza e lubrificação executadas durante o processo de remontagem do motor. Torna-se evidente que procedimentos simples como limpeza e lubrificação podem ter efeitos sobre o rendimento final do motor e podem contribuir para redução de consumo de energia elétrica nas indústrias [21, 22].

Uma importante variável na análise de motores reformados ou rebobinados é o rendimento, este é também o que apresenta maior nível de incerteza. Uma redução de rendimento é admissível quando compensada pelo reduzido custo da manutenção. Uma regra prática, segundo a referência [21], é que o custo da manutenção não deve exceder 60% do custo do motor novo.

2.6) Acoplamento motor-carga

A transmissão de potência entre o motor e a carga, é realizada por intermédio de sistemas de transmissão, ou acoplamentos mecânicos, que podem ser de vários tipos, como citados a seguir:

- Acoplamento direto;
- Acoplamento por correias;
- Acoplamento hidráulico;
- Caixas de engrenagens.

A figura 2.8 apresenta um diagrama onde estão representados conjugados, inércias, velocidades e redutores, que compõem o acoplamento motor-carga.

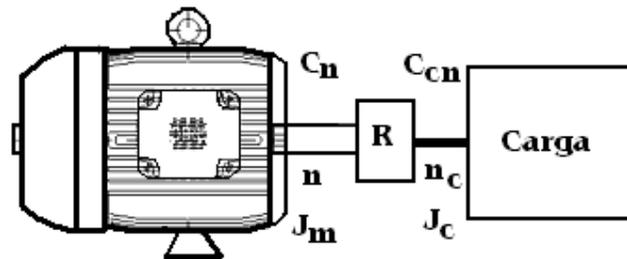


Figura 2.8 – Diagrama representativo do acoplamento motor-carga

Onde:

R = relação de acoplamento;

C_n = conjugado nominal;

C_{cn} = conjugado nominal da carga;

J_m = momento de inércia do motor;

J_c = momento de inércia da carga.

a) Acoplamento direto

O acoplamento direto é, em geral, a solução mais econômica, tanto em investimento de aquisição quanto nas perdas de energia na transmissão (praticamente nulas). Apesar dessas vantagens, a utilização deste tipo de acoplamento é limitada à equipamentos e maquinarias que podem trabalhar à mesma velocidade que o motor.

Matematicamente o acoplamento direto pode ser descrito em função da potência, da velocidade e do conjugado mecânicos, como indicado na equação (2.5) [23, 24].

$$P_n = 2. \pi. \omega. C_n \quad (2.5)$$

Onde:

ω = rotação em radianos por segundo.

b) Acoplamento por correias

A transmissão por correias é uma das mais utilizadas no setor industrial. Isto ocorre devido à facilidade de se ajustar a velocidade do motor a da máquina e por permitir diferentes geometrias de conexão entre o motor e a respectiva carga.

Este tipo de acoplamento apresenta, no entanto, perdas médias de energia da ordem dos 5%, valor este que pode ser melhorado ao se utilizar correias de tipos mais eficientes, com desenhos otimizados capazes de conduzir mais potência com melhor rendimento. Considerando os vários tipos de correias fabricadas, a sua eficiência cresce, de acordo com a seqüência: correias planas, correias de secção trapezoidal (correias em V) e correias dentadas.

As correias planas apresentam baixo rendimento, com grandes perdas por escorregamento, devido a isso não são utilizadas na maioria dos novos equipamentos. Às instalações industriais onde ainda existam equipamentos acionados por correias planas é aconselhável a substituição por correias mais eficientes, por exemplo correias trapezoidais, pois a economia de energia resultante da substituição permite a recuperação do investimento em tempo relativamente curto.

Para este tipo de acoplamento, a correia dentada com polias igualmente dentadas (correias síncronas) é a melhor solução. Nestas as perdas por escorregamento são praticamente nulas. Entretanto, a sua utilização em substituição a outras já existentes está condicionada ao tempo de retorno do investimento, sendo este normalmente aconselhável para motores de média e alta potência, com um regime de trabalho intenso, ou seja, superior a 4000 horas/ano.

Independente do tipo de correia utilizado, é fundamental para a eficiência global do sistema motor-acoplamento-carga, a manutenção adequada. Frequentemente, por exemplo, encontram-se sistemas de acoplamentos com polias de múltiplas correias, onde faltam uma ou mais correias, além de aumentar as perdas, este fato também contribui para provocar desequilíbrios e vibrações no sistema. Outro aspecto importante na manutenção é a verificação periódica da tensão das correias (exceto nas correias síncronas), que tem tendência a afrouxar, ao longo do tempo, provocando maiores escorregamentos e conseqüentes desperdícios de energia [24, 25].

c) Acoplamento por caixas redutoras e acoplamento hidráulico

A transmissão por caixas redutoras ou acoplamentos hidráulicos, tem os seus campos de aplicação, normalmente associados a grandes potências, conjugados elevados

de partida, variação de velocidade, etc. A eficiência destes tipos de acoplamento é elevada, desde que se cumpram os níveis de manutenção recomendados pelos fabricantes [24].

d) Acoplamento com variação de velocidade:

Acoplamentos onde existem variações de velocidade devem ter o conjugado e a inércia referidos ao eixo do motor. O equacionamento para esses procedimentos está citado a seguir [23]:

$$C_n = R \cdot C_{cn} \quad (2.6)$$

$$J_{mc} = J_c \cdot R^2 \quad (2.7)$$

$$R = \frac{n_c}{n} \quad (2.8)$$

$$P_n = \frac{P_c}{\eta_{ac}} \quad (2.9)$$

Onde:

J_{mc} - Momento de inércia da carga referida ao eixo do motor;

η_{ac} - Rendimento do acoplamento;

R - Relação de velocidade do acoplamento.

e) Rendimentos médios para acoplamentos

A título de ilustração a tabela 2.5 mostra os valores médios de rendimentos para alguns dos tipos de acoplamentos mais utilizados na indústria [23].

Tabela 2.5 – Rendimentos para alguns tipos de acoplamento

Tipo de acoplamento	Faixa de rendimento (%)
Direto	100
Embreagens eletromagnéticas	87 – 98
Correias planas	95 – 98
Correias em V	97 – 99
Engrenagens	96 – 99
Correia dentada	97 – 98
Cardã	25 – 100
Acoplamento hidráulico	100

2.7) Sistema de bombeamento

Bombas hidráulicas têm por função fornecer energia a um fluido, de modo a elevá-lo (recalcá-lo), por meio de conversão de energia mecânica em energia cinética (ou de movimento) através de um motor a combustão ou elétrico [26]. Assim, pode-se definir bombeamento como sendo o ato de se adicionar energia a um fluido com o intuito de movê-lo de um ponto a outro.

2.7.1) Principais componentes de um sistema de bombeamento

Um sistema de bombeamento é mostrado na figura 2.9, onde é possível visualizar em (3) a linha de sucção e em (4) a linha de recalque. Os vários componentes estão listados a seguir [26].

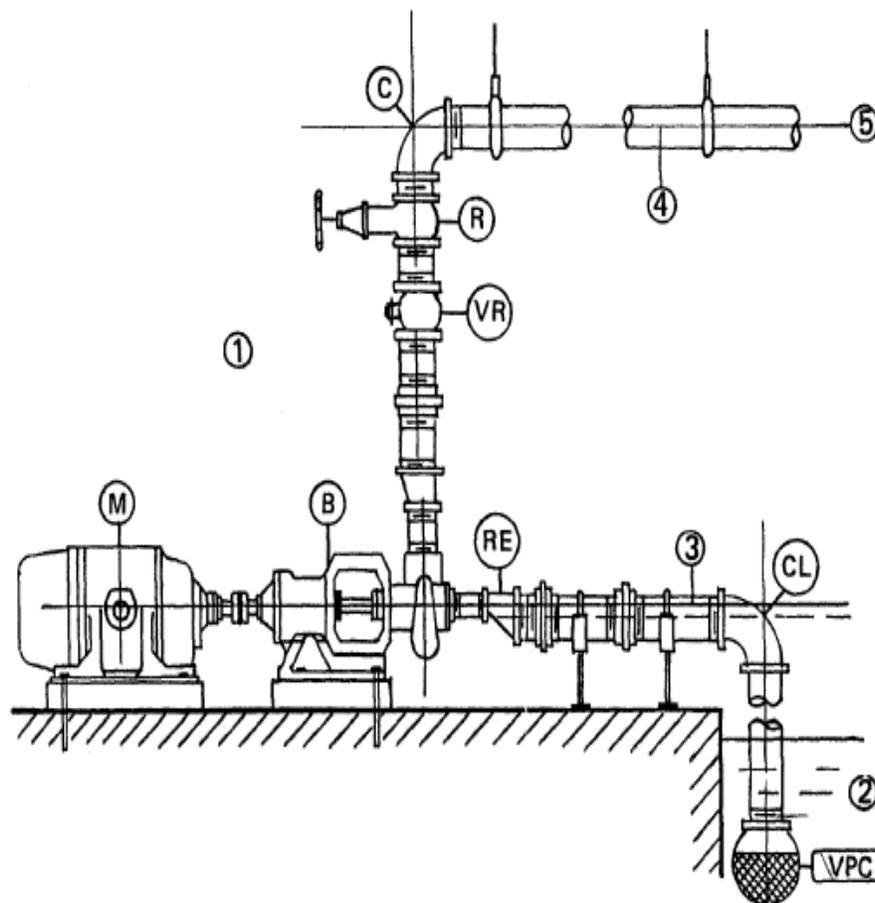


Figura 2.9 – Componentes de um sistema de bombeamento

Onde:

1- Casa de Bombas;

M – Motor de acionamento;

B – Bomba;

2 – Poço (fonte);

VPC - Válvula de pé com crivo;

CL - Curva de 90°;

3 – Linha de Sucção;

RE - Redução Excêntrica;

VR - Válvula de retenção;

R – Registro;

C – Joelhos;

4 - Linha de Recalque;

5 – Reservatório.

2.7.2) Bomba hidráulica

As principais classificações das bombas hidráulicas são [26]:

i) Quanto à trajetória do fluido

- a) Bombas radiais ou centrífugas: trabalham com pequenas vazões a grandes alturas, com predominância de força centrífuga, são as mais utilizadas atualmente;
- b) Bombas axiais: trabalham com grandes vazões a pequenas alturas;
- c) Bombas diagonais ou de fluxo misto: é uma combinação das duas anteriores, caracterizam-se por trabalhar com médias vazões a médias alturas.

ii) Quanto ao posicionamento do eixo

- a) Bomba de eixo vertical: utilizada em poços subterrâneos profundos.
- b) Bomba de eixo horizontal: é o tipo construtivo mais usado.

iii) Quanto à posição do eixo da bomba em relação ao nível da água

- a) Bomba de sucção positiva: quando o eixo da bomba situa-se acima do nível do reservatório.

b) Bomba de sucção negativa ("afogada"): quando o eixo da bomba situa-se abaixo do nível do reservatório.

2.8) Bomba centrífuga

O tipo de bomba instalada no Laboratório de Sistemas Motrizes é a bomba centrífuga, motivo pelo qual esta receberá atenção mais detalhada, tanto na definição quanto em suas características principais.

Bombas centrífugas são máquinas nas quais a movimentação de um líquido é produzida por forças que se desenvolvem na massa líquida, em consequência da rotação de um rotor (impelidor) com um certo número de pás. São aquelas em que a energia fornecida ao líquido é, primordialmente, cinética sendo posteriormente convertida, em grande parte, em energia de pressão [27].

Podem ser divididas em centrífugas radiais e tipo Francis:

a) Centrífugas radiais: neste tipo de bomba a energia cinética é obtida de maneira puramente centrífuga por um impelidor e, transferida à massa líquida.

b) Tipo Francis: é também radial, porém, este tipo de bomba possui impelidor de palhetas com curvaturas especiais chamadas Francis.

2.8.1) Curvas características ou de desempenho

2.8.1.1) Curvas da bomba

O desempenho esperado de bombas centrífugas é representado através de curvas características fornecidas pelos fabricantes do equipamento. Essas curvas são levantadas em laboratório e disponibilizadas em catálogos técnicos. São, basicamente, três as curvas características tradicionais: curva de carga x vazão, curva de potência absorvida x vazão e curva de rendimento x vazão. Por definição, vazão é o volume do líquido bombeado por unidade de tempo, ou seja, vazão é a velocidade de escoamento de um determinado líquido.

Curvas em função da velocidade não são fornecidas pela maioria dos fabricantes de bombas centrífugas. Com o tempo, essas curvas se tornarão de suma importância, uma vez

que o uso de inversores de frequência como forma de controlar a vazão tende a se solidificar nos segmentos ou instalações onde uma variação de vazão se faz necessário.

A equação geral das bombas centrífugas é mostrada a seguir:

$$H = An^2 + BnQ - CQ^2 \quad (2.10)$$

Onde:

Q = vazão [m³/h];

H = carga hidráulica de pressão [m];

A, B e C = constantes equacionais.

Percebe-se, pela análise da equação (2.10) que a curva (H x Q) será uma parábola, quando a rotação “n” for constante. Fato semelhante ocorrerá quando a vazão “Q” for constante a curva (H x n) também, neste caso, terá um comportamento quadrático, ou seja, parabólico.

a) Curva carga (H) versus vazão (Q)

A carga de uma bomba pode ser definida como energia por unidade de massa ou energia por unidade de peso que a bomba pode impor ao líquido de modo a obter a vazão desejada. O equacionamento matemático que representa função $H = f(Q)$, para uma rotação constante é ilustrado na equação (2.11). Diferentes denominações são encontradas para a curva $H = f(Q)$. Essas são dadas em função da inclinação da mesma. Assim pode-se encontrar curva inclinada, curva ascendente-descendente, curva altamente descendente e curva plana, conforme demonstrado na figura 2.10. As curvas cuja inclinação permite apenas um ponto de vazão para uma determinada carga é considerada estável. Portanto, a figura 2.10 indica que, apenas a curva ascendente-descendente é instável e que, devido a isso ao se confeccionar projetos nos quais esse tipo de máquina deve ser usado é importante evitar o ponto de trabalho no lado ascendente da curva [27, 28].

$$H = A + BQ - CQ^2 \quad (2.11)$$

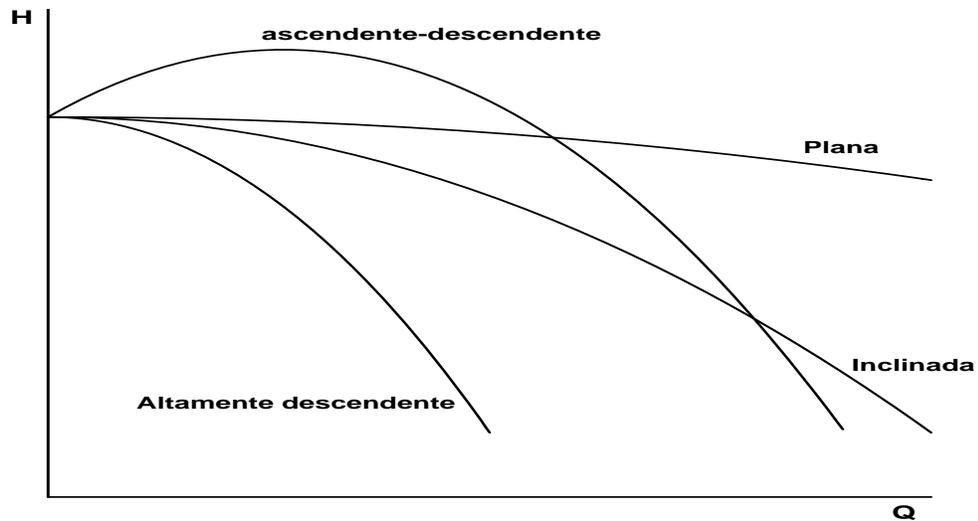


Figura 2.10 – Tipos de curva H x Q

b) Curva rendimento (η) versus vazão (Q)

Em um projeto de bombeamento outra curva de interesse, a curva rendimento (η) x vazão (Q). Rendimento que por definição é a razão entre a potência útil cedida ao fluido e potência absorvida pela bomba. Segundo catálogos de fabricantes, o rendimento dessas bombas, normalmente, varia de 0,45 a 0,75, entretanto, bombas de grandes dimensões podem atingir rendimento de 0,85. A figura 2.11 ilustra as características da curva η x Q. Para cada bomba existe uma vazão para a qual o rendimento é máximo. [27, 28].

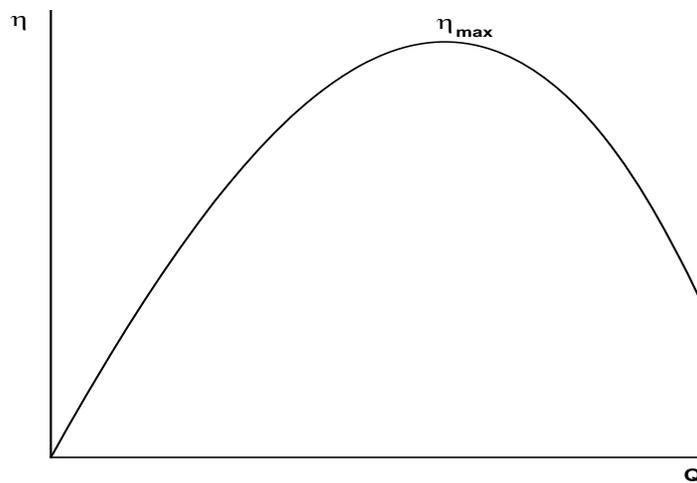


Figura 2.11 – Curva η x Q

c) Curva potência mecânica (P_m) versus Vazão (Q)

Na figura 2.12, a curva representada é a da potência mecânica (P_m) aplicada na bomba em função da vazão (Q). Para uma vazão nula, a potência hidráulica aplicada ao

fluido é zero, Ainda assim, uma potência mínima é necessária para manter o giro da bomba e, esta energia é dissipada em forma de calor. Todavia, a partida da bomba efetuada com a válvula de saída de fluido fechada é a condição de menor exigência do motor elétrico, o que pode ser visualizado na figura 2.12. Essa ação reduz o tempo de duração das correntes de partida do motor e traz um conseqüente aumento da vida útil do equipamento. Por outro lado, o funcionamento por longo tempo com vazão zero pode causar sobre-aquecimento do fluido e provocar problemas no sistema bombeamento. A curva de potência pode ser matematicamente representada como na equação (2.12).

$$P_m = \frac{\gamma \cdot Q \cdot H}{75} \quad (2.12)$$

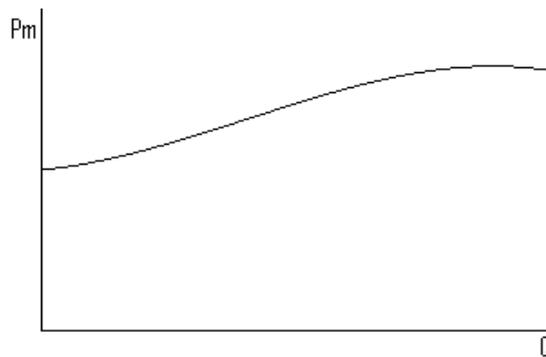


Figura 2.12 – Curva $P_m \times Q$

d) As leis de similaridade ou afinidade

Um entendimento da inter-relação dos parâmetros que compõem as curvas características é necessário para o correto estudo dos sistemas de bombeamento. Se forem tomadas as grandezas: rotação (n), a vazão (Q), a pressão (p) e a potência (P), o resultado será proporcionado pelas leis de similaridade, as quais estão relacionadas abaixo:

i) Relação vazão x rotação

$$\frac{Q_1}{n_1} = \frac{Q_2}{n_2} \quad (2.13)$$

ii) Relação pressão x rotação

$$\frac{p_1}{n_1^2} = \frac{p_2}{n_2^2} \quad (2.14)$$

iii) Relação Potência x rotação

$$\frac{P_1}{n_1^3} = \frac{P_2}{n_2^3} \quad (2.15)$$

iv) Relação Torque x rotação

$$\frac{C_1}{n_1^2} = \frac{C_2}{n_2^2} \quad (2.16)$$

Para que a relação de potência, indicada na equação (2.15) seja válida supôs-se que o rendimento da máquina permanecesse constante. Entretanto, na prática a variação da rotação altera o rendimento. A correção dos rendimentos na expressão de potência pode ser conseguida introduzindo a relação experimental indicada na equação (2.17) [29]:

$$\frac{n_2}{n_1} = \frac{n_2^3 \eta_1}{n_1^3 \eta_2}$$

Com:

$$\eta_2 = 1 - (1 - \eta_1) \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^{0,1} \quad (2.17)$$

Além desta, existem outras expressões empíricas para a estimativa da eficiência, tal como a recomendada na equação (2.18).

$$\eta_2 = \frac{\eta_1}{\eta_1 + (1 - \eta_1) \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^{0,17}} \quad (2.18)$$

Onde:

η_1 = rendimento da máquina antes da alteração da velocidade;

η_2 = rendimento da máquina após a alteração da velocidade.

Deve-se salientar, ainda, que as leis de afinidade têm maior grau de precisão quando a curva de carga do sistema parte da origem, ou seja, do ponto zero. E, mesmo

sistemas centrífugos, têm uma limitação à qual se pode reduzir sua velocidade sem que se perca a sua eficiência ou, até mesmo, sua funcionalidade.

2.8.1.2) Curva de carga do sistema

A curva de carga do sistema versus vazão é quem determina claramente a carga, ou energia por unidade de peso, que a bomba tem que fornecer ao fluido para vencer a altura manométrica e obter uma determinada vazão.

Para traçar a curva de carga é necessária a definição da altura manométrica, esta pode ser definida como a altura geométrica da instalação somada às perdas de carga ao longo da tubulação por onde o líquido irá percorrer durante o processo de bombeamento, ou seja, é o carregamento que, fisicamente, será percebido pela bomba. Matematicamente tem-se que:

$$H = h_g + h_f \quad (2.19)$$

Onde:

h_g = altura geométrica (sucção + recalque);

h_f = perda de carga total.

As perdas de carga (h_f) referem-se à energia perdida pela água ao longo da tubulação. Estas são provocadas por atritos entre a água e as paredes da tubulação. As perdas h_f se apresentam de duas formas ao longo da tubulação:

a) Contínuas: referem-se às perdas ao longo da tubulação, sendo função do comprimento, material e diâmetro;

b) Perdas de carga acidentais: referem-se aos elementos componentes da tubulação, como, curvas, registros, válvulas, luvas, reduções, ampliações, etc.

Há de se salientar também que para o estudo de todas essas perdas existem tabelas fornecidas pelos fabricantes dos componentes.

Para o levantamento da equação de carga existem vários métodos. Neste trabalho o método apresentado é o de Hazen-Willians. Desta forma, a equação $H = f(Q)$, é a seguinte:

$$H = hg + kQ^{1,852} \quad (2.20)$$

a) A relação pressão x altura manométrica

A pressão pode ser definida como a razão entre força a que um objeto está exposto e a área da superfície sobre a qual a força age. Assim, para um fluido, tem-se que:

$$p = \gamma H \quad (2.21)$$

Onde:

p = pressão

γ = peso específico do líquido a ser bombeado

Bernoulli demonstrou que a energia total específica (por unidade de peso) em qualquer seção pode ser expressa em termos de alturas de coluna de água, ou seja:

altura geométrica = $Z \sim [m]$

altura piezométrica = $p / \gamma \Rightarrow [(kgf/m^2)/(kgf/m^3)] \sim [m]$

altura dinâmica = $V^2 / 2g \Rightarrow [(m/s)^2 / (m/s^2)] \sim [m]$

A energia total específica, que é a soma das três parcelas, é chamada de altura manométrica total e representada em termos de altura.

A figura 2.13 representa a curva altura manométrica versus vazão:

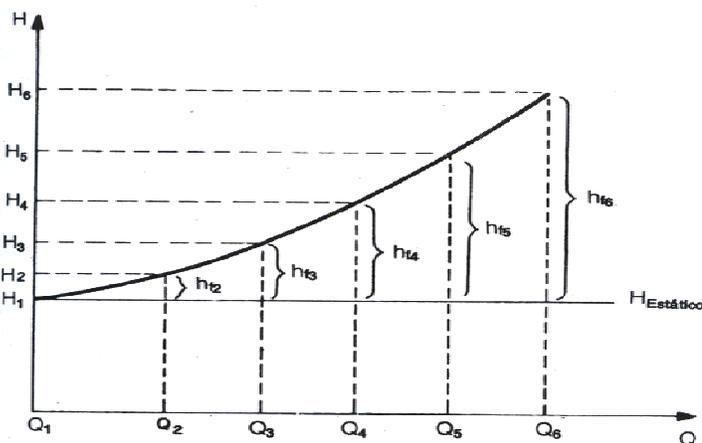


Figura 2.13 – Curva H x Q

Alterações na curva do sistema são obtidas pelas modificações na tubulação, isto pode ser pelo acionamento de válvulas de retenção. Uma redução de vazão, segundo a figura 2.13, acarretará aumento de pressão, esse efeito pode ou não ser danoso ao sistema [28].

2.8.1.3 – Curva de conjugado da bomba versus rotação

O conhecimento da curva de conjugado versus rotação de carga, indicada na figura 2.14, é necessário para o cálculo de tempo de aceleração do conjunto motor-bomba. Na referida figura estão indicados valores percentuais recomendados pela referência [9] para valores de conjugados relativos a percentuais de velocidade.

Uma boa aproximação para representar o conjugado no eixo da bomba é indicada na equação (2.22), onde se pode notar que esta variação tem característica quadrática.

$$C_c = C_0 + (k_c \times n_c^2) \quad (2.22)$$

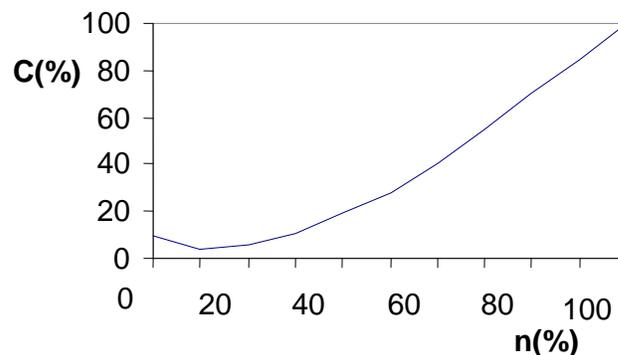


Figura 2.14 – Curva de conjugado *versus* rotação

O manual de comando e proteção da Weg [9] recomenda para C_0 um valor entre 10% e 20% do conjugado nominal quando se desconhece a curva do conjugado da bomba em função de sua velocidade.

A associação entre as figuras 2.1 (pág. 11) e 2.14, demonstrada na figura 2.15, mostra o ponto de trabalho do sistema de bombeamento ou de qualquer outro sistema cuja carga tenha característica centrífuga. O conhecimento dos conjugados médios do motor e da carga permite estimar o tempo de partida, essencial para a correta determinação do motor a ser usado no acionamento da carga, principalmente quando da troca de motores em um determinado processo industrial.

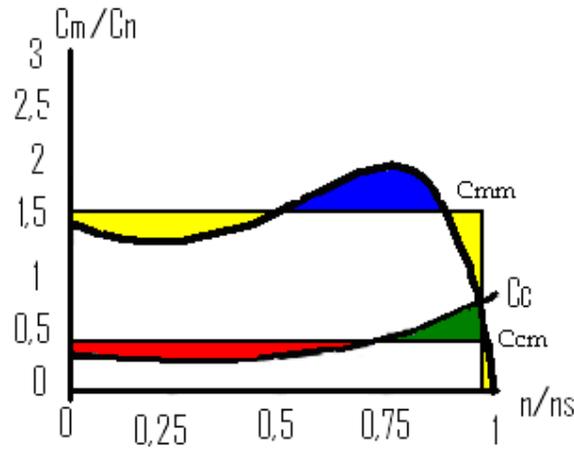


Figura 2.15 - Conjugados médios em função da rotação do sistema de bombeamento

O equacionamento do conjugado médio da carga é obtido, tomando-se como base as equações (2.23), (2.24) e (2.25).

$$C_{cm} = C_0 + \frac{1}{3} (k_c n_c^2) \quad (2.23)$$

Da equação (2.22), tem-se:

$$k_c = \frac{C_c - C_0}{n_c^2} \quad (2.24)$$

Substituindo-se a equação (2.24) na (2.23), obtém-se a (2.25):

$$C_{cm} = \frac{2C_0 + C_c}{2} \quad (2.25)$$

Por outro lado, o conjugado médio para os motores de indução trifásicos é estimado pela equação 2.26:

$$C_{mm} = a \left(\frac{C_p}{C_n} + \frac{C_{max}}{C_n} \right) 9,81 C_n \quad (2.26)$$

Onde “a” assume valores de 0,4, 0,5 ou 0,6 para motores de categoria H, N e D respectivamente.

Resumindo, o valor médio do conjugado do motor durante a aceleração com tensão plena pode ser estimado pelas seguintes relações [30]:

a) Motores de categoria N:

$$C_{mm} = 0,5(C_p + C_{max})$$

b) Motores de categoria H:

$$C_{mm} = 0,4(C_p + C_{max})$$

c) Motores de categoria D:

$$C_{mm} = 0,6(C_p + C_{max})$$

A partir dos conjugados médios do motor e da carga, pode-se estimar o tempo de aceleração (t_a) do acionamento, o qual é representado pela equação (2.27):

$$t_a = 2\pi n \left(\frac{J_m + J_c}{C_{mm} - C_{cm}} \right) \quad (2.27)$$

Após o cálculo do tempo de partida, ou de aceleração, a referência [9] sugere que o tempo de aceleração do sistema deva ser menor que 80% do tempo de rotor bloqueado. Isto pode ser justificado, pois valores que não se enquadram na condição imposta pela [9] não estão aptos a suportar oscilações eventuais na tensão durante a partida do motor. Esta condição permite afirmar que o acionamento durante a partida não deverá causar danos aos sistemas elétrico e mecânico.

2.8.2 – Estimativa do momento de inércia da carga (J_c)

Uma das maiores dificuldades para se realizar um diagnóstico energético nas plantas industriais em operação, é o conhecimento do valor do momento de inércia da carga. Neste sentido, este item segue na direção de mostrar uma possibilidade de estimar esta grandeza nas instalações de bombeamento. Assim, em um sistema em funcionamento o momento de inércia da carga pode ser estimado a partir do conhecimento dos conjugados médios de carga e motor e do tempo de aceleração ou de partida. A equação (2.28) aponta a relação entre os dados supracitados e o momento de inércia J' que, neste caso é o valor

da soma entre os momentos de inércia do motor e da carga ($J_m + J_c$). Catálogos de fabricantes de motores fornecem o valor do momento de inércia do motor. Da diferença entre o valor J' obtido no cálculo com o valor indicado pelo catálogo, retira-se o valor referente à carga.

$$C_{mm} - C_{mc} = J' \frac{dn}{dt} \quad (2.28)$$

Assim, o momento de inércia da carga pode ser estimado utilizando a equação (2.29).

$$J_c = \left(\frac{C_{mm} - C_{mc}}{n} \right) t - J_m \quad (2.29)$$

Segundo a referência [30], uma outra alternativa para estimar o conjugado médio da carga, quando esta for quadrática, é apresentada pela equação (2.30). Deve-se salientar que, $C_{reg} \approx C_n$, quando a carga mecânica centrífuga está bem especificada.

$$C_{mc} = \frac{1}{3} C_{reg} \quad (2.30)$$

Onde:

C_{reg} = conjugado em regime permanente

2.9) O controle de vazão por estrangulamento de válvula

Existe no mercado uma enorme quantidade de tipos de válvulas, algumas hidráulicas outras com atuador elétrico. Dentre elas:

- Válvulas do tipo on/off - acionamento remoto de unidades ou para operar registros de grandes dimensões;
- Válvulas redutoras de pressão - tem como utilidade a redução da pressão a jusante do ponto de instalação;
- Válvulas sustentadoras de pressão e válvulas de alívio - aplicam-se onde é necessário manter uma pressão inferior a um determinado limite. São utilizadas

para limitar a vazão num bombeamento com desnível negativo (bombeamento para “baixo” quando da partida do motor) e para limitar a vazão às zonas baixas, mantendo pressão nas zonas altas, etc;

- Válvulas controladoras de nível - têm seu campo de atuação preferido na prevenção de extravasamentos;
- Válvulas limitadoras de vazão - mantêm a vazão do sistema de abastecimento de água dentro dos limites desejados;
- Válvulas para a prevenção de golpe de aríete.

2.9.1) O efeito do estrangulamento de válvula na curva do sistema

A técnica de se usar válvulas de estrangulamento consiste em controlar vazão do sistema através da abertura ou fechamento parcial de uma válvula instalada em série com a bomba. Este controle é possível em bombas centrífugas porque estas possuem um limite inerente de maior pressão na descarga, portanto a bomba pode sofrer estrangulamentos na escala sem sofrer danos [31]. A figura 2.16 mostra uma sucessão de pontos de operação gerados pelo fechamento progressivo de uma válvula estrangulamento. Pode-se notar que à medida em que se faz o fechamento da válvula a vazão do sistema vai sendo reduzida, enquanto a pressão vai gradualmente aumentando e se transformando em perda de carga adicional

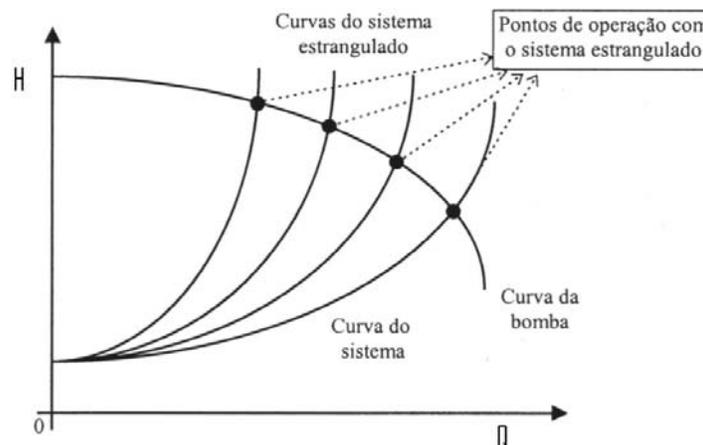


Figura 2.16 – Efeito da ação de válvulas de estrangulamento

Como a alteração que esse tipo de atuador provoca é na curva do sistema e não na curva da bomba, sempre que se fizer necessário a redução de vazão essa alteração resulta em um aumento de pressão. A equação (2.31) demonstra que, a redução de vazão por este

método pode não trazer ganho de potência substancial, uma vez que, tanto vazão quanto pressão fazem parte do numerador.

$$P_e = \frac{\gamma QH}{\eta_m \eta_b \eta_{ac}} \quad (2.31)$$

2.10) Inversor de frequência em sistemas de bombeamento

As curvas características da bomba, citadas anteriormente, podem sofrer modificações. As mais importantes são causadas por: variações na rotação da bomba, no diâmetro do rotor, as características físicas do líquido a ser bombeado, o tempo de serviço da máquina e alterações na característica da tubulação. Como o interesse primordial desse estudo é o uso racional da energia elétrica em sistemas de bombeamento, será analisada de modo mais profundo apenas a variação de velocidade, que pode ser obtida pelo uso de inversores de frequência.

Em condições energeticamente desfavoráveis, os inversores de frequência vêm ganhando espaço ao trazer consigo a missão de racionalizar o uso da energia elétrica alterando a operação do sistema de abastecimento, reduzindo a potência à ordem do cubo da razão entre velocidades, quando trabalha com vazões menores que a vazão nominal do sistema de bombeamento. Os inversores de frequência são equipamentos eletrônicos que, acoplados ao conjunto motor-bomba, têm a função de controlar a velocidade de rotação dos motores elétricos a corrente alternada (AC).

2.10.1) O inversor de frequência

Inversores de frequência estão disponíveis no mercado para dois tipos de controle: o escalar e o vetorial. O inversor, por controle escalar, é uma função de V/F (tensão/frequência), não oferece altos torques em baixas rotações, pois o torque é função direta da corrente de alimentação, não da tensão. A parametrização se faz, no inversor escalar pela curva V/F apontada na figura 2.17. Este é indicado para partidas suaves, operação acima da velocidade nominal do motor e operação com constantes reversões.

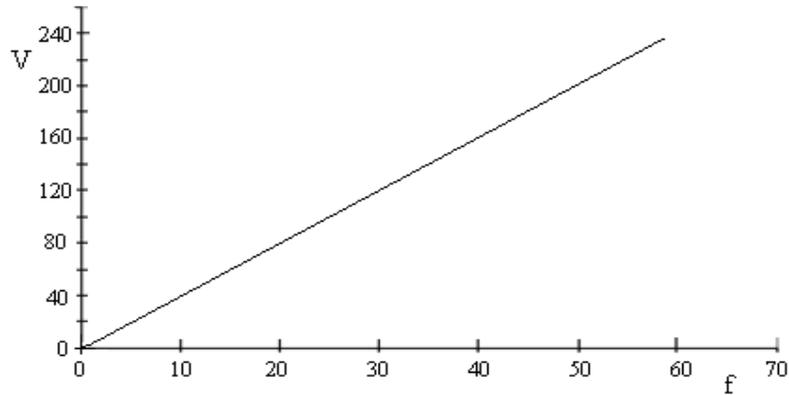


Figura 2.17 – Curva tensão versus frequência

O inversor por controle vetorial não possui uma curva parametrizada, essa curva obedece à solicitação do torque, assim, este possui circuitos que variam a tensão e a frequência do motor através do controle das correntes de magnetização e de rotor no motor de indução. O inversor vetorial é indicado para torque elevado com baixa rotação, controle preciso de velocidade e torque regulável [32].

Considerando as leis de similaridade citadas anteriormente, o efeito produzido pela variação da rotação sobre as características do bombeamento pode ser visto nas equações a seguir. Seja a curva altura manométrica x vazão ($H \times Q$), para a rotação nominal, dada por um ajuste polinomial de segunda ordem da curva do fabricante, sendo a , b e c coeficientes de ajuste da curva:

$$H = a + bQ + cQ^2 \quad (2.32)$$

A curva carga x vazão para uma rotação qualquer n , poderá ser escrita como:

$$H = a \left(\frac{n}{n_n}\right)^2 + b \left(\frac{n}{n_n}\right) Q + cQ^2 \quad (2.33)$$

A dependência da rotação n com a frequência f é dada pela relação:

$$n = 120 \frac{f}{p} \quad (2.34)$$

Onde:

f = frequência;

p = número de pólos.

No Brasil, a rotação nominal é obtida pela aplicação da frequência de 60 Hz na equação (2.34), então a equação (2.33) pode ser redigida em função da frequência como apresentada pela equação (2.35):

$$H = a \left(\frac{f}{60}\right)^2 + b \left(\frac{f}{60}\right) Q + cQ^2 \quad (2.35)$$

As demais curvas características da bomba podem ser obtidas de forma análoga a apresentada para a curva de carga.

A figura 2.18 apresenta a curva da bomba para diferentes valores de velocidade.

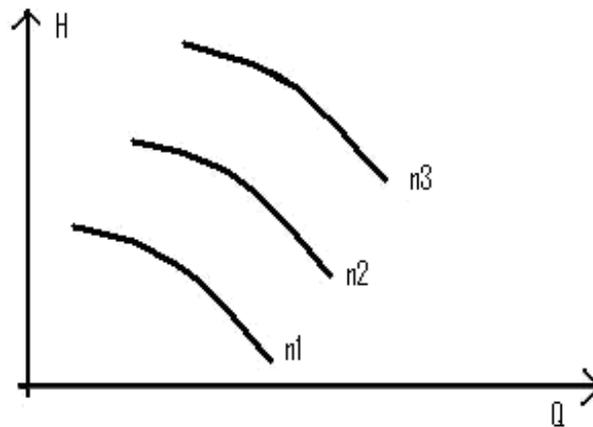


Figura 2.18 – Variação da curva de trabalho de uma bomba centrífuga pela variação da velocidade

Percebe-se, pela análise da figura 2.18, que a variação da velocidade provoca variações diretamente proporcionais de carga e vazão. Este efeito, quando se faz necessária a redução de vazão reduz a pressão, ao contrário do que ocorreria se a redução de vazão fosse obtida pela utilização de válvulas de estrangulamento.

2.10.2) Obtenção das curvas características para diversas rotações a partir da curva original

É comum que fabricantes de bombas centrífugas forneçam a curva para a velocidade nominal da mesma. Porém, quando é desejável curvas, com boa confiabilidade, para outras rotações, o seguinte procedimento oferece uma solução: a partir do

conhecimento dos vários pontos (Q1, H1) e (Q1, P1) na curva original e, através da lei de similaridade, obtém-se os valores (Q2, H2) e (Q2, P2) na velocidade desejada. O gráfico plotado dos pontos (Q2, H2) e (Q2, P2), também chamados pontos homólogos, gerará a curva característica para essa velocidade. O resultado deste procedimento está ilustrado na figura 2.19.

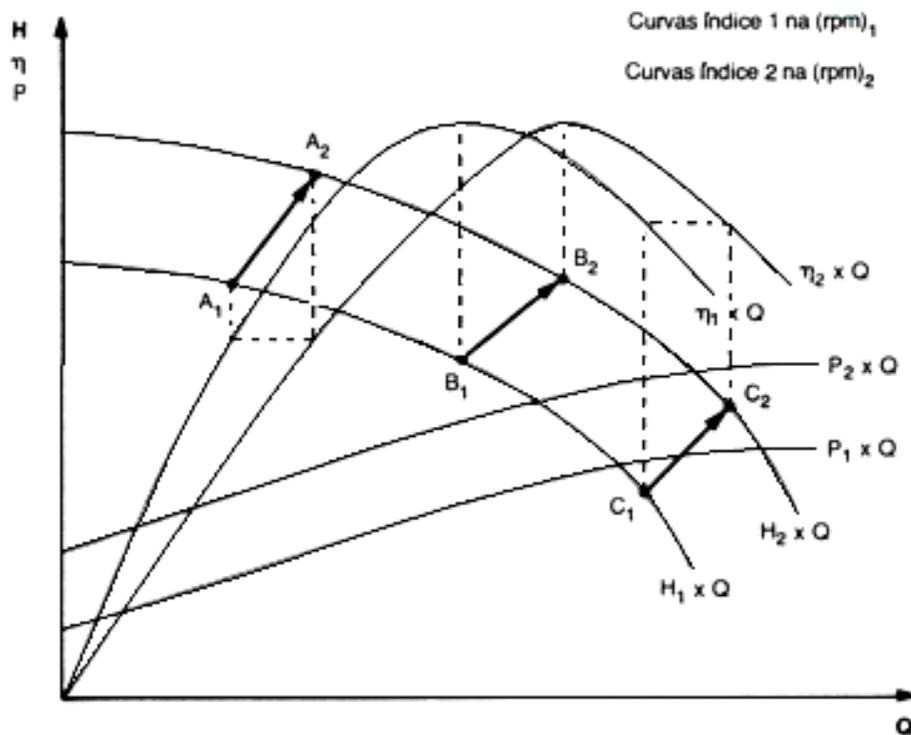


Figura 2.19 – Efeito da rotação nas curvas características

Deve-se salientar aqui, que a curva de rendimento (η) versus vazão (Q) é obtida considerando o fato de que o rendimento nos pontos homólogos é similar. Este fato pode ser observado na expressão de potência fornecida pela equação (2.36):

$$\eta = \frac{\gamma QH}{P_e} \quad (2.36)$$

Ao se proceder a uma análise pormenorizada na equação (2.36) e considerar as proporcionalidades: $Q \propto n$, $H \propto n^2$ e $P \propto n^3$, conclui-se que pontos homólogos devem ter rendimentos muito próximos do rendimento nos pontos originais [27].

2.10.3) Considerações sobre a utilização de inversores de frequência

Ao se variar a frequência de alimentação de um motor CA, varia-se a velocidade do rotor desde $f = 0$ até a máxima variação permitida pelo conversor. O comportamento do motor permanece da mesma forma, entretanto deslocado na rotação conforme a frequência como indicado na figura 2.20.

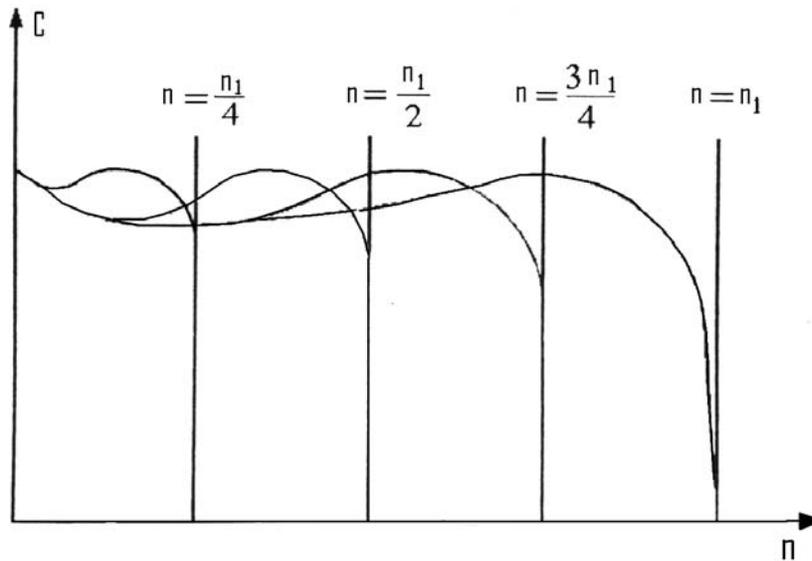


Figura 2.20 – Curva de conjugado x rotação da bomba para diversas velocidades

Segundo a literatura especializada existem duas faixas de operação, uma com fluxo constante, até a frequência nominal, e outra com enfraquecimento de campo que corresponde àquela acima da frequência nominal.

Entretanto, algumas considerações devem ser tecidas a respeito das faixas de operação:

- Se o motor é alto-ventilado, terá sua capacidade de refrigeração reduzida a baixas velocidades;
- A tensão de saída dos conversores apresenta componentes harmônicos, estes podem provocar aumento de perdas no motor;
- Maior aquecimento pela presença de correntes harmônicas e a redução de ventilação podem reduzir o rendimento.

Devido à existência de zonas onde o fluxo magnético sofre variações, fabricantes de motores recomendam a redução do conjugado e da potência aplicada ao motor quando, pela ação do conversor de frequência, atingem-se essas zonas de baixo fluxo magnético. A figura 2.21 apresenta a indicação de um conhecido fabricante de motores recomendando valores de conjugado máximo em função da variação da frequência [9].

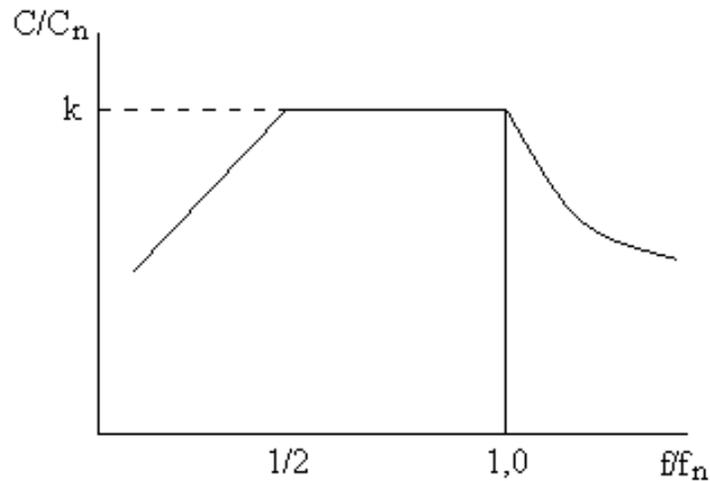


Figura 2.21 – Recomendação de torque em função da frequência para motores acionados a inversores de frequência.

Onde k é uma constante a ser multiplicada ao conjugado máximo permitido pelo motor de indução. Para este fabricante, k deve variar de 0,7 a 1 dependendo do conteúdo harmônico injetado na rede pelo próprio inversor de frequência somado ao conteúdo presente. Na impossibilidade de se obter tais harmônicos é recomendado que se utilize k entre 0,8 e 0,9.

2.11) Comparação entre os métodos válvula de estrangulamento e controle de velocidade

Na figura 2.22 estão representados os efeitos da utilização do inversor de frequência e das válvulas de estrangulamento. Pelo método de estrangulamento de válvula o ponto de operação com menor vazão implica em um aumento de pressão, portanto, a potência sofre poucas variações. Por outro lado, com a alteração da velocidade, para a mesma vazão obtida pelo sistema anterior, há uma redução na vazão e na pressão. A

economia (quadro cinzento) é evidente e obedece a equação de similaridade já mostrada pela equação (2.14) e ilustrada na figura 2.22.

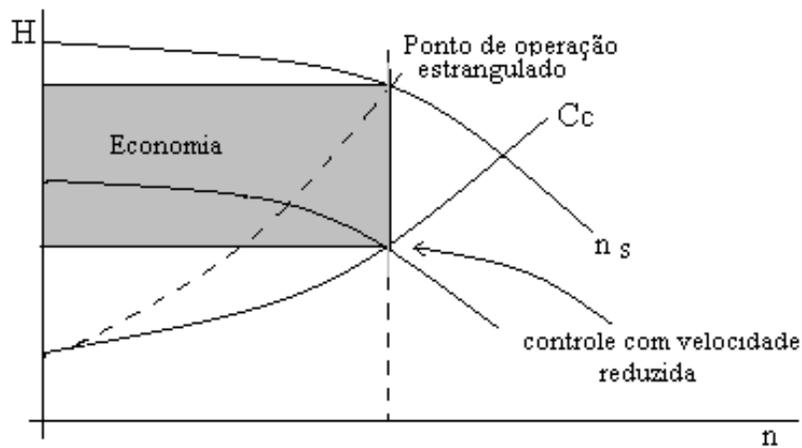


Figura 2.22 – Comparativo entre controle de vazão por estrangulamento de válvula e inversor frequência

Na figura 2.23, as curvas representam a evolução da potência elétrica pela variação da vazão por meio de válvulas de estrangulamento em 1 e, por controle eletrônico em 2. A curva 1 pode ser aproximada por uma reta, pois representa a equação 2.31 que tem características próximas às lineares [33]. A curva 2 obedece às leis de similaridade (equações 2.13 e 2.15), como descrito a seguir:

$$\text{Se } (Q_1/Q_2) = (n_1/n_2) \text{ e, } (P_1/P_2) = (n_1/n_2)^3$$

Então:

$$(P_1/P_2) = (Q_1/Q_2)^3$$

Assim, para a obtenção de uma vazão de 80% do valor nominal deve-se reduzir a velocidade para 80%. Desta forma, a potência necessária ao acionamento da carga será de, aproximadamente, 50%. Entretanto, o rendimento também é alterado (equações 2.17 e 2.18), e assim a economia de energia elétrica é de cerca de 45%.

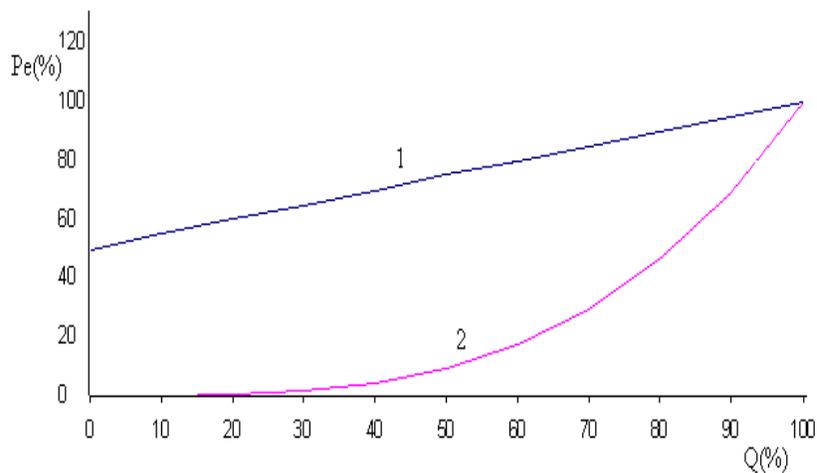


Figura 2.23 – A potência elétrica comparativa entre os dois métodos: válvula e inversor

2.12) Possibilidades de economizar energia elétrica em sistemas de bombeamento

Vistos de forma separada os parâmetros associados a um sistema de bombeamento não proporcionam uma visualização correta da amplitude das perdas de energia ao longo do sistema [36]. Ao se proceder a uma análise pormenorizada da figura 2.24, percebe-se que as possibilidades para ações que visem o uso eficiente de energia são grandes. Em média 50% da potência é utilizada de modo a produzir trabalho útil, os outros 50% se perdem pelo caminho em forma de vazamentos, aquecimentos ou quaisquer outros tipos de perda que por ventura venham a ser associadas a esse procedimento.

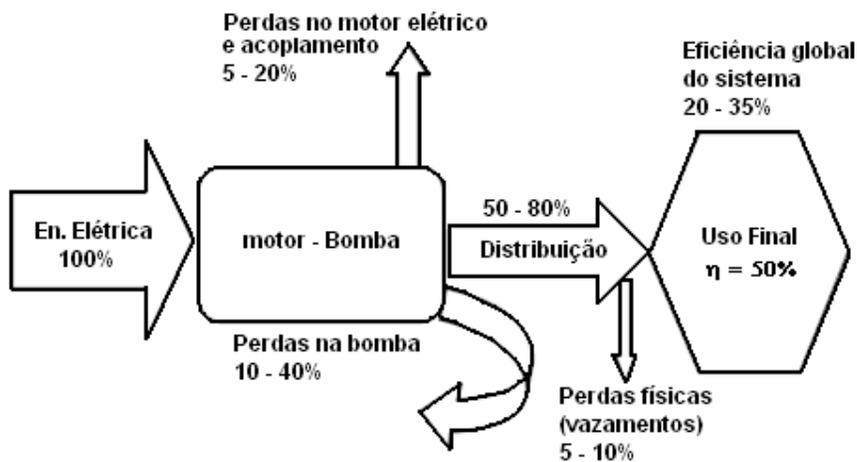


Figura 2.24 – Balanço médio de energia em um sistema hidráulico

As principais oportunidades de redução de consumo de energia elétrica vêm através da análise da expressão (2.31), transcrita a seguir, onde está representado o cálculo da potência elétrica necessária para o funcionamento de uma bomba centrífuga. Verificam-se seis fatores presentes no cálculo da potência elétrica: o peso específico (γ), os rendimentos (η_b , η_m e η_{ac}), vazão (Q) e altura manométrica (H). Destes fatores - os rendimentos (da bomba, do motor e do acoplamento) influenciam de forma inversamente proporcional e os outros três (peso específico, vazão bombeada e altura manométrica total) afetam de modo direto no resultado da potência necessária para realizar tal trabalho. A otimização de qualquer um destes itens reflete no consumo final da instalação. Assim, η_b , η_m e η_{ac} não podem ser alterados a não ser quando da confecção do projeto da instalação, entretanto, esses rendimentos têm um ponto de trabalho onde se tem máxima eficiência. Buscar o máximo rendimento, neste caso, é garantir valores próximos aos nominais de operação, limpeza e lubrificação adequadas, o melhor método de acoplamento, etc. Os parâmetros vazão (Q) e altura manométrica (H) podem ser trabalhados ao se evitar, sempre que possível, técnicas como estrangulamento de válvulas, por exemplo, que aumentam as perdas no processo.

$$P_e = \frac{\gamma Q H}{\eta_m \eta_b \eta_{ac}}$$

Outra possibilidade, sempre que possível, é variar a velocidade dos motores de modo a buscar o ponto de funcionamento no qual a bomba tem seu maior rendimento, conforme a demanda varie no decorrer do período.

2.13) Viabilidade econômica

Várias formas de análise financeira, especialmente as de ordem econômica, podem ser feitas ao se buscar o melhor investimento. Estas podem e devem envolver diferentes pontos de vista e com diferentes objetivos. Cada tipo de análise financeira determina um parâmetro econômico e este é que será usado na tomada da melhor decisão. As análises financeiras determinam os seguintes fatores: tempo de retorno do investimento (simples e capitalizado), economia mensal obtida com a aquisição de um bem ou serviço, custo operacional desse investimento ao longo de sua vida útil, entre outros.

Descrevem-se a seguir as principais variáveis da análise econômica tendo em vista a forma de determinação dessa análise. Esta sempre se vale da comparação entre dois tipos de investimento.

2.13.1) Tempo de retorno simples

É o tempo necessário para que o capital investido apresente retorno na forma de redução de custo operacional ou de ganhos financeiros. Geralmente o tempo de retorno simples é expresso em meses. O tempo de retorno aceitável deve ser estabelecido pelo consumidor e que se expressa de forma particular de cada empresa. Como exemplo, a compra de equipamentos mais eficientes é mais dispendiosa, por outro lado, o custo operacional é menor. O cálculo da determinação do tempo de retorno do investimento, fornecidos pelas equações (2.37) e (2.38), permite que se estabeleça uma forma de avaliar se o retorno do investimento se dará a curto, médio ou longo prazo, ou até mesmo se não haverá retorno ao longo da vida útil do equipamento.

$$T_{rs} = \frac{\Delta C_a}{\Delta E} \quad (2.37)$$

$$\Delta C_a = C_{a2} - C_{a1} \quad (2.38)$$

Onde:

T_{rs} - tempo de retorno simples em meses;

ΔC_a - custo adicional de investimento;

ΔE - economia mensal em R\$/mês;

C_{a1} - custo do investimento 1;

C_{a2} - custo do investimento 2.

Não existe um valor definido para o tempo de retorno econômico que atenda a todos os casos, uma vez que isto faz parte da escolha do investidor, que é de foro subjetivo, e da comparação com as outras formas de investimento do capital. O mais usual é considerar o tempo médio de vida útil de um equipamento. Como exemplo, a aquisição de um motor da linha padrão ou de alto-rendimento, com vida útil média de 13 anos, a literatura recomendada aponta um tempo médio aceitável para retorno de investimento quando inferior a 2 anos [34, 35].

2.13.2) Tempo de retorno capitalizado

O tempo de retorno também pode ser, por exemplo, mensal e considerar uma taxa de juros de modo que a economia seja parcelada. Considerando uma taxa de juros i em valores percentuais e considerando k períodos (meses) obtêm-se o seguinte valor presente das parcelas mensais [34]:

$$\Delta E_T = \frac{\left(\left(1 + \frac{i}{100} \right)^k - 1 \right)}{\frac{i}{100} \left(1 + \frac{i}{100} \right)^k} \Delta E \quad (2.39)$$

ΔE_T - valor presente das parcelas mensais;

k - meses considerados na capitalização.

A fim de se determinar o tempo de retorno capitalizado deve-se igualar o valor presente com o custo adicional e considerar o número de períodos como incógnita, conforme mostra a equação (2.40).

$$\Delta C_a = \frac{\left(\left(1 + \frac{i}{100} \right)^{T_{rc}} - 1 \right)}{\frac{i}{100} \left(1 + \frac{i}{100} \right)^{T_{rc}}} \Delta E \quad (2.40)$$

Aplicando logaritmos nos dois lados da equação, tem-se o tempo de retorno de investimento:

$$T_{rc} = \frac{\log\left(\frac{\Delta E}{\Delta E - \Delta C_a \frac{i}{100}} \right)}{\log\left(1 + \frac{i}{100} \right)} \quad (2.41)$$

2.13.3) Valor presente líquido (VPL)

Neste método, o critério de decisão quanto à aceitação ou não da alternativa é a verificação se o VPL é positivo. Por definição, valor presente é a soma algébrica entre o valor das entradas de caixa no tempo inicial e os investimentos ao longo da vida útil do

projeto. Caso esse projeto seja implementado ele deverá ser capaz de aumentar o patrimônio líquido da empresa.

Matematicamente:

$$VPL = \sum_{j=0}^n R_j(1+i)^{-j} - \sum_{j=0}^n C_j(1+j)^{-j} \quad (2.42)$$

Onde:

R_j = valor atual das receitas;

C_j = valor atual dos custos;

i = taxa de juros;

j = período em que as receitas ou os custos ocorrem;

n = número de períodos ou duração do projeto.

Também é intuitivo o entendimento de que, no caso de alternativas excludentes mutuamente, aquela que apresenta o maior VPL deve ser priorizada, considerando apenas a análise econômica. O “valor da empresa” ficará acrescido do VPL após o período considerado nessa análise econômica.

2.13.4) Exemplo de aplicação

Numericamente, serão apresentados apenas os itens (2.10.1) e (2.10.2) por serem os de uso mais comuns entre engenheiros.

Para uma determinada aplicação foi especificado um motor com as seguintes características: 30 cv; 220 V; 3500 rpm; 60 Hz. O motor deverá funcionar com a potência nominal durante 24 horas por dia. Deseja-se fazer uma análise econômica para verificar a viabilidade da aquisição de um motor de alto rendimento. O preço do kWh pago pelo consumidor é de R\$ 0,224 / kWh (tarifa média industrial, junho/2007, *site*: ANEEL). A taxa de juros a ser considerada é de 1,5% ao mês.

Os valores de preços de motores aqui utilizados são de 2006, pois se utilizou o banco de dados do software BDmotor 4.2 (3/2007).

Motor linha padrão: $\eta_{(100\%)} = 91\%$; preço (C_{a1}) = R\$ 2610,72.

Motor de alto rendimento: $\eta_{(100\%)} = 92\%$; preço (C_{a2}) = R\$ 3782,83.

Solução:

i) Economia anual com o motor de alto rendimento:

Considerando:

P_{e1} = potência elétrica do motor da linha padrão;

P_{e2} = potência elétrica do motor da linha de alto rendimento.

$$P_{e1} = 0,736 \times 30 / 0,91 = 24,264 \text{ kW}$$

$$P_{e2} = 0,736 \times 30 / 0,92 = 24 \text{ kW}$$

$$\Delta P_e = 0,264 \text{ kW}$$

Considerando R\$ 0,224 como valor do kWh cobrado:

$$\Delta E = 0,264 \times 0,224 \times 720 = \text{R\$ } 42,58 / \text{ mês}$$

ii) Tempo de retorno simples:

$$\Delta C_a = 3782,83 - 2610,72 = \text{R\$ } 1172,11$$

$$T_{rs} = 1172,11 / 42,58 = 27,53 \text{ meses}$$

Conforme citado, trata-se de tempo de retorno simples, desta forma não foi considerada a capitalização do montante investido, o adicional de R\$ 1172,11 necessário na compra do motor de alto rendimento retornará em 28 meses.

iii) Tempo de Retorno Capitalizado

A taxa de juros a ser considerada é de 1,5% ao mês.

$$T_{rc} = \frac{\log\left(\frac{42,58}{42,58 - 1172,11 \frac{1,5}{100}}\right)}{\log\left(1 + \frac{1,5}{100}\right)}$$

$$T_{rc} = 35,77 \text{ meses}$$

Neste cálculo foi utilizada uma taxa de juros de 1,5% ao mês na capitalização dos recursos investidos. O tempo de 35,77 meses, ou 3 anos, é longo, mas se for levado em conta uma vida útil média de 13 anos para este tipo de motor, eventuais reajustes de preços de tarifas de energia, entre outros fatores pode ser compensativo o investimento na aquisição do motor de alto rendimento.

iv) Retorno de investimento calculado pelo BDMotor 4.2

Adicionalmente, os mesmos valores foram inseridos no BDMotor e a figura 2.25, aponta como 28 meses o tempo de retorno de investimento. O tempo calculado pelo *software* é coerente com aquele encontrado no item (ii) para tempo de retorno simples. Por não levar em consideração os juros que incidiriam sobre o montante investido, deve ser usado apenas como uma aproximação do tempo de retorno do investimento. É possível, ainda, em última análise somar a esse capital um percentual de atratividade que justifique sua aplicação.

The screenshot shows the 'Comparação Entre Motores (Novo X Novo)' window. It compares two motor models: Motor 2246 - WEG and Motor 2472 - WEG. Both have a power of 30 cv and 8640 total hours per year. Motor 2246 has a 91% efficiency and a price of R\$ 2610,72. Motor 2472 has a 92% efficiency and a price of R\$ 3782,83. The interface also shows a mean energy tariff of 0,224 R\$/kWh and a centrifugal load of 'Sim'. The results section shows that for Motor 2472, the active energy consumption is 207360,00 kWh (R\$ 46448,64) and the investment payback period is 28 months. The difference in investment is R\$ 1172,11, and the annual economy is 2278,68 kWh (R\$ 510,42).

Motor	Potência (cv)	Carga (%)	Rendimento (%)	Preço (R\$)	Desconto (%)	Total Horas (Ano)
Motor 2246 - WEG	30	100	91	2610,72	0	8640
Motor 2472 - WEG	30	100	92	3782,83	0	8640

Consumo Ativo no Ano (kWh - R\$)	
209638,68 kWh	46959,06 R\$
207360,00 kWh	46448,64 R\$

Retorno da diferença do investimento (Payback) - Motor 2472	
28 meses	

Diferença Invest. :		Economia por Ano :	
1172,11 R\$	2278,68 kWh	510,42 R\$	

Figura 2.25 – Tela de retorno de investimento do *software* BDMotor

2.14) Considerações finais

Ao longo do capítulo foram apontados aspectos importantes sobre motores, acoplamentos, bombas, os mais variados tipos de acionamentos, entre outros. A intenção foi de ressaltar pontos-chaves em cada um destes componentes. Assim, qualquer medida de efficientização energética em uma parte isolada do sistema, que pode ou não causar impacto sobre as demais partes, deve ser avaliada de modo a saber se a medida é ou não produtiva. Esses impactos devem ser quantificados e considerados sob a luz das avaliações técnicas e econômicas.

Resumidamente, existem duas formas de se otimizar o uso da energia elétrica no funcionamento de sistemas de bombeamento.

A primeira forma é direta e consiste na utilização de instalações tecnicamente adequadas, ou seja: utilizar tubulações bem dimensionadas; manter a tubulação em bom estado de conservação; concepções adequadas de projeto e de operação que evitem o desperdício com altas pressões na rede; quando possível variar a velocidade dos motores elétricos com a utilização de inversores de frequência, de modo a adequar o ponto de funcionamento da bomba ao seu máximo rendimento; escolher o conjunto moto-bomba com melhor rendimento para o ponto de trabalho desejado; entre outros.

A segunda não economiza em energia elétrica, mas reduz custos com a mesma, consiste em evitar ou se reduzir o consumo energético nas horas de ponta uma vez que as concessionárias incentivam esse procedimento por intermédio de sua estrutura tarifária diferenciada. Isso se consegue mediante um arranjo adequado de reservatórios, de modo a permitir a paralisação ou a redução da vazão bombeada em determinadas horas.