

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



METODOLOGIA DE AVALIAÇÃO DAS CONDIÇÕES DE
FUNCIONAMENTO DOS MOTORES DE INDUÇÃO TRIFÁSICOS SOB O
ENFOQUE DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

CICIANE CHIOVATTO

Uberlândia
2011

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

METODOLOGIA DE AVALIAÇÃO DAS CONDIÇÕES DE
FUNCIONAMENTO DOS MOTORES DE INDUÇÃO TRIFÁSICOS SOB O
ENFOQUE DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

Ciciane Chiovatto

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Banca Examinadora:

Professor Décio Bispo, Dr. (UFU) - Orientador

Professor Sérgio Ferreira de Paula e Silva, Dr. (UFU)

Professor Augusto W. Fleury Veloso da Silveira, Dr. (UFU)

Professor Luciano Coutinho Gomes, Dr. (UFU)

Professor Paulo César Abreu Leão, Dr. (UFSJ)

Uberlândia
2011

METODOLOGIA DE AVALIAÇÃO DAS CONDIÇÕES DE FUNCIONAMENTO DOS MOTORES DE INDUÇÃO TRIFÁSICOS SOB O ENFOQUE DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

Ciciane Chiovatto

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Professor Dr. Décio Bispo
Orientador

Professor Dr. Alexandre Cardoso
Coordenador do Curso de Pós-
Graduação

**Uberlândia
2011**

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus amigos e familiares, em especial à minha mãe Maria de Fátima, meu pai Divino e meu irmão Adriano, pelo apoio, motivação e amor incondicional, e ao meu namorado Giordhanne pelo incentivo, companheirismo e compreensão durante o tempo dedicado ao estudo que gerou esta dissertação.

AGRADECIMENTOS

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

Aos amigos de pós-graduação, em especial **Afonso Bernardino, Alin Martins, Marcos Vinícius Silva e Victor de Paula e Silva**, que sempre estiveram presentes nos momentos de aprendizado, e que foram essenciais à conclusão deste trabalho.

À **Cinara e Marcília** pela presteza nos encaminhamentos junto à secretaria da Pós-Graduação e Graduação.

À FAPEMIG pelo apoio financeiro.

“O topo é o degrau mais baixo da próxima escada.”

Autor Desconhecido

RESUMO

Esta dissertação apresenta uma metodologia desenvolvida para obtenção das curvas características de motores de indução trifásicos, a fim de tornar possível diagnosticar as condições de funcionamento dos motores já instalados na indústria. Para execução do método apresentado necessita-se de dados fornecidos nos catálogos de fabricantes de motores, além de medições em campo. As curvas de desempenho a serem obtidas são de corrente, fator de potência e rendimento. O foco deste trabalho é a análise do carregamento dos motores em funcionamento, de modo a verificar se há superdimensionamento. Tendo conhecimento do carregamento, é possível obter o respectivo rendimento e fator de potência, para analisar a viabilidade da troca do motor em estudo por outro melhor dimensionado, buscando assim alcançar uma maior eficiência energética no sistema.

Palavras Chaves: eficiência energética, motor de indução, superdimensionamento, condições de partida de motores.

ABSTRACT

This thesis presents a methodology developed to obtain the characteristic curves of three-phase induction motors, in order to make it possible to diagnose the operating conditions of motors already installed in the industry. To execute the presented method it is needed data provided in the catalogs of motor manufacturers, as well as field measurements. The performance curves to be obtained are those of current, power factor and efficiency. The focus of this study is to analyze the motor's loading condition and attest if it is either oversized or not. The efficiency and power factor can be obtained through the loading, and the feasibility of swapping of the motor by another of an appropriate size is evaluated. The aim of this procedure is to increase the energy efficiency of the overall system.

Keywords: energy efficiency, induction motor, oversizing, motor starting conditions.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	20
1.1	Contextualização do Tema	20
1.2	A Política Nacional de Conservação de Energia	21
1.3	O Programa Brasileiro de Etiquetagem.....	25
1.4	Mercado de Motores Elétricos no Brasil.....	26
1.5	O Uso da Energia	27
1.6	Consumo de energia por uso final.....	32
1.7	Potencial de Conservação de Energia	36
1.8	Contribuições do trabalho	38
1.9	Estado da Arte	39
1.10	Estrutura da Dissertação	40
2	O MOTOR ELÉTRICO DE INDUÇÃO	43
2.1	Considerações Iniciais.....	43
2.2	Motores Trifásicos de Corrente Alternada	43
2.3	Motor Síncrono	43
2.4	Motor Assíncrono	44
2.4.1	Características do MITRGE	45
2.4.2	Escorregamento	46
2.4.3	Perdas no Motor de Indução	47
2.4.4	Rendimento.....	50
2.5	Motor de Linha Padrão X Motor de Alto Rendimento	51

2.6 Características de Funcionamento do MIT	53
2.6.1 Funcionamento conforme carga solicitada	53
2.6.2 Adequação à carga	55
2.6.3 Ambiente de trabalho do motor	56
2.6.3.1 Temperatura	56
2.6.3.2 Altitude da instalação	57
2.6.3.3 Grau de proteção do invólucro (IP).....	57
2.6.4 Características elétricas do motor	59
2.6.4.1 Fator de serviço (FS)	59
2.6.4.2 Frequência nominal do motor	59
2.6.4.3 Número de polos do motor	59
2.6.4.4 Número de pontas do motor.....	59
2.6.5 Características construtivas do motor	60
2.6.6 Características da rede elétrica	60
2.7 Considerações Finais do Capítulo II	60
 3 METODOLOGIA DE AVALIAÇÃO DAS CONDIÇÕES DE FUNCIONAMENTO DO MIT	 62
3.1 Considerações Iniciais.....	62
3.2 Custos associados aos motores elétricos.....	63
3.3 Superdimensionamento	64
3.4 Efeitos do Dimensionamento Inadequado.....	65
3.5 Aquisição de dados.....	66
3.5.1 Levantamento por amostragem.....	66
3.5.2 Levantamento por dados de placa.....	67
3.5.3 Levantamento detalhado.....	67
3.6 Dados relevantes a serem levantados	67
3.6.1 Horas de funcionamento.....	67
3.6.2 Dados do Fabricante.....	68
3.6.3 Medições elétricas e mecânicas	69

3.6.4	Diagnóstico e conclusões	69
3.7	Métodos PROCEL	70
3.7.1	Programa Computacional BDMotor	70
3.7.2	Comparação Direta com Dados dos Fabricantes	72
3.7.2.1	Exemplo de aplicação	73
3.8	Metodologia Desenvolvida	78
3.8.1	Dados de Placa do motor.....	79
3.8.2	Dados estimados	80
3.8.2.1	Corrente a vazio	80
3.8.2.2	Fator de Potência a vazio	82
3.8.2.3	Rendimento para carregamento nulo.....	86
3.8.3	Métodos de avaliação	86
3.8.3.1	Avaliação por meio de medição de corrente e tensão	86
3.8.3.2	Avaliação por meio de medição de potência elétrica	87
3.8.4	Método computacional	87
3.8.4.1	Interpolação Linear.....	88
3.8.4.2	<i>Spline</i> Cúbica	88
3.8.5	Procedimento de cálculo	89
3.8.5.1	Método da corrente e tensão (MCT)	89
3.8.5.2	Método da potência (MP)	91
3.8.5.3	Levantamento das curvas características	93
3.9	Resultados	93
3.9.1	Resultados MCT	94
3.9.2	Resultados MP	99
3.9.3	Análise do Erro	104
3.9.4	Exemplo de aplicação.....	105
3.10	Considerações Finais do Capítulo III.....	110
4	ESPECIFICAÇÃO DO MIT PARA CONDIÇÕES DE PARTIDA	112
4.1	Considerações Iniciais.....	112

4.2 Potência Nominal	112
4.3 Conjugado Resistente da Carga	114
4.3.1 Conjugado Constante	115
4.3.2 Conjugado Linear.....	116
4.3.3 Conjugado Quadrático.....	117
4.3.4 Conjugado Hiperbólico	118
4.3.5 Conjugados Não Definidos.....	119
4.4 Conjugado Resistente Médio da Carga.....	120
4.5 Conjugado x Velocidade do motor	123
4.5.1 Conjugado Básico	123
4.5.2 Conjugado Nominal ou de Plena Carga	124
4.5.3 Conjugado com Rotor Bloqueado.....	124
4.5.4 Conjugado Mínimo	125
4.5.5 Conjugado Máximo.....	125
4.5.6 Fatores de Correção dos Conjugados em Função da Tensão	126
4.6 Conjugado Médio do Motor	127
4.7 Momento de inércia da carga	129
4.7.1 Formas de se Obter o Momento de Inércia da Carga.....	130
4.7.1.1 Momento de Inércia Fornecido em Catálogos.....	130
4.7.1.2 Momento de Impulsão	131
4.7.1.3 Estimativa de Momento de Inércia da Carga	131
4.8 Tempo de Rotor Bloqueado (trb)	132
4.8.1 Tempo de rotor bloqueado em relação à classe Isolante	133
4.8.2 Tempo de Aceleração.....	134
4.8.3 Potência Dinâmica ou de Aceleração.....	136
4.8.4 Estudo de Caso.....	136
4.8.4.1 Dados da Bomba	137
4.8.4.2 Resolução.....	137
4.8.4.3 Especificação do motor	139
4.9 Considerações Finais do Capítulo IV	139

5	ANÁLISE ECONÔMICA	142
5.1	Considerações Iniciais.....	142
5.2	Fatores a Considerar na Análise Econômica	143
5.2.1	Vida Útil do Motor.....	144
5.3	Análise Econômica.....	145
5.3.1	Economia Mensal de Energia	145
5.3.2	Fluxo de Caixa	148
5.3.3	Tempo de Retorno Simples	149
5.3.4	Tempo de Retorno Capitalizado	150
5.3.5	Tempo de Retorno Capitalizado Considerando Aumento do Custo da Energia	152
5.3.6	Energia Economizada ao longo da Vida Útil	152
5.3.7	Valor presente líquido (VPL)	153
5.3.7.1	Valor Retornado ao Longo da Vida Útil	154
5.3.8	Valor Líquido Retornado Capitalizado com Aumento do Custo do kWh	155
5.4	Considerações Finais do Capítulo V	155
6	APLICAÇÃO COMPUTACIONAL.....	157
6.1	Considerações Iniciais.....	157
6.2	Apresentação da Interface.....	157
6.3	Considerações Finais do Capítulo VI.....	161
7	CONCLUSÕES.....	164
	REFERÊNCIAS	167
	ANEXOS.....	170

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Consumo de eletricidade por setor industrial de 1999 a 2009.	28
Figura 1.2 – Participação dos setores no consumo de energia elétrica.	29
Figura 1.3 – Participação das fontes de energia no setor industrial.	31
Figura 1.4 – Composição dos setores no consumo final de energia elétrica.	31
Figura 1.5 – Consumo de energia final na indústria por uso final.	32
Figura 1.6 – Consumo final dos principais energéticos por formas de uso ano 2004.	33
Figura 1.7 – Formas de uso da Eletricidade.	34
Figura 1.8 – Tipos de cargas acionadas por motores na indústria [35].	34
Figura 1.9 – Potencial de economia de energia por setores e usos finais.	37
Figura 2.1 – Aspecto construtivo de motores de indução trifásicos [17].	47
Figura 2.2 – Perdas no motor de indução.	48
Figura 2.3 – Evolução dos motores elétricos [21].	52
Figura 2.4 – Curvas de desempenho de um motor de indução de 50 hp.	54
Figura 2.5 – Classe de isolamento e temperatura de operação.	57
Figura 3.1 – Relação entre o custo operacional e o custo de aquisição.	63
Figura 3.2 – Curvas Características de um motor de indução.	65
Figura 3.3 – Telas capturadas do BDMotor simulando o rendimento para variados percentuais de carregamento.	71
Figura 3.4 – Comparação entre as curvas de rendimento do fabricante (vermelho) e do BDMotor (azul).	72
Figura 3.5 – Curvas características do motor 100 cv.	75
Figura 3.6 – Curvas características do motor 40 cv.	77
Figura 3.7 – Circuito equivalente do motor de indução trifásico para operação nominal [30].	83
Figura 3.8 – Circuito equivalente válido para o escorregamento s_k correspondente ao conjugado máximo M_k [29].	84
Figura 3.9 – Comparação entre interpolação linear (vermelho) e por <i>spline</i> cúbica (azul).	89
Figura 3.10 – Curvas de corrente versus carregamento pelo método MCT (em azul) e de referência do fabricante (em vermelho) para o motor de 20 hp.	94

Figura 3.11 – Curvas de rendimento e fator de potência versus carregamento pelo método MCT (em azul e preto) e de referência do fabricante (em vermelho e verde) para o motor de 20 hp.	94
Figura 3.12 – Curvas de corrente versus carregamento pelo método MCT (em azul) e de referência do fabricante (em vermelho) para o motor de 50 hp.	95
Figura 3.13 – Curvas de rendimento e fator de potência versus carregamento pelo método MCT (em azul e preto) e de referência do fabricante (em vermelho e verde) para o motor de 50 hp.	95
Figura 3.14 – Curvas de corrente versus carregamento pelo método MCT (em azul) e de referência do fabricante (em vermelho) para o motor de 100 hp.	96
Figura 3.15 – Curvas de rendimento e fator de potência versus carregamento pelo método MCT (em azul e preto) e de referência do fabricante (em vermelho e verde) para o motor de 100 hp.	96
Figura 3.16 – Curvas de corrente versus carregamento pelo método MCT (em azul) e de referência do fabricante (em vermelho) para o motor de 250 hp.	97
Figura 3.17 – Curvas de rendimento e fator de potência versus carregamento pelo método MCT (em azul e preto) e de referência do fabricante (em vermelho e verde) para o motor de 250 hp.	97
Figura 3.18 – Curvas de corrente versus carregamento pelo método MCT (em azul) e de referência do fabricante (em vermelho) para o motor de 500 hp.	98
Figura 3.19 – Curvas de rendimento e fator de potência versus carregamento pelo método MCT (em azul e preto) e de referência do fabricante (em vermelho e verde) para o motor de 500 hp.	98
Figura 3.20 – Curvas de corrente versus carregamento pelo método MP (em azul) e de referência do fabricante (em vermelho) para o motor de 20 hp.	99
Figura 3.21 – Curvas de rendimento e fator de potência versus carregamento pelo método MP (em azul e preto) e de referência do fabricante (em vermelho e verde) para o motor de 20 hp.	99
Figura 3.22 – Curva de corrente versus carregamento pelo método MP (em azul) e de referência do fabricante (em vermelho) para o motor de 50 hp.	100
Figura 3.23 – Curvas de rendimento e fator de potência versus carregamento pelo método MP (em azul e preto) e de referência do fabricante (em vermelho e verde) para o motor de 50 hp.	100
Figura 3.24 – Curvas de corrente versus carregamento pelo método MP (em azul) e de referência do fabricante (em vermelho) para o motor de 100 hp.	101
Figura 3.25 – Curvas de rendimento e fator de potência versus carregamento pelo método MP (em azul e preto) e de referência do fabricante (em vermelho e verde) para o motor de 100 hp.	101
Figura 3.26 – Curvas de corrente versus carregamento pelo método MP (em azul) e de referência do fabricante (em vermelho) para o motor de 250 hp.	102
Figura 3.27 – Curvas de rendimento e fator de potência versus carregamento pelo método MP (em azul e preto) e de referência do fabricante (em vermelho e verde) para o motor de 250 hp.	102

Figura 3.28 – Curvas de corrente versus carregamento pelo método MP (em azul) e de referência do fabricante (em vermelho) para o motor de 500 hp.	103
Figura 3.29 – Curvas de rendimento e fator de potência versus carregamento pelo método MP (em azul e preto) e de referência do fabricante (em vermelho e verde) para o motor de 500 hp.	103
Figura 3.30 – Erro percentual encontrado para cada carregamento e conforme a potência do motor utilizando o método MCT.....	104
Figura 3.31 – Erro percentual encontrado para cada carregamento e conforme a potência do motor utilizando o método MP.....	104
Figura 3.32 – Curvas de corrente versus carregamento pelo método MCT (em azul) e de referência do fabricante (em vermelho).	106
Figura 3.33 – Curvas de rendimento e fator de potência versus carregamento pelo método MCT (em azul e preto) e de referência do fabricante (em vermelho e verde).	107
Figura 3.34 – Curvas de corrente versus carregamento pelo método MP (em azul) e de referência do fabricante (em vermelho).	108
Figura 3.35 – Curvas de rendimento e fator de potência versus carregamento pelo método MP (em azul e preto) e de referência do fabricante (em vermelho e verde).	108
Figura 4.1 – Conjugado constante e potência versus velocidade.	115
Figura 4.2 – Conjugado linear e potência versus velocidade.....	116
Figura 4.3 – Conjugado parabólico e potência versus velocidade.	117
Figura 4.4 – Conjugado hiperbólico e potência versus velocidade.	119
Figura 4.5 – Conjugado não definido versus velocidade.....	120
Figura 4.6 – Curva de conjugados de cargas.	120
Figura 4.7 – Conjugado resistente médio para $x = -1$	122
Figura 4.8 – Curva Conjugado x Velocidade [37].	123
Figura 4.9 – Fatores de redução k_1 e k_2 [37].	126
Figura 4.10 – Conjugado médio do motor.....	128
Figura 4.11 – Momento de inércia em rotações diferentes.....	130
Figura 4.12 – Conjugado acelerador médio.	135
Figura 5.1 – Ciclo de carga e rendimento dos motores para cada trecho.	147
Figura 5.2 – Ciclo de carga e diferença de perdas de cada trecho.	147
Figura 5.3 – Fluxo de caixa do valor de economia mensal.....	150
Figura 6.1 – Tela inicial de análise da eficiência energética em motores de indução trifásicos.....	157
Figura 6.2 – Tela de verificação das condições de funcionamento do motor de indução.	158
Figura 6.3 – Tela de verificação das condições de partida do motor conforme a carga.....	159

Figura 6.4 – Tela da estimativa do momento de inércia.....	160
Figura 6.5 – Tela da análise econômica.....	161

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1 – Rendimentos nominais mínimos	24
Tabela 1.2 – Consumo de energia elétrica final por setores e uso final.	35
Tabela 1.3 – Participação dos motores no consumo de eletricidade do Brasil.	36
Tabela 2.1 – Significados dos Algarismos do grau de proteção [33].	58
Tabela 3.1 – Dados de catálogo para o motor em análise.....	74
Tabela 3.2 – Dados de catálogo para o novo motor em análise.	77
Tabela 3.3 – Dados disponíveis em catálogos de fabricantes de motores.	80
Tabela 3.4 – Porcentagem de referência para obtenção da corrente a vazio.	81
Tabela 3.5 – Dados de catálogo para um motor de 100 hp.....	106
Tabela 3.6 – Medições de campo para um motor de 100 hp.	106
Tabela 3.7 – Resultados comparativos.	109
Tabela 4.1 – Faixa de rendimento para tipos de acoplamento mais comuns [37].	114
Tabela 4.2 – Temperatura limite de rotor bloqueado.	132
Tabela 5.1 – Vida útil média de um motor de indução.....	145

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO DO TEMA

A energia elétrica é a modalidade de energia mais consumida no país. O consumo crescente, aliado à falta de investimentos nos setores de geração, transmissão e distribuição vêm diminuindo a distância entre a demanda e a oferta, tornando o fornecimento de energia elétrica cada vez mais crítico.

Procurar soluções para este problema envolve, por exemplo, a construção de novas usinas hidrelétricas e termelétricas, a conclusão de usinas não acabadas, a importação de gás natural e de energia elétrica de países vizinhos, a implementação de campanhas de combate ao desperdício de energia e o investimento em ações que promovam o aumento da eficiência no uso de energia elétrica [1].

Diante da perspectiva de crise no suprimento energético, o custo de energia elétrica tem sido cada vez mais elevado, forçando o consumidor a buscar formas de conservação capazes de promover o seu uso eficaz. A política de conservação de energia vem crescendo de importância em termos mundiais, especialmente face aos altos custos de novos aproveitamentos energéticos.

Do ponto de vista do setor elétrico, o uso eficiente de eletricidade diminui a necessidade de expansão do setor, postergando investimentos necessários ao atendimento do mercado de energia. Para os consumidores, as principais vantagens são: redução do gasto com energia elétrica, otimização dos sistemas presentes na instalação e marketing associado às ideias de preservação ambiental.

Tomando como referência o potencial de economia de energia de 15%, identificado nos Estados Unidos, o potencial de economia anual de energia no Brasil é cerca de 6,0 TWh. Para essa estimativa, foi considerado que as 2000 maiores indústrias brasileiras consomem aproximadamente 58 TWh, sendo 70 % em sistemas que utilizam motores elétricos [2].

Do lado do consumidor, ganha força o combate ao desperdício de energia em suas vertentes humana e tecnológica. O uso eficiente da energia representa uma das maneiras de promover o equilíbrio entre o desenvolvimento socioeconômico das populações e o meio ambiente [3], e significa mudança de atitudes e valores dos indivíduos, criando condições para o surgimento de um

comportamento duradouro e o desenvolvimento de uma visão crítica quanto aos problemas energéticos e suas consequências.

A energia é um insumo fundamental para assegurar o desenvolvimento econômico e social de um país. O combate ao desperdício do seu uso apresenta-se como alternativa de baixo custo e de curto prazo de implantação. Em alguns casos, significativas economias podem ser obtidas apenas com mudanças de procedimentos e de hábitos, além de impactar positivamente o meio ambiente.

Analisando o crescimento da produção de energia elétrica e o respectivo consumo, observa-se uma função exponencial a qual, admitindo um crescimento mundial anual da ordem de 7%, por um período de 10 anos, implica na obrigação de instalação de uma capacidade geradora igual à que foi instalada desde o início da era tecnológica [4].

A eficiência energética é, hoje, uma questão crucial para a humanidade. As atuais fontes de energia e padrões de uso são insustentáveis. O consumo cada vez maior de combustíveis fósseis causará enorme dano ao meio ambiente, riscos sem precedentes à mudança do clima, e esgotará rapidamente as reservas de petróleo [5]. Não é uma mensagem pessimista, pois uma “revolução energética” é possível e desejável. Enfatizando-se uma eficiência energética muito maior e ganhando-se confiança nas energias renováveis, todos os problemas relativos aos atuais padrões de uso de energia e suas tendências podem ser mitigados [5].

1.2 A POLÍTICA NACIONAL DE CONSERVAÇÃO DE ENERGIA

No Brasil, o problema de investimento no setor energético revela-se crítico ao longo dos últimos anos, razão pela qual se reveste da maior importância o implemento de políticas visando o uso eficiente da energia.

Por meio da Lei 10.295, de 17 de dezembro de 2001, ficou definida a política nacional de conservação de energia, com objetivo de alocação de recursos energéticos e a preservação do meio ambiente.

Esta lei define que o poder executivo tem a função de estabelecer os níveis máximos de consumo específico de energia, ou mínimos de eficiência energética, de máquinas e aparelhos consumidores de energia fabricados ou comercializados no país, baseado em indicadores pertinentes.

Estes níveis devem ser estabelecidos com base em valores técnica e economicamente viáveis, levando em conta a vida útil das máquinas e aparelhos consumidores de energia.

Fabricantes e importadores de máquinas e aparelhos que utilizam energia devem adotar as medidas necessárias para que sejam obedecidos os níveis máximos de consumo de energia e mínimos de eficiência energética. Para os importadores fica estabelecida a necessidade de comprovação de atendimento aos níveis estabelecidos, durante processo de importação.

O Decreto 4.059 [6], de dezembro de 2001, que regulamenta a lei 10.295, estabelece a criação CGIEE, Comitê Gestor de Indicadores e Níveis de Eficiência Energética, formado por órgãos e entidades do Ministério de Minas e Energia Elétrica, o Ministério da Ciência e Tecnologia e o Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior.

É competência do CGIEE elaborar o plano de trabalho e o cronograma, a regulamentação específica para cada tipo de aparelho e máquina consumidora de energia, estabelecer o programa de metas (com indicação da evolução dos níveis a serem alcançados para cada equipamento regulamentado), constituir comitês técnicos, acompanhar, avaliar e fiscalizar o processo de regulamentação.

A ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica, a ANP - Agência Nacional do Petróleo, o INMETRO - Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial, as Secretarias Executivas do PROCEL - Programa Nacional de Conservação de Energia, e do CONPET - Programa Nacional de Racionalização do Uso e Derivados de Petróleo e Gás Natural fornecem apoio técnico ao CGIEE e aos comitês técnicos por ele instituídos.

Os níveis máximos de consumo, ou mínimo de eficiência são publicados através do Decreto 4.508 de 11 de dezembro de 2002 [7], onde fica estabelecida a regulamentação específica dos níveis mínimos de eficiência energética de motores elétricos trifásicos de indução, rotor gaiola de esquilo, de fabricação nacional ou importado, para comercialização ou uso no Brasil, incluindo tanto os motores comercializados isoladamente quanto os que fazem parte de outros equipamentos.

Os motores objetos desta regulamentação possuem as seguintes características:

- 1) Para operação em rede de distribuição de corrente alternada trifásica de 60 Hz, e tensão nominal até 600 V, individualmente ou em quaisquer combinações de tensões;
 - 2) Frequência nominal de 60 ou 50 Hz, para operação em 60 Hz;
 - 3) Uma única velocidade nominal ou múltiplas velocidades para operação em uma única velocidade nominal;
-

- 4) Nas potências nominais de 1 a 250 cv ou HP (0,75 a 185 kW) nas polaridades de 2 a 4 pólos;
- 5) Nas potências de 1 a 200 cv ou HP (0,75 a 150 kW) na polaridade de 6 pólos;
- 6) Nas potências de 1 a 150 cv ou HP (0,75 a 110 kW) na polaridade de 8 pólos;
- 7) Para operação contínua, ou classificada como operação S1 conforme a Norma Brasileira - NBR 7094:2000 [26], da ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas;
- 8) Desempenho de partida de acordo com as características das categorias N e H da norma NBR 7094:2000, da ABNT, ou categorias equivalentes, tais como A ou B ou C da NEMA - *National Equipment Manufacturers Association*;
- 9) Seja do tipo totalmente fechado com ventilação externa, acoplada ou solidária ao próprio eixo de acionamento do motor elétrico.

Um ano após a sua constituição legal, o CGIEE fez aprovar o Decreto 4.508/2002, que regulamentou a eficiência energética dos motores elétricos trifásicos de indução rotor gaiola de esquilo [7]. Estes motores constituem seguramente mais de 90% da energia motriz produzida por eletricidade na indústria nacional. É usado, também, nos setor residencial, público, comercial e agropecuário, em aplicações como bombas, sistemas de ventilação, refrigeração e ar condicionado e máquinas diversas, chegando a representar um consumo de quase um terço da energia elétrica do país.

O Decreto 4.508 estabelece, no Art. 3º, que o indicador de eficiência energética a ser utilizado é o rendimento nominal [7]. Foram estabelecidas duas tabelas de rendimentos nominais mínimos, uma para os motores padrão e outra para os motores de alto rendimento, ambos reproduzidos na Tabela 1.1.

Considerando que a lei estabelece apenas o rendimento nominal dos motores, por potência e polaridade, faz-se necessário avaliar o modo com que os motores são operados na indústria, qual o rendimento operacional (diferente do nominal, apresentado na lei) e qual o ganho com a troca pelos motores de alto rendimento.

Os valores citados nesta tabela estão sujeitos às tolerâncias descritas na norma NBR 7094/2000 da ABNT.

A placa de identificação do motor deve conter claramente o rendimento e o fator de potência, observados os demais requisitos definidos na norma NBR 7094 da ABNT.

Tabela 1.1 – Rendimentos nominais mínimos

Potência Nominal		Linha Padrão				Alto Rendimento			
cv ou hp	kW	Pólos				Pólos			
		2,0	4,0	6,0	8,0	2,0	4,0	6,0	8,0
1,0	0,8	77,0	78,0	73,0	66,0	80,0	80,5	80,0	70,0
1,5	1,1	78,5	79,0	75,0	73,5	82,5	81,5	77,0	77,0
2,0	1,5	81,0	81,5	77,0	77,0	83,5	84,0	83,0	82,5
3,0	2,2	81,5	83,0	78,5	78,0	85,0	85,0	83,0	84,0
4,0	3,0	82,5	83,0	81,0	79,0	85,0	86,0	85,0	84,5
5,0	3,7	84,5	85,0	83,5	80,0	87,5	87,5	87,5	85,5
6	4,5	85	85,5	84,0	82,0	88,0	88,5	87,5	85,5
7,5	5,5	85,2	88	84,4	84,5	88,7	90	89,3	89,7
10,0	7,5	86,5	85,2	85,8	83,8	90,2	91,5	90,1	88,7
12,5	9,2	87,5	87,7	87,3	86,6	90,5	90,9	90,5	91
15,0	11,0	89,4	88,3	88,3	87,3	91	91,7	90,2	91,4
20,0	15,0	91	89,8	89	87,4	93	92,4	90,6	91,9
25,0	18,5	90,5	90,1	89,4	88,8	93	92,6	92,1	92,7
30,0	22,0	91	91	90,2	89,4	93	93	93,2	93
40,0	30,0	91	91	90,6	90,9	93,1	93	93,3	93
50,0	37,0	92,2	91,7	91,2	91	93,2	93	93,2	93,6
60,0	45,0	91,0	91,7	91,7	91,7	93,4	93,6	93,6	94,1
75,0	55,0	92,4	93,0	92,1	91,5	93,0	94,1	93,6	93,0
100,0	75,0	93,0	93,2	93,0	92,0	93,6	94,5	94,1	93,0
125,0	90,0	93,0	93,2	93,0	92,5	94,5	94,5	94,1	93,6
150,0	110,0	93,0	93,5	94,1	92,5	94,5	95,0	95,0	93,6
175,0	132,0	93,5	94,1	94,1		94,7	95,0	95,0	
200,0	150,0	94,1	94,5	94,1		95,0	95,0	95,0	
250,0	185,0	94,1	94,5			95,4	95,0		

Fonte: Decreto 4.508 [7].

Para avaliação da conformidade, antes da comercialização de um modelo básico de motor, o fabricante ou importador deve submetê-lo ao INMETRO para autorização de comercialização no Brasil. O motor básico é um motor que representa um conjunto de motores com as mesmas características elétricas e mecânicas, produzido por um mesmo fabricante. Porém, a autorização de comercialização conferida pelo INMETRO não isenta o fabricante ou importador da

responsabilidade de comercializar seus equipamentos dentro dos índices mínimos de eficiência definidos pela regulamentação.

A fiscalização do cumprimento das disposições da regulamentação está a cargo do INMETRO e das entidades de direito público que com ele tenham convênios. O não cumprimento das disposições acarreta aos infratores a aplicação de penalidades previstas na Lei 10.295/2001.

1.3 O PROGRAMA BRASILEIRO DE ETIQUETAGEM

O PBE, Programa Brasileiro de Etiquetagem, é um programa de conservação de energia, que atua através de etiquetas informativas, com o objetivo de alertar o consumidor quanto a eficiência energética de alguns dos principais eletrodomésticos nacionais.

O PBE é decorrente do Protocolo firmado em 1984 entre o então Ministério da Indústria e do Comércio e a ABINEE, Associação Brasileira da Indústria Elétrica e Eletrônica, com a interveniência do Ministério das Minas e Energia.

O mesmo visa prover os consumidores de informações a fim de que possam avaliar e otimizar o consumo de energia dos equipamentos eletrodomésticos, selecionar produtos de maior eficiência em relação ao consumo, e melhor utilizar eletrodomésticos, possibilitando economia nos custos de energia.

A adesão ao Programa Brasileiro de Etiquetagem é voluntária. Só são feitos testes com os produtos dos fabricantes que querem fazer parte do PBE. A partir dos resultados, é criada uma escala onde todos serão classificados. Esses testes são repetidos periodicamente, a fim de atualizar a escala.

Dessa maneira, o Programa incentiva a melhoria contínua do desempenho dos eletrodomésticos, buscando otimizar o processo de qualidade dos mesmos. Isso estimula a competitividade do mercado, já que, a cada nova avaliação, a tendência é que os fabricantes procurem atingir níveis de desempenho melhores em relação à avaliação anterior.

Atualmente, participam do programa diversos produtos, tais como condicionadores de ar, geladeiras, chuveiros, lâmpadas compactas, bombas centrífugas, motores elétricos trifásicos e outros produtos.

O Selo do Prêmio Nacional de Conservação de Uso Racional de Energia do PROCEL é concedido anualmente como forma de premiação aos equipamentos que estejam etiquetados no

âmbito do PBE e que tenham obtido classificação "A", ou, no caso dos motores elétricos trifásicos, que tenham um rendimento igual ou superior a limites estabelecidos. Atualmente o selo é concedido para motores elétricos de indução trifásico de potência até 10 cv.

O que está sendo certificado é a informação prestada pelo fabricante quanto ao rendimento e o fator de potência dos motores testados, medidos conforme as Normas Brasileiras pertinentes e controlado pelo laboratório de ensaios credenciado, que permitirá a colocação da ENCE nos motores objetos da etiquetagem.

1.4 MERCADO DE MOTORES ELÉTRICOS NO BRASIL

O mercado de fabricação é dominado por três fábricas brasileiras:

- Weg (<http://www.weg.com.br/>): domina cerca de 75% do mercado, é líder no setor na América Latina, figura entre os cinco maiores fabricantes do mundo, exporta para mais de 50 países e conta com filiais e assistência técnica nos cinco continentes [8]. Em 2002, fabricou 7.619.000 motores [9]. Com sede em Jaraguá do Sul, em Santa Catarina, onde surgiu em 1961, domina o fornecimento de motores de baixa tensão na indústria. Por essa razão e por disponibilizar as curvas características de seus motores em seu site, os motores Weg serão utilizados neste trabalho.
- Eberle (<http://www.eberle.com.br/>): com sede em Caxias do Sul – RS, fábrica motores elétricos desde 1939.
- Kohlbach (<http://www.kohlbach.com.br/>): também situada em Jaraguá do Sul – SC, fábrica motores e geradores.

No entanto, ainda se encontram funcionando motores de fabricação GE, que dominou o mercado até os anos 70, e outras marcas como Búfalo, Brasil, que não são mais fabricados. Dos motores estrangeiros, o que mais se encontra são os de fabricação SEW (<http://www.sew.com.br/>), geralmente acoplados a dispositivos de variação de velocidade, como motorreduzidores e acionamentos eletrônicos [15].

1.5 O USO DA ENERGIA

Este item é desenvolvido com o intuito de mostrar uma visão do uso da energia elétrica na indústria brasileira, e para nela situar a participação e importância dos motores elétricos, além de delinear sobre o potencial de conservação de energia, em especial em eletricidade.

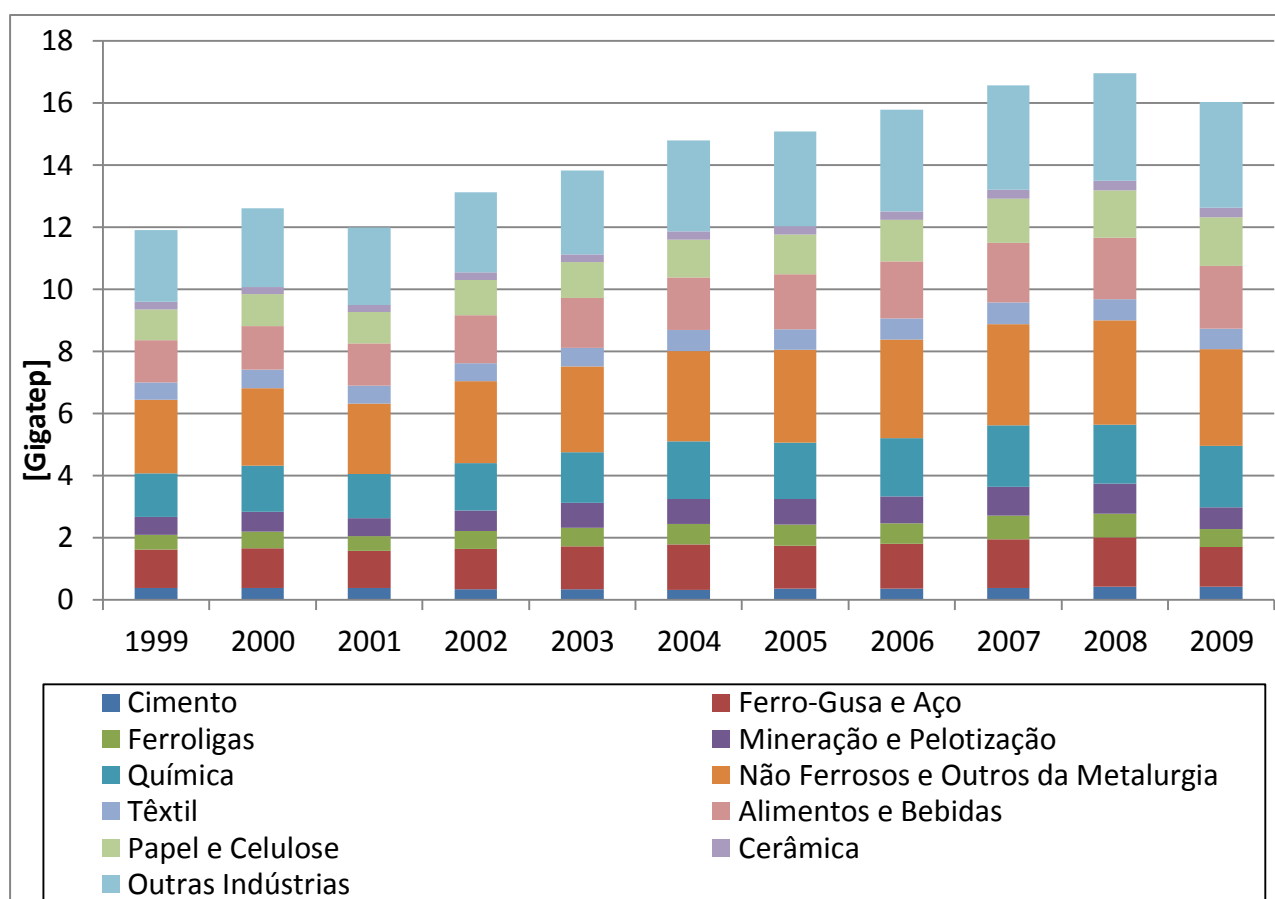
A geração de energia elétrica no Brasil em centrais de serviço público e autoprodutores atingiu 466,2 TWh em 2009, resultado 0,7% superior ao de 2008 [10].

Permanece como principal a contribuição de centrais de serviço público, com 87,8% da geração total. Nestas, a principal fonte é a energia hidráulica, que apresentou elevação de 4,9% na comparação com 2008, em função do regime hidrológico favorável observado no período [10].

A geração pública a partir de combustíveis fósseis caiu 35,1%, com redução expressiva na geração a partir do gás natural (65,2%) e do óleo combustível (33,3%). A geração de autoprodutores em 2009 apresentou expressivo crescimento de 11,5% com relação ao ano anterior, considerando o agregado de todas as fontes utilizadas [10].

Importações líquidas de 40,0 TWh, somadas à geração interna, permitiram uma oferta interna de energia elétrica de 506,1 TWh, montante 0,2% superior a 2008. O consumo final foi de 426,0 TWh, uma redução de 0,5% em comparação com 2008. [10].

A Figura 1.1 apresenta a evolução do consumo de energia total na indústria brasileira, dividido por setor de atividade, no intervalo de 1999 e 2009.

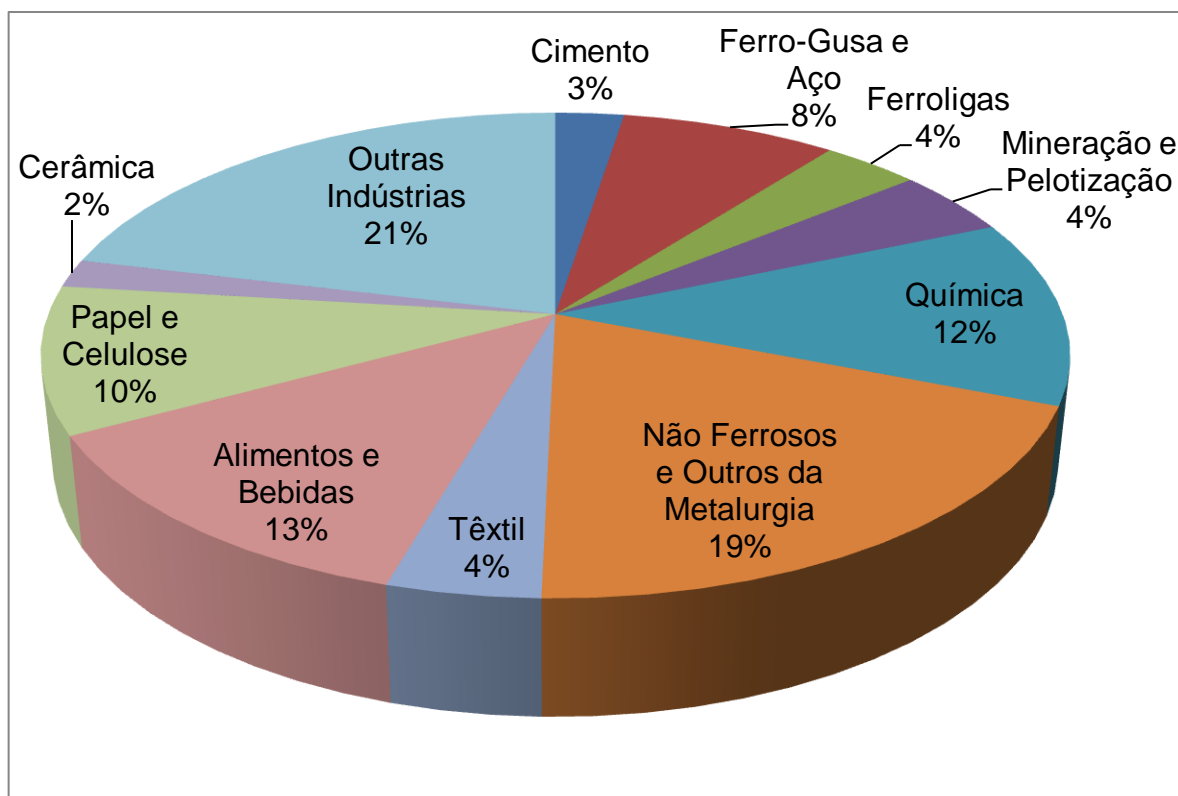


Fonte: Elaboração própria com base nos dados do BEN de 2010 [10].

Figura 1.1 – Consumo de eletricidade por setor industrial de 1999 a 2009.

Nota-se que há uma tendência de crescimento do consumo de eletricidade ao longo do período analisado, com exceção dos biênios 2001-2000 e 2009-2008, os quais apresentaram uma pequena queda, sendo que o primeiro decaiu em virtude do racionamento de energia elétrica acontecido em 2001 e o segundo apresentou queda de 5,55% no consumo elétrico devido à redução da produção física em algumas atividades energo-intensivas. A elevação percentual do consumo de energia elétrica no setor industrial do ano de 1999 para 2008 foi de 25,65% e houve uma aparente manutenção da participação dos setores.

Esta participação pode ser mais bem notada na Figura 1.2, na qual são ilustradas graficamente as parcelas de eletricidade que cada setor da indústria consome, tomando por base o ano de 2009.



Fonte: Elaboração própria com base nos dados do BEN de 2010 [10].

Figura 1.2 – Participação dos setores no consumo de energia elétrica.

Nas edições do Balanço Energético Nacional a partir de 2003, os critérios de conversões para eletricidade e geração hidráulica adotados consideram a base teórica ($1 \text{ kWh} = 860 \text{ kcal}$), sendo o petróleo de referência igual a 10000 kcal/kg . Dessa forma, o fator de conversão adotado é o de $0,086 \text{ tep/MWh}$.

Estes novos critérios são aderentes com os critérios internacionais, especialmente com os da Agência Internacional de Energia, Conselho Mundial de Energia, Organização Latino-americana de Energia e o Departamento de Energia dos Estados Unidos.

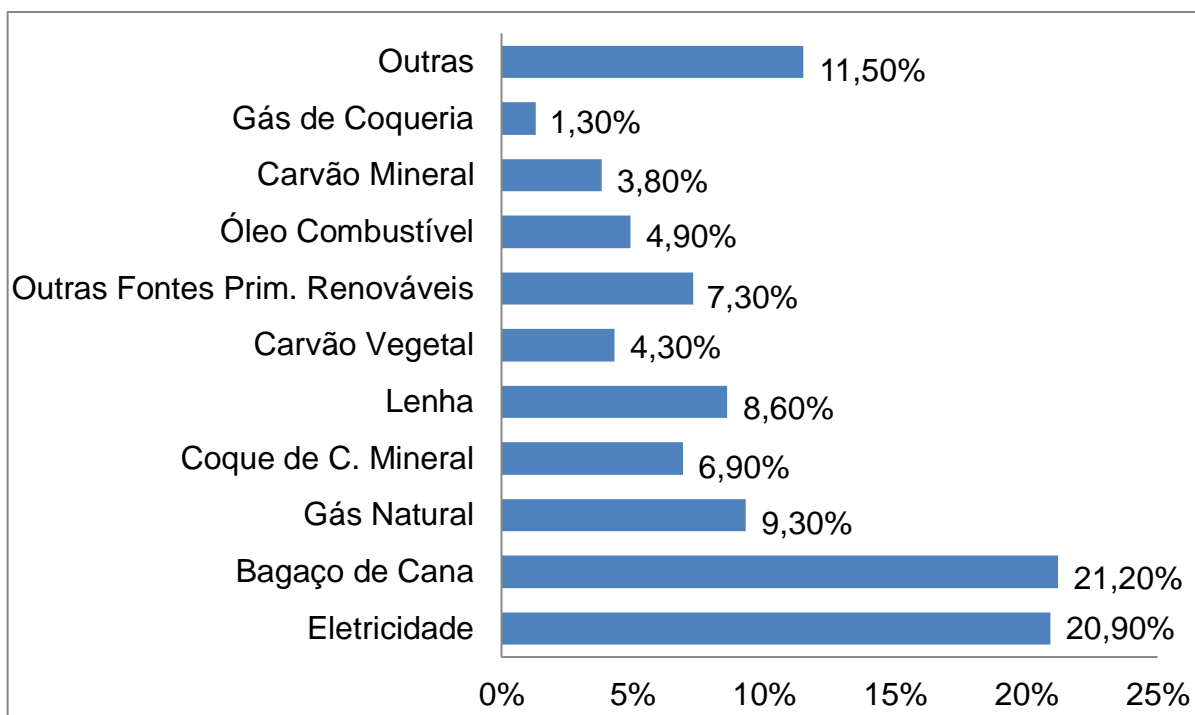
O BEU - Balanço de Energia Útil é uma ferramenta criada com o objetivo de ampliar o conteúdo das informações apresentadas pelo Balanço Energético Nacional. Essa ferramenta permite que se faça uma estimativa da energia efetivamente aplicada nos principais usos finais a partir de uma conceituação tecnicamente bem estruturada.

Na Versão 2005 do BEU, que é a mais recente existente, são contempladas as seguintes categorias de Usos Finais:

-
- Força Motriz: Energia usada em motores estacionários ou de veículos de transporte individual ou coletivo, de carga, tratores, máquinas agrícolas, de terraplenagem e de movimentação de terras.
 - Calor de Processo: Energia Usada em caldeiras e aquecedores de água ou de fluidos térmicos.
 - Aquecimento Direto: Energia usada em fornos, fornalhas, radiação, aquecimento por indução, condução e micro-ondas.
 - Refrigeração: Energia usada em geladeiras, freezers, equipamentos de refrigeração e ar condicionado tanto de ciclo de compressão como de absorção.
 - Iluminação: Energia usada em iluminação de interiores e externa.
 - Eletroquímica: Energia usada em células eletrolíticas, processos de galvanoplastia, eletroforese e eletrodeposição.
 - Outros Usos: Energia usada em computadores, telecomunicações, máquinas de escritório, xerografia e equipamentos eletrônicos de controle.

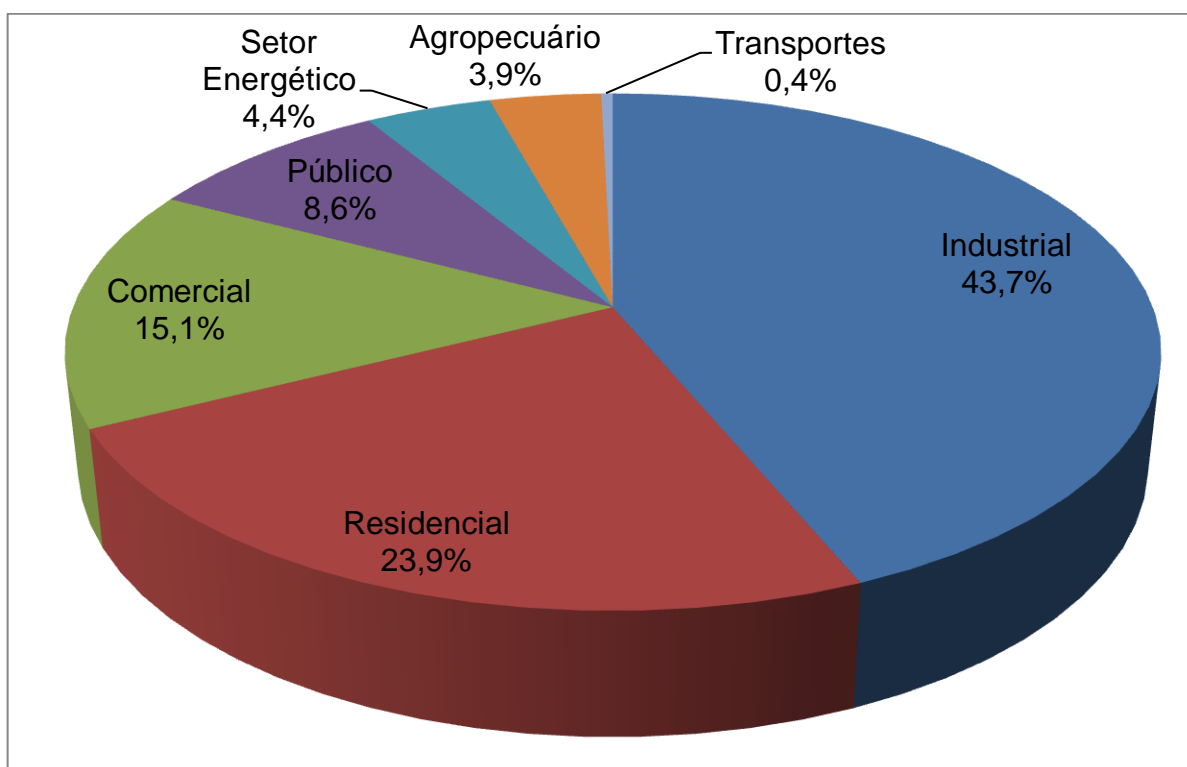
Em termos de fontes de energia, a participação relativa para o consumo da indústria está na Figura 1.3.

O Setor Industrial é responsável por quase metade do consumo final de energia elétrica, como mostra a Figura 1.4, e é certamente o que tem maior potencial de conservação de energia.



Fonte: Elaboração própria com base nos dados do BEN de 2010 [10].

Figura 1.3 – Participação das fontes de energia no setor industrial.



Fonte: Elaboração própria com base nos dados do BEN de 2010 [10].

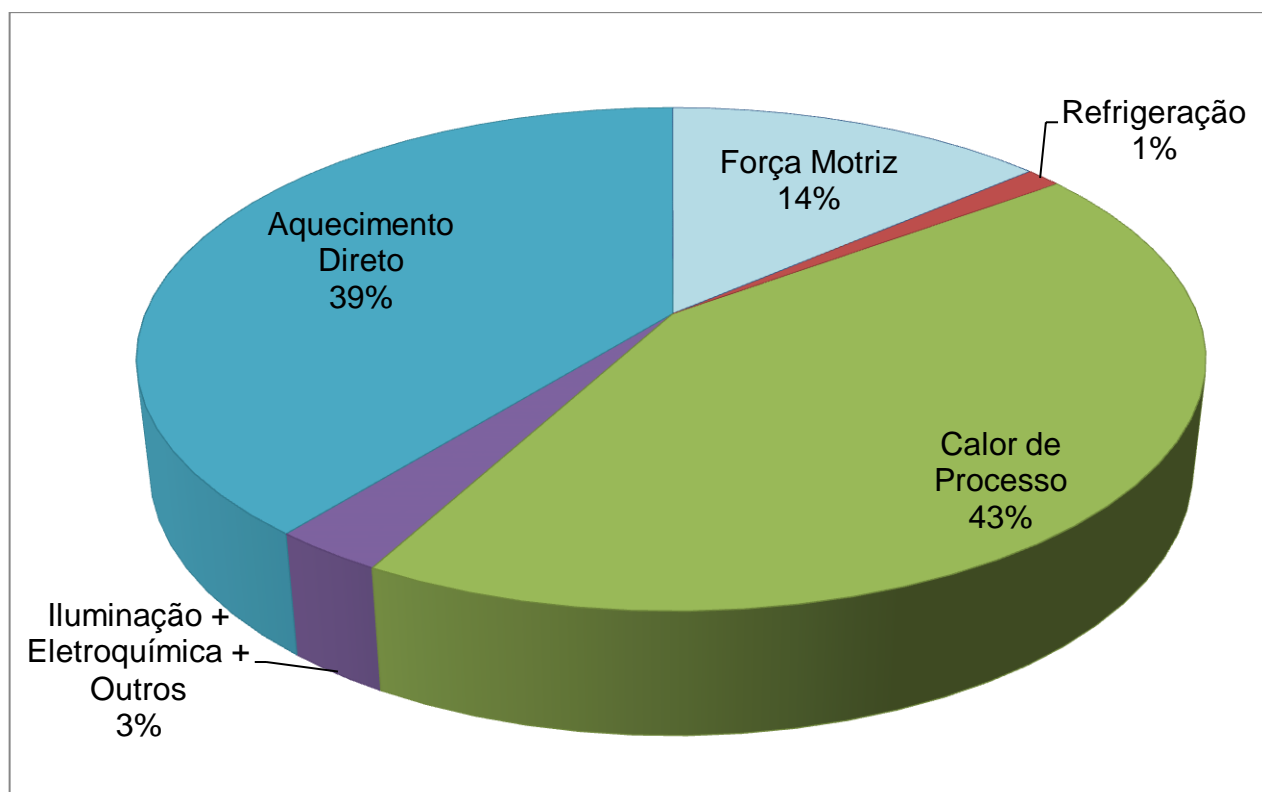
Figura 1.4 – Composição dos setores no consumo final de energia elétrica.

1.6 CONSUMO DE ENERGIA POR USO FINAL

Aquecimento direto (fornos) é usado em quase todos os setores, com grande destaque para ferro-gusa e aço, depois cimento e cerâmica. Calor de processo tem grande uso em usinas de açúcar, fábricas de papel e celulose, químicas e de alimentos e bebidas. Já força motriz é usada em todos os setores, com destaque para as indústrias finais de transformação.

Fornos são alimentados por quase todos os tipos de energéticos, com destaque para o coque. Vapor também é gerado por várias fontes, em especial o bagaço da cana. Já a força motriz é produzida principalmente por motores elétricos. Eletrólise e iluminação também são produzidos por eletricidade. O BEU considera ainda uma boa parte da eletricidade para geração de calor.

Quando se aplicam os dados do BEN [10] à estrutura do BEU [11], para o setor industrial, é possível ter-se uma dimensão do uso da energia por uso final, como se vê na Figura 1.5.



Fonte: Elaboração própria com base nos dados do BEN de 2010 [10] e BEU 2005 [11].

Figura 1.5 – Consumo de energia final na indústria por uso final.

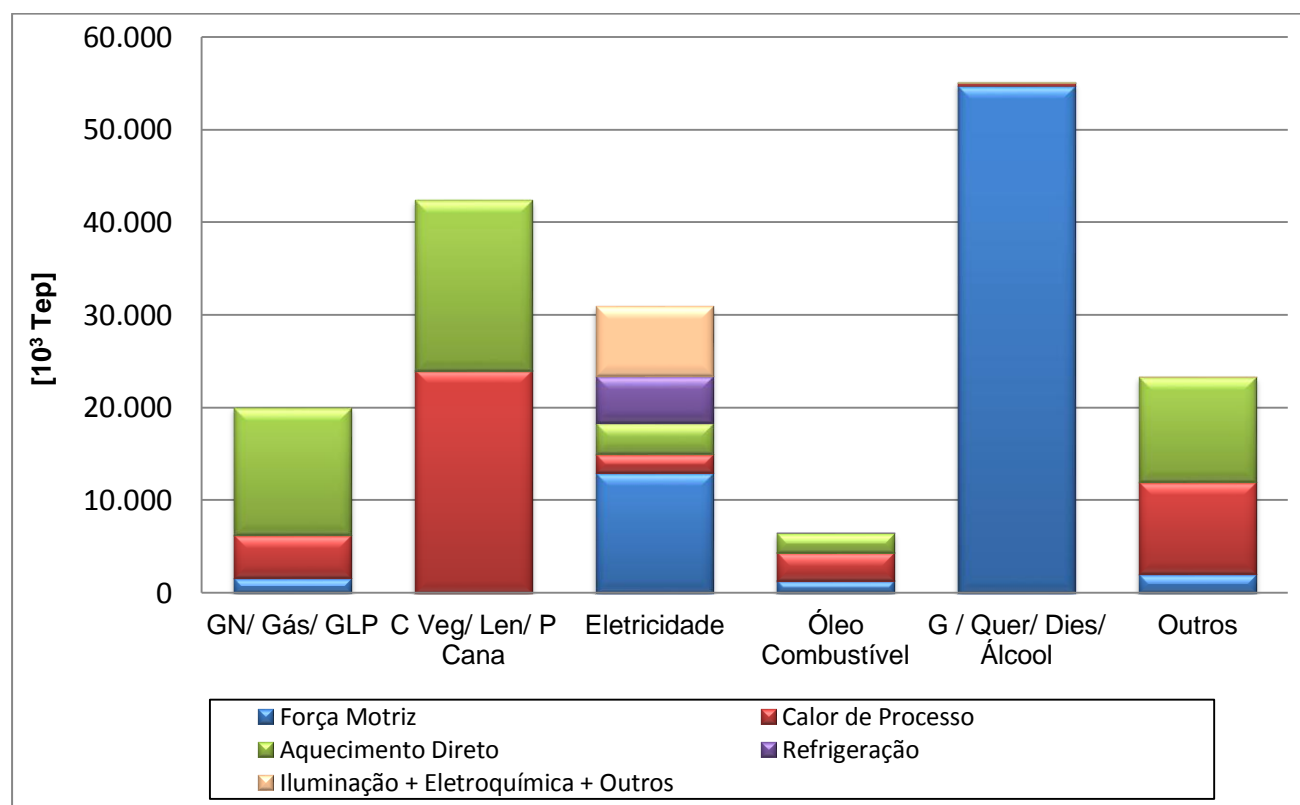
A participação dos motores no consumo global de energia do país pode ser estimada em 23%. De fato, em algumas regiões do país, o consumo de motores dentro do setor industrial pode

chegar até 70% [12]. Embora os mesmos sejam máquinas intrinsecamente eficientes, é comum encontrar motores operando de forma sobredimensionada, acarretando em baixos fatores de potência e rendimentos.

Ao se verificar o uso final pelo emprego das diferentes fontes de energia, tem-se a Figura 1.6 (observa-se que a principal fonte de energia da força motriz relacionada a motores elétricos, é a eletricidade). A coluna que representa a “Gasolina, Querosene, Diesel e Álcool” faz referência à força motriz relacionada com motores automotivos.

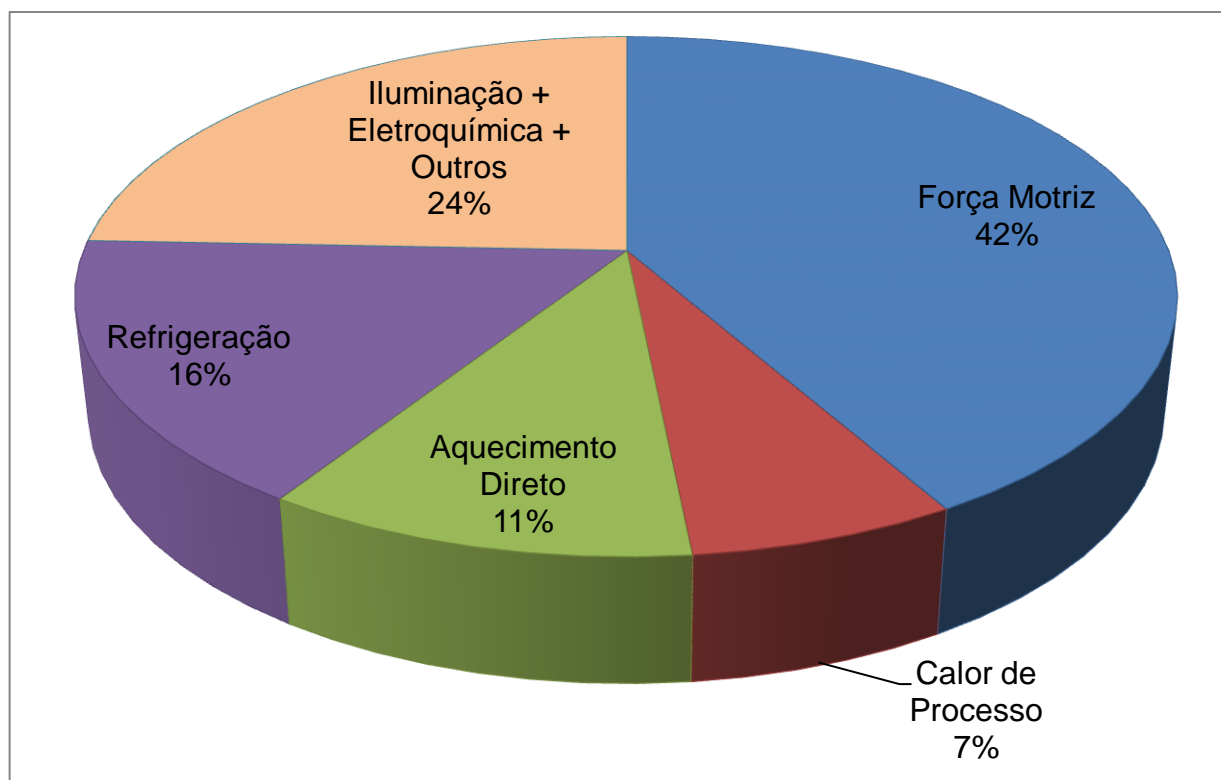
Na Figura 1.7 é mostrado um detalhamento do uso final de eletricidade em relação às categorias de uso final contempladas no BEU.

Como se observa na Figura 1.7, a força motriz é responsável pelo consumo de aproximadamente 42% de toda energia elétrica, portanto fica claro que medidas devem ser tomadas para um aumento da eficiência destes equipamentos em seus processos de operação.



Fonte: Elaboração própria com base nos dados do BEU de 2005 [11].

Figura 1.6 – Consumo final dos principais energéticos por formas de uso ano 2004.



Fonte: Elaboração própria com base nos dados do BEU de 2005 [11].

Figura 1.7 – Formas de uso da Eletricidade.

Dentro do setor industrial, os motores são usados para acionamento de cargas como as mostradas na Figura 1.8.

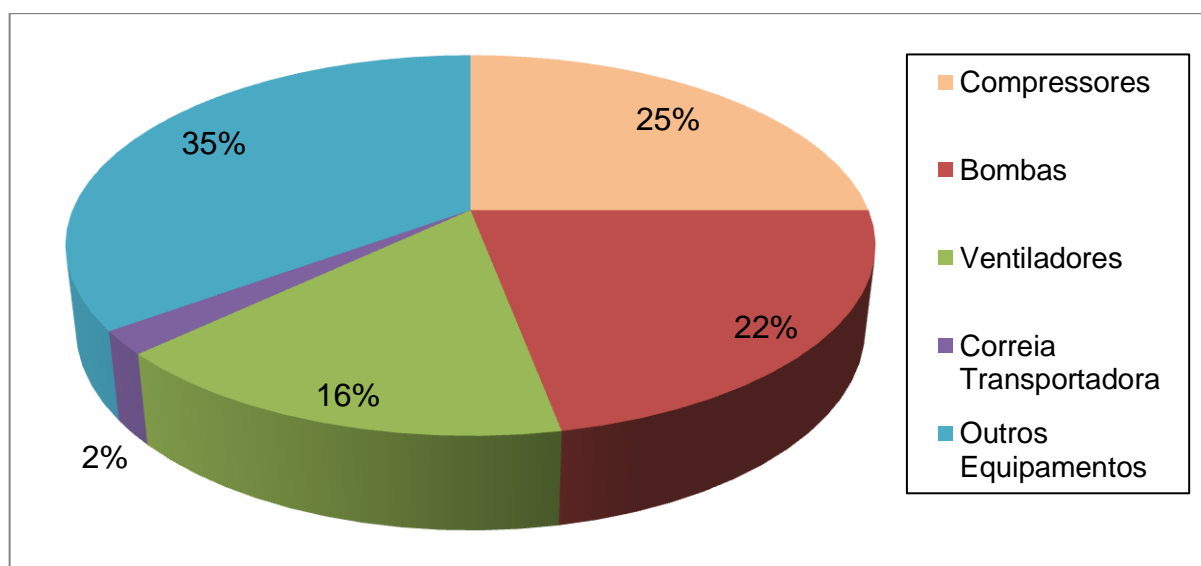


Figura 1.8 – Tipos de cargas acionadas por motores na indústria [35].

Uma correta aplicação do motor representa benefícios imediatos, reduzindo custos de produção e de consumo de energia que refletirá diretamente no lucro, além de representar uma considerável economia de energia, minimizando os investimentos em nova geração de energia elétrica.

A participação da força motriz no consumo de energia elétrica para cada setor é apresentada na Tabela 1.2, sendo que esta foi elaborada com as informações divulgadas no BEU 2005 [11].

Tabela 1.2 – Consumo de energia elétrica final por setores e uso final.

Setor	Industrial	Residencial	Comercial	Público	Energético	Agropecuário	Transportes
Força Motriz	61,8%	3,0%	14,6%	27,9%	92,6%	85,1%	100,0%
Calor de Processo	1,9%	26,0%	0,6%	0,25%	0,3%	0,2%	0,0%
Aquecimento Direto	16,1%	8,0%	7,8%	2,15%	0,0%	0,8%	0,0%
Refrigeração	6,1%	32,0%	33,3%	18,00%	0,0%	10,0%	0,0%
Iluminação	3,2%	24,0%	41,8%	49,72%	6,8%	3,7%	0,0%
Eletroquímica	10,4%	0,0%	0,0%	0,00%	0,0%	0,0%	0,0%
Outros	0,5%	7,0%	1,9%	2,00%	0,3%	0,2%	0,0%

Aplicando os valores percentuais referentes à força motriz aos dados do BEN 2010, chega-se, enfim, à Tabela 1.3.

Tabela 1.3 – Participação dos motores no consumo de eletricidade do Brasil.

Setor	Total		Participação Motores		
	10 ³ tep	GWh	Porcentagem	10 ³ tep	GWh
Industrial	16.010,81	186.172,16	61,8%	9.896,28	115.073,01
Residencial	8.756,48	101.819,56	3%	262,69	3.054,59
Comercial	5.532,34	64.329,51	14,6%	807,17	9.385,68
Público	3.150,87	36.638,00	27,9%	878,46	10.214,67
Energético	1.612,07	18.745,02	92,6%	1.492,78	17.357,89
Agropecuário	1.428,88	16.614,91	85,1%	1.215,98	14.139,29
Transportes	146,55	1.704,09	100%	146,55	1.704,09
Consumo Total	36.638,00	426.023,26	-	14.699,91	170.929,22
40%					

Fonte: Elaboração a partir do BEN 2010 [10] e BEU 2005 [11].

Verifica-se, portanto, que a participação dos motores é de 40% do total de energia elétrica consumida no Brasil. Dessa forma, mesmo ganhos de apenas 1% (a ordem de grandeza da economia atual) significam a não entrada de usinas de mais de 295 MW. A usina de Itaipu fornece 73 TWh, com 18 turbinas de capacidade total 12.600 MW, 18 x 700 MW e um fator de carga de 0,66. Nestas condições, 1.709,29 GWh (1% da energia usada nos motores) seriam atendidos por uma usina de 296 MW, considerando-se o funcionamento dos motores 24 horas por dia, todos os dias do ano. Para 5% da energia consumida pelos motores, ter-se-ia 8.546,45 GWh, o que exigiria um suprimento de 1.478 MW, mais que duas turbinas de Itaipu. Vale observar que este cálculo envolve também os motores monofásicos, que ainda não foram regulamentados.

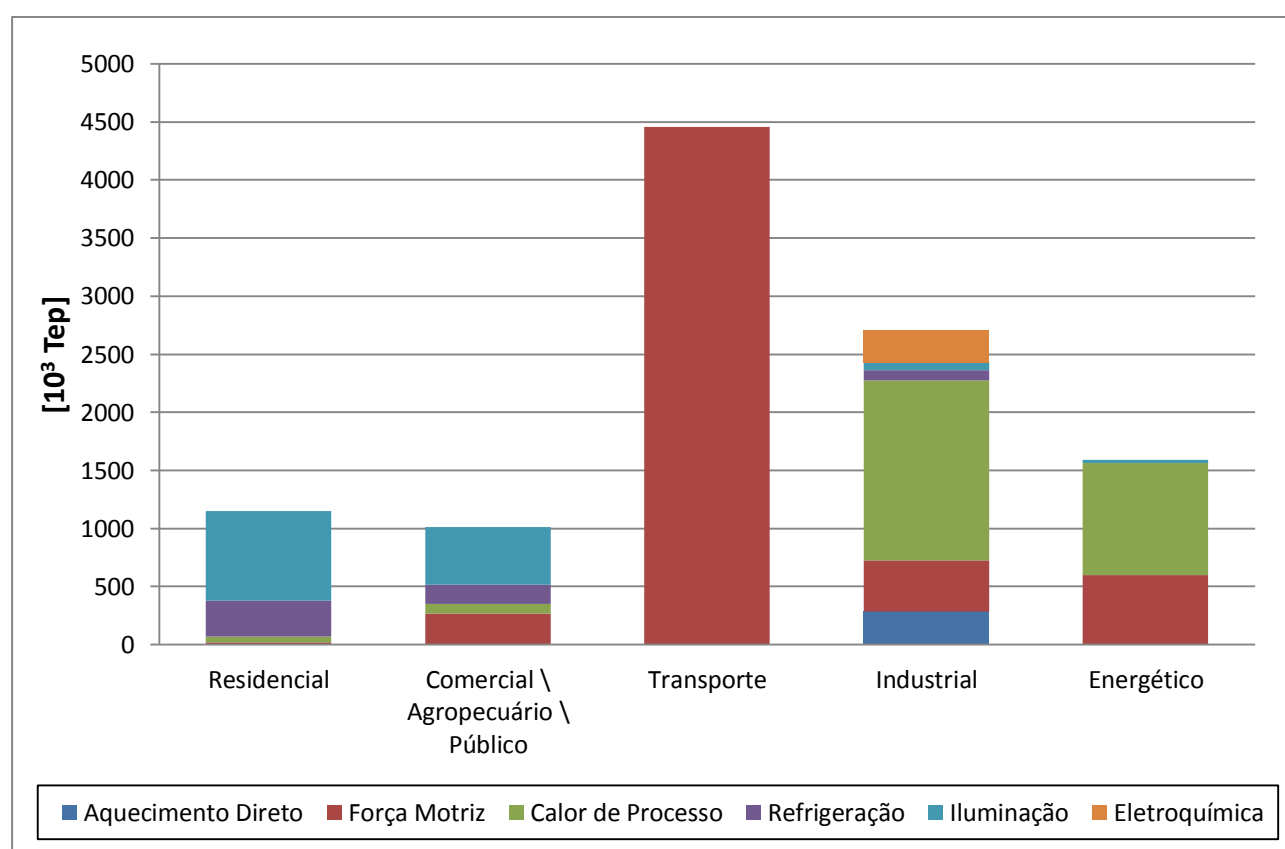
1.7 POTENCIAL DE CONSERVAÇÃO DE ENERGIA

Não há dúvidas que existe um bom potencial de conservação de energia na indústria brasileira. O Brasil teve algum sucesso em aumentar a eficiência no uso da eletricidade, porém muitas indústrias ainda desperdiçam energia por causa de processos industriais ineficientes e

equipamentos mal dimensionados. Por exemplo, os motores usados no Brasil são ineficientes pelos padrões internacionais, assim como sobredimensionados e mal operados em muitos casos [5].

No entanto, números exatos não estão disponíveis. O Procel está desenvolvendo um amplo Projeto de Eficiência Energética, onde uma das atividades será a criação de um centro de referência em eficiência energética, com a estruturação e manutenção de um banco de dados sobre eficiência energética incluindo a identificação do potencial de conservação de energia nos estados [13].

Frente ao novo cenário do setor elétrico brasileiro, a regulamentação estabelecida através da Lei 10.295/2001 [14], e seus decretos regulamentadores, uma grande ênfase na busca de potenciais de conservação de energia em sistemas com motores elétricos trifásicos têm se consolidado.



Fonte: Elaboração própria com base nos dados do BEU de 2005 [11].

Figura 1.9 – Potencial de economia de energia por setores e usos finais.

A Figura 1.9 apresenta o potencial de economia de energia por setores e usos finais, sendo que para o setor industrial, a força motriz apresentou um potencial de economia de 9%.

Do ponto de vista dos consumidores industriais, apenas uma ínfima fração dos custos com energia elétrica retorna como fomento ao uso racional da energia elétrica. Como exemplo, no

período de 1999 a 2006, estima-se que as indústrias brasileiras pagaram R\$ 157 bilhões em consumo de energia elétrica. Nesse mesmo período as concessionárias de energia elétrica aplicaram R\$ 147 milhões, 0,09% do total pago, em projetos de eficiência energética industrial.

1.8 CONTRIBUIÇÕES DO TRABALHO

Constata-se que a indústria não é prioridade nos programas governamentais de eficiência energética apesar de ser o maior consumidor de energia. O setor industrial responde por 34,6% de toda energia consumida no Brasil [10]. No entanto, não existe uma política governamental de longo prazo específica para o uso eficiente da energia na indústria. Isso se reflete na baixa prioridade dos programas federais de eficiência energética, nos investimentos de fundos setoriais de eficiência energética e nas condições de financiamento. Os setores residencial, comercial e público, que têm recebido maior prioridade nas políticas governamentais, respondem apenas por 15,0% do total do consumo de energia no País.

Diante do cenário energético apresentado e da perspectiva de constante elevação do consumo de energia, este trabalho é direcionado para ser aplicado no setor industrial, especificamente na forma de energia de força motriz.

É escopo deste trabalho apresentar uma metodologia prática, a qual foi desenvolvida com o intuito de tornar mais dinâmico o processo de verificação das condições de operação dos motores de indução trifásicos com rotor gaiola de esquilo em atividade na indústria. Além de detectar a presença do superdimensionamento, esta metodologia tem o intuito de quantificar com pouco desvio do valor real as condições de funcionamento. Com isso, será possível analisar a viabilidade de se efetuar a substituição do motor em atividade por outro melhor especificado.

O método desenvolvido é dependente de alguns dados fornecidos no catálogo do fabricante e de algumas medições. No entanto, tem a grande vantagem de não depender das curvas de desempenho dos motores - as quais são raramente disponibilizadas pelos fabricantes - na determinação do carregamento do motor em atividade.

1.9 ESTADO DA ARTE

No estado da arte do presente trabalho foi feito um levantamento bibliográfico sobre os mais diversos assuntos relacionados com o diagnóstico das condições de funcionamento dos motores de indução trifásicos. Através de tais pesquisas obteve-se um expressivo conjunto de informações que orientam sobre os distintos trabalhos de pesquisa e avanços do conhecimento no contexto aqui enfocado.

As referências [10] e [11] foram utilizadas como principais fontes de informações estatísticas desta dissertação. As informações obtidas foram utilizadas para inserir a participação dos motores de indução trifásicos no cenário nacional, dando assim maior noção de sua representatividade.

A referência [15] apresenta dados coletados no chão-de-fábrica, obtidos para a realização de diagnósticos energéticos e dá sua contribuição para estimar-se o impacto da Lei de Eficiência Energética no potencial de conservação de energia elétrica na indústria brasileira. Inicialmente, é discutida a Lei, os programas de etiquetagem e padronização, a regulamentação dos motores; em seguida aborda-se o uso e o potencial de conservação de energia final na indústria, em especial a energia elétrica e em força motriz. Apresentam-se o motor elétrico trifásico de indução e as diversas questões relativas ao seu uso industrial, para então apresentarem-se os dados obtidos.

Já a referência [21] foi elaborada para dar suporte aos profissionais e estudantes interessados nas técnicas de eficiência energética, onde são apresentados os fundamentos e as tecnologias para o uso racional de energia nos setores industrial e de serviços.

Em [25] é apresentada uma metodologia de realização de diagnóstico energético elaborada pela Eletrobrás/PROCEL, a qual pode ser aplicada em motores cujas curvas características já são conhecidas. O guia apresenta a metodologia para a realização de diagnósticos em plantas industriais, abordando tópicos como planejamento da atuação do consultor, análise técnica dos equipamentos, aquisição de dados e medições, diagnóstico das instalações e conclusões. É apresentado também nesta referência um *software* desenvolvido especificamente para análise de eficiência energética em motores de indução trifásicos: o BDMotor.

Já na referência [38] a metodologia desenvolvida permite verificar a viabilidade técnica e econômica para a substituição de motores de indução trifásicos superdimensionados com o objetivo da conservação energia. As incertezas inerentes ao processo de medição das características de desempenho de motores a serem substituídos são consideradas. Seu uso adequado permite tomar decisões sobre uma eventual substituição, reduzindo a riscos presentes.

O artigo referenciado em [39] apresentou um conjunto de metodologias para a avaliação das condições de carregamento dos motores. Neste artigo foi visto que o processo sequencial de verificação do fator de carga em estado estacionário, a análise das dinâmicas de partida – incluindo modelagem de torque-velocidade - e uma análise térmica para um ciclo inteiro de funcionamento, são necessários para a correta avaliação do comportamento do sistema motor-carga.

Os trabalhos aqui referenciados embasaram a escolha do tema abordado na presente dissertação, inclusive direcionando para a criação de uma metodologia prática para análise das condições de funcionamento dos motores de indução trifásicos, cujo diferencial em relação às metodologias já existentes e mencionadas neste estado da arte, é a facilidade de aplicação aliada ao uso de ferramentas comuns e à qualidade dos resultados.

1.10 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Para alcançar os objetivos propostos, além do presente capítulo, este trabalho encontra-se estruturado da seguinte forma:

CAPÍTULO 2 – O motor Elétrico de Indução

Esse capítulo traz uma teoria resumida sobre o motor de indução trifásico, em especial sobre suas características construtivas e operacionais. Além disso, também se discorre sobre os motores de alto rendimento e o comportamento do motor de acordo com o carregamento imposto ao mesmo.

CAPÍTULO 3 – Metodologia de Avaliação das Condições de Funcionamento do MIT

Nesta etapa são apresentadas as metodologias propostas para avaliar as condições de funcionamento motores de indução trifásicos em atividade na indústria. São expostos os métodos existentes atualmente e as vantagens e utilidade da metodologia desenvolvida nesta dissertação.

CAPÍTULO 4 – Especificação do MIT para Condições de Partida

Quando o superdimensionamento é constatado, verifica-se a possibilidade de utilizar um motor de potência inferior para acionar uma carga e para isso, as exigências de partida da mesma devem ser atendidas. Neste capítulo é mostrado como proceder para verificar se um motor está apto a acionar determinada carga.

CAPÍTULO 5 – Análise Econômica

Este capítulo trata da importância de se realizar uma análise econômica para projetos que requerem investimento inicial e quais os principais indicadores econômicos a serem considerados em um projeto de eficiência energética.

CAPÍTULO 6 – Aplicação Computacional

Nesta parte do trabalho é apresentada a interface computacional desenvolvida para aplicação da metodologia desenvolvida nesta dissertação, com o intuito de tornar mais prática a sua aplicação. Destaca-se também que a metodologia de verificação das condições de funcionamento do MIT pode ser implementada em qualquer linguagem computacional de preferência do usuário.

CAPÍTULO 7 – Conclusões

Finalizando, o capítulo 7 tem por objetivo sintetizar as principais discussões e conclusões finais dos capítulos que formam essa dissertação. Além disso, serão ressaltadas as principais contribuições deste trabalho.

CAPÍTULO II

O MOTOR ELÉTRICO DE INDUÇÃO

2 O MOTOR ELÉTRICO DE INDUÇÃO

2.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Este capítulo decorre sobre os motores de indução, os quais são bastante utilizados na indústria. Serão analisadas as características construtivas e de funcionamento dos motores, quais as causas e os problemas de se utilizar um motor mal dimensionado, e o que isso influi no baixo rendimento do sistema. Também será abordada a questão de se adotar motores de alto rendimento ao invés de motores da linha padrão.

2.2 MOTORES TRIFÁSICOS DE CORRENTE ALTERNADA

Os motores trifásicos são aqueles alimentados por um sistema trifásico a três fios.

Estes motores podem ser:

- Síncrono: velocidade constante e igual a velocidade de sincronismo;
- Assíncrono: velocidade pouco abaixo da velocidade de sincronismo.

2.3 MOTOR SÍNCRONO

O motor síncrono é o único motor elétrico que possui velocidade absolutamente constante, com carga ou em vazio, desde que a frequência da rede elétrica que o alimenta seja constante [16]. A velocidade do seu rotor é sincronizada com o campo girante que é estabelecido no estator e depende da frequência e número de pólos.

Este motor normalmente é utilizado para grandes potências, principalmente devido ao seu alto custo de fabricação para potências menores.

A eficiência em aplicações onde são exigidos a correção do fator de potência, altos torques e baixas correntes de partida, velocidade constante em variações de carga, são os principais motivos que resultam na escolha dos Motores Síncronos para acionamento de diversos tipos de cargas. Este motor possui também rendimento maior do que o do motor de indução quando funciona com fator de potência unitário.

A principal desvantagem do motor síncrono é que normalmente ele não parte sozinho, devendo ser acionado previamente por meio de um motor auxiliar (assíncrono ou de corrente contínua), ou um enrolamento de compensação, a fim de fazê-lo alcançar sua velocidade de sincronismo [16]. Além disso, há uma necessidade de manutenção constante que é maior do que nos motores de indução.

2.4 MOTOR ASSÍNCRONO

No motor assíncrono a corrente alternada é fornecida diretamente ao estator, ao passo que o rotor recebe a corrente por indução eletromagnética a partir do estator e, por isso, este motor é chamado de motor de indução.

O motor de indução apresenta velocidade praticamente constante, sofrendo pequena variação conforme a carga mecânica aplicada ao seu eixo. Por causa de suas características construtivas, o motor assíncrono é um equipamento robusto e apresenta um baixo custo e simplicidade de manutenção. Este motor é largamente utilizado na indústria, sendo adequado para diversos tipos de aplicações.

Em algumas aplicações de motores de indução é necessário controlar a velocidade de acionamento da carga. Um modo frequentemente usado para variar de maneira controlada a velocidade de motores de indução é através da variação da frequência da tensão de alimentação. Sabe-se que a velocidade do campo girante é diretamente proporcional ao valor da frequência e que a velocidade do motor depende da velocidade do campo girante.

A variação da frequência é obtida através do conversor de frequência, também denominado inversor de frequência.

O rotor de uma máquina de indução polifásica pode ser de dois tipos: de rotor bobinado ou enrolado e de rotor gaiola de esquilo.

O motor de indução trifásico de rotor bobinado (MITRB) é composto de um rotor de ferro laminado, com ranhuras onde se alojam condutores de cobre isolados entre si, os quais formam um enrolamento trifásico semelhante ao do estator. Seus terminais encontram-se ligados a um coletor de anéis que contacta com a parte estatórica através de um conjunto de escovas de carvão gráfico [18].

Os MITRB são aplicados onde se necessita de conjugados de partida elevados, com corrente de partida reduzida, tais como: bombas de êmbolo, bombas centrífugas, compressores, guindastes, esteiras transportadoras, etc. [19].

Embora este motor possa ser empregado em algumas situações como já foi mencionado, o uso do MITRB é relativamente incomum, sendo encontrados apenas em um número limitado de aplicações especializadas. Este tipo de máquina apresenta maior necessidade de manutenção e maior custo de aquisição quando comparado com o motor rotor gaiola de esquilo (MITRGE). Tais características colaboram para que a aplicação do MITRB seja menos representativa do que a do MITRGE.

2.4.1 CARACTERÍSTICAS DO MITRGE

O MITRGE é o mais simples dos motores no aspecto construtivo, pois não possui comutador, nem anéis coletores, nem quaisquer contatos móveis entre o rotor e o estator. Este tipo de construção apresenta muitas vantagens, inclusive uma operação praticamente sem manutenção, sua aplicação é indicada em localizações remotas, e operação em situações severas de trabalho, mesmo na presença de poeira e outros materiais abrasivos [17].

No motor de indução, a corrente do rotor é induzida pelo campo magnético formado no estator, ao contrário do que ocorre com outros motores onde a corrente do rotor é injetada do exterior através de anéis fixados ao eixo. Daí se originou o nome de motor de indução. Se as velocidades do campo magnético e do rotor se igualarem, o campo não mais variará nos condutores do rotor e o efeito motor irá cessar. Por este motivo, este motor também é chamado de assíncrono.

O MITRGE responde por 75% dos motores existentes no Brasil [20]. Dos 25% restantes, grande parte se constitui de motores menores que 1 cv, monofásicos, com aplicação em equipamentos residenciais como geladeira, ar condicionado, máquina de lavar, ventiladores, dentre outros [15]. Baseando-se nesses números, este trabalho se justifica por ater-se somente aos MITRGE, já que estes são motores de maior porte e em quantidade mais significativa em atividade nas indústrias.

2.4.2 ESCORREGAMENTO

O motor de indução ou assíncrono como o próprio nome evidência, possui uma velocidade assíncrona, ou seja, seu rotor possui uma velocidade abaixo da velocidade do campo magnético girante formado pelas suas bobinas.

O motor de indução é um motor que mantém praticamente constante sua velocidade, desde a vazio até a 100% de carga [17].

O estator do MITRGE possui 3 grupos de enrolamentos individuais e idênticos, deslocados em 120° elétricos e pelos quais circulam correntes defasadas também de 120° no tempo, que produzem um campo magnético girante e de amplitude constante, a uma velocidade síncrona que está relacionada ao número de pólos do motor e a frequência da rede conforme Equação (2.1).

$$\omega_s = \frac{120 \cdot f}{p} \quad (2.1)$$

Onde:

ω_s - Velocidade do campo magnético girante ou velocidade síncrona (rpm);

f - frequência da rede (Hz);

p - Número de Pólos formados pelo grupo de enrolamentos.

O rotor por sua vez não acompanha a velocidade do campo magnético girante, daí o nome de motor assíncrono. A diferença entre a velocidade do campo magnético e do rotor dá-se o nome de velocidade de escorregamento e é normalmente expressa como uma porcentagem da velocidade síncrona [17]. A Equação 2.2 apresenta esta relação.

$$s(\%) = \frac{(\omega_s - \omega_r)}{\omega_s} \cdot 100\% \quad (2.2)$$

Onde:

s - Escorregamento percentual (%);

ω_r - Velocidade do rotor (rpm).

2.4.3 PERDAS NO MOTOR DE INDUÇÃO

As perdas num motor de indução correspondem à energia que não é convertida em trabalho útil, e que é transformada em calor. Tais perdas não só contribuem para a redução do rendimento do motor, mas também provocam o aumento da sua temperatura, o que pode conduzir a uma redução substancial da vida útil do motor.

O motor é um dispositivo dinâmico, portanto não desenvolve uma conversão de energia quando não há movimento. O motor elétrico deve estar operando para converter energia elétrica em mecânica, logo é incapaz de armazenar energia. Por esta razão, também, de acordo com a lei da conservação de energia, a potência total recebida por um motor elétrico a qualquer instante é igual a sua potência de saída (útil) acrescida das perdas que ocorrem no interior da máquina durante o processo de conversão de energia. Isto significa que um motor nunca pode converter toda a potência de entrada em potência útil. A Figura 2.1 mostra os principais componentes do MIT [17].

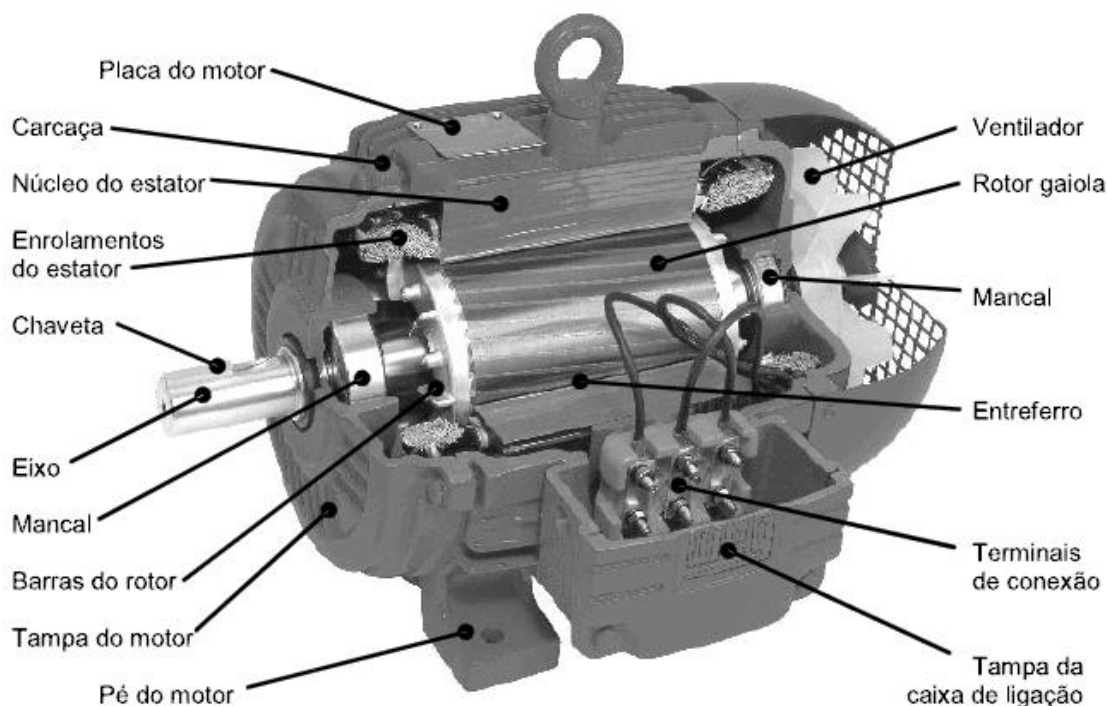


Figura 2.1 – Aspecto construtivo de motores de indução trifásicos [17].

A Equação 2.3 apresenta a lei de conservação de energia.

$$P_{in} = P_{out} + P_{perdas} \quad (2.3)$$

Onde:

P_{in} - Potência total recebida por um motor, ou seja, potência de entrada;

P_{out} - Potência útil entregue pelo motor para executar o trabalho, ou seja, potência de saída;

P_{perdas} - Perda total produzida dentro do motor, como resultado da conversão de energia, isto é: $P_{in} - P_{out}$.

De acordo com [16], as perdas que se produzem no funcionamento do motor assíncrono são:

- Perdas no ferro;
- Perdas superficiais do estator e do rotor;
- Perdas por efeito Joule no estator e no rotor;
- Perdas adicionais;
- Perdas mecânicas.

A Figura 2.2 apresenta a potência de entrada, as perdas ocorridas na conversão de energia elétrica em mecânica e a potência de saída no eixo do motor.

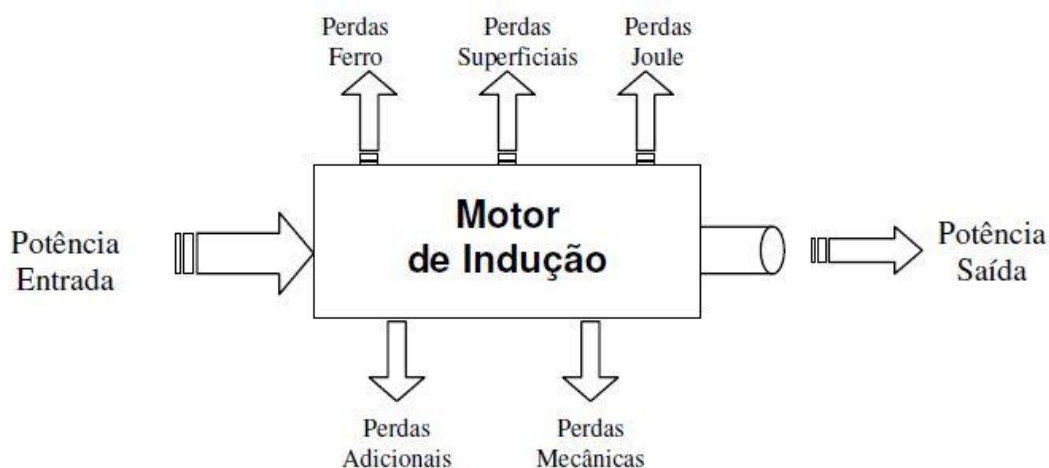


Figura 2.2 – Perdas no motor de indução.

a) Perdas no ferro

a.1) Perdas no ferro do estator: se compõem das perdas por correntes parasitas e das perdas por histerese magnética [16].

Perdas por correntes parasitas (Foucault): Numa massa metálica sujeita à variação de fluxo, geram-se f.e.m. que produzem, dentro da própria massa metálica condutora, correntes muito intensas, chamadas correntes parasitas.

Estas correntes produzem uma força magnetomotriz (f.m.m.) que, pela lei de Lenz, se opõe à causa que a produz, isto é, ao movimento. Assim sendo, o efeito destas correntes constitui uma perda de potência. A fim de se reduzir esta perda, é necessária a construção do induzido com lâminas de ferro isoladas entre si. Com esta construção, o valor da f.e.m. produzida em cada lâmina é pequeno a atua sobre um circuito elétrico de pequena seção, o que reduz consideravelmente o valor das correntes parasitas e a correspondente perda de potência.

Perdas por histerese magnética: Qualquer núcleo magnético sujeito a magnetizar-se, percorre um ciclo de histereses todas as vezes que o campo magnetizante varia de $+B_m$ à $-B_m$ e deste novamente para $+B_m$, sendo a potência perdida proporcional à superfície do ciclo. Esta perda foi interpretada como sendo necessária para vencer os atritos entre os magnetos elementares de que o núcleo se compõe, e foi chamada de perda por histereses magnética.

a.2) Perdas no ferro do rotor: Sendo a velocidade do rotor muito próxima da velocidade de sincronismo, a frequência de variação do fluxo no mesmo é muito pequena. Por esta razão, as perdas no ferro do núcleo que ocorrem no rotor dos motores assíncronos são consideradas nulas [16].

b) Perdas por efeito Joule no estator e no rotor

As perdas por efeito Joule são as que se verificam nos condutores estatóricos e rotóricos por efeito da passagem da corrente elétrica [16].

É importante salientar que no motor rotor gaiola em curto a bobina do rotor é normalmente formada por barras de alumínio ou cobre curto-circuitadas por um anel, logo a resistência rotórica é a soma da resistência das barras, mais a resistência do anel de curto-circuito.

c) Perdas mecânicas

As perdas mecânicas são as devidas aos atritos nos rolamentos e à ventilação (atrito com o ar); por isso, dependem do tipo de rolamentos, dos processos de lubrificação, dos sistemas de ventilação e da velocidade de rotação do motor [16].

d) Perdas superficiais no estator e no rotor

Perdas superficiais no estator: são produzidas pela variação do fluxo que se produz na ponta dos dentes estatóricos por efeito da passagem, em sua frente, dos dentes rotóricos. Caso o rotor seja

de canais fechados, estas perdas são desprezíveis. Se o rotor possuir canais abertos ou semifechados, as perdas superficiais estatóricas podem ser consideradas como sendo iguais a 30% das perdas que se verificam nos dentes do estator [16].

Perdas superficiais no rotor: As perdas superficiais do rotor são devidas à variação do fluxo que se produz na superfície periférica rotórica, por efeito da passagem desta sob os dentes e rasgos estatóricos [16].

e) Perdas adicionais

Além das perdas calculadas, conforme anteriormente foram indicadas, outras perdas verificam-se no decorrer do funcionamento da máquina, as quais são de difícil avaliação.

Tais perdas são as que se verificam nos parafusos de fixação dos núcleos rotóricos e estatóricos, as que se verificam nos condutores de cobre por efeito do recozimento e da diminuição de seção nas curvas, dispersão do fluxo magnético nos dentes e cantos de ranhuras, etc. [16].

2.4.4 RENDIMENTO

A potência elétrica absorvida da rede subtraída das perdas resulta na potência mecânica disponível no eixo do motor. O rendimento será dado pela relação entre a potência mecânica e a potência elétrica, conforme Equação 2.4.

$$\eta = \frac{P_{mec}}{P_{el}} \quad (2.4)$$

Onde:

η - Rendimento do motor;

P_{mec} - Potência fornecida no eixo do motor sob forma de potência mecânica (W);

P_{el} - Potência total recebida por um motor (W).

A distribuição das perdas em um motor varia de acordo com o seu carregamento. Fora das condições nominais, a distribuição percentual das perdas é totalmente diferente da situação nominal, uma vez que o valor absoluto de cada componente das perdas totais varia significativamente.

Além da distribuição das perdas variar em função da carga, ela também varia em função da potência do motor. Para potências maiores, percentualmente, as perdas Joule são menores e as perdas por Histerese e Foucault são maiores do que para os motores de menores potências [21].

O rendimento altera-se com o carregamento do motor, ou seja, com a variação da potência fornecida. Dessa maneira, é possível traçar uma curva que representa a variação do rendimento do motor conforme a potência mecânica fornecida é modificada.

Especificando adequadamente um motor elétrico para a carga que o mesmo deve acionar, é possível obter um rendimento maior, o que conseqüentemente proporciona uma economia na energia elétrica consumida pela máquina. Além disso, com a melhor adequação à carga, há uma melhoria também no fator de potência da instalação, que, por sua vez, evita gastos desnecessários com a instalação e manutenção de equipamentos de compensação. Esta constatação, embora seja evidente, muitas vezes não é contabilizada na proposta de adequação de motores a carga acionada, sendo este o objeto de estudo deste trabalho nos capítulos seguintes.

2.5 MOTOR DE LINHA PADRÃO X MOTOR DE ALTO RENDIMENTO

Os motores elétricos vêm sofrendo uma série de desenvolvimentos e melhorias desde sua invenção. Um bom exemplo é a relação peso-potência que em 1891 era da ordem de 88 kg/kW e passou para 5,7 kg/kW nos dias atuais, como mostrado na Figura 2.8. Esta redução de peso se deve principalmente aos avanços nas técnicas de isolamento e na redução da seção dos condutores, extraindo-se, contudo, uma mesma potência [21].

Verifica-se uma gradativa e significativa redução no tamanho e peso destes equipamentos conforme visualizado na Figura 2.3. Tal redução de tamanho e peso em contrapartida ocorreram em detrimento do rendimento. Este fato pode ser explicado pela maior importância dada ao custo inicial do motor do que seu custo de operação, que caracteriza o período até o início dos anos 70.

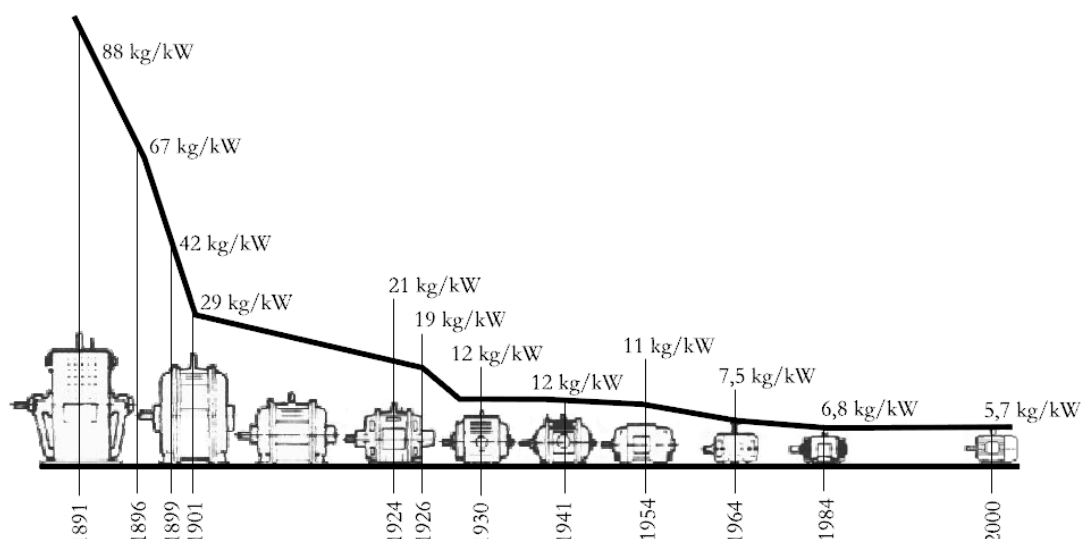


Figura 2.3 – Evolução dos motores elétricos [21].

Durante o período de 1960 a 1975 os motores elétricos principalmente de 1 a 250 hp eram projetados para terem o menor custo possível. Devido aos constantes aumentos no custo da energia elétrica a partir de 1972, surgiu a necessidade de melhorar o rendimento dos motores elétricos [4].

Os motores de alto rendimento se apresentam como uma alternativa para a economia de energia em sistemas motrizes, muito embora não sejam a solução definitiva para todos os problemas energéticos relacionados ao motor de indução, posto que são tão suscetíveis a fatores exógenos (condição do alimentador, método de partida, ambiente de trabalho) quanto os motores de projeto padronizado [21].

Os motores de alto rendimento são motores projetados para fornecer a mesma potência útil do motor padrão, porém, consumindo menos energia elétrica da rede. Eles são fabricados com algumas melhorias em relação ao motor padrão, diminuindo assim as perdas e aumentando seu rendimento.

A principal característica destes motores é a melhoria em pontos vitais onde se concentram a maioria das perdas. Construtivamente, os motores de alto rendimento possuem as seguintes características [21]:

- Chapas magnéticas de melhor qualidade: utilizando aço com maior teor de silício, que tem maior suscetibilidade, reduzindo as perdas no ferro.
- Maior volume de cobre: além de reduzir as perdas por efeito Joule no bobinado do estator, faz o motor trabalhar a temperatura mais baixa, aumentando sua vida útil.

- Enrolamentos especiais: reduzem as perdas no estator.
- Núcleos do rotor e estator tratados termicamente: reduz as perdas suplementares.
- Desenho das ranhuras: permitindo um maior enchimento, facilitando a dissipação de calor.
- Maiores barras e anéis de curto-circuito: diminuem as perdas Joule no rotor.
- Melhor desenho da ventilação: reduzindo as perdas por ventilação.
- Redução do entreferro: melhor projeto do rotor, menos ovalizado, permitindo a redução do entreferro.

Com todas as melhorias o motor de alto rendimento possui um rendimento superior ao da linha padrão que varia de 2 a 6% [22], porém apresenta um custo de aquisição maior, cerca de 20 a 30% [20]. A escolha de se adquirir o motor de alto rendimento em detrimento do da linha padrão, ou mesmo a substituição de um motor da linha padrão em operação, pode ser economicamente viável em função do custo de energia economizada ao longo da vida útil do equipamento, pois o custo da energia consumida por um motor chega a mais de 100 vezes o seu preço de aquisição.

Em geral, convém trocar o motor da linha padrão por um de alto rendimento ao término de sua vida útil, no entanto, observa-se que essa substituição para um motor ainda em atividade, também pode ser uma boa alternativa de economia mediante uma análise econômica criteriosa que comprove a viabilidade da troca.

2.6 CARACTERÍSTICAS DE FUNCIONAMENTO DO MIT

2.6.1 FUNCIONAMENTO CONFORME CARGA SOLICITADA

O MIT pode operar com diversas condições de carregamento indo desde o funcionamento à vazio, ou seja, sem carga, até situações de sobrecarregamento por algum tempo, com isto suas grandezas elétricas e mecânicas se alteram. No funcionamento a vazio, o escorregamento apresentado é muito pequeno (menor que 1%), logo a velocidade do rotor é muito próxima da velocidade do campo magnético girante. Seu rendimento, corrente, potência de saída e fator de potência são baixos.

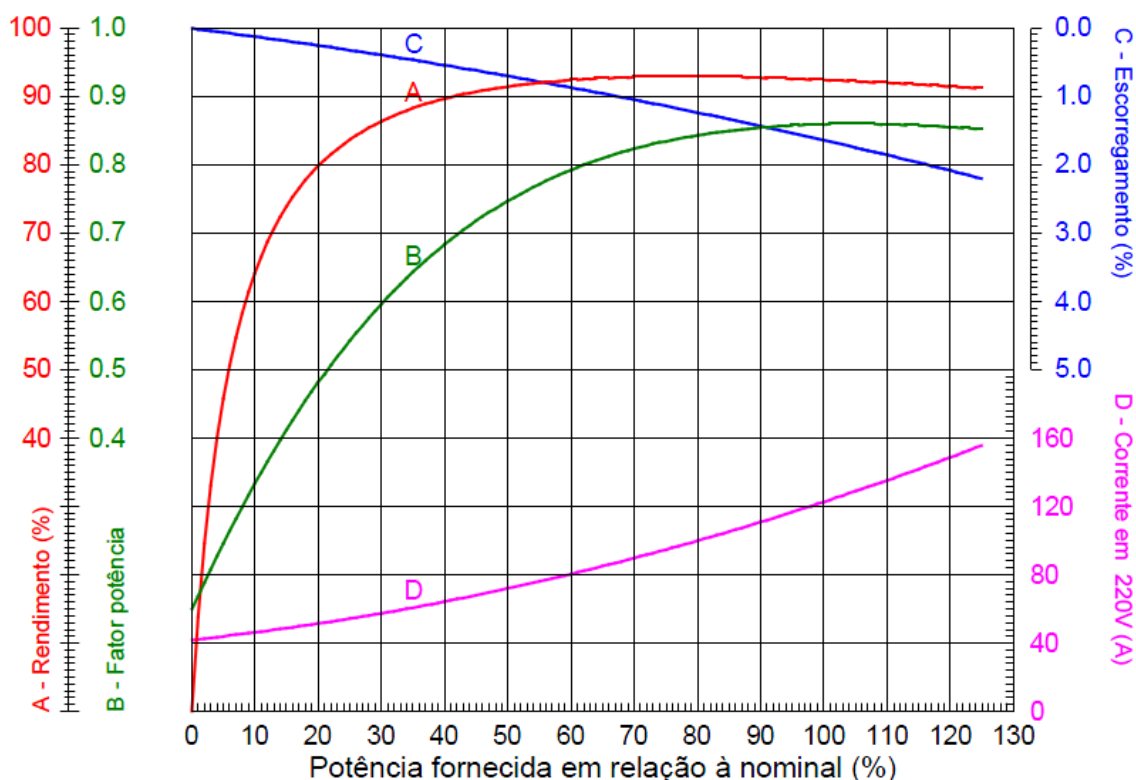
Em condições de plena carga, o motor apresenta um escorregamento que promove o equilíbrio entre o torque desenvolvido e o torque aplicado. À medida que se impõe um aumento na carga no eixo do motor, o escorregamento cresce, pois o torque aplicado excede o torque desenvolvido. Já as grandezas elétricas aumentam até atingirem seus valores nominais.

Quando o torque nominal é aplicado ao eixo do motor de indução, este apresenta um fator de potência que varia de 0,8 (pequenos motores) a cerca de 0,95 nos grandes motores [17].

Diversas grandezas variam de acordo com as condições de operação do motor, sendo que algumas delas serão destacadas nesta dissertação. São elas:

- Carregamento: relação entre a potência fornecida e a potência nominal do motor;
- Fator de potência: cosseno do ângulo da corrente do motor em relação à tensão;
- Rendimento: relação entre a potência mecânica e a elétrica.

Estas grandezas variam de acordo com a carga solicitada no eixo do motor. A Figura 2.4 mostra as curvas características de um motor de indução, sendo a curva “A” a de rendimento, “B” de fator de potência, “C” escorregamento e “D” de corrente para uma tensão fixa de 220V.



Fonte: WEG

Figura 2.4 – Curvas de desempenho de um motor de indução de 50 hp.

Observa-se que para cada carregamento específico, há um respectivo rendimento, fator de potência e escorregamento, de modo que com a diminuição do carregamento, há também um menor rendimento e fator de potência para o motor, o que torna o sistema menos eficiente e econômico.

2.6.2 ADEQUAÇÃO À CARGA

Muitos motores instalados encontram-se superdimensionados para a carga que acionam. De uma amostra de 2.119 motores da indústria brasileira analisada, 36% operavam a menos de 50% da carga nominal [15]. Para uma amostra da indústria americana, 44% dos motores operavam a menos de 40% da potência nominal [23]. Operar a baixa carga significa operar a baixo rendimento, em especial quando a carga é menor que a metade da nominal.

Em alguns casos, este superdimensionamento é necessário, para atender a partidas mais severas ou eventuais condições de sobrecarga. Na maioria dos casos, porém, a utilização de motores de menor potência é possível. É estimada em 5% a perda de rendimento média causada por superdimensionamento para a indústria dos EUA [23]. Para a indústria brasileira é apontada uma perda de cerca de 1% [15].

Além de o superdimensionamento acarretar em um baixo rendimento, especialmente para motores de pequeno porte, o fator de potência também decai abaixo da plena carga. O superdimensionamento ainda gera custos maiores para a aquisição e instalação do motor e equipamentos de acionamento.

Para corrigir o problema pode-se substituir o motor elétrico, estando ele danificado ou não, por outro motor de potência diferente que, normalmente, será de potência inferior ao anterior, visando a melhoria do carregamento e, conseqüentemente, do fator de potência, rendimento e energia consumida pelo equipamento.

Para que a adequação de um motor elétrico seja bem sucedida há necessidade de uma análise das diversas grandezas elétricas e mecânicas envolvidas da carga acionada e do motor. Há que ser analisada, também, as condições do ambiente onde o motor está instalado. A seguir serão relatadas as principais preocupações e grandezas a serem avaliadas antes da substituição.

Em geral, a substituição de motores superdimensionados só se justifica economicamente quando realizada próxima ao final da vida útil, quando o custo da substituição em média é inferior

ao da reposição, compensando o custo com adaptações de base e outras (por exemplo, troca do relé térmico) eventualmente necessárias [24].

As principais políticas de incentivo neste caso parecem ser programas de treinamento, orientando usuários a dimensionar adequadamente os motores. Contratos de performance e leilão de eficiência, embutidos em projetos mais abrangentes, podem também ser usados. O trabalho aqui desenvolvido contribui positivamente ao dar ênfase nos motores já instalados e em atividade nas indústrias, que por motivos variados, tais como: especificação incorreta, alterações de carga, substituições inadequadas realizadas pelo setor de manutenção, dentre outros motivos, podem vir a apresentar condições de superdimensionamento nos motores.

2.6.3 AMBIENTE DE TRABALHO DO MOTOR

As condições ambientais da localidade onde está instalado o motor influem diretamente no seu funcionamento. Estas condições podem acarretar na redução da vida útil do equipamento ou até mesmo causar sua queima.

2.6.3.1 TEMPERATURA

A temperatura ambiente de referência para a potência nominal dos motores é de 40°C. Caso a temperatura ambiente seja superior, deve-se corrigir a potência disponível no eixo conforme os valores em uma tabela específica do fabricante.

As classes de isolamento utilizadas em máquinas elétricas e seus respectivos limites de temperatura são definidos pela NBR-7034 [26] e ilustradas na Figura 2.5.

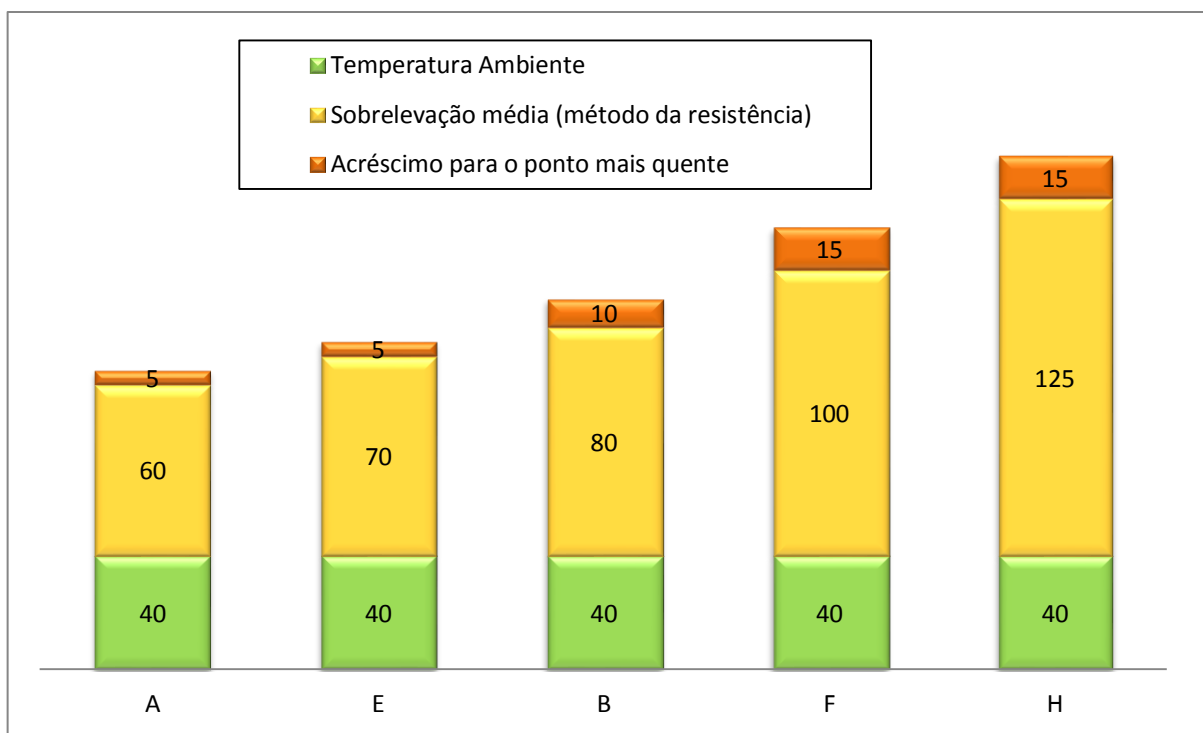


Figura 2.5 – Classe de isolamento e temperatura de operação.

2.6.3.2 ALTITUDE DA INSTALAÇÃO

Motores funcionando em altitudes acima de 1.000 m sofrem a diminuição do seu poder de arrefecimento devido à rarefação do ar em altitudes mais elevadas.

A fim de corrigir a potencia que estará acessível no eixo, utilizam-se fatores de correção disponibilizados pelo próprio fabricante do motor elétrico.

2.6.3.3 GRAU DE PROTEÇÃO DO INVÓLUCRO (IP)

Os invólucros dos equipamentos elétricos, conforme as características do local em que serão instalados e de sua acessibilidade devem oferecer um determinado grau de proteção

A norma NBR 9884 [27] define os graus de proteção dos equipamentos elétricos por meio das letras características IP, seguidas por dois algarismos, cujos significados são:

- 1º ALGARISMO: Indica o grau de proteção contra penetração de corpos sólidos estranhos e contato acidental;

- 2º ALGARISMO: Indica o grau de proteção contra penetração de água no interior do motor.

Embora possa haver uma série de combinações, os tipos de proteção mais comumente encontrados são:

- IP21, IP22 e IP23: Também classificados como motores abertos, ou seja, devem trabalhar em ambientes limpos e abrigados;
- IP44, IP55: Também classificados como motores fechados, ou seja, podem trabalhar em ambientes desabrigados.

Cabe ressaltar que um motor com grau de Proteção IP55 substitui com vantagens os motores com grau de proteção inferiores (IP21, IP22, IP23 e IP44) apresentando maior segurança contra exposição acidental à poeiras e água.

A Tabela 2.1 apresenta os significados dos algarismos do grau de proteção.

Tabela 2.1 – Significados dos algarismos do grau de proteção [33].

1º Algarismo		2º Algarismo
Algarismo		
0	Sem Proteção	Sem Proteção
1	Corpos estranhos com dimensão acima de 50 mm	Pingos de água na vertical
2	Corpos estranhos com dimensão acima de 12 mm	Pingos de água na vertical até a inclinação de 15° com a vertical
3	Corpos estranhos com dimensão acima de 2,5 mm	Água de chuva até a inclinação de 60° com a vertical
4	Corpos estranhos com dimensão acima de 1,0 mm	Respingos de todas as direções
5	Proteção contra acúmulo de poeiras prejudiciais ao motor	Jatos de água de todas as direções
6	Totalmente protegido contra a poeira	Água de vagalhões
7	-	Imersão temporária
8	-	Imersão permanente

Vagalhões: grandes ondas de mar muito agitado.

2.6.4 CARACTERÍSTICAS ELÉTRICAS DO MOTOR

Algumas características elétricas dos motores, normalmente não são discriminadas no ato da compra do motor pela área responsável, estas por sua vez não podem ficar em segundo plano, pois podem ser as responsáveis pela não utilização do motor, caso não sejam atendidas.

2.6.4.1 FATOR DE SERVIÇO (FS)

O Fator de serviço é um multiplicador que quando aplicado à potência nominal do motor elétrico indica a carga que pode ser acionada continuamente sob tensão e frequência nominais e com limite de elevação de temperatura. O fator de serviço pode ser obtido no catálogo do fabricante.

2.6.4.2 FREQUÊNCIA NOMINAL DO MOTOR

Embora no Brasil a frequência padronizada seja de 60 Hz, no caso de importação de motores, a mesma deve ser especificada, pois o padrão europeu se dá em frequência de 50 Hz, e sua operação equivocada provocará alteração no desempenho.

2.6.4.3 NÚMERO DE POLOS DO MOTOR

Este valor expressa o número de pares de polos magnéticos formado pelas bobinas do motor, possui relação inversa com a rotação do motor, ou seja, quanto maior o número de polos menor a rotação do motor.

2.6.4.4 NÚMERO DE PONTAS DO MOTOR

Quanto maior a quantidade de pontas existentes no motor, maior a possibilidade de ligações em tensões diferentes. O motor elétrico pode ter 3, 6, 9 ou 12 pontas.

2.6.5 CARACTERÍSTICAS CONSTRUTIVAS DO MOTOR

Os motores elétricos possuem suas dimensões padronizadas conforme NBR 15623-1 [28]. Existem potências que são disponibilizadas em duas carcaças diferentes, logo na escolha do motor deve-se especificar a carcaça desejada para evitar alterações na instalação do novo motor. Outro item a ser especificado é o tipo de montagem: vertical ou horizontal e a forma de fixação, pois caso não seja respeitada estas características o motor poderá ter a vida útil de seus rolamentos comprometida.

2.6.6 CARACTERÍSTICAS DA REDE ELÉTRICA

O valor da tensão aplicada aos terminais do motor também é um fator importante, pois se o motor opera com tensão inferior à nominal, sua corrente absorvida aumenta para manter o torque necessário, elevando as perdas Joule no estator e no rotor, causando uma elevação de temperatura no motor.

A presença de harmônicos e desequilíbrios de tensão, mesmo que pequenos, provocam grandes desequilíbrios de corrente, proporcionando perdas adicionais no motor. Há que se analisar a tensão de alimentação do motor elétrico, verificando se o desequilíbrio de tensão está dentro dos limites aceitáveis e se há a presença de harmônicos, antes de iniciar qualquer avaliação técnica e econômica visando a conservação de energia em motores elétricos [21].

2.7 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO II

O MITRG tem participação bastante significativa na indústria e será tomado como objeto de aplicação do trabalho desenvolvido nesta dissertação. Suas características de desempenho em relação à carga acoplada em seu eixo foram analisadas no presente capítulo, e foi visto que é necessário se conhecer alguns parâmetros que variam com o percentual de carregamento, tais como o rendimento e fator de potência, a fim de se determinar se um motor está corretamente empregado para determinada atividade, analisando-se do ponto de vista da eficiência energética.

CAPÍTULO III

METODOLOGIA DE AVALIAÇÃO DAS CONDIÇÕES DE FUNCIONAMENTO DO MIT

3 METODOLOGIA DE AVALIAÇÃO DAS CONDIÇÕES DE FUNCIONAMENTO DO MIT

3.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O MITRGE é o mais importante uso final de energia elétrica no país. No Brasil a quantidade de energia por ele processada é superior a 30% da energia elétrica total gerada [25]. Diante disso, este tipo de motor será o objeto de estudo desta dissertação, pois qualquer iniciativa que se desenvolva para aumentar o rendimento destes equipamentos tem potencial de gerar grande economia para o país.

Em um diagnóstico energético, grande parte do tempo é dedicada aos motores elétricos, em primeiro lugar, devido a sua importância no consumo da planta industrial, e em segundo lugar, pela grande quantidade de unidades instaladas.

É possível destacar as quatro principais causas do uso ineficiente de um motor elétrico:

- Superdimensionamento;
- Reparo inadequado do motor;
- Uso de motores de baixo rendimento;
- Acoplamento motor-carga de baixa eficiência.

Este capítulo mostrará uma metodologia desenvolvida com o intuito de tornar mais prático o procedimento de verificação do carregamento dos motores de indução trifásicos e, com isso, avaliar seu rendimento e se o mesmo encontra-se em situação de superdimensionamento ou não. Dessa forma, será possível estimar qual é o consumo de energia elétrica do motor, o que pode ser utilizado na análise econômica nos casos em que os motores se encontram mal dimensionados, a fim de verificar a viabilidade de se propor uma troca por um motor de menor potência, sempre com cuidado para que o novo motor proposto seja capaz de suprir a demanda de corrente de partida da carga acoplada, conforme será exposto no Capítulo 4 desta dissertação.

3.2 CUSTOS ASSOCIADOS AOS MOTORES ELÉTRICOS

Existem basicamente dois tipos de custos associados que devem ser levados em conta. São eles:

- **Custo de aquisição:** refere-se ao preço de compra do motor no mercado. Esse valor varia de acordo com o tipo de motor, o qual pode ser da linha padrão ou de alto rendimento e também deve incluir os valores dos acessórios necessários e custo de instalação;
- **Custo operacional:** este custo leva em consideração o valor pago durante todo o seu tempo de funcionamento. Engloba principalmente o custo da energia elétrica consumida durante a sua vida útil.

Em muitos casos as decisões sobre qual motor adquirir se baseiam apenas no custo de aquisição, no entanto, deve ser ressaltado que, na maioria das vezes, o custo operacional do motor chega a 100 vezes o seu custo de aquisição. A Figura 3.1 mostra a relação entre o custo operacional e o custo de aquisição para quatro potências distintas [25].

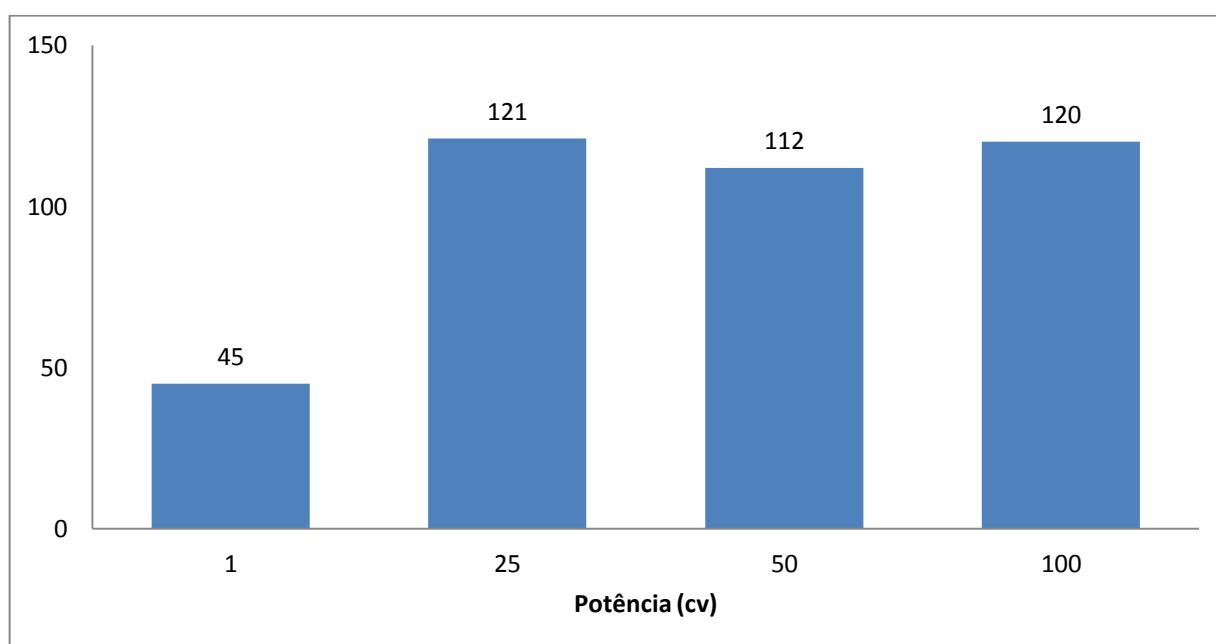


Figura 3.1 – Relação entre o custo operacional e o custo de aquisição.

Portanto, deve existir uma preocupação no ato da compra de um novo motor, não só com o custo de aquisição, mas principalmente com o custo de operação que, conforme pôde ser visualizado na Figura 3.1, apresenta um custo superior a cem vezes o custo de aquisição para potências maiores que 25 cv.

Além disso, o custo operacional pode ser reduzido levando-se em conta alguns aspectos importantes, como por exemplo, o superdimensionamento.

3.3 SUPERDIMENSIONAMENTO

O superdimensionamento é uma causa muito comum de operação ineficiente dos motores elétricos e implica na potência nominal do motor ser bem maior do que a potência solicitada pela carga mecânica.

As causas mais frequentes do superdimensionamento são [25]:

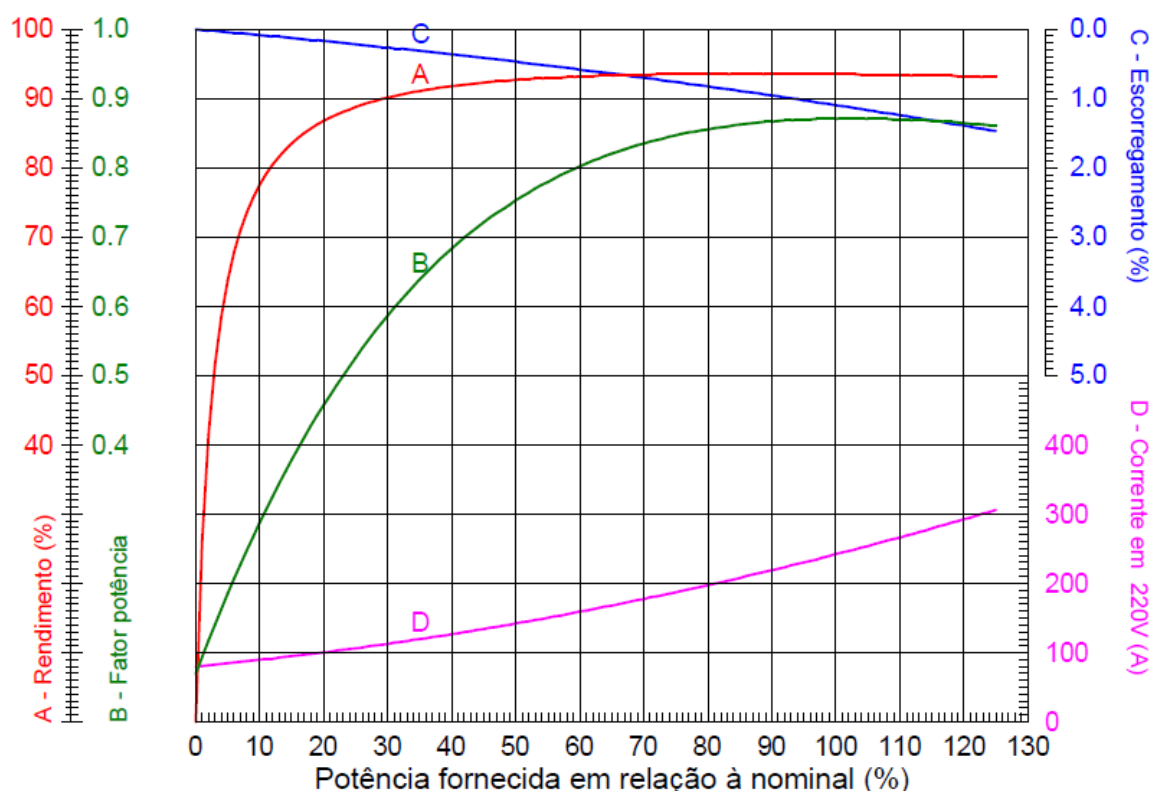
- Desconhecimento das características da carga que será acionada pelo motor;
- Falta de conhecimento de métodos para um dimensionamento mais adequado;
- Aplicação de sucessivos fatores de segurança nas várias etapas de um projeto;
- Expectativa de aumento futuro de carga;
- A não especificação de motores com fator de serviço maior do que um, para que os motores possam atender cargas que apresentem picos esporádicos;
- Permissão de margem de segurança para operação de processos vitais;
- As equipes de manutenção substituírem um motor danificado por outro de potência maior, quando falta no estoque um sobressalente de potência adequada;
- Redução da produção por retração do mercado consumidor;

Com isso, várias consequências desfavoráveis decorrem do superdimensionamento dos motores de indução, dentre as quais se destacam [25]:

- Maior custo, volume e peso;
 - Redução do fator de potência, provocando a necessidade de instalação de mais equipamentos para a sua correção;
 - Redução do rendimento do motor, embora muitos motores apresentem seu rendimento máximo a aproximadamente 75% da sua carga nominal;
 - Maior corrente de partida, acarretando maior custo da instalação e proteção.
-

3.4 EFEITOS DO DIMENSIONAMENTO INADEQUADO

A Figura 3.2 apresenta as curvas características de um motor de indução. Observa-se que o comportamento das curvas de rendimento e fator de potência em função do carregamento tendem a decair com a diminuição do percentual de carga. Geralmente o superdimensionamento corresponde a uma diminuição do rendimento e fator de potência, porém, cada caso deve ser analisado com cuidado, pois em algumas situações o superdimensionamento pode não ser grave e até necessário. Em geral, para cargas entre 75 e 100% da nominal, o motor pode ser considerado bem dimensionado [25].



Fonte: WEG

Figura 3.2 – Curvas Características de um motor de indução.

Ressalta-se que o subdimensionamento também é um problema e apresenta as mesmas consequências de uma operação em sobrecarga, ou seja, acarreta o superaquecimento, que por sua vez provoca redução da vida útil do equipamento, com possíveis perdas de produção. No entanto, esta situação é, via de regra, prontamente percebida e, consequentemente, corrigida.

Quanto menor a potência do motor, mais fortemente é reduzido o seu rendimento em cargas parciais. Nestes motores o rendimento cai drasticamente com a redução de sua carga. De uma

maneira geral, motores operando a 50% de carga ou menos, apresentam um valor baixo de rendimento.

As mesmas observações se aplicam para o fator de potência, o qual, para carregamentos inferiores a 75% da carga nominal, assume valores reduzidos. Este problema é mais sério ainda nos motores de menores velocidades, pois o fator de potência para funcionamento nominal diminui com o aumento do número de polos do motor [25].

3.5 AQUISIÇÃO DE DADOS

Durante a realização do diagnóstico energético, a fase de levantamento de dados em campo é de fundamental importância para o sucesso do trabalho e compromete em muito a fidedignidade dos resultados quando é mal realizada. Desta forma, deve ser dedicada atenção especial e tempo necessário para efetuar essa tarefa. Dependendo do grau de precisão e detalhamento que se espera do diagnóstico energético, esse levantamento de dados pode ser feito de três maneiras diferentes:

1. Levantamento por amostragem;
2. Levantamento por dados de placa;
3. Levantamento detalhado.

3.5.1 LEVANTAMENTO POR AMOSTRAGEM

Esse tipo de levantamento é mais aplicável onde a planta industrial apresenta uma grande quantidade de máquinas iguais desempenhando a mesma tarefa. Observa-se que nesse procedimento fica comprometida a precisão dos resultados por generalizar demasiadamente ao considerar que uma máquina funciona exatamente nas mesmas condições que a outra.

Adota-se este tipo de levantamento por se ter como prioridade uma economia de tempo ou quando o objetivo é realizar uma análise preliminar apenas. O procedimento implica em escolher somente alguns motores para efetuar as medições em campo, e considerar válidos os valores levantados para os demais motores.

A partir dos dados levantados, é possível detectar possíveis casos de superdimensionamento, além dos possíveis candidatos à troca por motores de alto rendimento.

3.5.2 LEVANTAMENTO POR DADOS DE PLACA

Numa planta industrial onde existe uma grande variedade de motores instalados de diferentes características, o levantamento por dados de placa se apresenta como uma possível solução para uma primeira análise da situação de planta.

Esse método consiste em adquirir os dados de placa de todos os motores instalados, seja diretamente no campo ou através de dados de arquivo e considerar todos os motores operando em carga nominal.

Dessa maneira, não será possível detectar os casos de superdimensionamento, mas pode-se efetuar uma análise preliminar dos possíveis candidatos à troca por motores de alto rendimento.

A principal característica deste método é que não é necessária a realização de nenhuma medição de campo.

3.5.3 LEVANTAMENTO DETALHADO

O método detalhado é uma combinação aperfeiçoada dos dois casos anteriores, pois há uma preocupação de se analisar todos os motores instalados, tanto no que diz respeito à aquisição dos seus dados de placa, como na realização das medições de campo.

Esse método requer um dispêndio de tempo maior, sendo os resultados os mais precisos possíveis. Este tipo de levantamento será o adotado na metodologia desenvolvida nesta dissertação que prima pela qualidade dos resultados encontrados aliados à praticidade.

3.6 DADOS RELEVANTES A SEREM LEVANTADOS

3.6.1 HORAS DE FUNCIONAMENTO

A viabilidade de uma medida de eficiência energética em motores é diretamente influenciada pelo seu regime de funcionamento. Em outras palavras, quando maior for o tempo de funcionamento de um motor, melhores as possibilidades de eficiência energética, pois o consumo

de energia elétrica será maior e qualquer redução percentual será mais significativa. Esta característica leva a uma necessidade de conhecer o tempo de operação de cada motor.

Para levantar o número de horas de funcionamento de cada motor há algumas alternativas, como por meio de informações do pessoal de operação e manutenção e monitoramento dos motores ou da produção.

3.6.2 DADOS DO FABRICANTE

A norma NBR 7094 [26] define que todo motor de indução deve conter informações relativas às suas características de operação e de fabricação.

Para os motores de indução trifásicos de gaiola, as seguintes informações devem constar na sua marcação ou placa (em ordem crescente de prioridade):

- Nome e/ou marca do fabricante;
 - Modelo;
 - Carcaça;
 - Grau de proteção (IPXX);
 - Classificação térmica do isolamento;
 - Potência nominal;
 - Tensões nominais;
 - Correntes nominais;
 - Velocidade de rotação nominal;
 - Fator de potência nominal;
 - Rendimento nominal;
 - Categoria;
 - Corrente de partida;
 - Fator de serviço;
 - Número de série e/ou código de data de fabricação;
-

- Denominação principal (motor de indução de gaiola ou de anéis);
- Número de fases;
- Número da norma (NBR7094);
- Regime tipo de motor;
- Frequência nominal;
- Diagrama de ligações;
- Temperatura ambiente máxima;
- Massa total;
- Número de rolamentos.

No caso dos motores antigos e/ou sujeitos às normas americanas (NEMA), alguns desses dados podem não aparecer na placa de identificação, ou aparecer de outra forma, ou ainda surgir outro dado que não mantém relação com os dados normalizados pela NBR 7094.

Nos catálogos é possível obter mais informações, tais como corrente a vazio, conjugado de partida e máximo, dentre outras.

3.6.3 MEDIÇÕES ELÉTRICAS E MECÂNICAS

Essa etapa do trabalho é fundamental, pois é a partir das medições elétricas e mecânicas que todas as decisões serão tomadas. Tais medidas caracterizam qual é a condição de operação dos equipamentos.

3.6.4 DIAGNÓSTICO E CONCLUSÕES

Depois de concluída a parte de coleta dos dados, inicia-se o diagnóstico energético em si. No caso específico do superdimensionamento, para que ele seja eliminado, precisa primeiro ser detectado.

Para o diagnóstico em si, é necessário determinar se o nível de carregamento do motor é satisfatório ou não. Como parâmetro de comparação considera-se que se o valor estiver abaixo de

75%, provavelmente o motor apresenta sinais de superdimensionamento. Nos casos em que o carregamento estiver abaixo de 50%, deverá então ser aprofundada a possibilidade da sua imediata substituição por outro de capacidade compatível com a carga acionada e capaz de atender as condições de partida da mesma.

3.7 MÉTODOS PROCEL

3.7.1 PROGRAMA COMPUTACIONAL BDMotor

O Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (Cepel) desenvolveu um programa computacional, chamado BDMotor, o qual é capaz de efetuar diversas simulações necessárias para a determinação dos ganhos energéticos nos motores elétricos.

Por meio deste programa podem ser simulados os carregamentos dos motores, os ganhos na substituição por motores melhores dimensionados, as vantagens com o uso de motores de alto rendimento, além de fornecer dados sobre o que fazer quando da queima de um motor em uso.

O BDMotor apresenta um banco de dados extenso, com os dados de catálogo dos principais fabricantes de motores do Brasil. Os resultados de obtenção do carregamento do motor, em geral possuem boa precisão, no entanto, os resultados de rendimento encontrados por meio deste software apresentam algumas deficiências como, por exemplo:

- Rendimento impreciso em diversas potências e pontos de carga, o que compromete a aquisição do consumo de energia e posteriores cálculos incluídos na análise econômica;

A Figura 3.3 apresenta a tela de comparação do BDMotor com alguns pontos percentuais de carga simulados, observa-se que o motor em análise é referenciado como o “Motor 2337 – WEG” no banco de dados do BDMotor e encontra-se em destaque do lado esquerdo da tela capturada destacada com um retângulo vermelho. Como o software desenvolvido pela Cepel não apresenta a opção de gerar a curva do rendimento diretamente, foram simulados pontos de carga para obtenção do rendimento, pois esta foi a forma possível de se obter os dados necessários para se ter o traçado da curva do rendimento utilizando o BDMotor.

Motor	Potência (cv)	Carga (%)	Rendimento (%)	Perda Rend. (%)	Total Horas (Ano)	Preço (R\$)	Desconto (%)	Tarifa média de energia (R\$/kWh)
Motor 2337 - WEG	500	20	66,1	0			0	0,345
Motor 2552 - WEG	500	20	66,2				0	
Motor 2337 - WEG	500	25	82,6	0			0	0,345
Motor 2552 - WEG	500	25	82,7				0	
Motor 2337 - WEG	500	30	84,9	0			0	0,345
Motor 2552 - WEG	500	30	85,				0	
Motor 2337 - WEG	500	35	87,1	0			0	0,345
Motor 2552 - WEG	500	35	87,2				0	

Figura 3.3 – Telas capturadas do BDMotor simulando o rendimento para variados percentuais de carregamento.

A Figura 3.4 mostrada em seguida possui duas curvas distintas levantadas para um motor WEG da linha padrão, modelo W21 e de potência 500 hp. De vermelho é apresentada a curva do fabricante, que será considerada como a referência e a curva de azul é obtida com os resultados do BDMotor, sendo os pontos de rendimento foram adquiridos ao se impor diversos pontos de carga de 0 até 100% com variação de 5%.

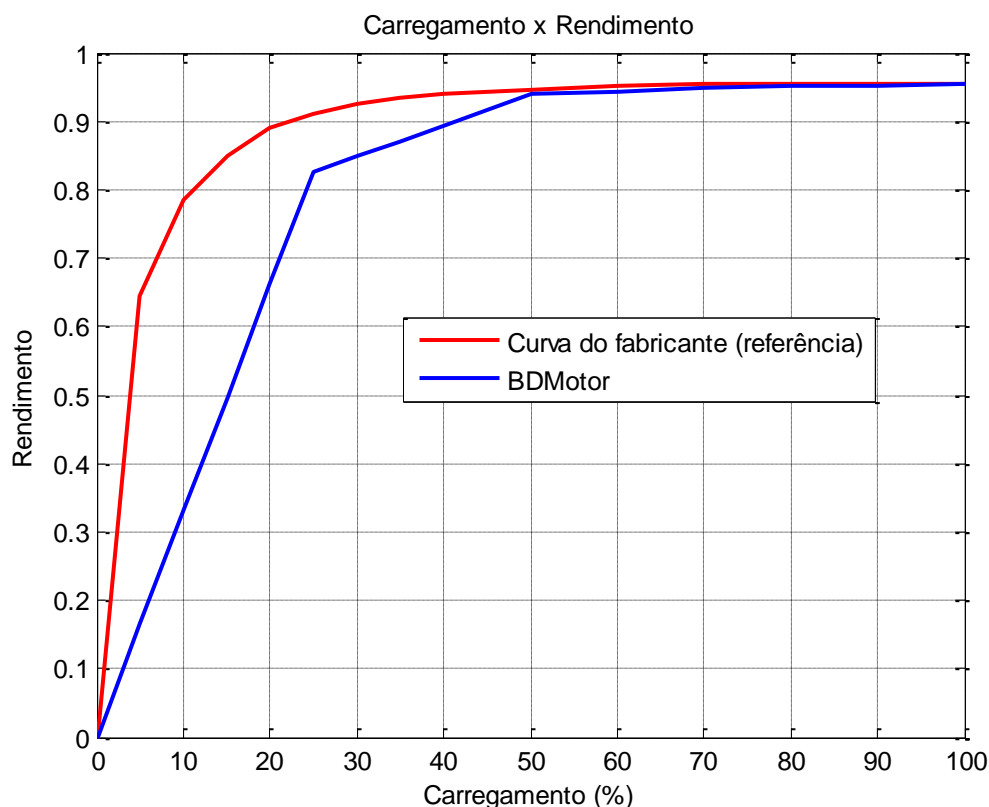


Figura 3.4 – Comparação entre as curvas de rendimento do fabricante (vermelho) e do BDMotor (azul).

O erro percentual máximo obtido para o exemplo mostrado foi de 74,4%, o que se considera um erro alto e que comprometeria os resultados de uma análise econômica. Observa-se que este erro se manteve na mesma faixa para outros motores simulados no BDMotor.

Portanto, o BDMotor é útil no sentido de se detectar o carregamento, mas deve-se atentar para as imprecisões do método implementado no programa que gera rendimentos com erro alto, principalmente abaixo de 50% de carregamento.

3.7.2 COMPARAÇÃO DIRETA COM DADOS DOS FABRICANTES

Será exposta neste subitem uma rotina para detecção do superdimensionamento que é de autoria do PROCEL e pode ser encontrada na referência [25].

Para o procedimento, é necessário pelo menos um desses instrumentos de medição:

- Alicates amperímetro – para medição de corrente elétrica do motor;
- Wattímetro – para a medição da potência elétrica consumida pelo motor;
- Tacômetro – para a medição da velocidade de rotação do motor.

O instrumento mais comum disponível para a equipe de manutenção é o alicate amperímetro. Este deve ser de boa qualidade e precisa ser periodicamente calibrado por empresas especializadas. Entretanto, o instrumento mais indicado para essa análise é o wattímetro, que apesar de mais caro e complexo, leva a resultados finais do superdimensionamento mais precisos e confiáveis.

No caso com o alicate amperímetro, deve ser seguida a seguinte rotina:

- O motor deve estar operando numa situação de maior carga;
- Devem ser medidas as correntes das três fases;
- Toma-se, para efeito de análise, a média aritmética simples dos três valores como o valor da corrente média;
- Caso as três correntes apresentem valores muito diferentes, isto pode indicar outro tipo de problema no motor, como por exemplo, um curto-circuito numa das fases;
- O valor médio encontrado deve então ser marcado no gráfico com as curvas características do motor em análise. Essas curvas são disponibilizadas pelos fabricantes dos motores;
- Determina-se graficamente o nível de carregamento do motor.

3.7.2.1 EXEMPLO DE APLICAÇÃO

A fim de ilustrar o procedimento citado, uma análise será realizada para um suposto motor de indução trifásico da marca WEG, modelo W22 Plus, que se encontra em funcionamento com as características apresentadas na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Dados de catálogo para o motor em análise.

Potência	100 cv
Número de pólos	4
Velocidade nominal	1775
Tensão	220/380 V
Corrente Nominal	240/139 A
Tempo de funcionamento por ano	6000 horas/ano

O objetivo é determinar se este motor está operando ou não em condições adequadas e favoráveis de funcionamento. Caso não esteja, deve-se indicar qual seria o motor mais adequado para substituí-lo.

1º Etapa

O motor deve ser colocado em funcionamento num regime de maior carregamento possível.

2º Etapa

Foram medidas as correntes nas três fases.

$$I_a = 121 \text{ A}$$

$$I_b = 120 \text{ A}$$

$$I_c = 119 \text{ A.}$$

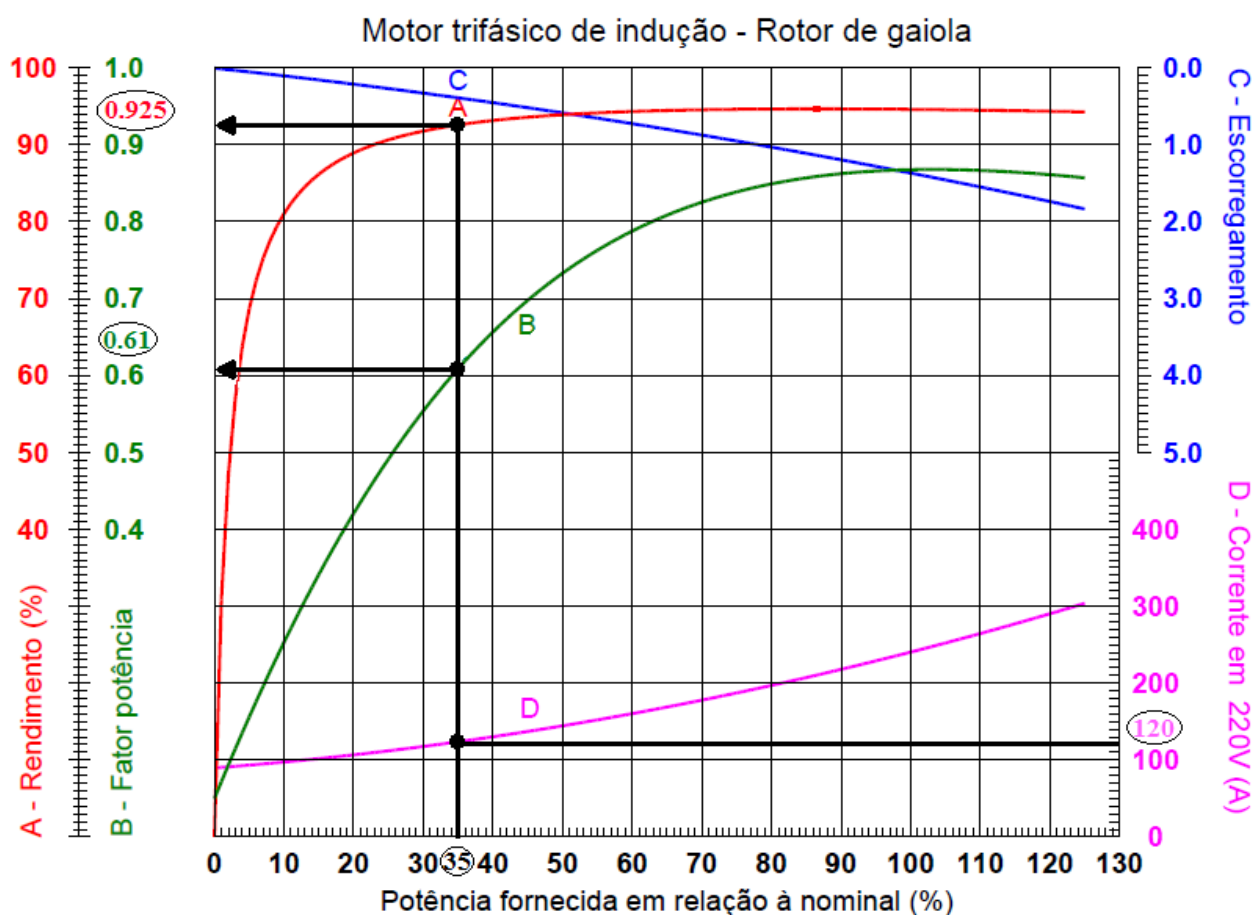
3º Etapa

Nesta etapa calcula-se a média das correntes.

$$I_{méd} = \frac{(I_a + I_b + I_c)}{3} = 120 \text{ A}$$

4º Etapa

A Figura 3.5 apresenta um gráfico com as curvas características do motor em estudo. Este gráfico pode ser obtido junto ao fabricante WEG, o qual disponibiliza as curvas dos motores atualmente comercializados em seu site. Já para motores mais antigos há dificuldade de se obter suas curvas de desempenho, pois estas não mais são divulgadas no site do fabricante.



Fonte: WEG

Figura 3.5 – Curvas características do motor 100 cv.

O valor de corrente média foi introduzido no gráfico do motor, determinando-se então o correspondente carregamento.

5ª Etapa

Marca-se a corrente média no eixo vertical da corrente e uma reta horizontal é traçada até interceptar a curva da corrente. A partir deste ponto, uma reta vertical deve ser feita até o eixo do carregamento. O valor encontrado de 35% é o carregamento atual do motor.

6ª Etapa

A partir deste carregamento eleva-se uma reta vertical interceptando as curvas do fator de potência e rendimento. Os valores encontrados são: fator de potência = 0,61 e rendimento = 92,5%.

7º Etapa

O cálculo da energia consumida por esse motor pode ser conhecido por meio da Equação (3.1).

$$E_{kWh} = \frac{P_n \cdot X \cdot t \cdot 0,736}{\eta_x} \quad (3.1)$$

Onde:

E_{kWh} - energia consumida pelo motor em kWh;

P_n - potência nominal do motor em cv;

X - potência fornecida em relação à nominal em porcentagem;

t - tempo de funcionamento em horas;

η_x - rendimento do motor para o carregamento em questão.

Utilizando os dados apresentados na Tabela 3.1 e as informações retiradas da Figura 3.5 por meio da medição de corrente, obtém-se por meio de (3.1) que:

$$E_{kWh} = \frac{100 \cdot 0,35 \cdot 6000 \cdot 0,736}{0,925} = 167.091,9 \text{ kWh}$$

8º Etapa

Como é possível perceber, o motor de 100 cv está operando com um carregamento de 35%, dentro da faixa crítica de superdimensionamento, abaixo de 50%. Neste caso, a escolha de um motor mais adequado pode ser feita através do cálculo da potência real solicitada pela carga, que é calculada multiplicando-se a potência nominal do motor pelo seu carregamento.

Assim, tem-se que a potência requerida (P_{rq}) é:

$$P_{rq} = 100 \cdot 0,35 = 35 \text{ cv}$$

A partir desse valor, escolhe-se o motor imediatamente superior a este valor que será de 40 cv. Agora, este novo motor de 40 cv acionando uma carga de 35 cv irá trabalhar com um carregamento de 87,5% ($35 \text{ cv}/40 \text{ cv} = 0,875$).

É necessário observar as condições de partida do motor, mas neste exemplo será arbitrado que esta nova potência do motor consegue suprir os requisitos de partida.

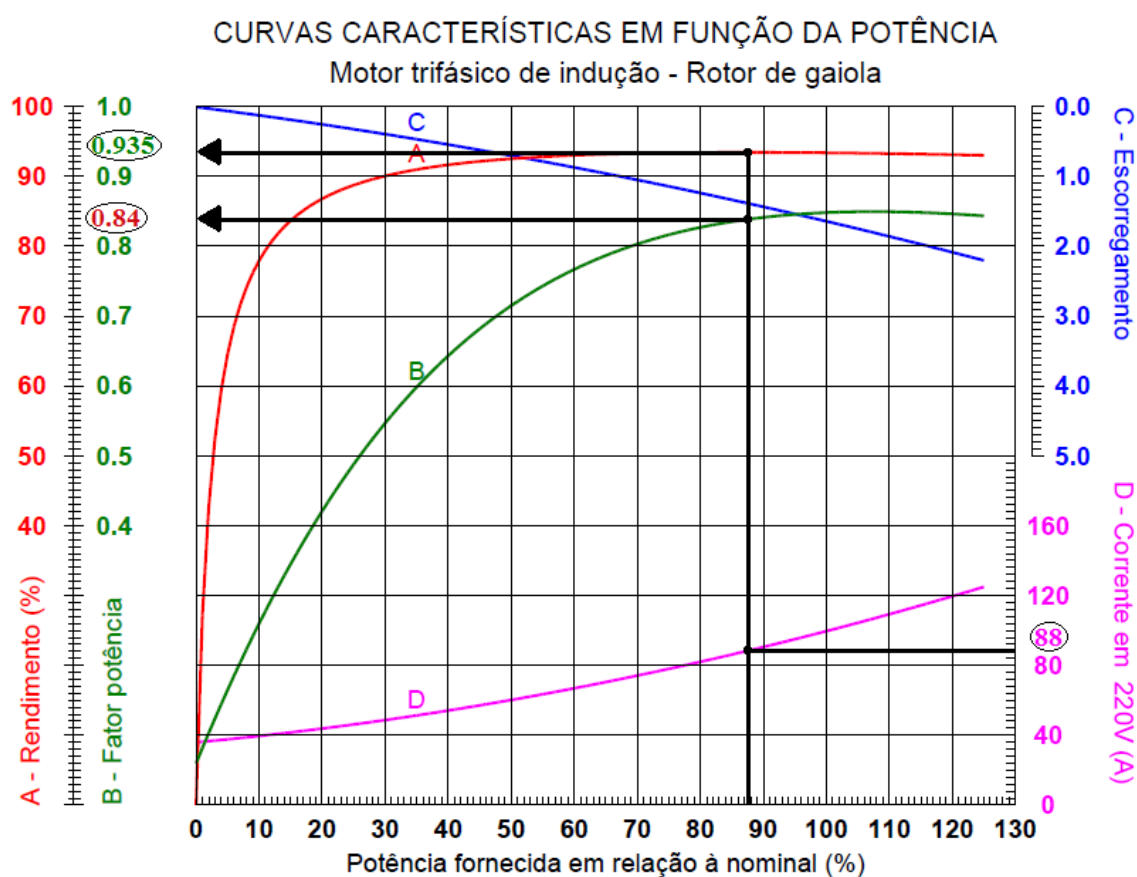
As características do novo motor são apresentadas na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 – Dados de catálogo para o novo motor em análise.

Potência	40 cv
Número de polos	4
Velocidade nominal	1770
Tensão	220/380 V
Corrente Nominal	99,2/57,4 A
Tempo de funcionamento por ano	6000 horas/ano

9ª Etapa

A partir das curvas de desempenho desse novo motor, são repetidas as etapas 5, 6 e 7, só que agora tomando como ponto de partida o carregamento (87,5%), e não mais a corrente medida.



Fonte: WEG

Figura 3.6 – Curvas características do motor 40 cv.

Agora se pode retirar das curvas apresentadas na Figura 3.6 informações como:

- Corrente = 88 A;
- Rendimento = 93,5%;
- Fator de potência = 0,84.

A energia consumida pelo novo motor é então calculada por (3.1).

$$E_{kWh} = \frac{40 \cdot 0,875 \cdot 6000 \cdot 0,736}{0,935} = 165.305,81 \text{ kWh}$$

O que gera uma economia de energia anual de 1.786,08 kWh.

Conforme visto, este procedimento é útil, mas também apresenta algumas desvantagens tais como:

- Arredondamentos dos valores retirados das curvas de desempenho;
- Pouca agilidade, em especial para uma planta industrial que possua muitos motores em funcionamento;
- Dependência da disponibilização das curvas do fabricante, o que pode inviabilizar o processo caso o mesmo não as forneça;
- Muitas curvas fornecidas são curvas médias e não correspondem exatamente ao motor em questão, que pode ter dados de placa divergentes dos dados informados no catálogo para os quais foram levantadas as curvas, mesmo se tratando exatamente do mesmo motor.

3.8 METODOLOGIA DESENVOLVIDA

Levando-se em conta os procedimentos existentes e suas vantagens e desvantagens, procurou-se desenvolver uma metodologia que aliasse as vantagens das já existentes e aprimorasse todo o procedimento de verificação do superdimensionamento buscando praticidade e qualidade nos resultados.

O procedimento de verificação do superdimensionamento, apesar de não ser muito complexo, depende da aquisição das curvas de desempenho do motor de indução. Como dito anteriormente, essas curvas podem ser obtidas diretamente com o fabricante, no entanto, na realidade as mesmas são de difícil acesso e não possuem ampla divulgação. Poucos fabricantes

disponibilizam para os usuários e público em geral as curvas características da corrente, rendimento e fator de potência em função do carregamento do motor.

Apesar de a WEG ser um exemplo de fabricante que divulga em seu site as curvas de desempenho para toda faixa de potência dos motores que produz atualmente, quando um motor deixa de ser fabricado por ela, suas respectivas curvas características também deixam de ser disponibilizadas. Isso faz com que os motores mais antigos não possam ser estudados pelo método PROCEL.

Dessa forma conclui-se que depender dos fabricantes de motores para verificar o superdimensionamento não é viável e pode impedir toda uma análise de verificação das condições de funcionamento dos motores utilizados numa planta industrial.

Sendo assim, surge a necessidade de se desenvolver uma maneira de levantar as curvas necessárias para a análise do superdimensionamento, e dessa forma, facilitar e dinamizar o diagnóstico das condições de funcionamento do motor de indução trifásico.

A metodologia proposta requer:

- Informações de placa e de catálogo do motor que se deseja analisar;
- Valores encontrados por meio de medições;
- Algumas estimativas para alguns parâmetros necessários para os cálculos.

3.8.1 DADOS DE PLACA DO MOTOR

Na placa do motor de indução são encontradas informações sobre o equipamento. A Tabela 3.3 mostra os dados geralmente disponíveis em catálogos de fabricantes e que necessitam ser coletados.

Tabela 3.3 – Dados disponíveis em catálogos de fabricantes de motores.

Grandeza	Símbolo	Unidade
Potência nominal	P_n	W
Velocidade nominal	ω_n	rpm
Tensão nominal	U_n	V
Corrente nominal	I_n	A
Velocidade síncrona	ω_s	rpm
Frequência nominal	f_n	Hz
Fator de potência nominal	fp_n	-
Fator de potência 75%	fp_{75}	-
Fator de potência 50%	fp_{50}	-
Rendimento nominal	η_n	-
Rendimento 75%	η_{75}	-
Rendimento 50%	η_{50}	-
Conjugado nominal	M_n	N.m
Conjugado máximo	M_k	p.u. de M_n

3.8.2 DADOS ESTIMADOS

As curvas características dos motores de indução, em especial a curva de rendimento em função do carregamento, apresentam uma característica de declive mais acentuado abaixo de 50% de carregamento, não tendo um comportamento similar aos pontos acima deste valor que se comportam semelhantemente a uma reta. Tal propriedade dificulta a obtenção de uma equação geral que descreva fielmente o comportamento da curva do rendimento, a qual será o foco deste trabalho.

Devido a isso, e tendo o intuito de se obter resultados mais refinados, é proposto utilizar como dados de entrada na execução da metodologia proposta mais um ponto para o rendimento e fator de potência, além dos três encontrados na placa do motor (50%, 75% e 100%). O quarto ponto escolhido é a 0% de carregamento por questões de conveniência. Será necessário, portanto, realizar estimativas para o fator de potência e corrente a vazio.

3.8.2.1 CORRENTE A VAZIO

A corrente a vazio é comumente encontrada na literatura como uma porcentagem da corrente nominal, em torno de 30%. No entanto, foi verificado analisando-se motores com potências

entre 1 cv a 500 cv, que há certa flutuação em torno desse valor para cada potência de motor. Sendo assim, essa estimativa não será adotada no presente trabalho a fim de não prejudicar a qualidade dos resultados adquiridos. Propõe-se, portanto, a obtenção da corrente a vazio do motor em estudo de duas formas possíveis:

1º Alguns fabricantes disponibilizam o valor da corrente a vazio no catálogo do equipamento, é o caso, por exemplo, da WEG.

2º No caso da primeira forma não estar disponível ou ser de difícil acesso, a Tabela 3.4 pode ser usada de referência para se estimar a corrente a vazio, de forma mais precisa do que simplesmente utilizar a porcentagem de 30% sem se considerar a potência do motor em estudo. A tabela foi elaborada a partir de dados de um fabricante de motores (WEG), mas pode ser utilizada para outros fabricantes sem que os resultados encontrados sejam muito desviados do valor real. Convém fazer uso da porcentagem da corrente a vazio em relação à nominal para uma dada potência de motor de outros fabricantes. Para obter a corrente a vazio é necessário apenas multiplicar a porcentagem encontrada na tabela pela corrente nominal do motor em análise.

Tabela 3.4 – Porcentagem de referência para obtenção da corrente a vazio.

Potência	Corrente Nominal (I_n)	Corrente a Vazio (I_o)	Porcentagem (I_o/I_n)
1	3,00	1,90	0,63
5	14,13	6,80	0,48
10	26,50	14,00	0,53
15	39,93	17,00	0,43
20	52,30	21,00	0,40
25	64,80	26,00	0,40
30	76,75	30,00	0,39
40	100,36	36,00	0,36
50	123,05	42,00	0,34
60	145,02	52,00	0,36
75	179,22	54,00	0,30
100	240,67	80,00	0,33
125	303,36	106,00	0,35
150	358,71	110,00	0,31
175	422,91	125,00	0,30
200	481,28	160,00	0,33
250	601,60	200,00	0,33
300	710,61	216,00	0,30
350	828,18	240,00	0,29
400	933,77	224,00	0,24
450	1049,39	280,00	0,27
500	1165,99	300,00	0,26

Foram desenvolvidas duas opções para avaliação do carregamento, fator de potência e rendimento do motor de acordo com suas condições de operação. A partir desses resultados será possível verificar se o motor se encontra em boas condições de funcionamento ou se será necessário propor alguma modificação.

3.8.2.2 FATOR DE POTÊNCIA A VAZIO

Dentre as diversas metodologias existentes para a obtenção de parâmetros do circuito equivalente de motores de indução trifásicos, optou-se por descrever a apresentada em [29] por ser bastante intuitiva e ter apresentado bons resultados em testes.

A metodologia adotada determina os parâmetros constantes do circuito equivalente do motor, para isso, duas hipóteses devem ser formuladas:

1) Na faixa de operação entre a velocidade em vazio (próxima da síncrona) e a velocidade correspondente ao conjugado máximo, os valores de R_2 e X_2 permanecem constantes e iguais a R_{2n} e X_{2np} respectivamente. Esta hipótese é perfeitamente aceitável, uma vez que os motores de indução trifásicos com rotor do tipo gaiola de esquilo, usualmente apresentam uma variação muito pequena de escorregamento entre o escorregamento para conjugado máximo e o escorregamento nulo.

2) Com o rotor travado existe uma relação definida entre os valores de reatância de dispersão do estator (X_1) e do rotor (X_{2p}) [29].

O escorregamento s_k correspondente ao conjugado máximo M_k pode ser calculado a partir de dados de catálogos com auxílio da equação de Kloos [29].

O valor de s_k , para máquina operando como motor é obtido então a partir de dados apresentados em catálogos de fabricantes mostrados na Tabela 3.1, por meio da Equação (3.2).

$$s_k = s_n \cdot \left(\overline{M}_k + \sqrt{\overline{M}_k^2 - 1} \right) \quad (3.2)$$

Onde:

$$\overline{M}_k = \frac{M_k}{M_n} \quad (3.3)$$

O circuito equivalente do motor de indução trifásico é o apresentado na Figura 3.7. Observe-se que esta é uma representação para cada fase do motor.

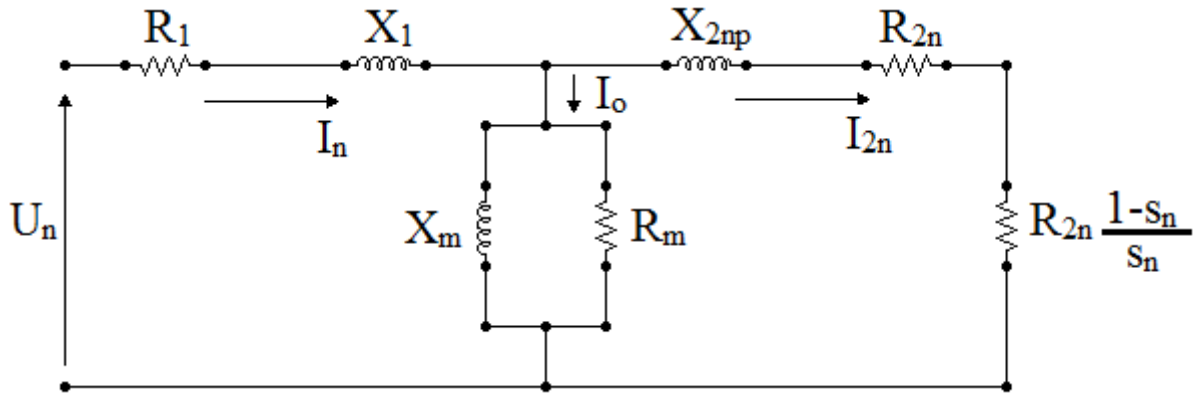


Figura 3.7 – Circuito equivalente do motor de indução trifásico para operação nominal [30].

Utilizando o circuito equivalente válido para o funcionamento em condições nominais de operação, é deduzida a equação final (3.4) a ser usada para o cálculo da resistência R_{2n} , a qual pode ser encontrada deduzida em [29].

$$R_{2n} = \left(\frac{s_n}{1-s_n} \right) \cdot \left(\frac{P_n}{3 \cdot I_{2n}^2} \right) \quad (3.4)$$

Já a corrente do circuito do rotor pode ser conhecida por meio da Equação (3.5) [29].

$$I_{2n} = I_n \cdot fp_n \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{s_n}{s_k} \right)^2} \quad (3.5)$$

A determinação da resistência do enrolamento do estator R_l é feita a partir da consideração de que para o escorregamento s_k , correspondente ao conjugado máximo M_k , a corrente de magnetização é ainda muito pequena quando comparada com a corrente do enrolamento do rotor [31], podendo então ser desprezada. Com essa simplificação, o circuito equivalente ilustrado na figura anterior, para esta condição, ficará reduzido ao indicado na Figura 3.8.

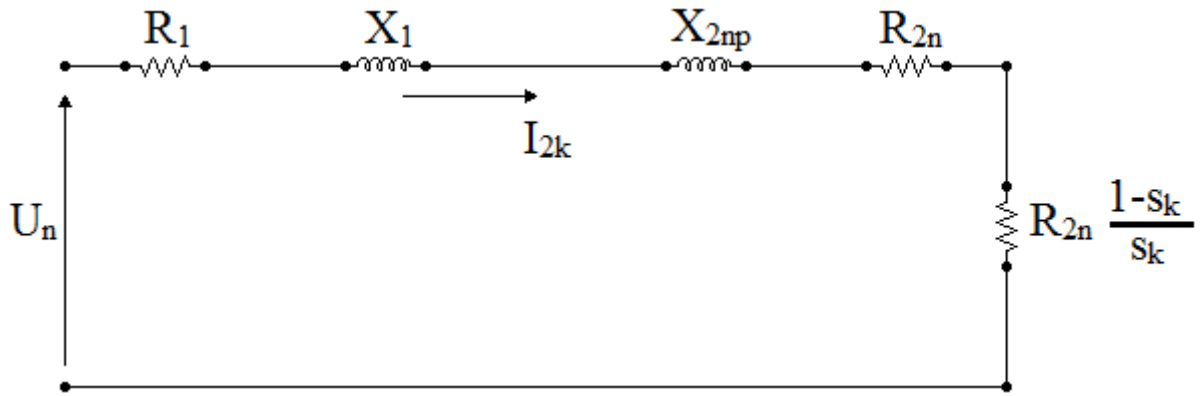


Figura 3.8 – Circuito equivalente válido para o escorregamento s_k correspondente ao conjugado máximo M_k [29].

Partindo do circuito da Figura 3.8, é obtida a expressão para cálculo da resistência do estator apresentada na Equação (3.6).

$$R_1 = \sqrt{\frac{180 \cdot R_{2n} \cdot U_n^2}{2 \cdot \pi \cdot s_k \cdot \omega_s \cdot M_k \cdot M_n} - \left(\frac{R_{2n}}{s_k}\right)^2} - \frac{R_{2n}}{s_k} \quad (3.6)$$

As perdas totais nominais de um motor podem ser definidas pela Equação (3.7).

$$\sum P_m = P_n \cdot \left(\frac{1}{\eta_n} - 1 \right) \quad (3.7)$$

Onde:

$\sum P_m$ - perdas totais nominais do motor (W);

P_n - potência nominal do motor (W);

η_n - rendimento nominal do motor.

As perdas do motor podem ser distribuídas em três parcelas mais significativas:

- Perdas no enrolamento do estator;
- Perdas no enrolamento do rotor;
- Perdas a vazio.

O objetivo desta etapa do trabalho é determinar as perdas a vazio para, enfim ser encontrado o fator de potência a vazio.

As perdas a vazio caracterizam-se por praticamente independem da carga e da velocidade do motor; já as perdas nos enrolamentos do estator e do rotor dependem principalmente da carga acionada pelo motor.

Definindo um fator K como sendo a relação entre as perdas nos enrolamentos do estator e do rotor e as perdas totais para condição nominal de operação, as perdas a vazio W_o serão determinadas pela Equação (3.8).

$$W_o = (1 - K) \cdot \left(\frac{1}{\eta_n} - 1 \right) \cdot P_n \quad (3.8)$$

O valor de K pode ser conhecido aplicando-se da Equação (3.9).

$$K = \frac{P_{j1} + P_{j2}}{P_n \cdot \left(\frac{1}{\eta_n} - 1 \right)} \quad (3.9)$$

Onde:

P_{j1} - perdas no enrolamento no estator (W);

P_{j2} - perdas no enrolamento do rotor (W).

Sabe-se ainda que as perdas nos enrolamentos do estator e do rotor são obtidas por meio de (3.10) e (3.11) respectivamente.

$$P_{j1} = 3 \cdot R_1 \cdot I_n^2 \quad (3.10)$$

$$P_{j2} = 3 \cdot R_{2n} \cdot I_{2n}^2 \quad (3.11)$$

O total de perdas no motor em vazio é dado pela potência de entrada calculada pela Equação (3.12)

$$P_o = \sqrt{3} \cdot V_n \cdot I_o \cdot \text{fp}_o \quad (3.12)$$

A diferença entre a potência de entrada e as perdas no estator devido à passagem da corrente a vazio, resulta nas perdas em vazio, que se tratam da soma das perdas por atrito e ventilação (mecânicas) e no núcleo (histerese e Foucault).

Portanto, a perda a vazio pode ser obtida pela Equação (3.13).

$$P_o = W_o + P_{ojl} = W_o + 3 \cdot R_1 \cdot I_o^2 \quad (3.13)$$

Dessa forma é possível encontrar o valor do fator de potência a vazio (fp_o) mostrado na Equação (3.14), isolando-o na Equação (3.12) e substituindo (3.13) na mesma.

$$fp_o = \frac{W_o + 3 \cdot R_1 \cdot I_o^2}{\sqrt{3} \cdot V_n \cdot I_o} \quad (3.14)$$

3.8.2.3 RENDIMENTO PARA CARREGAMENTO NULO

Para o rendimento, tem-se que para um carregamento nulo, o rendimento também é nulo.

3.8.3 MÉTODOS DE AVALIAÇÃO

3.8.3.1 AVALIAÇÃO POR MEIO DE MEDIÇÃO DE CORRENTE E TENSÃO

Por esse método, devem ser efetuadas medições de corrente e tensão.

Para efetuar as medições, segue-se a mesma rotina já descrita para o método PROCEL. Ou seja:

- O motor deve estar operando numa situação de maior carga;
 - Devem ser medidas as correntes das três fases;
 - Toma-se, para efeito de análise, a média aritmética simples dos três valores como o valor da corrente média;
 - É conveniente também medir as tensões entre as três fases e fazer-se a média entre as mesmas.
-

3.8.3.2 AVALIAÇÃO POR MEIO DE MEDIÇÃO DE POTÊNCIA ELÉTRICA

Para este procedimento, é requerida que seja feita a medição da potência elétrica consumida pelo motor. Esta pode ser realizada com o uso de um wattímetro, um instrumento mais caro e complexo que o alicate amperímetro.

Neste método, é preciso ter-se o valor da potência elétrica a vazio, que corresponde às perdas com rotor livre. Esta informação pode ser adquirida fazendo-se o ensaio a vazio do motor, porém, seria uma maneira trabalhosa de se obter tal parâmetro. Para tornar o procedimento mais dinâmico, as perdas à vazio serão calculadas segundo a Equação (3.12).

Observa-se que o valor de P_o depende de outros dados já definidos, tornando assim, o cálculo possível.

Tendo posse dos dados iniciais explicitados neste item, de acordo com o meio de avaliação desejado (medição de corrente e tensão ou potência) é proposto utilizar recursos da matemática computacional na efetivação dos cálculos que virão adiante.

3.8.4 MÉTODO COMPUTACIONAL

Em diversas áreas do conhecimento, frequentemente se torna necessário descrever os dados obtidos experimentalmente oriundos de um experimento ou fenômeno físico. Essas informações podem ser tomadas como coordenadas de pontos que definem uma função analítica $f(x)$. Na interpolação, parte-se do pressuposto de que os dados estejam corretos e procura-se alguma maneira de descrever o que acontece entre os pontos dados.

A interpolação é uma ferramenta valiosa quando não se pode calcular rapidamente a função nos pontos intermediários desejados. Por exemplo, isto ocorre quando os pontos de dados resultam de medições experimentais ou de procedimentos computacionais demorados.

Diante do cenário de se ter apenas quatro pontos distintos pertencentes a uma curva, a qual apresenta equação geral desconhecida e de difícil obtenção, optou-se por utilizar dois métodos de interpolação, que geraram os resultados desejados com boa precisão. Em algumas situações a interpolação linear foi mais adequada, já em outras a interpolação por *spline* cúbica obteve resultados mais precisos.

3.8.4.1 INTERPOLAÇÃO LINEAR

A interpolação linear utiliza a reta que passa por dois pontos conhecidos para estimar um terceiro ponto desconhecido ao considerar que os valores intermediários caem em uma linha reta entre os pontos definidos. Neste método se torna claro que, na medida em que se têm mais pontos de dados e a distância entre eles diminui, a interpolação linear se torna mais precisa.

3.8.4.2 *SPLINE* CÚBICA

Uma *spline* cúbica é uma curva suave construída passando através de um conjunto de pontos. A curva entre cada par de pontos é determinada por um polinômio do terceiro grau, que é calculado para fornecer uma curva entre os pontos ao invés de ligá-los em linha reta simplesmente.

As *splines* se tornam excelentes curvas interpoladoras, devido ao fato de serem bastante suaves e, além disso, bastante viáveis computacionalmente por não exigirem a resolução de sistemas lineares muito grandes e também por evitar certas oscilações indesejadas, que é o que ocorre quando se utilizam polinômios de graus maiores para efetuar a interpolação.

Os resultados obtidos podem ser utilizados para interpolação de qualquer conjunto de pontos no plano obtidos experimentalmente.

Na Figura 3.9 pode-se observar o traçado típico das curvas encontradas interpolando-se alguns pontos por interpolação linear (vermelho) e *spline* cúbica (azul). Entre um ponto e seu seguinte, a curva é definida pela função característica do tipo específico da interpolação que está sendo imposta.

A fim de avaliar qual opção de interpolação é mais adequada deve-se analisar a forma original da curva que se almeja traçar para, enfim, decidir pela alternativa que gera uma curva mais semelhante à original.

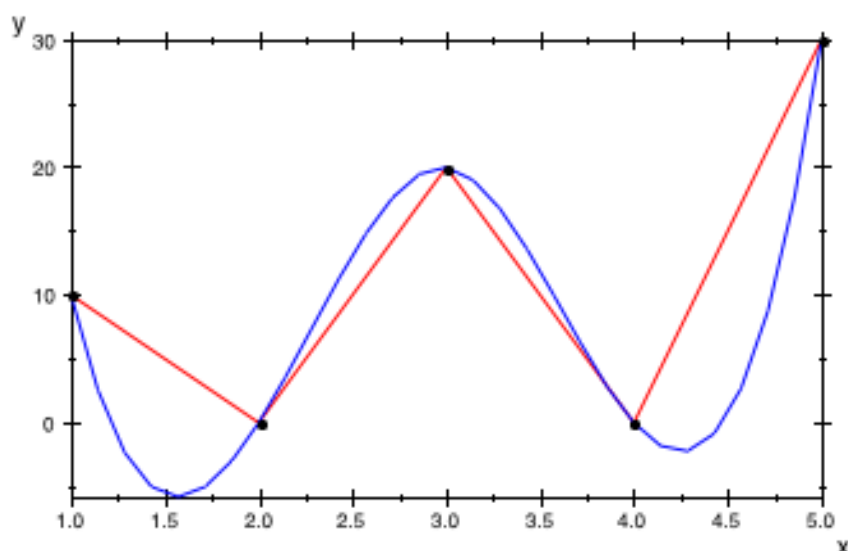


Figura 3.9 – Comparação entre interpolação linear (vermelho) e por *spline* cúbica (azul).

3.8.5 PROCEDIMENTO DE CÁLCULO

3.8.5.1 MÉTODO DA CORRENTE E TENSÃO (MCT)

Na medição por corrente, mede-se a corrente e tensão em uma das fases ou, preferencialmente, tira-se a média das três fases. Calcula-se, então as correntes elétricas para 3 pontos: a 50, 75 e 100% de carga nominal utilizando a expressão (3.15).

$$I_x = \frac{P_{hp} \cdot 746 \cdot X}{\sqrt{3} \cdot V_n \cdot fp_x \cdot \eta_x} \quad (3.15)$$

Onde:

X – carregamento;

P_{hp} – potência mecânica do motor em hp;

V_n – Tensão nominal de placa em Volts;

fp_x – Fator de potência;

η_x – Rendimento;

I – Corrente elétrica em Ampères.

O quarto ponto para a corrente é obtido para carregamento de 0%, ou seja, utilizando-se a corrente a vazio I_o .

Estes pontos fazem parte de uma curva em função do carregamento do motor, a qual tem dependência direta com a tensão de funcionamento, ou seja, a tensão medida. Caso a tensão medida apresente uma diferença considerável em relação à tensão nominal, será necessário realizar um ajuste para os pontos de corrente coletados anteriormente. Para adaptar os dados retirados do fabricante (que considera uma tensão de referência fixa, por exemplo: 220V ou 380V) para outra tensão de funcionamento, calcula-se primeiramente a relação entre a tensão nominal e a tensão medida, conforme a Equação (3.16)

$$k = \frac{V_n}{V_{med}} \quad (3.16)$$

Em seguida, multiplica-se o valor de k encontrado por todos os dados iniciais de corrente I , obtendo dessa forma, novos valores constituintes do vetor I . Com esta adaptação dos dados iniciais de corrente, será possível comparar o valor medido da corrente com a real curva de desempenho para o motor em estudo.

Sendo assim, tem-se fator de potência, rendimento, carregamento e corrente elétrica, cada um com 4 pontos conhecidos.

A partir disso, a seguinte sequência de procedimentos é realizada:

1) Avaliação do carregamento

Neste item, faz-se uso do método de interpolação por *spline* cúbica, onde os pontos conhecidos utilizados são os quatro da corrente elétrica I e os do carregamento X . Para se obter o respectivo carregamento para o motor em avaliação, entra-se com o valor da corrente medida. Dessa forma obtém-se o carregamento do motor de indução trifásico em funcionamento. Utilizando o software matemático *Matlab*, o comando que executa a função da *spline* cúbica deve ser utilizado da seguinte forma:

$$carregamento = spline(I, X, I_{med});$$

2) Avaliação do fator de potência

Conhecendo-se o carregamento, a avaliação do fator de potência é feita também por *spline* cúbica. Dessa forma, devem ser inseridos os quatro valores conhecidos do carregamento X e do fator de potência fp . Para saber o fator de potência do motor em funcionamento, utiliza-se o valor

do carregamento obtido no primeiro item. Assim é encontrado o fator de potência para o respectivo carregamento informado. O comando em *Matlab* é estruturado da seguinte forma:

$$fp_x = spline(X, FP, carregamento);$$

3) Avaliação do rendimento

Diante das características da curva de rendimento abaixo do ponto de meia carga e de não se ter mais pontos conhecidos, optou-se por calcular o rendimento utilizando a Equação (3.17) ao invés de aplicar interpolação ou tentar obter uma equação geral.

$$\eta_x = \frac{X \cdot P_{hp} \cdot 746}{\sqrt{3} \cdot V_{med} \cdot I_{med} \cdot fp_x} \quad (3.17)$$

Nota-se que todas variáveis das quais depende o cálculo do rendimento já são conhecidas neste ponto, tornando possível o conhecimento do rendimento para um carregamento específico.

3.8.5.2 MÉTODO DA POTÊNCIA (MP)

Este método apresenta resultados um pouco mais precisos do que o da medição da corrente e tensão, como será possível notar no decorrer deste capítulo.

Deseja-se ter conhecidas as potências elétricas para quatro pontos inicialmente. Para tal, utiliza-se a seguinte equação em 50, 75 e 100% de carga nominal.

$$P_{el} = \frac{X \cdot P_{hp} \cdot 746}{\eta_x} \quad (3.18)$$

O quarto elemento da potência elétrica está situado a 0% de carregamento e pode ser obtido com a Equação (3.12) supracitada.

Com um wattímetro alicate, mede-se a potência em uma fase (a potência do motor será o triplo da lida), ou mede-se a potência nas três fases, somando-as. Pode-se também usar o método dos dois wattímetros, medindo-se, primeiro, a potência com a corrente da fase A, por exemplo, e a tensão entre as fases A e B, somando-se a potência lida com a potência obtida da medição da corrente na fase C e a tensão entre as fases B e C. Quando se usa um analisador de grandezas elétricas, que possui três alicates amperímetros e mede as tensões nas três fases simultaneamente, a potência total é precisamente medida a cada instante.

Tendo-se o valor da potência elétrica consumida pelo motor, os demais parâmetros necessários para descrever o atual funcionamento do equipamento em uso podem ser conhecidos seguindo-se a seguinte sequência de ações.

1) Avaliação do fator de potência

O fator de potência relacionado com a porcentagem de carga nominal do motor pode ser encontrado por meio de interpolação por *spline* cúbica, sendo os dados de entrada utilizados nesse caso os quatro pontos da potência elétrica e do fator de potência. Dessa maneira, é obtida para uma potência elétrica medida o seu correspondente fator de potência:

$$fp_x = spline(P_{el}, FP, P_{med});$$

2) Avaliação do carregamento

A fim de se obter o carregamento do motor de indução em questão, utiliza-se o método de interpolação linear. A interpolação é realizada entre os pontos conhecidos de potência elétrica e carregamento. Para se obter o carregamento relacionado com a potência elétrica medida, o valor desta deve ser inserido no processo.

Observa-se que para o cálculo do carregamento, deve ser feita a correção do fator de potência a vazio substituindo o valor estimado anteriormente pelo valor obtido no item sobre a avaliação do fator de potência. Com isso, os resultados obtidos são refinados, já que uma pequena diferença do fator de potência estimado com o real já gera um erro mais visível nos resultados da curva de rendimento. Após efetuar tal correção, aplica-se a interpolação que no Matlab pode ser feito por meio do seguinte comando:

$$Carregamento = interp1(P_{el}, X, P_{med}, 'linear');$$

3) Avaliação do rendimento

Enfim, o rendimento pode ser conhecido com a Equação (3.19).

$$\eta_x = \frac{X \cdot P_{hp} \cdot 746}{P_{med}} \quad (3.19)$$

3.8.5.3 LEVANTAMENTO DAS CURVAS CARACTERÍSTICAS

Como subproduto dos métodos desenvolvidos, é apresentado agora um procedimento tão-somente para levantamento das curvas características dos motores. Ou seja, para este procedimento não é necessário entrar com medições, já que ele não encontra as condições de funcionamento do motor, apenas levanta suas curvas de desempenho. Para tal, deve-se variar o carregamento de 0 a 100% (quanto mais pontos se utilizar, melhores resultados serão adquiridos) e calcular cada respectivo valor de corrente e fator de potência utilizando interpolação por *spline* cúbica. O comando em Matlab apresenta a seguinte forma:

$$I_x = \text{spline}(X, I, \text{carregamento});$$

$$fp_x = \text{spline}(X, FP, \text{carregamento});$$

Tendo estes parâmetros conhecidos, pode-se agora encontrar o rendimento de cada um dos pontos de carga utilizados inicialmente, por meio de (3.20).

$$\eta_x = \frac{\text{carregamento} \cdot P_{hp} \cdot 746}{\sqrt{3} \cdot V_n \cdot I_x \cdot fp_x} \quad (3.20)$$

Dessa forma, ter-se-ão conhecidos tantos valores de rendimento quanto o número de carregamentos diferentes utilizados inicialmente e, a partir daí, basta interligar os pontos calculados para se ter o traçado das curvas de desempenho desejadas.

3.9 RESULTADOS

Os métodos desenvolvidos foram aplicados a uma ampla faixa de potência de motores (1 cv a 500 cv). O intuito deste item é verificar a fidedignidade dos valores encontrados para corrente elétrica, fator de potência e rendimento em comparação com uma curva de referência, a qual é adquirida diretamente com o fabricante do motor. Pelas dificuldades já citadas anteriormente, serão apresentados apenas comparações para motores WEG, já que os mesmos têm suas curvas de desempenho divulgadas. Exemplos comparativos para os motores de 20 hp, 50 hp, 100 hp, 250 hp e 500 hp, todos da linha padrão W21 podem ser visualizados a seguir nas Figuras 3.10 à 3.29.

3.9.1 RESULTADOS MCT

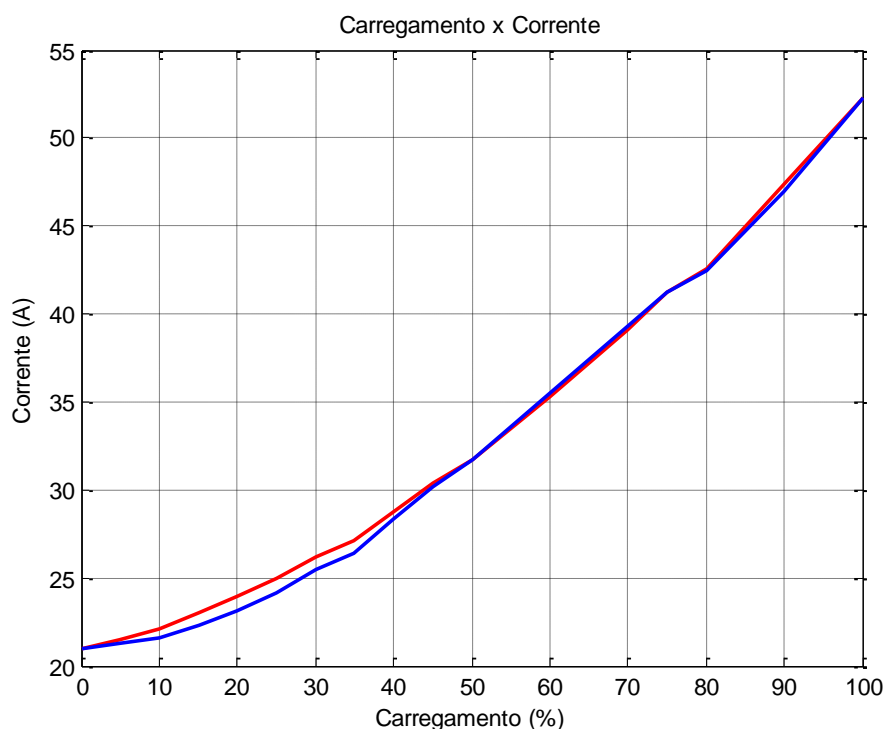


Figura 3.10 – Curvas de corrente versus carregamento pelo método MCT (em azul) e de referência do fabricante (em vermelho) para o motor de 20 hp.

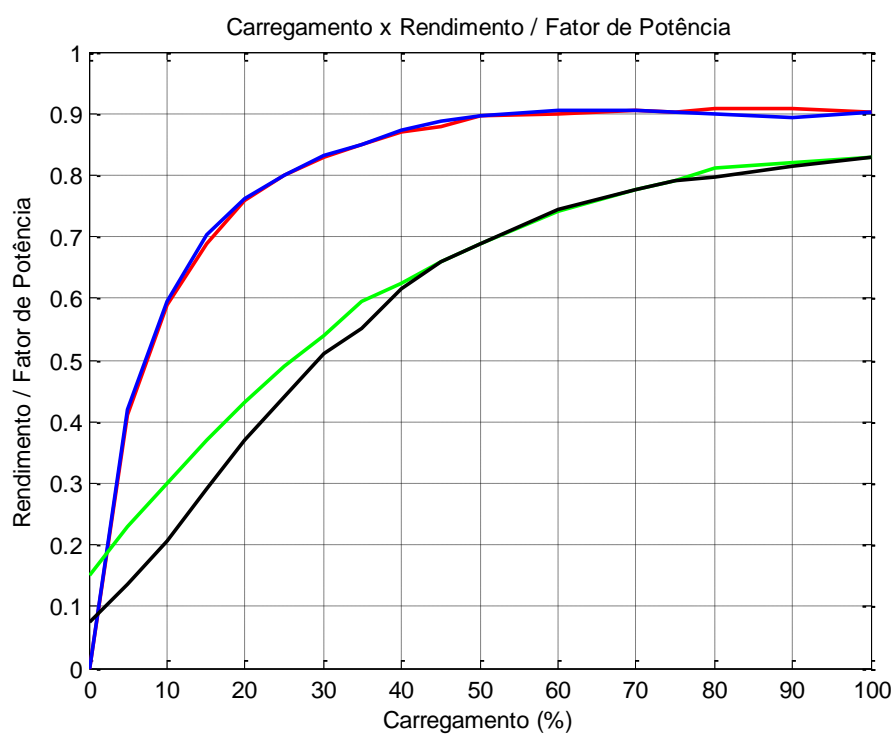


Figura 3.11 – Curvas de rendimento e fator de potência versus carregamento pelo método MCT (em azul e preto) e de referência do fabricante (em vermelho e verde) para o motor de 20 hp.

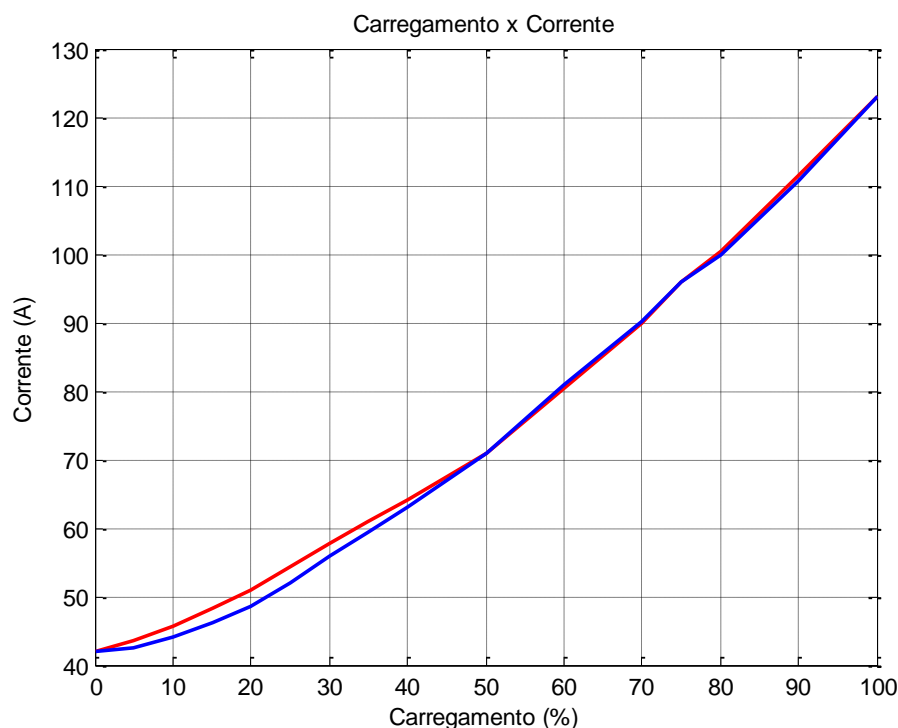


Figura 3.12 – Curvas de corrente versus carregamento pelo método MCT (em azul) e de referência do fabricante (em vermelho) para o motor de 50 hp.

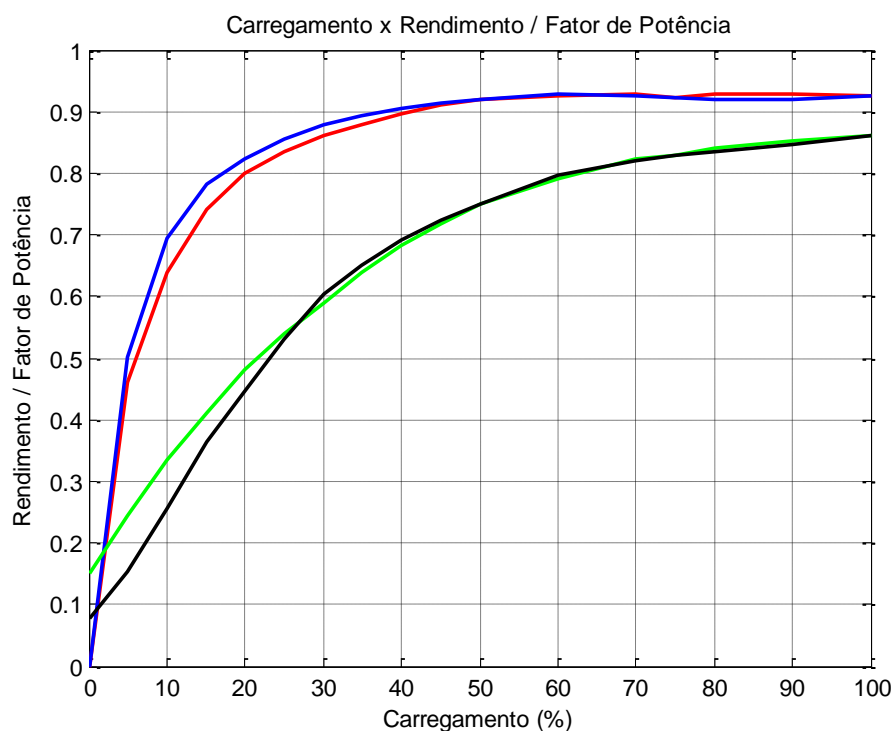


Figura 3.13 – Curvas de rendimento e fator de potência versus carregamento pelo método MCT (em azul e preto) e de referência do fabricante (em vermelho e verde) para o motor de 50 hp.

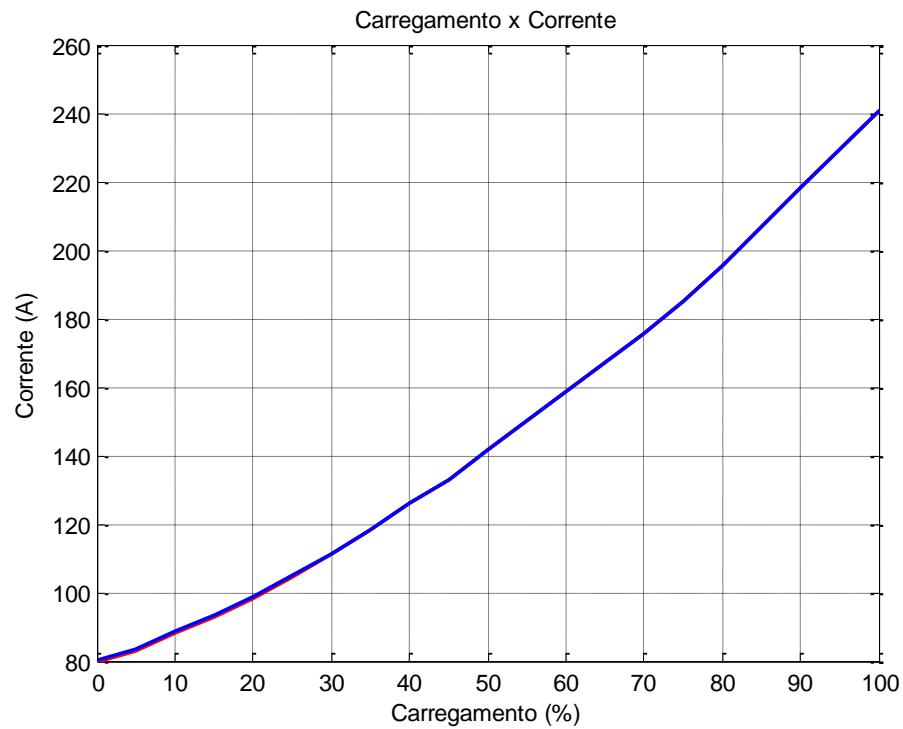


Figura 3.14 – Curvas de corrente versus carregamento pelo método MCT (em azul) e de referência do fabricante (em vermelho) para o motor de 100 hp.

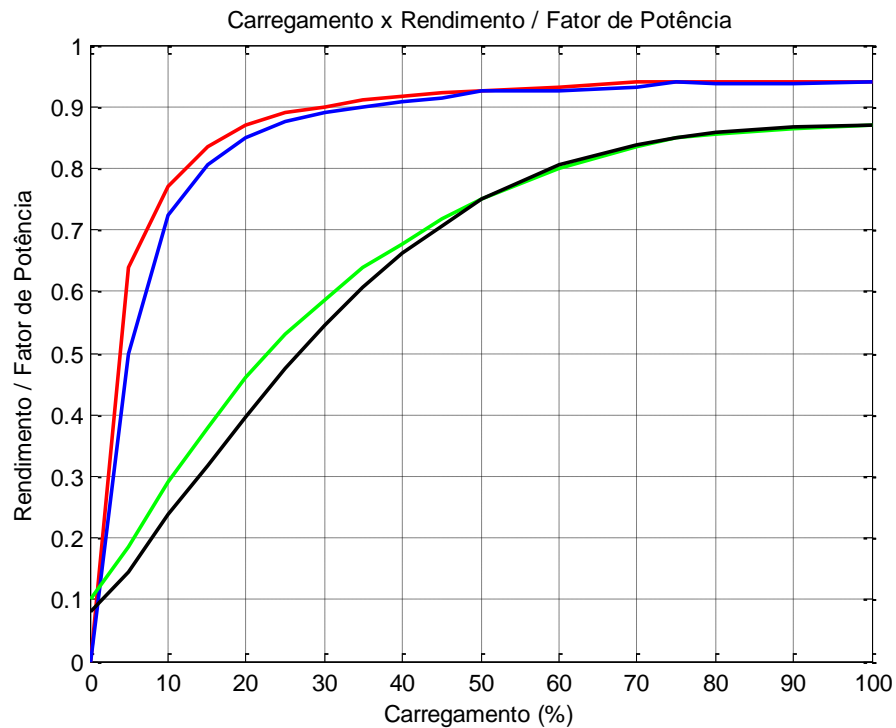


Figura 3.15 – Curvas de rendimento e fator de potência versus carregamento pelo método MCT (em azul e preto) e de referência do fabricante (em vermelho e verde) para o motor de 100 hp.

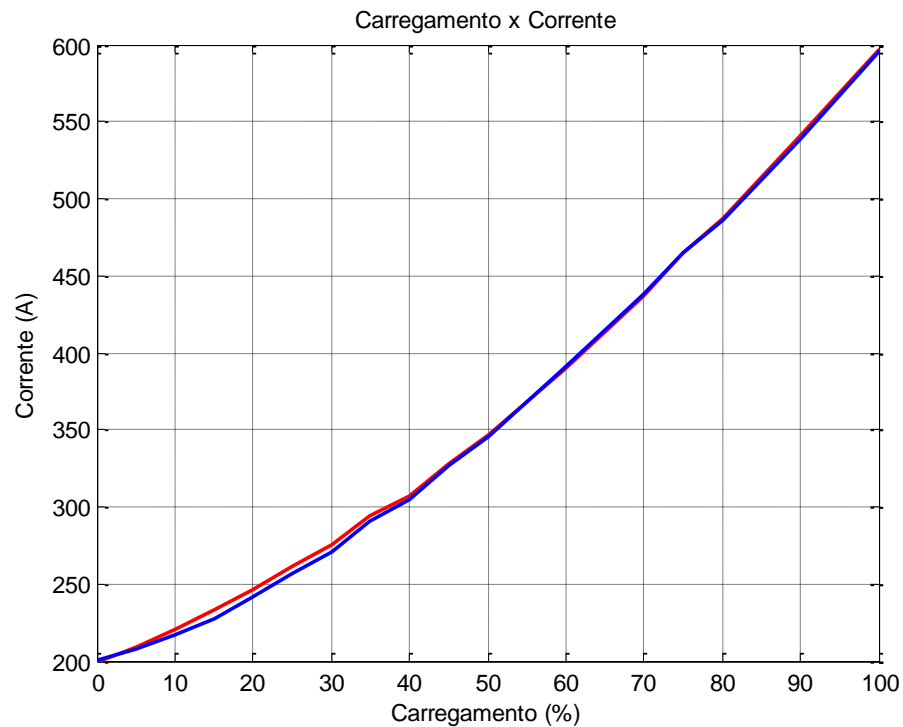


Figura 3.16 – Curvas de corrente versus carregamento pelo método MCT (em azul) e de referência do fabricante (em vermelho) para o motor de 250 hp.

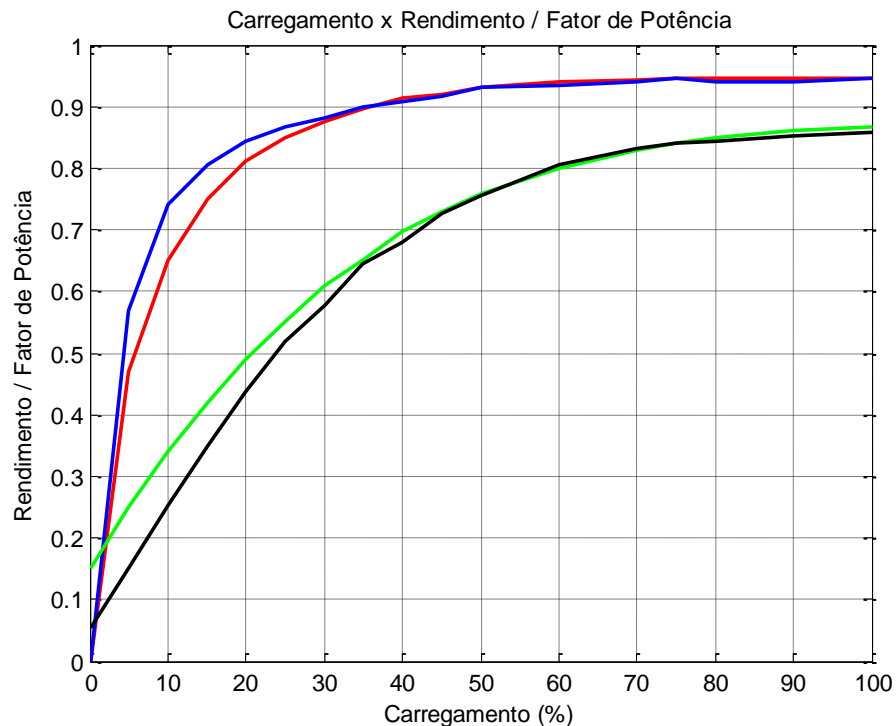


Figura 3.17 – Curvas de rendimento e fator de potência versus carregamento pelo método MCT (em azul e preto) e de referência do fabricante (em vermelho e verde) para o motor de 250 hp.

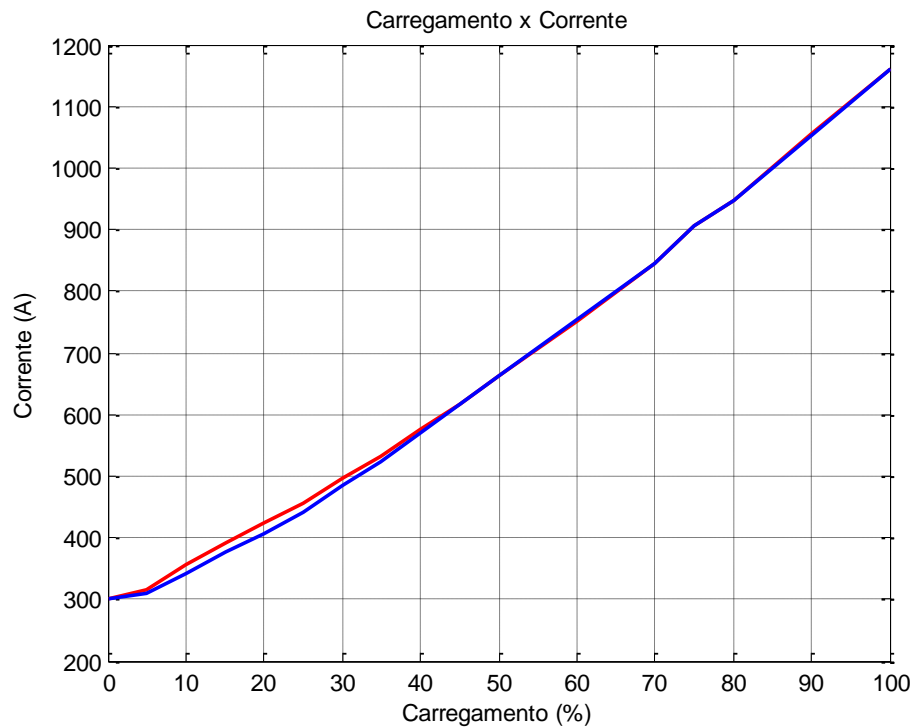


Figura 3.18 – Curvas de corrente versus carregamento pelo método MCT (em azul) e de referência do fabricante (em vermelho) para o motor de 500 hp.

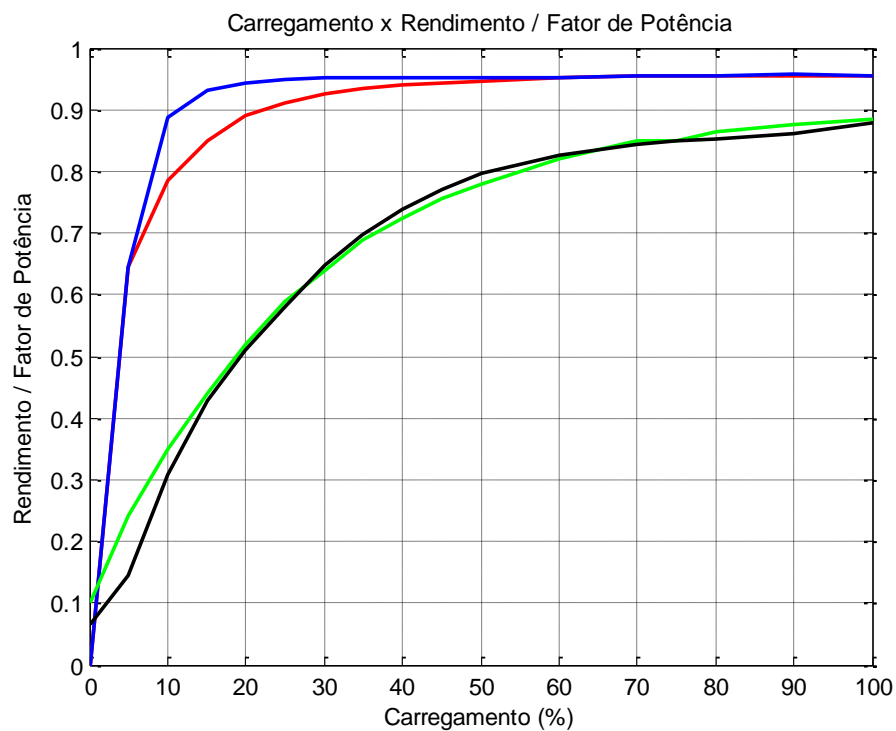


Figura 3.19 – Curvas de rendimento e fator de potência versus carregamento pelo método MCT (em azul e preto) e de referência do fabricante (em vermelho e verde) para o motor de 500 hp.

3.9.2 RESULTADOS MP

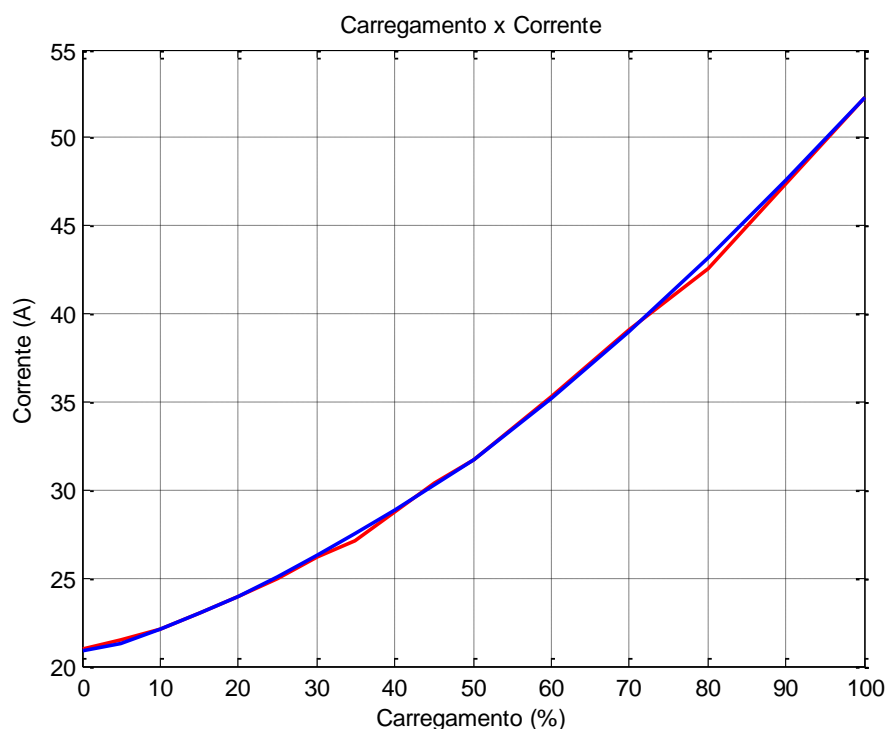


Figura 3.20 – Curvas de corrente versus carregamento pelo método MP (em azul) e de referência do fabricante (em vermelho) para o motor de 20 hp.

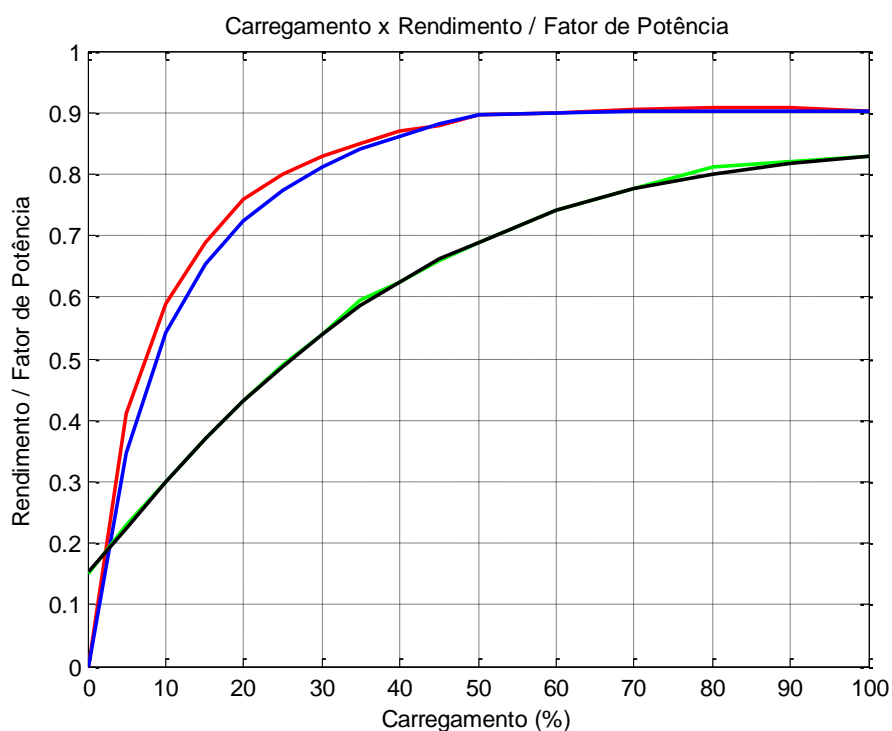


Figura 3.21 – Curvas de rendimento e fator de potência versus carregamento pelo método MP (em azul e preto) e de referência do fabricante (em vermelho e verde) para o motor de 20 hp.

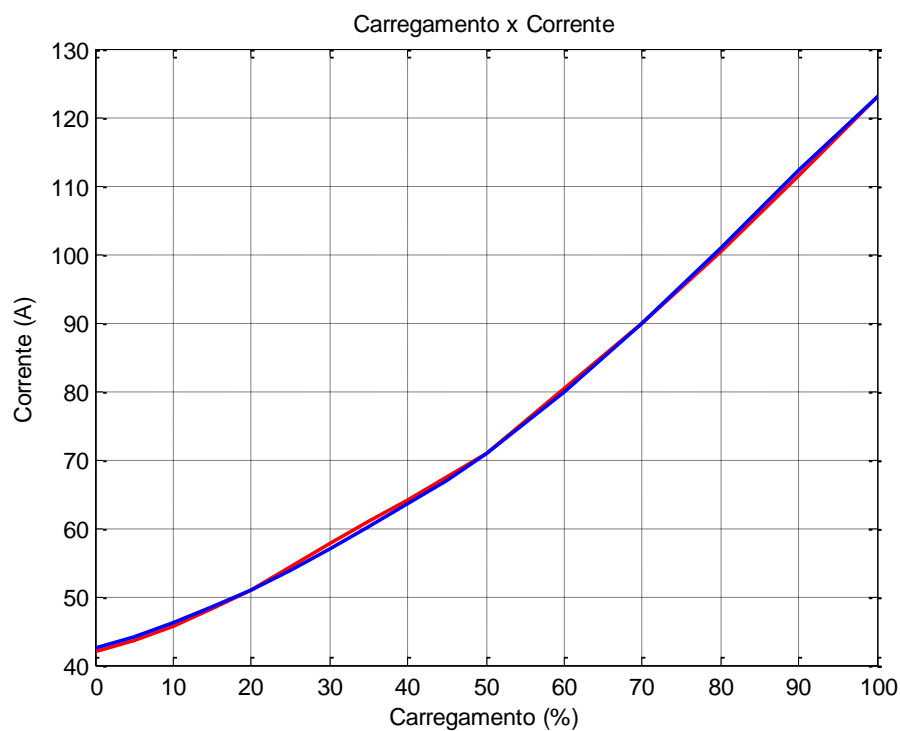


Figura 3.22 – Curva de corrente versus carregamento pelo método MP (em azul) e de referência do fabricante (em vermelho) para o motor de 50 hp.

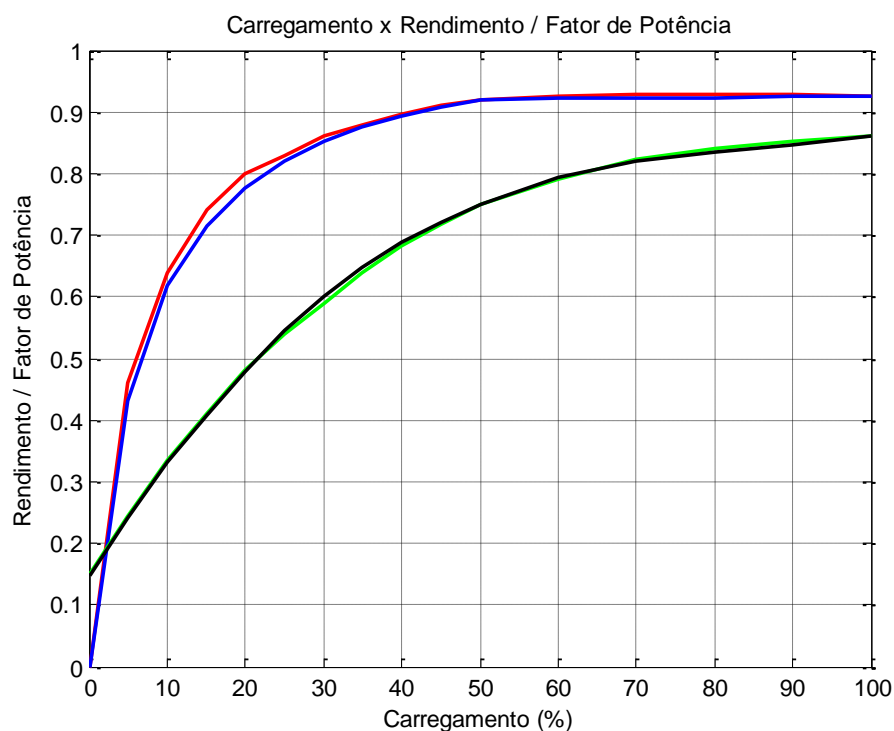


Figura 3.23 – Curvas de rendimento e fator de potência versus carregamento pelo método MP (em azul e preto) e de referência do fabricante (em vermelho e verde) para o motor de 50 hp.

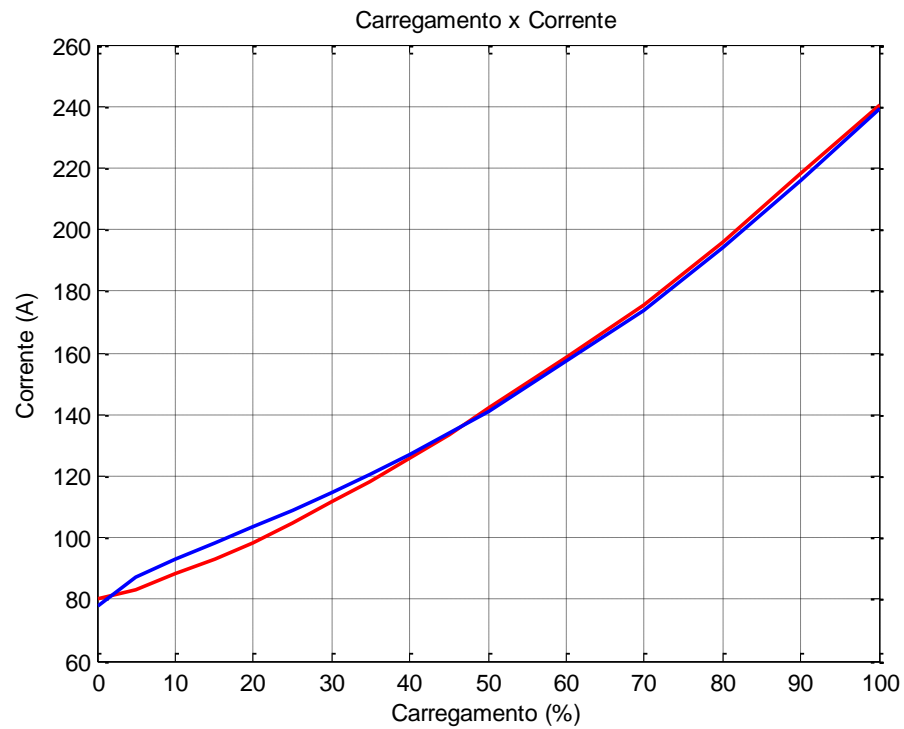


Figura 3.24 – Curvas de corrente versus carregamento pelo método MP (em azul) e de referência do fabricante (em vermelho) para o motor de 100 hp.

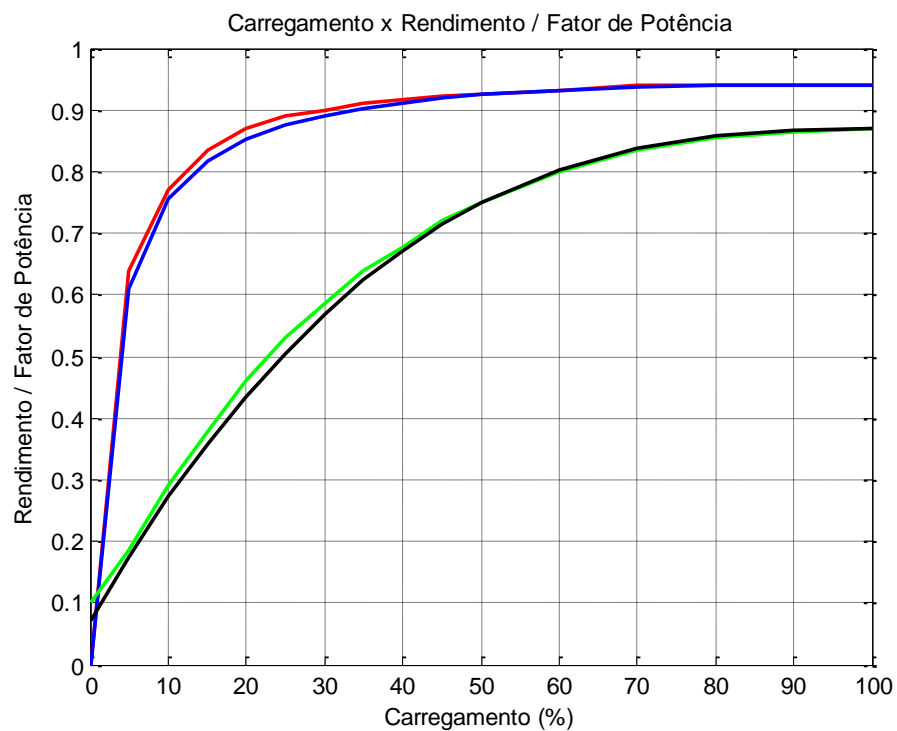


Figura 3.25 – Curvas de rendimento e fator de potência versus carregamento pelo método MP (em azul e preto) e de referência do fabricante (em vermelho e verde) para o motor de 100 hp.

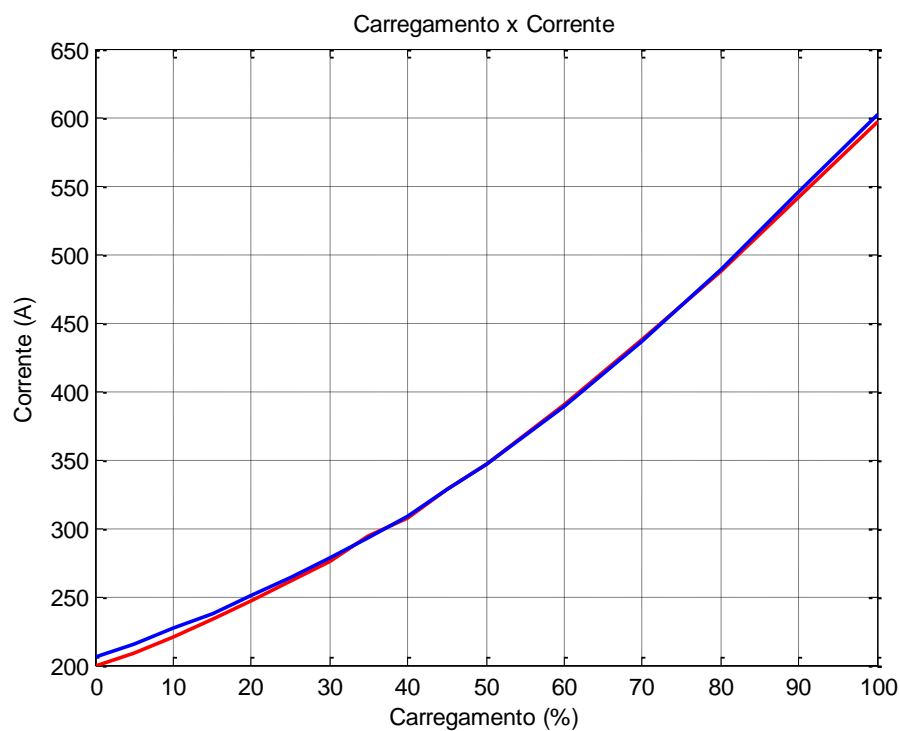


Figura 3.26 – Curvas de corrente versus carregamento pelo método MP (em azul) e de referência do fabricante (em vermelho) para o motor de 250 hp.

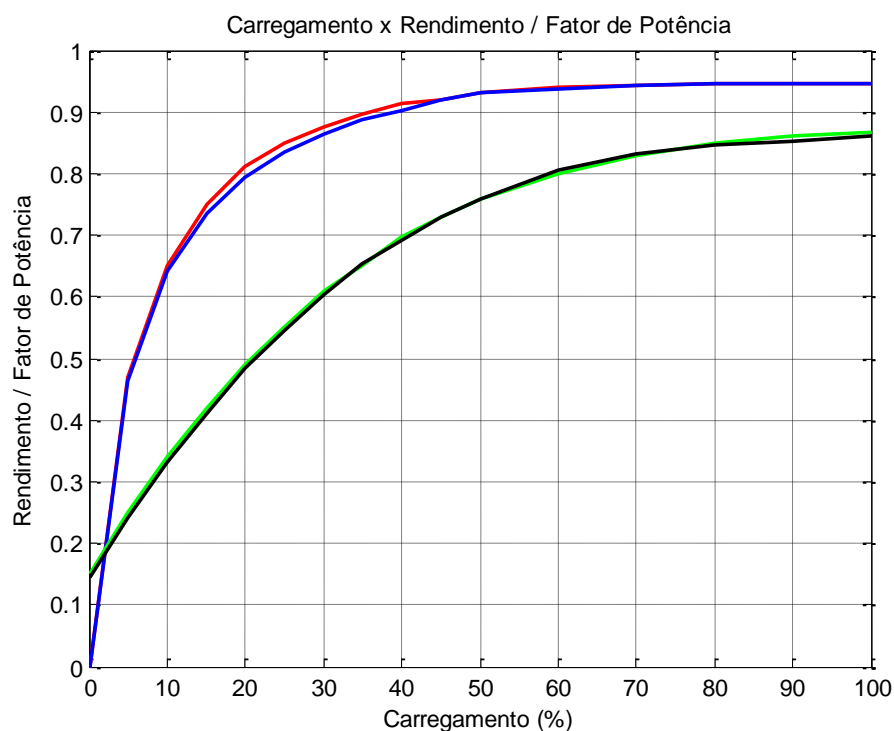


Figura 3.27 – Curvas de rendimento e fator de potência versus carregamento pelo método MP (em azul e preto) e de referência do fabricante (em vermelho e verde) para o motor de 250 hp.

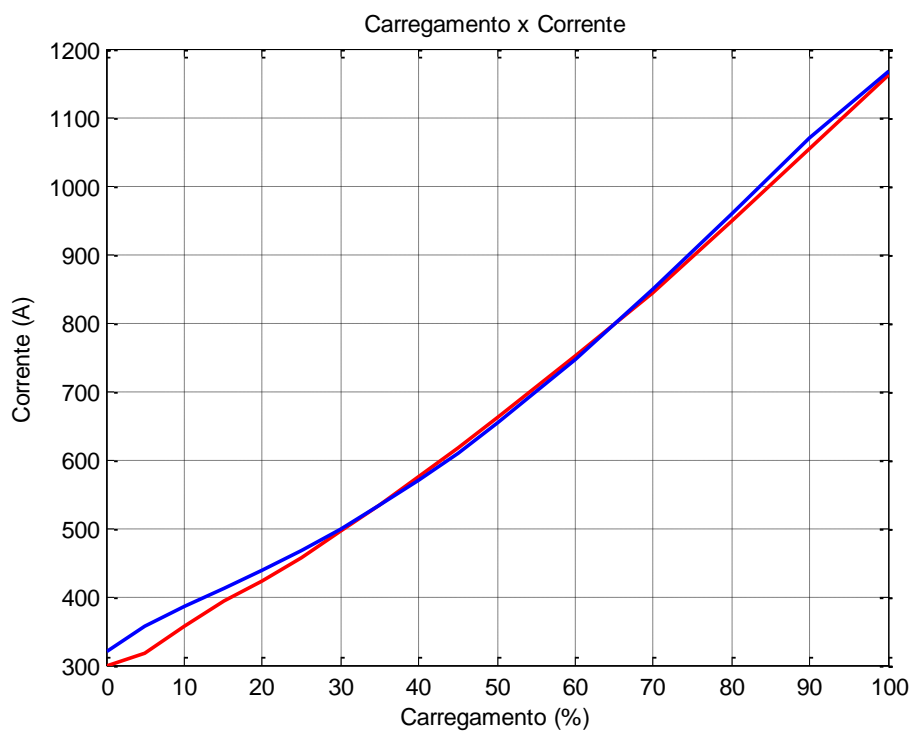


Figura 3.28 – Curvas de corrente versus carregamento pelo método MP (em azul) e de referência do fabricante (em vermelho) para o motor de 500 hp.

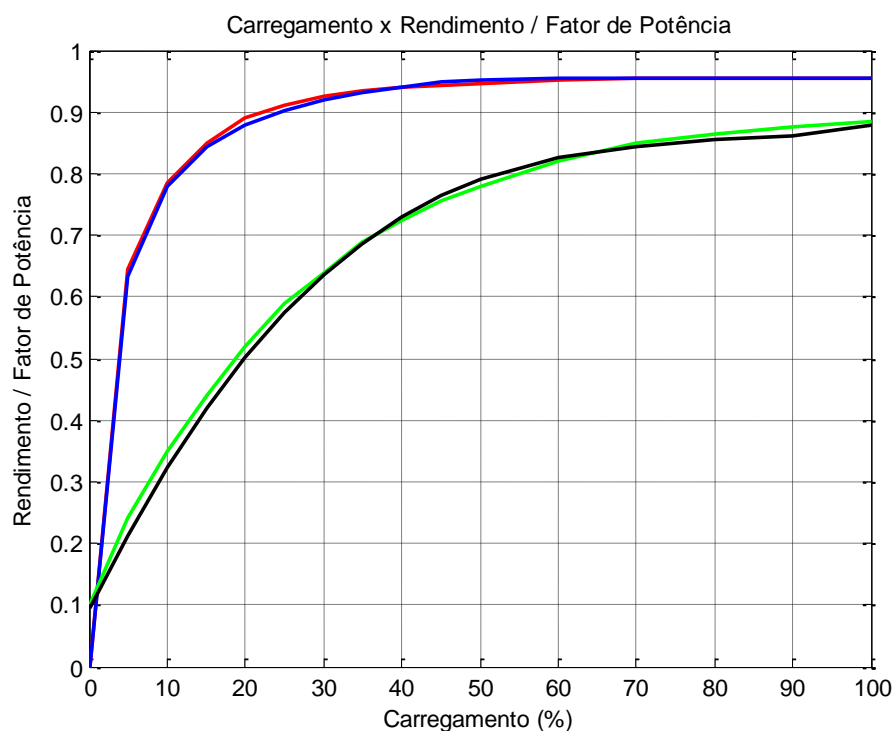


Figura 3.29 – Curvas de rendimento e fator de potência versus carregamento pelo método MP (em azul e preto) e de referência do fabricante (em vermelho e verde) para o motor de 500 hp.

3.9.3 ANÁLISE DO ERRO

Com o intuito de visualizar melhor a qualidade dos resultados adquiridos por meio das metodologias desenvolvidas e aplicadas como exemplos comparativos, foram calculados os erros em porcentagem para diversos pontos percentuais de carga. Os resultados gerados podem ser vistos nas Figuras 3.30 e 3.31 que tratam, respectivamente, do método MCT e MP.

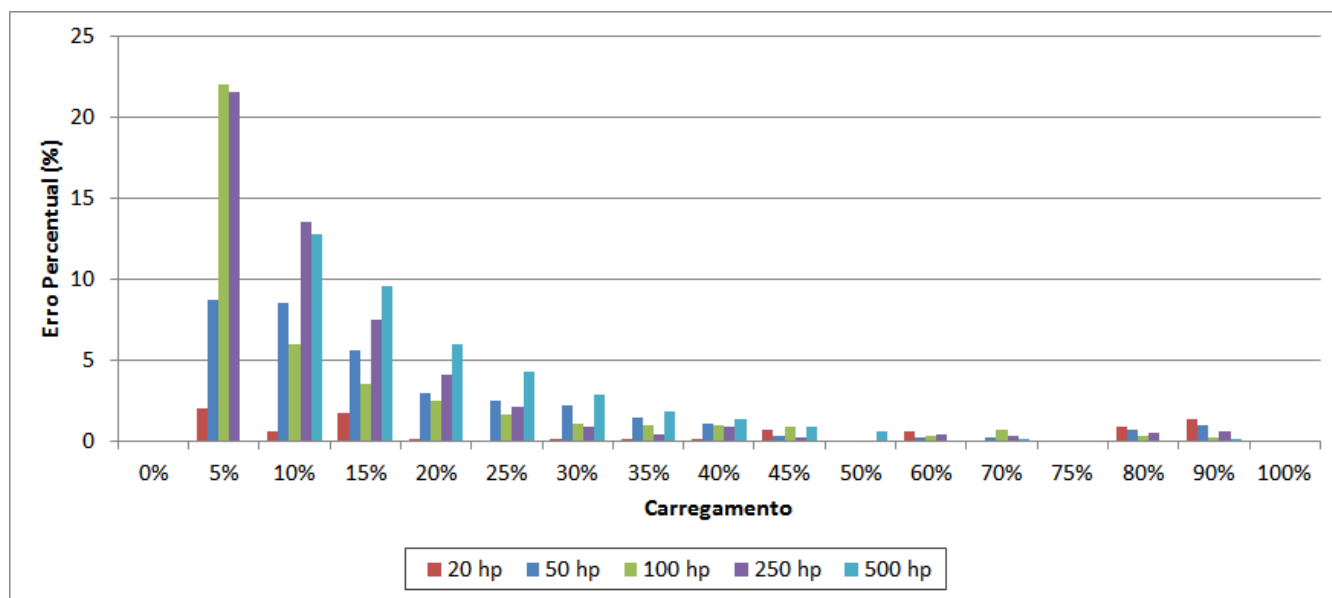


Figura 3.30 – Erro percentual encontrado para cada carregamento e conforme a potência do motor utilizando o método MCT.

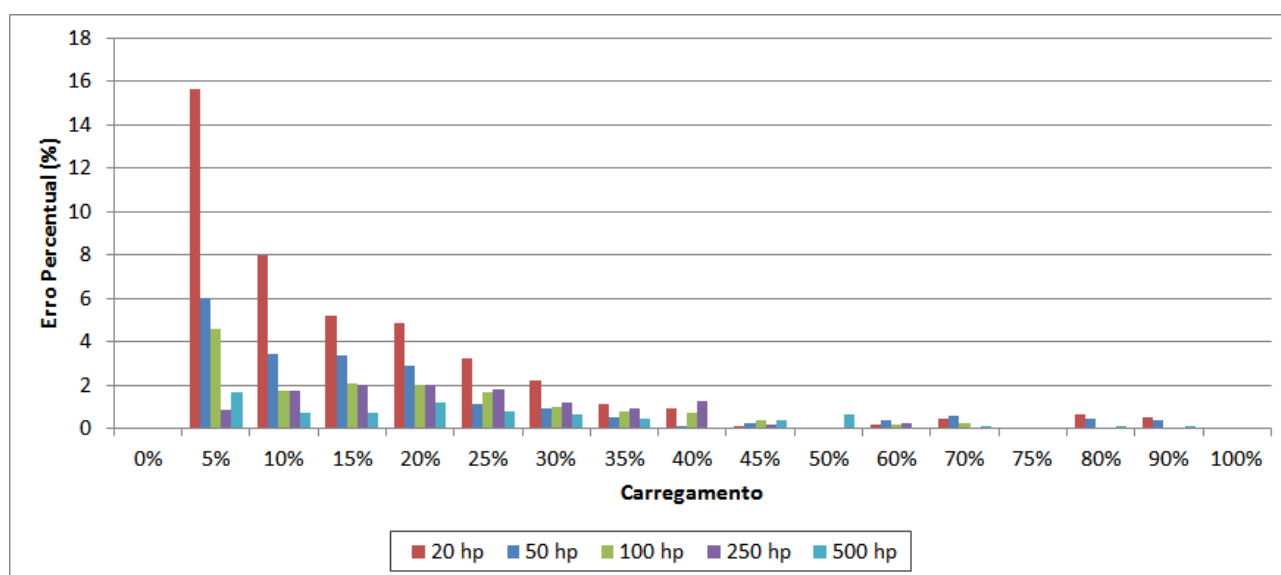


Figura 3.31 – Erro percentual encontrado para cada carregamento e conforme a potência do motor utilizando o método MP.

É possível observar que o método MP apresentou um erro percentual menor para a maioria dos casos exemplificados. No entanto, o motor de menor potência (20 hp) apresentou menor erro máximo quando foi aplicado o método MCT.

Evidencia-se que à medida que o carregamento diminui, o erro aumenta independente do método empregado. Tal comportamento ocorre, via de regra, e é previsto devido à falta de dados de entrada informando o comportamento da curva entre 0% e 50% de carga.

Na prática, mesmo os motores muito superdimensionados encontram-se acima de 25% de carregamento e, acima deste valor, não houve grande discrepância entre os valores calculados pelos métodos e os valores de referência. A partir do ponto de 25% até 100% de carga, os maiores erros percentuais encontrados foram justamente para o carregamento de 25%, para o qual foi gerado o valor máximo de erro de 4,3% no método MCT para o motor de 500 hp, com as demais potências apresentando erro inferior a 2,6%. Já no método MP, o maior erro obtido foi para o motor de 20 hp, o qual apresentou erro percentual de 3,2%. Os outros motores tiveram erro inferior a 1,8%.

Para os carregamentos de 50%, 75% e 100% o erro foi nulo e entre 50% e 100%, o máximo erro percentual calculado foi de 1,4% e 0,7% para os métodos MCT e MP, respectivamente.

O erro médio do método MCT é de 2,1% e do método MP é de 1,2%. Já o desvio padrão médio para uma amostra de 15 motores foi de 2,6% no método MCT e de 1,2% no MP.

3.9.4 EXEMPLO DE APLICAÇÃO

A seguir, será mostrado um exemplo de aplicação da metodologia desenvolvida para um motor com os dados apresentados na Tabela 3.5.

O conjugado nominal pode ser encontrado por (3.20).

$$M_n = \frac{P_n \cdot 60}{w_n \cdot 2\pi} \quad (3.20)$$

As medições de campo de corrente, tensão e potência elétrica são mostradas na Tabela 3.6.

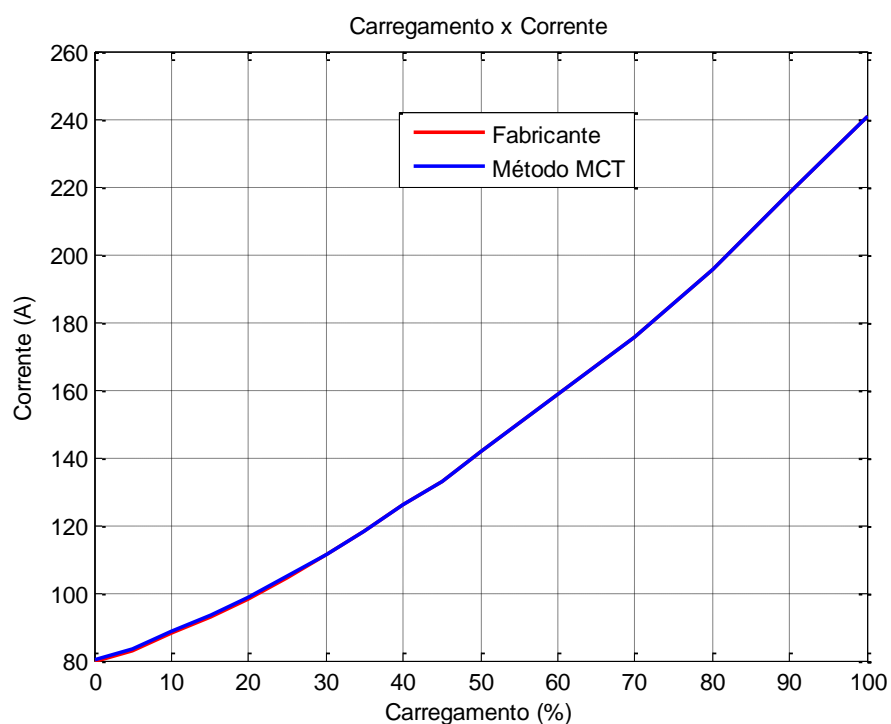
As Figuras 3.32 e 3.33 apresentam as curvas geradas pelo método MCT.

Tabela 3.5 – Dados de catálogo para um motor de 100 hp.

P_{hp}	100	hp
η_{50}	92,4	%
η_{75}	94	%
η_n	94	%
fp_{50}	0,75	-
fp_{75}	0,85	-
fp_n	0,87	-
w_n	1780	rpm
w_s	1800	rpm
M_k	$3,3 \times M_n$	-

Tabela 3.6 – Medições de campo para um motor de 100 hp.

I_{med}	125,82	A
V_{med}	220	V
P_{med}	32505,45	W

**Figura 3.32 – Curvas de corrente versus carregamento pelo método MCT (em azul) e de referência do fabricante (em vermelho).**

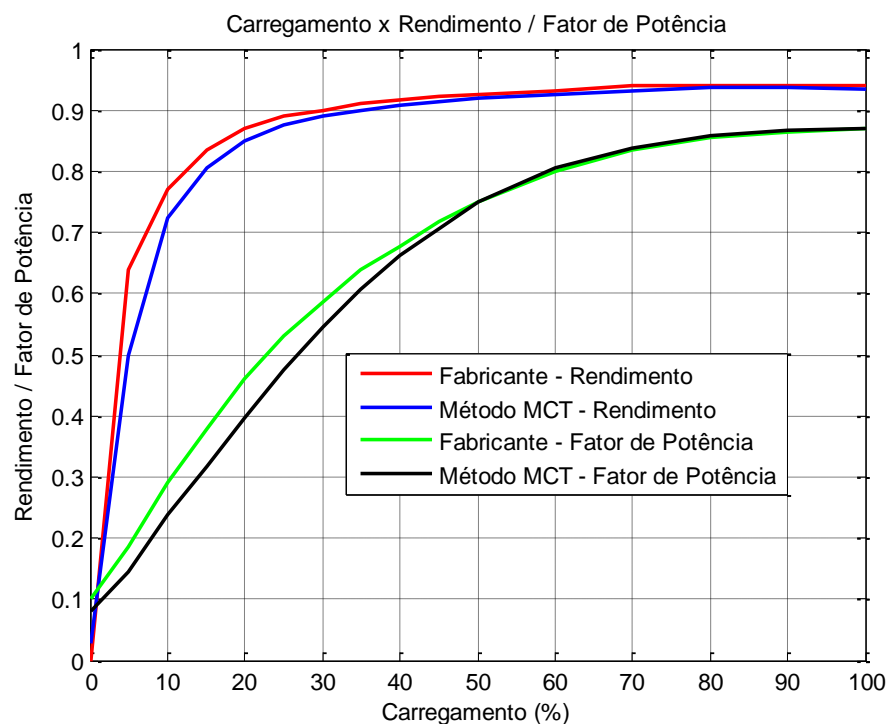


Figura 3.33 – Curvas de rendimento e fator de potência versus carregamento pelo método MCT (em azul e preto) e de referência do fabricante (em vermelho e verde).

Para a realização de uma estimativa de eficiência energética do sistema, a curva do rendimento necessita de resultados mais refinados do que as demais. Para o motor de 100 hp em estudo, ao utilizar o método MCT é obtido que este motor funciona com um carregamento de 39 %, 0,66 de fator de potência e rendimento de 0,91.

As Figuras 3.34 e 3.35 mostram as curvas obtidas pelo método MP.

Como dito anteriormente, o método MP apresenta resultados mais precisos, o que pode ser comprovado analisando-se as curvas de desempenho geradas.

Analisando a situação de funcionamento do motor em estudo pelo método MP, obtém-se que este motor opera com um carregamento de aproximadamente 39%, fator de potência igual a 0,67 e rendimento de 0,91.

Verificou-se, portanto, que esse motor apresenta valor inferior a 40% de potência fornecida em relação à nominal. A partir dessa informação, considera-se a substituição imediata do motor.

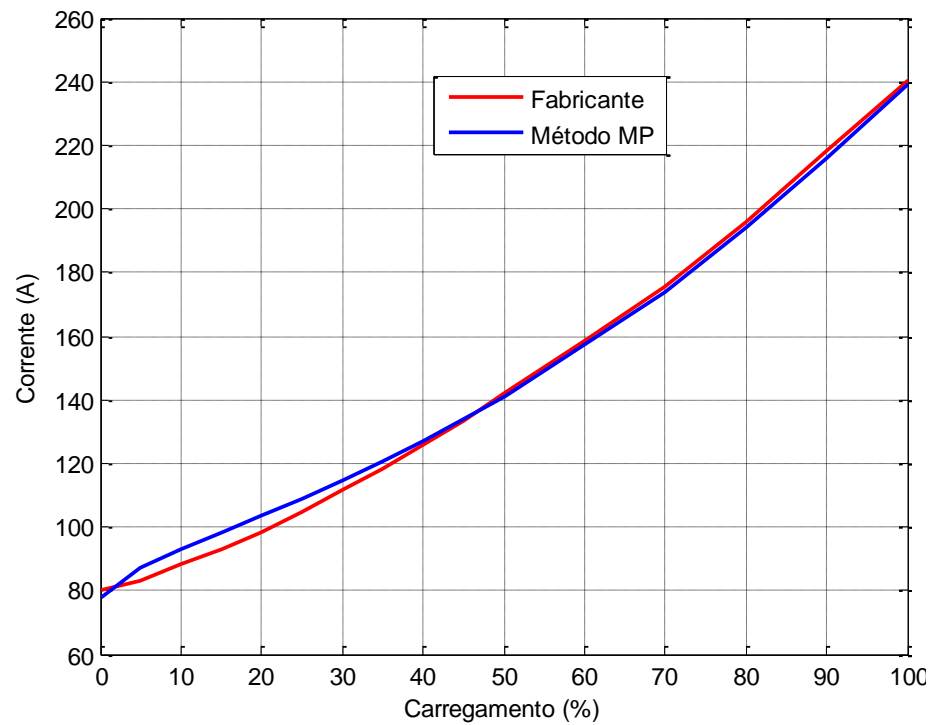


Figura 3.34 – Curvas de corrente versus carregamento pelo método MP (em azul) e de referência do fabricante (em vermelho).

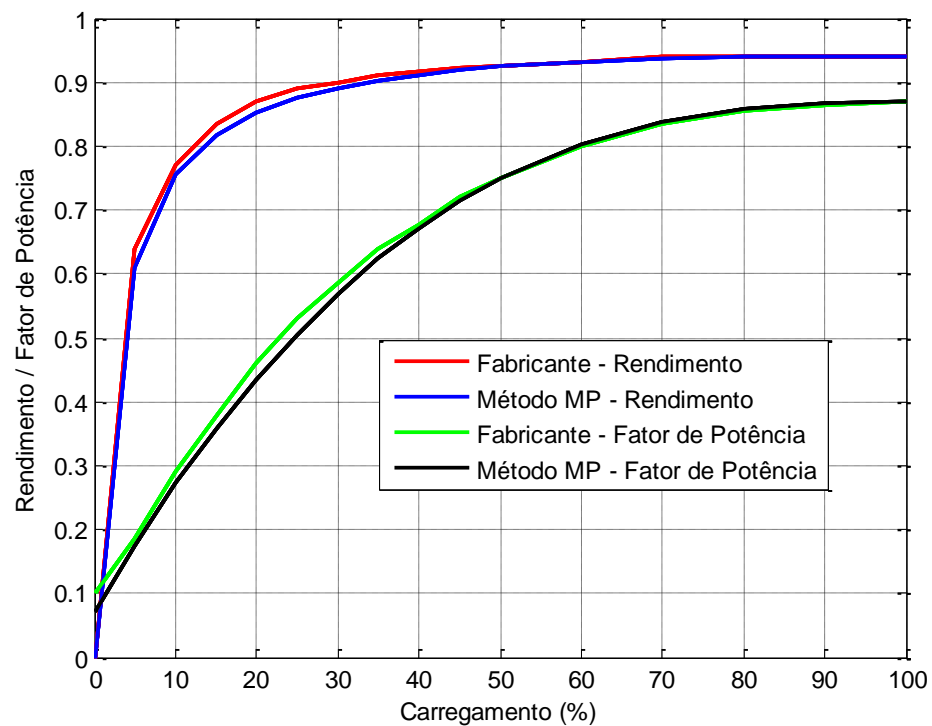


Figura 3.35 – Curvas de rendimento e fator de potência versus carregamento pelo método MP (em azul e preto) e de referência do fabricante (em vermelho e verde).

A escolha de um motor mais adequado pode ser feita através do cálculo da potência real solicitada pela carga, que é calculada multiplicando-se a potência nominal do motor pelo seu carregamento.

$$\text{Potência requerida} = 100 \text{ hp} \times 0,39 = 39,0 \text{ hp}.$$

A partir desses resultados, escolhe-se o motor imediatamente superior a este valor e que também atenda as características da carga que está sendo acionada, a fim de que o motor seja capaz suprir as condições de partida da mesma. Dessa forma, será escolhido o motor de potência 50 hp.

Este novo motor funcionará com carregamento de 39/50, que equivale a cerca de 78% de potência fornecida em relação a nominal.

A Tabela 3.7 apresenta resumidamente os resultados de consumo do motor em atividade e do motor de nova potência sugerido. Foi considerado para cálculo da energia um funcionamento de 24 horas por dia para o período de um ano.

Tabela 3.7 – Resultados comparativos.

100 hp			50 hp		
<i>X</i> (%)	η (%)	Energia (MWh)	<i>X</i> (%)	η (%)	Energia (MWh)
39	91	276,23	78	92,4	272,05

Com a substituição do motor em atividade pelo de menor potência seria atingida uma economia de 4.185,35 kWh anualmente, ou seja, cerca de 1,5% para um único motor em funcionamento. Para uma indústria na qual há motores em piores condições de funcionamento do que o motor do exemplo, e também possui um número muito grande de máquinas em atividade, o potencial de economia é maior e mais representativo.

Observa-se que em um cálculo completo deve ser verificado se a condição de partida da carga é atendida antes de propor a substituição. Também deve ser realizada uma análise econômica que verifique a viabilidade da troca antes de tomar qualquer decisão.

3.10 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO III

É sabido que existe um grande potencial de conservação de energia em motores de indução trifásicos. A falta de informação pode ser considerada a principal causa da má especificação dos sistemas.

O dimensionamento com excessiva margem de segurança, o desconhecimento do pleno comportamento das cargas, tamanhos preferenciais ou padronizados e requisitos de elevados conjugados de partida implicam que a grande quantidade dos motores atualmente instalados no Brasil opera com cargas inferiores a 50% da potência nominal e muitas vezes, por longos períodos, praticamente sem carga [36].

Este trabalho apresenta uma metodologia para obter as condições de funcionamento dos motores. Para casos de superdimensionamento, os motores podem ser substituídos por outros corretamente dimensionados ou realocados na fábrica, sempre atentando para os casos em que o superdimensionamento é realmente necessário diante das condições de partida.

Dois métodos foram propostos, sendo que o MP apresentou resultados um pouco mais precisos, no entanto o método MCT possui a vantagem de depender de medições que são mais fáceis de serem adquiridas.

Os métodos desenvolvidos permitem avaliar a porcentagem do carregamento, rendimento e fator de potência, sem a dependência das curvas características fornecidas pelos fabricantes. Portanto, facilidade de aplicação aliada ao uso de ferramentas comuns é o principal ponto para a utilização da metodologia apresentada que tem como objetivo o aumento do aproveitamento energético nos motores de indução.

CAPÍTULO IV

ESPECIFICAÇÃO DO MIT PARA CONDIÇÕES DE PARTIDA

4 ESPECIFICAÇÃO DO MIT PARA CONDIÇÕES DE PARTIDA

4.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Pesquisas realizadas por concessionárias e fabricantes indicam que a grande maioria dos motores opera com potência abaixo de seu valor nominal.

Para quantificar essa informação, os últimos estudos efetuados pela Centrais Elétricas de Minas Gerais (Cemig) em sua área de concessão registraram o fato de que no universo de 3.425 motores, equivalente a 78.850 cv, 28,7% encontravam-se superdimensionados e 5,9% com sobrecarga [36].

Nos processos de acionamentos por meio de motores elétricos de indução, a questão central é o correto dimensionamento.

O superdimensionamento também implica motores operando com menor rendimento, elevado consumo de energia, resultando disso um custo elevado do processo.

Importante vantagem econômica é conseguida pela substancial redução do consumo de energia elétrica pelo correto dimensionamento dos motores aplicados nos mais diferentes tipos de acionamentos.

Neste capítulo serão apresentados os fatores e parâmetros que devem ser analisados na escolha de um motor para acionamento de determinada carga. A metodologia de cálculo de dimensionamento que será apresentada é complementar a toda análise de superdimensionamento exibida no Capítulo 3, pois ao se propor um motor de potência inferior para acionar uma carga, as exigências da mesma devem ser atendidas, principalmente no que tange as condições de partida da mesma. A execução do procedimento completo de verificar as condições de funcionamento do motor e as exigências da carga a ser acoplada, comprova as vantagens do adequado dimensionamento do motor.

4.2 POTÊNCIA NOMINAL

Quando se deseja escolher um motor para acionar uma determinada carga, é preciso conhecer o conjugado requerido pela carga e a rotação que esta carga deve ter em condições

nominais. Conhecendo-se também o tipo de acoplamento é possível saber qual rotação nominal o motor deve ter.

Portanto, a potência nominal do motor é dada pela Equação (4.1).

$$P_n = 2 \cdot \pi \cdot \omega_n \cdot C_n \quad (4.1)$$

Onde:

P_n - Potência nominal do motor em Watt;

C_n - Conjugado nominal do motor em N.m;

ω_n - Rotação nominal do motor em rps.

Na Equação (4.1) considerou-se que o conjugado requerido pela carga é igual ao conjugado nominal do motor. Esta consideração só é verdadeira para acoplamento direto. Quando o acoplamento possuir redução de velocidade, o conjugado requerido pela carga deve ser referido ao eixo do motor de acordo com a Equação (4.2).

$$C_n = \frac{1}{\eta_{ac}} \cdot \frac{\omega_c}{\omega_n} \cdot C_{cn} \quad (4.2)$$

Onde:

ω_c - Rotação da carga em rps;

C_{cn} - Conjugado de carga nominal, dado em N.m;

η_{ac} - Rendimento do acoplamento;

ω_n - Rotação nominal do motor em rps.

O rendimento do acoplamento é definido pela Equação (4.3).

$$\eta_{ac} = \frac{P_c}{P_n} \quad (4.3)$$

Onde:

P_c - Potência transmitida à carga em Watts;

P_n - Potência nominal do motor em Watts.

Na Tabela 4.1 pode-se observar o rendimento de alguns tipos de acoplamentos mais utilizados.

Tabela 4.1– Faixa de rendimento para tipos de acoplamento mais comuns [37].

Tipo de Acoplamento	Faixa de Rendimento (%)
Direto	100
Embreagem Eletromagnética	87 – 98
Polia com Correia Plana	95 – 98
Polia com Correia em V	97 – 99
Engrenagem	96 – 99
Roda Dentada (Correia)	97 – 98
Cardã	25 – 100
Acoplamento Hidráulico	100

4.3 CONJUGADO RESISTENTE DA CARGA

É o conjugado requerido pela carga e, portanto, depende do tipo de carga a ser acionada pelo motor. Porém todos podem ser representados de forma generalizada pela Equação (4.4), exceto o conjugado não definido que será detalhado no item 4.3.5.

$$C_c = C_o + k_c \cdot \omega_c^x \quad (4.4)$$

Onde:

C_c - Conjugado resistente da carga em N.m;

C_o - Conjugado da carga para rotação zero em N.m;

k_c - Constante que depende da carga;

x - Parâmetro dependente da carga, pode assumir os valores -1, 0, 1 ou 2.

De acordo com a Equação (4.4) percebe-se que o conjugado da carga varia com a rotação. Esta variação depende do parâmetro x , e assim as cargas podem ser classificadas em quatro grupos apresentados a seguir.

4.3.1 CONJUGADO CONSTANTE

Para este tipo de carga, o parâmetro x é zero ($x = 0$) e tem-se a Equação (4.5).

$$C_c = (C_o + k_c) = \text{Constante} \quad (4.5)$$

Nas máquinas deste tipo, o conjugado permanece constante durante a variação de velocidade e a potência aumenta proporcionalmente com a velocidade. Logo, a potência da carga segue a relação exposta na Equação (4.6).

$$P_c = (C_o + k_c) \times \omega_c \quad (4.6)$$

Onde:

k_c - Constante que depende da carga;

P_c - Potência de carga.

Este caso é mostrado na Figura 4.1, sendo C_c o conjugado resistente da carga (Constante) e P_c a potência que é proporcional ao número de rotações.

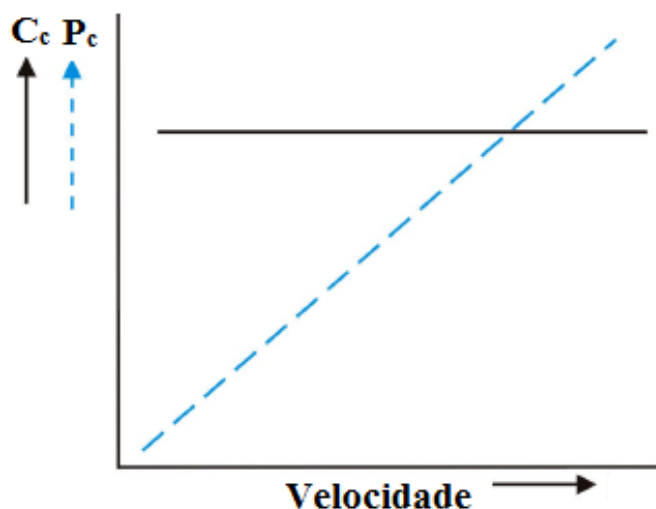


Figura 4.1 – Conjugado constante e potência versus velocidade.

Alguns exemplos de cargas com conjugados constantes são:

- Compressores a pistão;
- Talhas;
- Guindastes;
- Bombas a pistão;
- Britadores;
- Transportadores contínuos.

4.3.2 CONJUGADO LINEAR

Neste grupo o parâmetro x é igual a 1 ($x = 1$). Então se tem a Equação (4.7).

$$C_c = C_o + (k_c \times \omega_c) = \text{Linear} \quad (4.7)$$

Nestes tipos de máquinas o conjugado varia linearmente com a rotação; já a potência, varia com o quadrado da rotação. Portanto, obtém-se a Equação (4.8).

$$P_c = (C_o \times \omega_c) + (k_c \times \omega_c^2) \quad (4.8)$$

A Figura 4.2 mostra este caso.

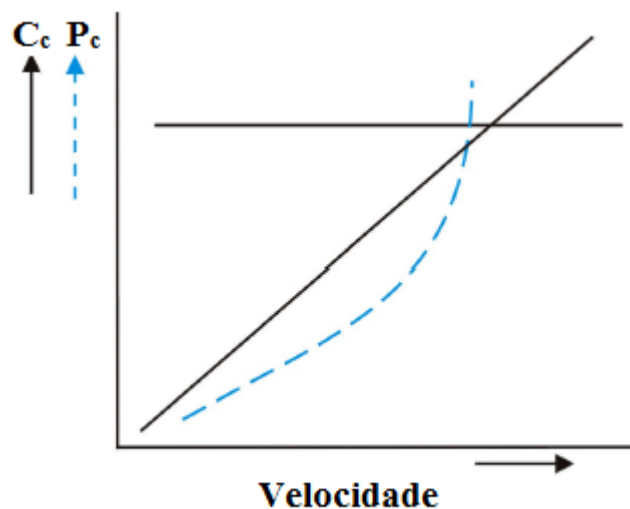


Figura 4.2 – Conjugado linear e potência versus velocidade.

Onde:

C_c - Conjugado resistente de carga proporcional a ω_c ;

P_c - Potência proporcional a ω_c^2 .

Cargas com conjugado linear possuem aplicação muito rara. Um exemplo de utilização desse tipo de carga é pode ser visto em:

- Calandra com atrito viscoso (para calandrar papel).

4.3.3 CONJUGADO QUADRÁTICO

Neste caso tem-se $x = 2$ e o conjugado é expresso pela Equação (4.9).

$$C_c = C_o + (k_c \times \omega_c^2) = \text{Parabólico} \quad (4.9)$$

Neste caso o conjugado varia com o quadrado da rotação e a potência com o cubo da rotação. Logo, tem-se a Equação (4.10).

$$P_c = (C_o \times \omega_c) + (k_c \times \omega_c^3) \quad (4.10)$$

A Figura 4.3 ilustra este caso, sendo que:

C_c - Conjugado resistente de carga proporcional a ω_c^2 ;

P_c - Potência proporcional a ω_c^3 .

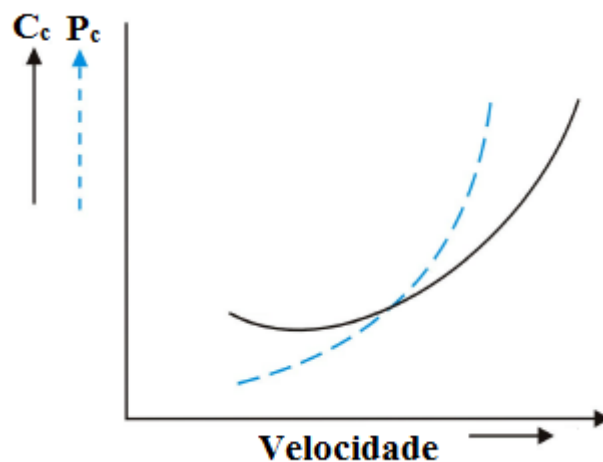


Figura 4.3 – Conjugado parabólico e potência versus velocidade.

São exemplos de cargas com conjugado quadrático:

- Bombas centrífugas;
- Ventiladores;
- Misturadores centrífugos.

4.3.4 CONJUGADO HIPERBÓLICO

Neste tipo de conjugado tem-se $x = -1$, e o conjugado pode ser conhecido por meio da Equação (4.11).

$$C_c = \frac{k_c}{\omega_c} = \text{Hiperbólico} \quad (4.11)$$

Neste tipo de carga a constante C_0 pode ser considerada nula. Pela expressão acima se percebe que para $\omega_c = 0$, o conjugado seria infinito, o que não tem sentido físico. Este fato na prática não acontece porque a rotação da máquina só pode variar entre um limite mínimo (ω_{c1}) e máximo (ω_{c2}).

A potência neste caso permanece constante, isto é, não varia com a rotação, conforme pode ser constatado pela Equação (4.12).

$$P_c = k_c = \text{Constante} \quad (4.12)$$

A Figura 4.4 ilustra este caso, sendo que:

C_c - Conjugado resistente de carga proporcional a ω^{-1} ;

P_c - Potência de carga constante.

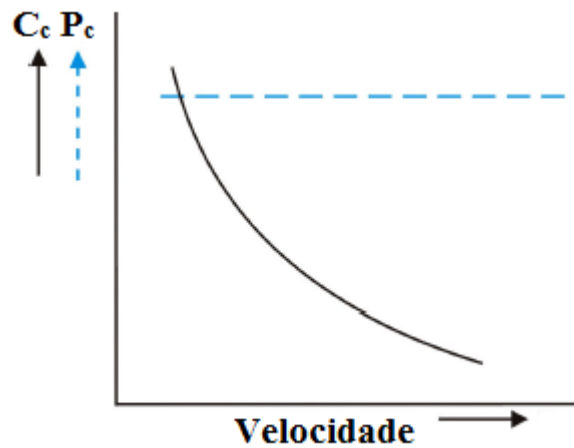


Figura 4.4 – Conjugado hiperbólico e potência versus velocidade.

Exemplos de cargas com conjugado hiperbólico:

- Bobinadeira de papel (normalmente usa-se motor CC);
- Bobinadeira de pano (normalmente usa-se motor CC);
- Descascador de toras;
- Tornos (análise feita com conjugado constante com elevado número de manobras, em geral motores de dupla velocidade);
- Bobinadeira de fios.

4.3.5 CONJUGADOS NÃO DEFINIDOS

Neste caso não se aplica a Equação (4.4), pois não se pode determinar sua equação de maneira precisa, logo se tem que determinar o seu conjugado utilizando técnicas de integração gráfica. Na prática, analisa-se como conjugado constante, pelo máximo valor de torque absorvido.

A Figura 4.5 mostra este tipo de conjugado.

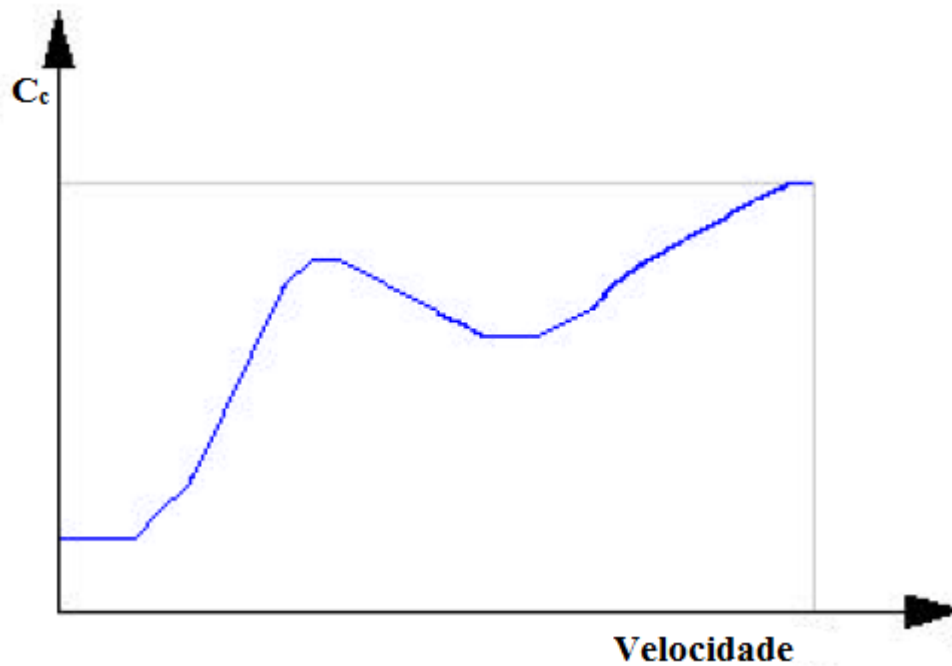


Figura 4.5 – Conjugo não definido versus velocidade.

4.4 CONJUGADO RESISTENTE MÉDIO DA CARGA

Conhecendo-se a curva do conjugo da carga é possível determinar seu conjugo médio. O conhecimento do conjugo médio é importante no cálculo do tempo de aceleração.

Na Figura 4.6 é mostrada uma curva de conjugo e o conjugo médio da carga.

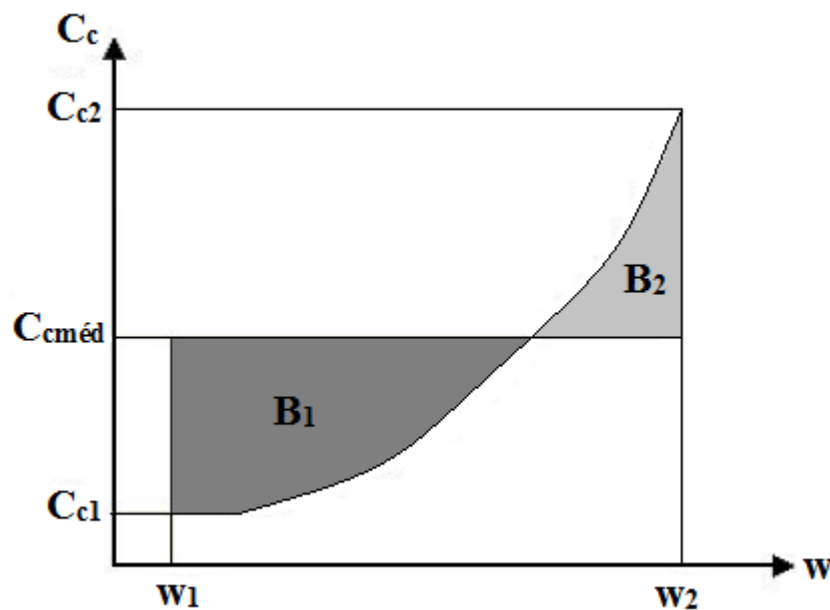


Figura 4.6 – Curva de conjugados de cargas.

O conjugado médio da carga pode ser obtido graficamente, bastando que se observe que a área B_1 seja igual à área B_2 . Analiticamente o conjugado médio da carga pode ser calculado como explicitado a seguir.

Como dito anteriormente, o conjugado da carga é dado pela expressão (4.4).

Para $x = 0, 1$ ou 2 , o conjugado médio pode ser calculado pela Equação (4.16), encontrada por meio do desenvolvimento da expressão (4.13), conforme demonstrado em sequencia.

$$C_{cméd} = \frac{1}{\omega_2 - \omega_1} \int_{\omega_2}^{\omega_1} C_c \cdot d\omega \quad (4.13)$$

$$C_{cméd} = \frac{1}{\omega_2 - \omega_1} \int_{\omega_2}^{\omega_1} (C_o + k_c \times \omega^x) \cdot d\omega \quad (4.14)$$

$$C_{cméd} = \frac{1}{\omega_2 - \omega_1} \left((C_o \times \omega) + \left(\frac{1}{x+1} \times k_c \times \omega^{x+1} \right) \right) \Bigg|_{\omega_2}^{\omega_1} \quad (4.15)$$

$$C_{cméd} = C_o + \left(k_c \times \left(\frac{\omega_2^{x+1} - \omega_1^{x+1}}{\omega_2 - \omega_1} \right) \times \frac{1}{x+1} \right) \quad (4.16)$$

Quando a carga parte do repouso, a velocidade inicial é nula ($\omega_1 = 0$), logo, a Equação (4.16) se resume na forma apresentada em (4.17).

$$C_{cméd} = C_o + \left(k_c \times \frac{\omega_2^x}{x+1} \right) \quad (4.17)$$

Portanto, tem-se:

Para cargas de conjugado constante ($x = 0$);

$$C_{cméd} = C_o + k_c = \text{Constante} \quad (4.18)$$

2) Para cargas de conjugado linear ($x = 1$);

$$C_{cméd} = C_o + \left(\frac{1}{2} \times k_c \times \omega_2 \right) \quad (4.19)$$

3) Para cargas de conjugado quadrático ($x = 2$);

$$C_{cméd} = C_o + \left(\frac{1}{3} \times k_c \times \omega_2^2 \right) \quad (4.20)$$

4) Para cargas de conjugado hiperbólico ($x = -1$);

Neste caso o conjugado é dado pela expressão (4.21) que se segue.

$$C_c = \frac{k_c}{\omega} \quad (4.21)$$

Conforme mostrado na Figura 4.7, onde se supõem que a rotação da carga varia entre o intervalo de ω_1 a ω_2 , o conjugado médio de carga será dado por (4.23).

$$C_{cméd} = \frac{1}{\omega_2 - \omega_1} \int_{\omega_1}^{\omega_2} \frac{k_c}{\omega} \cdot d\omega \quad (4.22)$$

$$C_{cméd} = \frac{k_c}{\omega_2 - \omega_1} \times \ln \left(\frac{\omega_2}{\omega_1} \right) \quad (4.23)$$

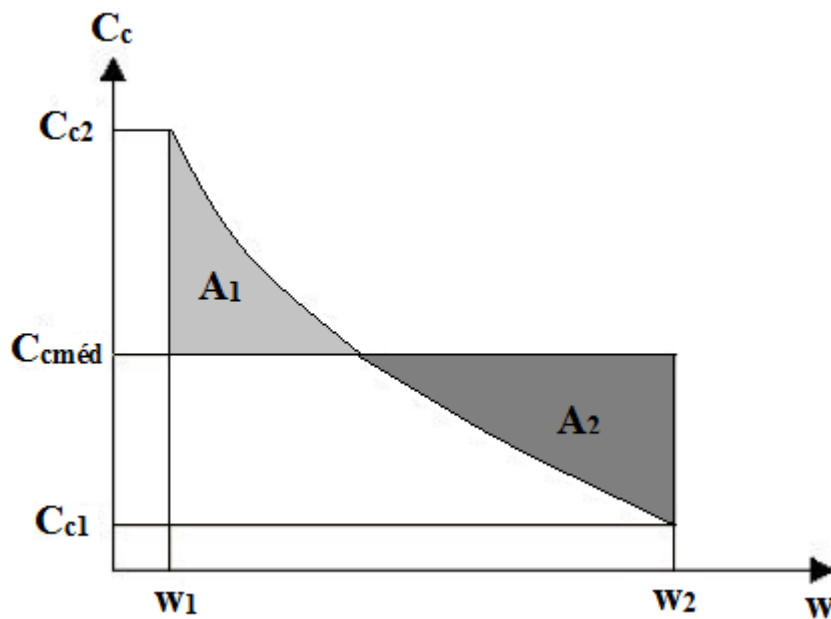


Figura 4.7 – Conjugado resistente médio para $x = -1$.

4.5 CONJUGADO X VELOCIDADE DO MOTOR

O motor de indução tem conjugado igual a zero à velocidade síncrona. À medida que a carga vai aumentando, a rotação do motor vai caindo gradativamente, até um ponto em que o conjugado atinge o valor máximo que o motor é capaz de desenvolver. Se o conjugado da carga aumentar mais, a rotação do motor cai bruscamente, podendo chegar a travar o rotor.

Representando num gráfico a variação do conjugado com a velocidade para um motor, obtêm-se uma curva com o aspecto representado na Figura 4.8.

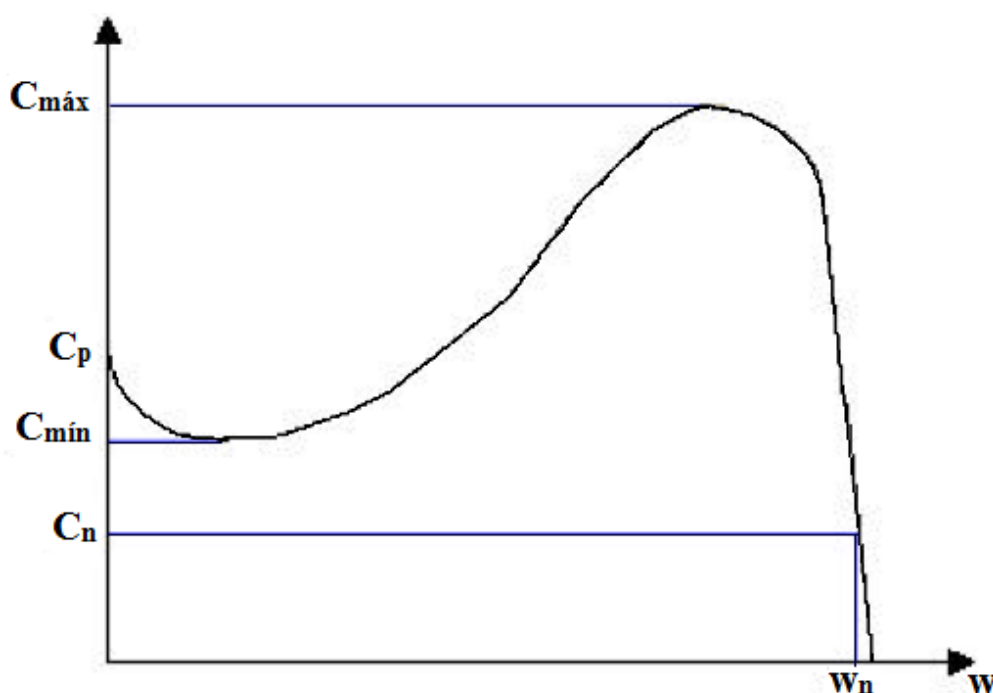


Figura 4.8 – Curva Conjugado x Velocidade [37].

Nesta curva destaca-se e define-se alguns pontos importantes. Os valores dos conjugados relativos a estes pontos são especificados por norma (NBR 7094) e serão apresentados a seguir.

4.5.1 CONJUGADO BÁSICO

É o conjugado calculado em função da potência e velocidade síncrona.

$$C_b = \frac{P_n}{2\pi \cdot \omega_s} \quad (4.24)$$

Onde:

C_b - Conjugado base em Nm;

ω_s - Rotação síncrona em rps;

P_n - Potência nominal em W.

4.5.2 CONJUGADO NOMINAL OU DE PLENA CARGA

É o conjugado desenvolvido pelo motor à potência nominal, sob tensão e frequência nominais.

$$C_n = \frac{P_n}{2\pi \cdot \omega_n} \quad (4.25)$$

Onde:

C_n - Conjugado Nominal em Nm;

ω_n - Rotação nominal em rps;

P_n - Potência nominal em W.

4.5.3 CONJUGADO COM ROTOR BLOQUEADO

Também denominado "Conjugado de Partida" ou "Conjugado de Arranque". É o conjugado mínimo desenvolvido pelo motor com rotor bloqueado. O valor do conjugado de partida depende do projeto do motor e normalmente é encontrado no catálogo ou na folha de dados do motor.

O conjugado de partida pode ser expresso em Nm ou mais comumente em porcentagem do conjugado nominal, ou seja:

$$C_p(\%) = \frac{C_p(Nm)}{C_n(Nm)} \times 100 \quad (4.26)$$

Obs.: Na prática, o conjugado de rotor bloqueado deve ser o mais alto possível para que o motor possa vencer a inércia inicial da carga e possa acelerá-la rapidamente, principalmente quando a partida é com tensão reduzida.

4.5.4 CONJUGADO MÍNIMO

É o menor conjugado desenvolvido pelo motor ao acelerar desde a velocidade zero até a velocidade correspondente ao conjugado máximo.

Na prática, este valor não deve ser muito baixo, isto é, a curva não deve apresentar uma depressão acentuada na aceleração, para que a partida não seja muito demorada, sobreaquecendo o motor, especialmente nos casos de alta inércia ou partida com tensão reduzida.

O conjugado mínimo também pode ser expresso em N.m ou em porcentagem do conjugado nominal.

4.5.5 CONJUGADO MÁXIMO

É o maior conjugado desenvolvido pelo motor, sob tensão e frequência nominais, sem queda brusca de velocidade.

Na prática, o conjugado máximo deve ser o mais alto possível, por duas razões principais:

a) motor deve ser capaz de vencer eventuais picos de carga, como pode acontecer em certas aplicações, como por exemplo: britadores, misturadores, calandras e outras.

b) motor não deve “arriar”, isto é, perder bruscamente a velocidade quando ocorrem quedas de tensão excessivas momentaneamente.

O conjugado máximo normalmente é expresso em porcentagem do conjugado nominal.

$$C_{m\acute{a}x}(\%) = \frac{C_{m\acute{a}x}(Nm)}{C_n(Nm)} \quad (4.27)$$

4.5.6 FATORES DE CORREÇÃO DOS CONJUGADOS EM FUNÇÃO DA TENSÃO

Quando a tensão aplicada ao motor (V_m) for diferente da nominal (V_n), os conjugados e a corrente de partida deverão ser corrigidos. A correção deve ser feita através de fatores de multiplicação k_1 , para a corrente de partida, e k_2 para os conjugados C_p e $C_{m\acute{a}x}$, tiradas da Figura 4.9.

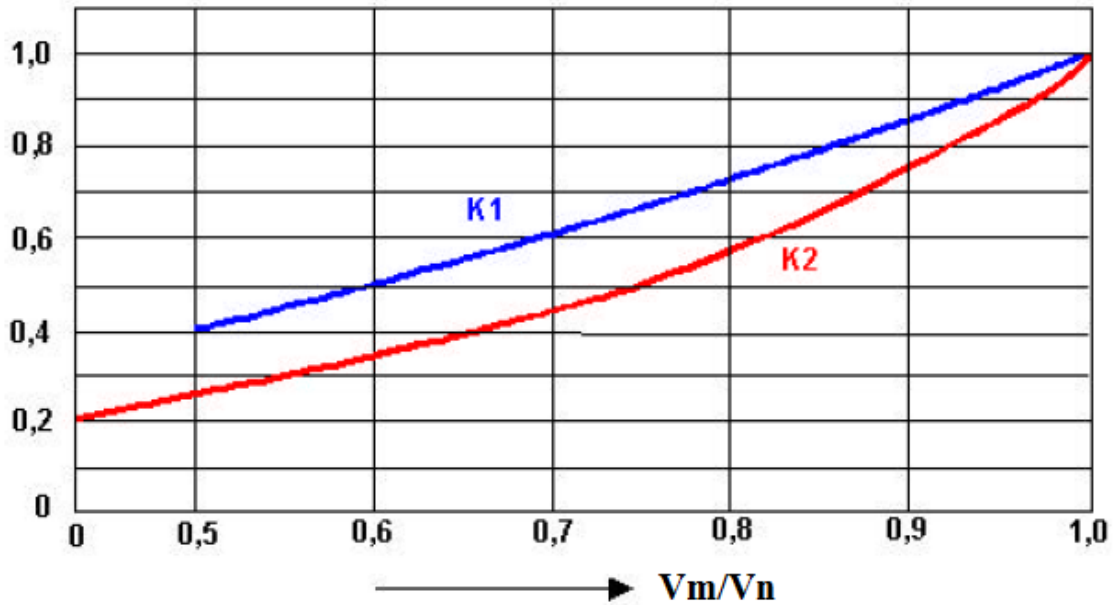


Figura 4.9 – Fatores de redução k_1 e k_2 [37].

Portanto, as Equações (4.28), (4.29) e (4.30) podem ser utilizadas para obtenção dos parâmetros corrigidos de acordo com a tensão de operação.

$$\left(\frac{I_p}{I_n}\right)_{V_m} = k_1 \times \left(\frac{I_p}{I_n}\right)_{V_n} \quad (4.28)$$

$$\left(\frac{C_p}{C_n}\right)_{V_m} = k_2 \times \left(\frac{C_p}{C_n}\right)_{V_n} \quad (4.29)$$

$$\left(\frac{C_{m\acute{a}x}}{C_n}\right)_{V_m} = k_2 \times \left(\frac{C_{m\acute{a}x}}{C_n}\right)_{V_n} \quad (4.30)$$

4.6 CONJUGADO MÉDIO DO MOTOR

O conjugado mecânico no eixo do motor é dado pela expressão (4.31) abaixo:

$$C_M = \frac{3 \cdot R_2 \cdot I_2^2}{2 \cdot \pi \cdot \omega_s \cdot s} \quad (4.31)$$

Onde:

R_2 - Resistência de fase do rotor em Ohm;

I_2 - Corrente de fase do rotor em A;

s - Escorregamento do motor em p.u.;

ω_s - Rotação síncrona.

A Equação (4.31) representa a curva de conjugado do motor, que após algumas simplificações pode ser representado pela expressão (4.32).

$$C_m = \frac{A - (B \times \omega_m)}{(C \times \omega_m^2) - (D \times \omega_m) + E} \quad (4.32)$$

Onde:

C_m - Conjugado motor em Nm;

ω_m - Rotação do motor em rps;

A, B, C, D, E - Constantes positivas que dependem do projeto do motor.

Os valores das constantes dependem do estado de saturação magnética do núcleo do motor.

Representando a Equação (4.32) em um gráfico, obtém-se a curva característica do conjugado do motor apresentado na Figura 4.10.

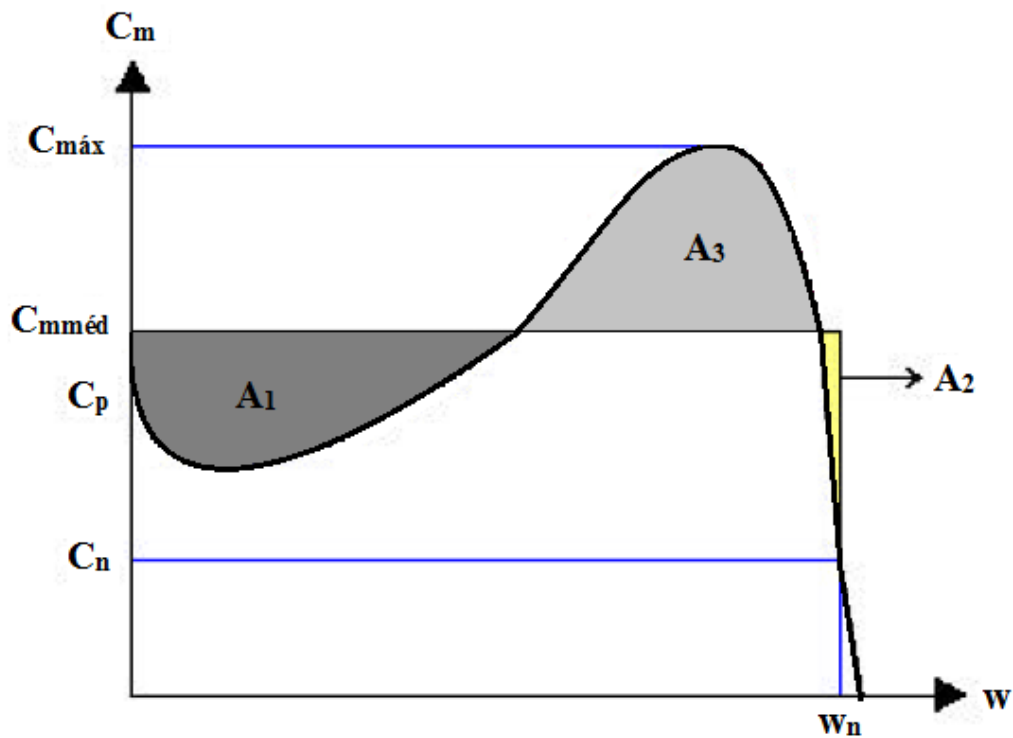


Figura 4.10 – Conjugado médio do motor.

Analicamente o conjugado motor médio pode ser calculado pela integral:

$$C_{mméd} = \frac{1}{\omega_2 - \omega_1} \int_{\omega_1}^{\omega_2} \left(\frac{A - (B \times \omega)}{(C \times \omega^2) - (D \times \omega) + E} \right) d\omega \quad (4.33)$$

Como esta integral é muito difícil de ser resolvida, na prática é feita a integração gráfica. Isto não é muito complicado, basta que se observe que a soma das áreas A_1 e A_2 seja igual à área A_3 (ver Figura 4.10).

Usualmente tem-se:

Para motores categorias N e H:

$$C_{mméd} = 0,45 \times \left(\frac{C_p}{C_n} + \frac{C_{máx}}{C_n} \right) \times C_n \quad (4.34)$$

b) Para motores categoria D:

$$C_{mméd} = 0,60 \times \frac{C_p}{C_n} \times C_n \quad (4.35)$$

Quando o conjugado nominal (C_n) é dado em kgfm, basta multiplicar pela gravidade ($9,81 \text{ m/s}^2$) para se obter em Nm.

4.7 MOMENTO DE INÉRCIA DA CARGA

O momento de inércia da carga acionada é uma das características fundamentais para o estudo da aplicação do motor elétrico. Tanto o momento do motor como da carga afetam o tempo de aceleração do motor. O momento de inércia é a grandeza que mede a "resistência" que um corpo oferece a uma mudança em seu movimento de rotação em torno de um dado eixo.

Esta grandeza depende do eixo de rotação, da forma do corpo e da maneira como sua massa é distribuída.

A unidade do momento de inércia no sistema internacional (SI) é o kgm^2 .

O momento de inércia de uma máquina, que tem rotação diferente da do motor deverá ser referido ao eixo do motor conforme expressão (4.36).

$$J_{ce} = J_c \times \left(\frac{\omega_c}{\omega_n} \right)^2 \quad (4.36)$$

Onde:

J_{ce} - Momento de inércia da carga referida ao eixo do motor em kgm^2 ;

J_c - Momento de inércia da carga em kgm^2 .

A Figura 4.11 esquematiza o sistema de ligação entre o motor e a carga para rotações diferentes.

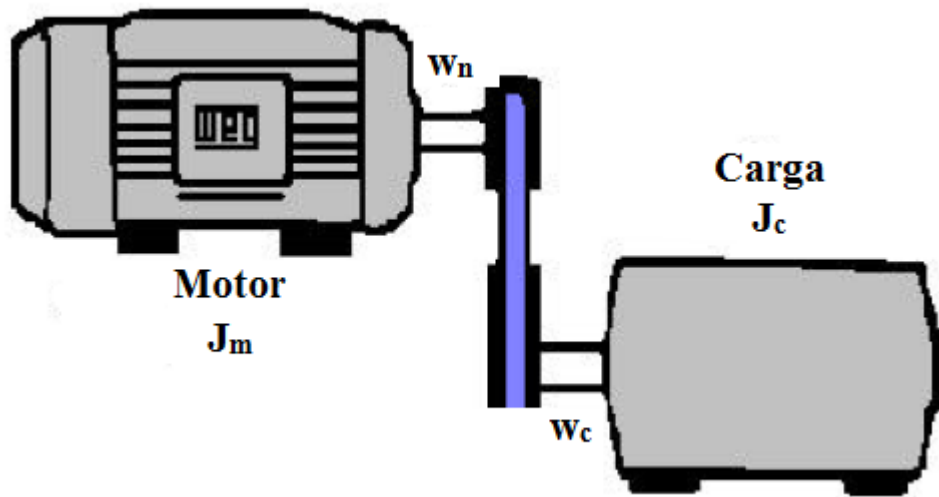


Figura 4.11 – Momento de inércia em rotações diferentes.

A inércia total vista pelo motor será obtida pela Equação (4.37)

$$J_t = J_m + J_{ce} \quad (4.37)$$

4.7.1 FORMAS DE SE OBTER O MOMENTO DE INÉRCIA DA CARGA

Para um acionamento perfeito das cargas mecânicas em operação, uma das maiores dificuldades encontradas pelos profissionais responsáveis pela realização de diagnóstico em plantas industriais corresponde ao conhecimento do valor do momento de inércia da carga.

Isto se justifica, pois o cálculo do tempo de partida do conjunto motor-carga é essencial quando da substituição por motores de menor potência. Neste sentido, serão indicadas neste capítulo algumas formas possíveis de se obter o momento de inércia da carga, inclusive mostrando uma metodologia que permite estimar o momento de inércia das cargas mecânicas centrífugas encontradas nos complexos industriais em operação

4.7.1.1 MOMENTO DE INÉRCIA FORNECIDO EM CATÁLOGOS

Inicialmente, pode ser verificado no próprio catálogo do fabricante do equipamento a ser acionado pelo motor elétrico, se o momento de inércia da carga é disponibilizado. No entanto,

observa-se que nem sempre esta grandeza é informada e, a partir daí surge a necessidade de procurar alternativas para se quantificar o momento de inércia da carga. Algumas formas possíveis serão indicadas nos subitens seguintes.

4.7.1.2 MOMENTO DE IMPULSÃO

Uma grandeza muito usada para medir o momento de inércia é o "Momento de Impulsão" fornecido em catálogos das cargas, conhecido como GD^2 da carga e expresso em kgm^2 . Sua relação com o momento de inércia é dado por (4.38) [37].

$$J_c = \frac{GD^2}{4} \quad (4.38)$$

4.7.1.3 ESTIMATIVA DE MOMENTO DE INÉRCIA DA CARGA

Como citado anteriormente, uma das grandes dificuldades para se realizar um diagnóstico energético nas plantas industriais em operação, é o conhecimento do valor do momento de inércia da carga.

Da referência [34] tem-se que a partir dos cálculos dos conjugados médios do motor, da carga, do momento de inércia do motor e do tempo de partida do acionamento medido ou estimado nas plantas industriais em funcionamento, pode-se estimar o momento de inércia da carga, o qual é representado pela Equação (4.39).

$$J_c = \left(\frac{C_{mméd} - C_{cméd}}{\omega} \right) \cdot t_a - J_m \quad (4.39)$$

Onde:

t_a - Tempo de aceleração;

J_m - Momento de inércia do motor;

J_c - Momento de inércia da carga.

Ao acionar um motor elétrico, este parte do repouso e sua velocidade aumenta até atingir um valor estável de funcionamento, que é quando chega ao regime permanente. A avaliação desta velocidade em seu regime transitório permite estimar o tempo necessário na partida do sistema.

Tomando-se como base as equações apresentadas e discutidas anteriormente, e o catálogo do motor elétrico, pode-se calcular os conjugados médios do motor e da carga e, conseqüentemente, o seu momento de inércia.

4.8 TEMPO DE ROTOR BLOQUEADO (TRB)

Tempo de rotor bloqueado é o tempo necessário para que o enrolamento da máquina, quando percorrido pela sua corrente de partida (“arranque”), atinja a sua temperatura limite, partindo da temperatura atingida em condições nominais de serviço e considerando a temperatura ambiente no seu valor máximo.

Este tempo é um parâmetro que depende do projeto da máquina. Encontra-se normalmente no catálogo ou na folha de dados do fabricante.

A Tabela 4.2 mostra os valores limites da temperatura de rotor bloqueado, de acordo com as normas NEMA e IEC.

Tabela 4.2 – Temperatura limite de rotor bloqueado.

Classe Térmica	T_{MAX}		ΔT_{MAX}
	NEMA	IEC	
B	175	185	80
F	200	210	105
H	225	235	125

Para partidas com tensão reduzida o tempo de rotor bloqueado pode ser corrigido como segue:

$$t_{rb} = t_b \times \left(\frac{V_n}{V_r} \right)^2 \quad (4.40)$$

Onde:

t_{rb} - Tempo de rotor bloqueado com tensão reduzida;

t_b - Tempo de rotor bloqueado à tensão nominal;

V_n - Tensão nominal;

V_r - Tensão reduzida.

4.8.1 TEMPO DE ROTOR BLOQUEADO EM RELAÇÃO À CLASSE ISOLANTE

Os tempos de rotor bloqueado apresentados em catálogos estão referenciados ao isolante classe “B”. Ao trocar-se o isolante para uma classe superior, pode-se aumentar o tempo de rotor bloqueado (t_{rb}), da seguinte maneira:

$$t_{rb} = \frac{T_{MÁX} - T_{AMB} - \Delta T_{MOTOR}}{k} \quad (4.41)$$

Onde:

$$k = 5,52 \times 10^{-4} \times \left(\left(\frac{I_p}{I_n} \right) \times J_1 \right)^2$$

$T_{MÁX}$ - Temperatura máxima da classe para curta duração (picos de temperatura);

ΔT_{MOTOR} - Elevação de temperatura do motor.

A Tabela 4.2 apresenta os valores limites para $T_{MÁX}$ e $\Delta T_{MÁX}$, para cada classe de isolante utilizada.

Pode-se notar que o tempo de rotor bloqueado é inversamente proporcional a $\left(\frac{I_p}{I_n} \right)^2$ ou J_1^2 .

4.8.2 TEMPO DE ACELERAÇÃO

Tempo de aceleração é o tempo que o motor leva para acionar a carga desde a rotação zero até a rotação nominal.

O tempo de aceleração permite verificar se o motor consegue acionar a carga dentro das condições exigidas pela estabilidade térmica do material isolante. O tempo de aceleração também é um parâmetro útil para dimensionar o equipamento de partida e o sistema de proteção.

O ideal seria que o tempo de aceleração fosse bem menor que o tempo de rotor bloqueado. Quando não pode ser muito menor, pelo menos deve obedecer a relação abaixo:

$$t_a < t_{rb} \cdot 0,8$$

Onde:

t_{rb} - tempo máximo de rotor bloqueado.

Para um movimento de rotação é válida a relação:

$$C_A = J \frac{dw_{ang}}{dt} \quad (4.42)$$

Onde:

J - momento de inércia do corpo em kgm^2 ;

C_A - conjugado acelerador em Nm;

w_{ang} - velocidade angular em rad/s.

A velocidade angular pode ser calculada por:

$$w_{ang} = 2 \cdot \pi \cdot \omega_n \quad (4.43)$$

Para o caso em que o motor deve acionar uma carga, tem-se:

$$J = J_t = J_m + J_{ce} \quad (4.44)$$

Onde:

J_t - inércia total referida ao eixo do motor (4.37).

O conjugado acelerador pode ser substituído sem perda de precisão pelo conjugado acelerador médio dado por:

$$C_{AMÉD} = C_{mméd} - C_{rméd} \quad (4.45)$$

Onde:

$$C_{rméd} = R \times C_{cméd} \quad (4.46)$$

Sendo R o fator definido como sendo a relação entre a rotação de saída e de entrada, ou seja, rotação da carga em relação à rotação do motor.

A Figura 4.12, mostra a curva do conjugado acelerador médio.

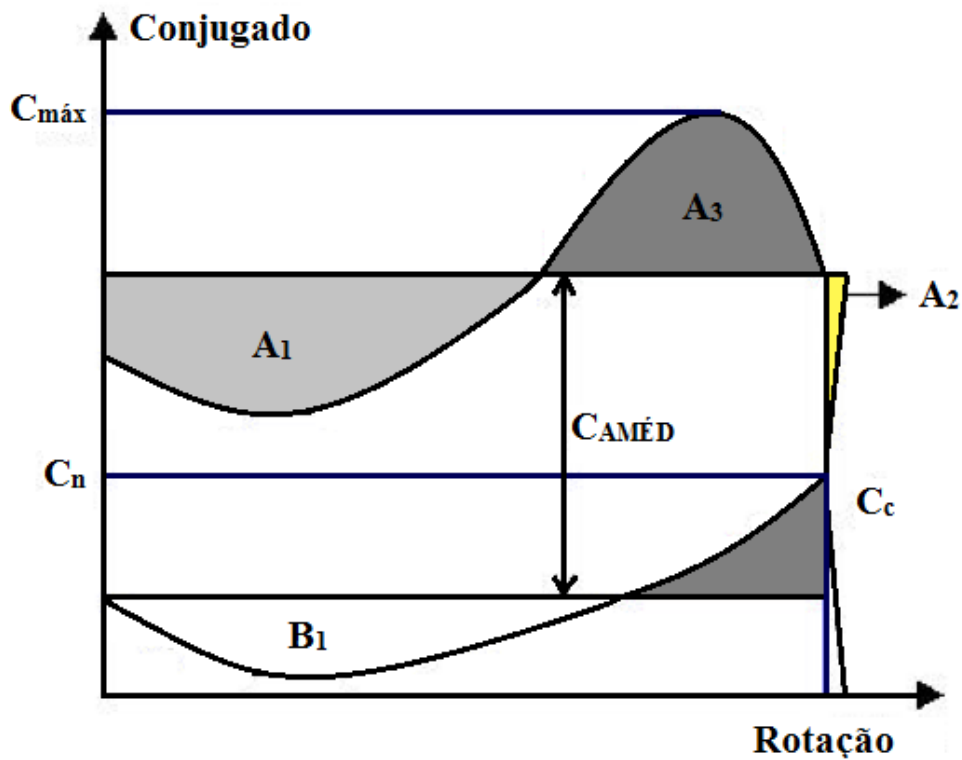


Figura 4.12 – Conjugado acelerador médio.

Substituindo (4.43), (4.44) e (4.45) em (4.42), tem-se:

$$C_{mméd} - C_{rméd} = (J_m - J_{ce}) \times 2 \cdot \pi \times \frac{d\omega}{dt} \quad (4.47)$$

Portanto:

$$dt = 2\pi \cdot \frac{J_m + J_{ce}}{C_{mméd} - C_{rméd}} \times d\omega \quad (4.48)$$

Integrando, tem-se:

$$\int_0^{t_a} dt = 2\pi \cdot \frac{J_m + J_{ce}}{C_{mméd} - C_{rméd}} \int_0^{\omega} d\omega \quad (4.49)$$

$$t_a = 2\pi \cdot \omega_n \times \left(\frac{J_m + J_{ce}}{C_{mméd} - C_{rméd}} \right) \quad (4.50)$$

Portanto, o tempo de aceleração pode ser obtido utilizando-se a Equação (4.50) para, enfim ser comparado com o tempo de rotor bloqueado.

4.8.3 POTÊNCIA DINÂMICA OU DE ACELERAÇÃO

O tempo de aceleração sempre deve ser menor que o tempo de rotor bloqueado do motor.

A potência dinâmica é a potência necessária para acelerar a carga até a rotação nominal em um intervalo de tempo menor que o tempo de rotor bloqueado.

Esta potência, na medida do possível, deve ser igual à potência nominal do motor.

Porém dependendo das características da carga (inércia e conjugado), a potência dinâmica pode assumir valores bem maiores que a potência nominal.

Nestes casos deverá ser feito um estudo técnico-econômico, para ver se é possível utilizar um acoplamento especial tal como hidráulico, eletromagnético ou de fricção (embreagem). Dependendo do estudo técnico-econômico pode tornar-se evidente que a melhor solução seria um outro tipo de motor, por exemplo um motor de anéis ou motor de gaiola acionado por conversor de frequência.

4.8.4 ESTUDO DE CASO

Como exemplo numérico, deseja-se saber que motor deve ser acoplado a uma bomba que apresenta as características expostas em seguida.

4.8.4.1 DADOS DA BOMBA

a) Características da rede de alimentação:

- $U = 440 \text{ V}$;
- $f = 60 \text{ Hz}$;
- Partida direta.

b) Características do ambiente:

- Atmosfera limpa (normal).

c) Características construtivas:

- Horizontal;
- Proteção térmica classe B;
- Sentido de rotação horário.

d) Características da bomba:

- $\omega_c = 1780 \text{ rpm}$;
- $J_c = 6 \text{ kgm}^2$;
- Acoplamento direto;
- Conjugado nominal: $C_{cn} = 480 \text{ Nm}$;
- Conjugado inicial: $C_o = 57,6 \text{ Nm}$ (retirado da curva de rotação x conjugado da bomba).

4.8.4.2 RESOLUÇÃO

a) Velocidade do motor (ω_n):

Como o acoplamento é direto tem-se que $R = 1$, logo:

$$\omega_n = \frac{\omega_c}{R} = \frac{1780}{1} = 1780 \text{ rpm}$$

Ou seja, $\omega_n = 29,7 \text{ rps}$.

Portanto, sendo $\omega_s = \frac{f}{p}$, o motor será de IV pólos.

c) Conjugado resistente médio ($C_{rméd}$):

Manipulando a Equação 4.9, encontra-se a seguinte relação vista em (4.51).

$$k_c = \frac{C_c - C_o}{\omega_c^2} \quad (4.51)$$

Substituindo (4.51) em (4.20), tem-se a Equação (4.52).

$$C_{cméd} = \frac{2 \cdot C_o + C_{cn}}{3} \quad (4.52)$$

$$\text{Logo, } C_{cméd} = \frac{2 \cdot 57,6 + 480}{3} = 198,4 \text{ Nm}$$

Como $R = 1$, obtém-se o conjugado resistente médio ($C_{rméd}$) conforme Equação (4.46).

$$C_{rmed} = R \times C_{cméd} = 1 \times 198,4 = 198,4 \text{ Nm}$$

d) Conjugado motor médio ($C_{mméd}$):

Para um motor de 90 kW / 125 cv da marca WEG, retira-se do catálogo as seguintes informações:

- $C_n = 49,5 \text{ kgfm}$
- $\frac{C_p}{C_n} = 2,2$
- $\frac{C_p}{C_n} = 2,5$
- $J_m = 1,60592 \text{ kgm}^2$

O conjugado motor médio é obtido a partir da Equação (4.34) utilizada para motores das categorias N e H.

$$C_{mméd} = 0,45 \times (2,2 + 2,5) \times 49,5 \times 9,81$$

$$C_{mméd} = 1020,8 \text{ Nm}$$

e) Tempo de aceleração (t_a):

Como o acoplamento é direto tem-se que $J_{ce} = J_c = 6 \text{ kgm}^2$. Logo, o tempo de aceleração é conhecido por meio de (4.50).

$$t_a = 2\pi \cdot 29,7 \times \left(\frac{1,60592 + 6}{1020,8 - 198,4} \right) = 1,726 \text{ segundos}$$

Do catálogo retira-se que o tempo de rotor bloqueado (t_{rb}) é de 19 segundos.

Fazendo a comparação de t_a com o t_{rb} , tem-se que a condição de $t_a \leq 0,8 \times t_{rb}$ deve ser atendida. Dessa forma, verifica-se que:

$$t_a \leq 0,8 \times 19$$

$$t_a \leq 15,2 \text{ s}$$

Portanto, conclui-se que o motor está apto a acionar a bomba.

4.8.4.3 ESPECIFICAÇÃO DO MOTOR

No estudo de caso proposto, o motor especificado apresenta as seguintes características:

- Motor trifásico de indução, rotor de gaiola, marca WEG;
- Potência: 125 cv;
- Polaridade: IV Polos;
- Tensão: 440 Volts;
- Frequência: 60 Hz;
- Grau de Proteção: IP 55;
- Classe de isolamento: F;
- Categoria: N;
- Regime de Serviço: S1.

4.9 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO IV

Este capítulo decorreu sobre a necessidade de se realizar uma verificação das condições de partida da carga antes de optar definitivamente por um motor de menor potência para seu acionamento.

Diante da constatação do superdimensionamento e, sendo este suficiente para que seja proposta uma troca do motor de indução trifásico em atividade, um procedimento de cálculos deve ser executado para verificar se o tempo de aceleração é menor que 80% do tempo de rotor bloqueado do motor. É fundamental que esta condição seja atendida para que o motor seja capaz de partir a carga acoplada ao seu eixo.

Foi descrito o procedimento de cálculos para se averiguar se o motor de menor potência é capaz de suprir as exigências da partida da carga e, caso ele não seja, deve-se tentar a primeira potência padronizada acima, executando novamente o procedimento de verificação e assim por diante, até encontrar a menor potência capaz de atender as necessidades da carga. Após a escolha, passa-se para a etapa econômica, na qual será feito um estudo sobre a viabilidade técnico-econômica de se adquirir um novo equipamento e efetuar a troca do motor atividade.

CAPÍTULO V

ANÁLISE ECONÔMICA

5 ANÁLISE ECONÔMICA

5.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Este capítulo discorre sobre a importância de se realizar uma análise econômica para projetos que requerem investimento inicial e quais os principais indicadores a serem considerados.

Para o sucesso dos investimentos em bens de produção, notadamente no setor industrial, há a necessidade de amplos estudos, visando oferecer ao potencial investidor uma margem de confiança para a tomada de decisão. Nesse sentido, a decisão por investimentos em tecnologias adequadas pode implicar na viabilidade técnico-econômica, que é reconhecida como o principal fator a ser considerado, visto que fornece e permite a avaliação de parâmetros determinantes para a implantação e continuidade do projeto no longo prazo.

A análise econômica consiste em fazer estimativas de todas as entradas e saídas, ou seja, os gastos envolvidos com o investimento inicial, operação e manutenção, e também as receitas geradas durante um determinado período de tempo, para assim obter-se o fluxo de caixa relativo à atividade, permitindo o cálculo dos indicadores econômicos conseguidos com esse empreendimento.

Comparando esses indicadores econômicos com as possíveis taxas de rendimento de mercado ou próprias para o investimento de capital, pode-se concluir sobre a viabilidade do investimento [32].

Quanto à estruturação dos novos investimentos, os valores e formas gerenciais distintos dos tomadores de decisão não só dependem do levantamento, como também da construção de módulos de gestão e gerenciamento favoráveis. A coleta de informações leva à análise, porém, esta depende de fatores do meio em que as unidades de produção serão instaladas.

Nos capítulos anteriores foram demonstrados os critérios da aplicação prática de uma análise técnica na adequação de um motor à carga mecânica aplicada em seu eixo. Nesse tipo de análise são abordadas as atuais condições operativas do motor a ser substituído e, posteriormente, se identifica o motor que melhor se adequa às condições impostas pela carga.

É realizada uma análise dos parâmetros elétricos envolvidos e a identificação da economia no consumo a ser obtida com a substituição do motor existente inicialmente por um motor melhor dimensionado. No entanto, para esta situação há um custo de aquisição de um novo motor que deve

ser levado em conta, bem como gastos com instalação e outros que podem vir a aparecer em decorrência da troca proposta.

Portanto, a avaliação só será completa quando incluir fatores econômicos que comprovem a viabilidade da substituição. Sendo assim, para uma análise completa, além da parte técnica, deve-se contemplar também a parte econômica, e esta pode ser incluída no estudo com o uso de indicadores econômicos, tais como: o valor presente líquido (VPL), a taxa interna de retorno (TIR), o tempo de retorno de capital (TRC), dentre outros.

Na sequência são apresentados alguns fatores e critérios econômicos que permitem analisar a viabilidade de uma proposta técnica.

5.2 FATORES A CONSIDERAR NA ANÁLISE ECONÔMICA

Para um estudo que contemple os motores em funcionamento na indústria, os principais fatores que influenciam na análise econômica são descritos e comentados a seguir.

a) Rendimento dos motores

Sempre que possível deve-se ter disponível a curva de rendimento em função do carregamento (potência fornecida no eixo) dos motores que estão sendo analisados. Em alguns casos podem-se tomar valores estatísticos normalizados ou valores de ensaio. A confiabilidade da análise está diretamente relacionada com a confiabilidade dos dados de rendimento. Atualmente, os catálogos de fabricantes fornecem valores de rendimento somente para algumas condições de carga.

b) Tempo de operação

É expresso em número de horas que o motor permanece em operação colocado sobre uma base mensal ou diária. Esta informação pode também estar contida no ciclo de trabalho do motor.

c) Nível de carregamento

Além do número de horas em operação, deve-se conhecer quanto da potência nominal do motor está sendo utilizada quando o mesmo se encontra em operação. Esta informação é essencial tendo em vista que o rendimento do motor depende da carga sendo solicitada do mesmo.

d) Custo da Energia

Para a análise econômica o custo do kWh deve ser conhecido. Em geral, este custo varia conforme o tipo de consumidor, enquadramento tarifário a que pertence e também de acordo com a concessionária.

e) Taxas de juros

A comparação de várias alternativas necessita de taxas referenciais para a aplicação de capital, as quais também variam de caso a caso e da perspectiva do usuário do motor, bem como da sua disponibilidade financeira.

Portanto, pode ser constatado que a análise econômica inclui uma série de fatores, muitos dos quais são estabelecidos de forma objetiva e outros que são específicos do caso que está sendo analisado. Outros fatores são muitas vezes determinados de forma subjetiva levando-se em conta também a experiência do usuário. A análise econômica expressa desta forma o caso especial de um usuário e dificilmente pode ser estendida para outros casos, devendo, portanto, cada caso ser avaliado separadamente.

5.2.1 VIDA ÚTIL DO MOTOR

Uma vez que a possível economia que o novo motor irá proporcionar ocorrerá ao longo da sua vida útil, torna-se necessário estimar qual a vida útil do mesmo. Para tanto, não existe uma forma precisa para a sua determinação, sendo que os métodos disponíveis baseiam-se em estudos estatísticos. Os principais fatores que influenciam a vida útil são: temperatura do enrolamento, temperatura ambiente, sobrecargas eventuais e variações de tensão da rede.

O principal fator que afeta a vida útil é a temperatura de trabalho do motor. Temperaturas acima da permitida pela classe de isolamento do motor contribuem para um envelhecimento precoce dos materiais isolantes, podendo levar a avarias prematuras. Estima-se que para cada aumento de 10 a 12 graus além da temperatura permitida pela classe de isolamento, a vida útil do motor é reduzida pela metade. Estudos estatísticos mostram que a vida útil varia também com a potência do motor.

Valores aproximados para a vida útil podem ser obtidos pela Tabela 5.1, a qual serve para fins de análise econômica e foi retirada da referência [4]. De acordo com o estudo estatístico que serviu de base a Tabela 5.1, a vida média dos motores elétricos é de 13,3 anos, isto considerando todas as faixas de potência. Este valor pode também ser utilizado para fins de análise econômica.

Tabela 5.1 – Vida útil média de um motor de indução.

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

5.3 ANÁLISE ECONÔMICA

Existem vários tipos de análise econômica que podem ser feitas, as quais envolvem diferentes pontos de vista e com diferentes objetivos. As conclusões e decisões que serão tomadas serão também baseadas em um determinado tipo de análise. Cada tipo de análise objetiva determinar um parâmetro que será usado para a tomada de decisão.

As análises que serão detalhadas a seguir neste capítulo visam determinar os seguintes fatores: tempo de retorno (simples e capitalizado), economia mensal gerada pela aquisição de um motor melhor dimensionado, custo da energia consumida ao longo da vida útil, custo da energia economizada, etc.

Para que um projeto seja viável, é necessário que o seu retorno econômico se dê em um adequado período, onde se optará pela alternativa que apresente o melhor resultado, ou seja, de menor custo inicial e com menor prazo de retorno.

Para o estudo em questão, toma-se como referência a vida útil do motor elétrico. Para um tempo de retorno superior à vida útil do equipamento, o descarte do projeto deve ser imediato.

A seguir é descrita a forma de determinação das principais variáveis da análise econômica.

5.3.1 ECONOMIA MENSAL DE ENERGIA

Para a determinação do tempo de retorno quando é feita a substituição de um motor existente por outro, é necessário inicialmente o conhecimento das perdas de cada um. O rendimento de cada motor está diretamente ligado com o carregamento em que o motor irá operar, logo, o

conhecimento das características operacionais do motor é primordial para a execução desta análise econômica. Com o auxílio da metodologia desenvolvida neste trabalho, é possível determinar o rendimento do motor em atividade e estimar qual serão o carregamento e rendimento do novo motor proposto.

A diferença nas perdas (ΔP) em kW entre um motor em operação e um novo motor, pode ser conhecida pela Equação (5.1).

$$\Delta P_p = 100 \cdot \left(\frac{P_1}{\eta_1} - \frac{P_2}{\eta_2} \right) \quad (5.1)$$

Onde:

P_1 - potência nominal do motor atual (kW);

P_2 - potência nominal do novo motor (kW);

η_1 - rendimento em % do motor atual;

η_2 - rendimento em % do novo motor.

Adotando-se uma base de análise mensal, a redução no consumo ΔC dada em kWh/mês com a aquisição de um motor de alto rendimento será então determinada pela relação exposta na Equação (5.2).

$$\Delta C = \Delta P_p \cdot H \quad (5.2)$$

Onde:

H - número de horas em operação durante um mês;

ΔC - redução no consumo mensal em kWh/mês.

As equações anteriores consideram que o motor trabalha sempre sob a mesma condição de carga e consequentemente com um rendimento constante. Quando o motor trabalha sob carga e rendimento variáveis, deve-se calcular a diferença de perdas para cada valor de carga. Para tanto, pode-se usar o ciclo de carga do motor, conforme mostra a Figura 5.1. Para cada trecho do ciclo de carga, está associado um determinado rendimento para o “Motor 1” e para o “Motor 2”.

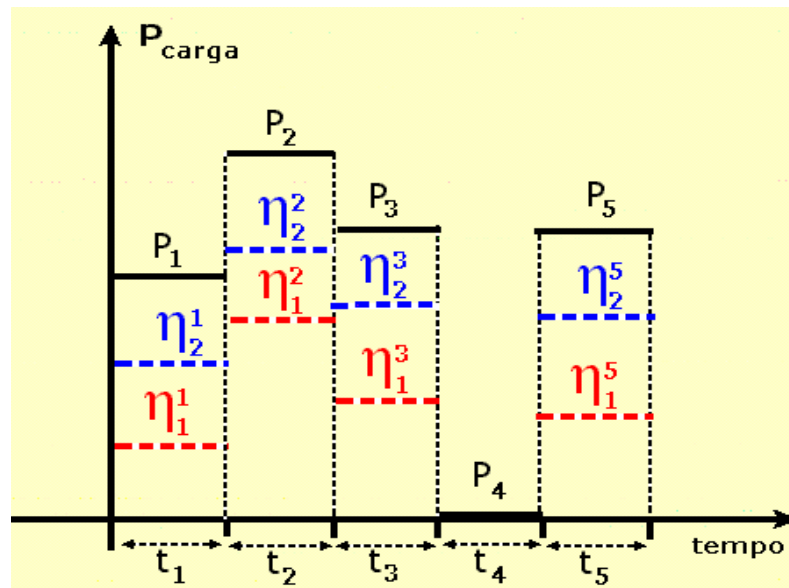


Figura 5.1 – Ciclo de carga e rendimento dos motores para cada trecho.

Pode-se, desta forma determinar uma curva com as diferenças de perdas, a qual será obtida do ciclo de carga e das curvas de rendimento dos motores, conforme ilustrado na Figura 5.2. A diferença de perdas para todo ciclo de carga será então dada pela Equação (5.3).

$$\Delta P_p = \sum_{i=1}^n 100 \cdot \left(\frac{P_1}{\eta_1^i} - \frac{P_2}{\eta_2^i} \right) \quad (5.3)$$

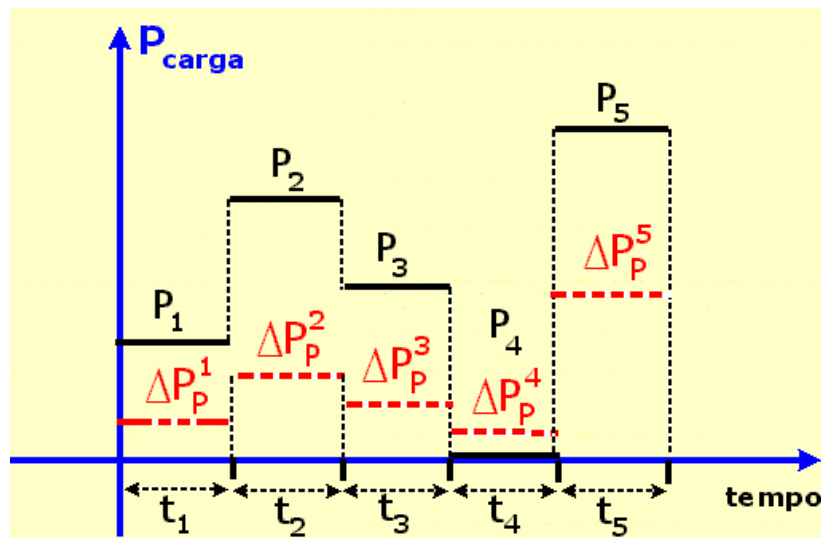


Figura 5.2 – Ciclo de carga e diferença de perdas de cada trecho.

A determinação da redução do consumo mensal segue sendo calculado pela Equação (5.2). A economia em R\$/mês, denominada de ΔE , pode agora ser estimada pela expressão (5.4).

$$\Delta E = \Delta C \cdot C_{kWh} \quad (5.4)$$

Onde:

ΔE - economia mensal em R\$/mês;

C_{kWh} - custo do kWh em R\$.

Considerando a fórmula estabelecida para a redução do consumo, pode-se também usar a Equação (5.5) para a economia mensal:

$$\Delta E = \Delta P_p \cdot H \cdot C_{kWh} \quad (5.5)$$

Conforme mostra a última equação a economia mensal em reais depende diretamente da diferença de perdas entre os motores, do número de horas que o motor trabalha durante o mês e do custo do kWh. Qualquer alteração num destes fatores reflete-se diretamente na economia mensal.

Deve-se também salientar que o valor do kWh é considerado constante na análise feita, caso o preço da energia aumente ao longo da vida útil do motor o valor economizado também aumentará na mesma proporção. A consideração do aumento da tarifa será considerado mais adiante. Finalmente a economia mensal significa um montante de capital que deixará de ser pago na conta de energia. Esta diferença tem diferentes significados e consequências dependendo do ponto de vista. Para a concessionária, por exemplo, trata-se de uma energia que poderá ser utilizada para atender outro cliente, ou que foi disponibilizada para comercialização.

5.3.2 FLUXO DE CAIXA

A base de todas as técnicas de análise de investimentos é o fluxo de caixa. O fluxo de caixa se trata de uma representação gráfica de entradas e saídas de recursos monetários ao longo de um determinado período, ou seja, uma demonstração visual de receitas e despesas distribuídas pela linha do tempo futuro.

O fluxo de caixa tem grande importância, pois facilita aos administradores tomarem decisões importantes de investimentos com base em uma visão futura dos recursos financeiros de uma empresa.

5.3.3 TEMPO DE RETORNO SIMPLES

É o tempo necessário para que o capital investido na aquisição do motor seja retornada na forma de parcelas mensais que deixarão de ser pagos na conta de energia (economia mensal). Em geral o tempo de retorno é expresso em meses. O tempo de retorno aceitável é estabelecido pelo usuário, expressando um critério particular de cada empresa.

A determinação do tempo de retorno permite estabelecer uma forma de avaliar se o investimento dará retorno a curto, médio ou longo prazo, ou até mesmo se não haverá retorno ao longo da vida útil do motor. Não existe um valor ótimo ou aceitável para o tempo de retorno que atenda a todos os casos e organizações, uma vez que isto faz parte do julgamento subjetivo do investidor e da comparação com outras formas de investimento do capital. Em geral, considerando tempo de vida útil média de um motor (13,3 anos), procura-se obter um tempo de retorno menor que 4 anos, sendo que a literatura recomenda um valor médio de 2 anos. Quando uma proposta apresenta tempo de retorno muito próximo ou maior que a vida útil esperada do motor ela deve ser descartada.

Deve-se ter também em mente que decorrido o tempo de retorno, o motor passará a proporcionar uma economia mensal de energia, a qual do ponto de vista econômico pode ser considerada como um ganho de capital que se estenderá por toda a vida útil do motor.

Com base na economia mensal proporcionada pelo motor de potência adequada pode-se determinar qual o tempo de retorno do investimento adicional feito na aquisição do mesmo. O tempo de retorno simples não considera a capitalização do valor da economia mensal (taxa de juros zero) e é dado pela Equação (5.6).

$$T_{rs} = \frac{\Delta C_a}{\Delta E} \quad (5.6)$$

Onde:

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

ΔC_a - custo de aquisição do novo motor .

No caso de se realizar uma comparação entre duas opções de aquisição e saber qual o tempo de retorno adicional ao optar por alguma das opções, utiliza-se a Equação (5.7) para determinar o valor de ΔC_a .

$$\Delta C_a = C_{a2} - C_{a1} \quad (5.7)$$

Onde:

C_{a1} - custo de aquisição do Motor 1;

C_{a2} - custo de aquisição do Motor 2.

Como está sendo considerado um retorno em parcelas mensais, o valor obtido com a equação acima deverá ser arredondado para o próximo inteiro.

5.3.4 TEMPO DE RETORNO CAPITALIZADO

O tempo de retorno também pode considerar uma determinada taxa de juros, de forma que a economia seja auferida em parcelas mensais, cujo valor presente será menor, conforme mostra a Figura 5.3.

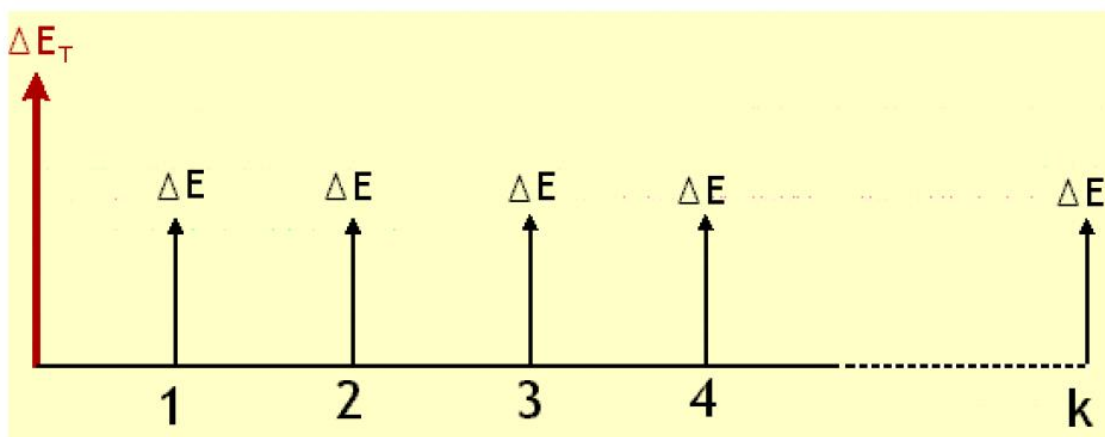


Figura 5.3 – Fluxo de caixa do valor de economia mensal.

Considerando uma taxa de juros i em valores percentuais e considerando N períodos (meses), obtém-se o seguinte valor presente das parcelas mensais dado pela Equação (5.8).

$$\Delta E_T = \frac{\left[\left(1 + \frac{i}{100} \right)^N - 1 \right]}{\frac{i}{100} \cdot \left(1 + \frac{i}{100} \right)^N} \cdot \Delta E \quad (5.8)$$

Onde:

ΔE_T - valor presente das parcelas mensais de N meses considerando capitalização;

De acordo com a fórmula anterior as parcelas mensais de economia de energia aparecem multiplicadas pelo fator de valor atual. A fim de 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 segue explicitado na expressão (5.9).

$$\Delta C_a = \frac{\left[\left(1 + \frac{i}{100} \right)^{T_{rc}} - 1 \right]}{\frac{i}{100} \cdot \left(1 + \frac{i}{100} \right)^{T_{rc}}} \cdot \Delta E \quad (5.9)$$

Através da aplicação de logaritmos em ambos os lados da equação anterior, pode-se determinar o tempo de retorno capitalizado conforme (5.10).

$$T_{rc} = \frac{\log \left(\frac{\Delta E}{\Delta E - \Delta C_a \cdot \frac{i}{100}} \right)}{\log \left(1 + \frac{i}{100} \right)} \quad (5.10)$$

Como no caso do tempo de retorno simples, a equação acima fornecerá um valor não inteiro. Como estamos considerando que o retorno do capital investido será feito por meio de parcelas mensais, o valor obtido deve ser arredondado para o próximo valor inteiro.

Deve-se atentar para o fato de que o tempo de retorno capitalizado será maior que o tempo de retorno simples, uma vez que cada uma das parcelas mensais de economia é multiplicada por um fator de desconto.

5.3.5 TEMPO DE RETORNO CAPITALIZADO CONSIDERANDO AUMENTO DO CUSTO DA ENERGIA

A determinação do tempo de retorno também pode incluir o efeito do aumento mensal (previsto ou provável) do custo do kWh. Para tanto, deve-se inicialmente determinar uma taxa de juros líquida aplicando a Equação (5.11).

$$i_L = \frac{\left(1 + \frac{i}{100}\right)}{\left(1 + \frac{i_e}{100}\right)} - 1 \quad (5.11)$$

Onde:

i_L - taxa de juros líquida considerando o aumento do custo da energia;

i_e - taxa de aumento mensal da energia em %.

A expressão para o cálculo do tempo de retorno capitalizado será então dada por (5.12).

$$T_{rc} = \frac{\log\left(\frac{\Delta E}{\Delta E - \Delta C_a \cdot \frac{i_L}{100}}\right)}{\log\left(1 + \frac{i_L}{100}\right)} \quad (5.12)$$

Trata-se da mesma equação anteriormente empregada na determinação do tempo de retorno capitalizado, onde apenas a taxa de juros foi substituída pela taxa líquida.

5.3.6 ENERGIA ECONOMIZADA AO LONGO DA VIDA ÚTIL

Quando há a substituição de um motor superdimensionado por um mais adequado à carga, a economia de energia gerada será dada a partir do momento da instalação até o final da vida útil do motor. Esta economia torna-se extremamente importante tendo em vista que em média o consumo de motores representa 60% a 70% da energia total consumida em instalações industriais. Desta

forma, medidas de redução de consumo de motores possuem em geral grande impacto sobre o consumo total de energia.

Além disso, o menor consumo do motor poderá proporcionar uma economia indireta, caso o mesmo ajude a reduzir a demanda em horários de ponta ou reduzir a demanda total contratada. No caso de autogerarção de energia, esta parcela representa uma energia que não precisará ser produzida, reduzindo gastos direta e indiretamente. A energia total economizada ao longo da vida útil pode ser determinada pelas expressões (5.13) e (5.14).

$$C_{vu} = \Delta C \cdot V_u \quad (5.13)$$

$$C_{vu} = \Delta P_p \cdot H \cdot V_u \quad (5.14)$$

Onde:

C_{vu} - energia total economizada em kWh durante a vida útil do motor;

V_u - vida útil do motor em meses.

A vida útil do motor poderá ser determinada pela Tabela 5.1 em função da potência de saída do motor.

5.3.7 VALOR PRESENTE LÍQUIDO (VPL)

O valor presente líquido (VPL) é um critério muito recomendado por especialistas em finanças para decisão de investimento, isto porque o VPL considera o valor do investimento no tempo, e permite uma decisão mais acertada quando há dois tipos de investimentos, pois ao considerar os fluxos futuros a valores atuais, os fluxos podem ser adicionados e analisados conjuntamente, evitando a opção por um projeto menos viável economicamente. O VPL pode ser obtido conforme Equação (5.15).

$$VPL = \frac{\left(1 + \frac{i}{100}\right)^N - 1}{\frac{i}{100} \cdot \left(1 + \frac{i}{100}\right)^N} \cdot \Delta P_p \cdot H \cdot C_{kWh} - \Delta C_a \quad (5.15)$$

Onde:

N - número de meses de funcionamento do motor considerado na análise;

i - taxa de juros ao mês (%).

5.3.7.1 VALOR RETORNADO AO LONGO DA VIDA ÚTIL

Outro critério interessante de análise é o valor total (em R\$) retornado ao longo da vida útil. Mesmo após transcorrido o tempo de retorno, o motor continuará proporcionando um retorno financeiro mensal até o final da sua vida útil. Este valor poderá ser determinado considerando ou não a capitalização das parcelas mensais. O valor sem considerar a capitalização será dado pela expressão (5.16).

$$VPL_s = \Delta P_p \cdot H \cdot C_{kWh} - \Delta C_a \quad (5.16)$$

Onde:

VPL_s - valor retornado líquido simples.

O valor de retorno líquido foi obtido descontando-se o valor adicional investido na aquisição do novo motor. Além de uma taxa de juros igual a zero, também foi considerado que o custo do kWh não se altera ao longo da vida útil do motor.

4.1.1.1 VALOR LÍQUIDO RETORNADO CAPITALIZADO AO LONGO DA VIDA ÚTIL

Considerando uma taxa de juros i para cada uma das parcelas mensais que retornarão obtém-se um valor presente de retorno capitalizado dado pela Equação (5.17).

$$VPL_c = \frac{\left(1 + \frac{i}{100}\right)^{V_u} - 1}{\frac{i}{100} \cdot \left(1 + \frac{i}{100}\right)^{V_u}} \cdot \Delta P_p \cdot H \cdot C_k - \Delta C_a \quad (5.17)$$

Onde:

VPL_c - valor retornado líquido capitalizado.

5.3.8 VALOR LÍQUIDO RETORNADO CAPITALIZADO COM AUMENTO DO CUSTO DO KWH

Pode-se também considerar um aumento do custo de energia ao ser feito a determinação do retorno líquido capitalizado. O procedimento é semelhante ao que foi utilizado para o tempo de retorno: primeiro determina-se uma taxa de juros líquida e então se utiliza a Equação (5.18) para se encontrar o valor líquido de retorno capitalizado.

$$VPL_c = \frac{\left(1 + \frac{i_L}{100}\right)^{V_u} - 1}{\frac{i_L}{100} \cdot \left(1 + \frac{i_L}{100}\right)^{V_u}} \cdot \Delta P_p \cdot H \cdot C_{kWh} - \Delta C_a \quad (5.18)$$

5.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO V

A dificuldade de avaliar a viabilidade econômica de um projeto em ambiente de incertezas é um fato presente na atividade dos gestores e, em alguns momentos, chega ao ponto de tornar a escolha por investir em determinado projeto bastante intuitiva.

A análise largamente utilizada tanto pelas empresas, como pelos órgãos de financiamento, é baseada na interpretação de indicadores que evidenciem numericamente a realidade, principalmente, quando se trata de projetos de alta complexidade.

A análise econômica é uma alternativa capaz de reduzir a incerteza, sem adição significativa de custo e tempo, necessitando apenas conhecimentos estatísticos para leitura dos resultados. Pode-se, portanto, concluir que com a utilização de indicadores econômicos conhecidos, tais como os mencionados neste capítulo, o nível de incerteza no processo de decisão é reduzido e esta redução, por sua vez, proporcionará benefícios para o processo de tomada de decisão no gerenciamento de projetos.

CAPÍTULO VI

APLICAÇÃO COMPUTACIONAL

6 APLICAÇÃO COMPUTACIONAL

6.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Este capítulo tem por objetivo apresentar uma implementação computacional da metodologia desenvolvida nesta dissertação. Conforme mencionado anteriormente, os métodos desenvolvidos e apresentados para levantamento das condições de operação dos motores nas indústrias podem ser implementados computacionalmente e, dessa forma, tornar mais prática a sua aplicação. A interface a ser apresentada no decorrer do capítulo foi desenvolvida utilizando o GUIDE do MATLAB®, que é um *software* matemático bastante utilizado.

No entanto, convém destacar que se pode optar pelo software que se tenha preferência, pois a metodologia é facilmente implementada em qualquer linguagem.

6.2 APRESENTAÇÃO DA INTERFACE

A tela inicial do programa é mostrada na Figura 6.1. As opções disponíveis são mostradas no menu principal.

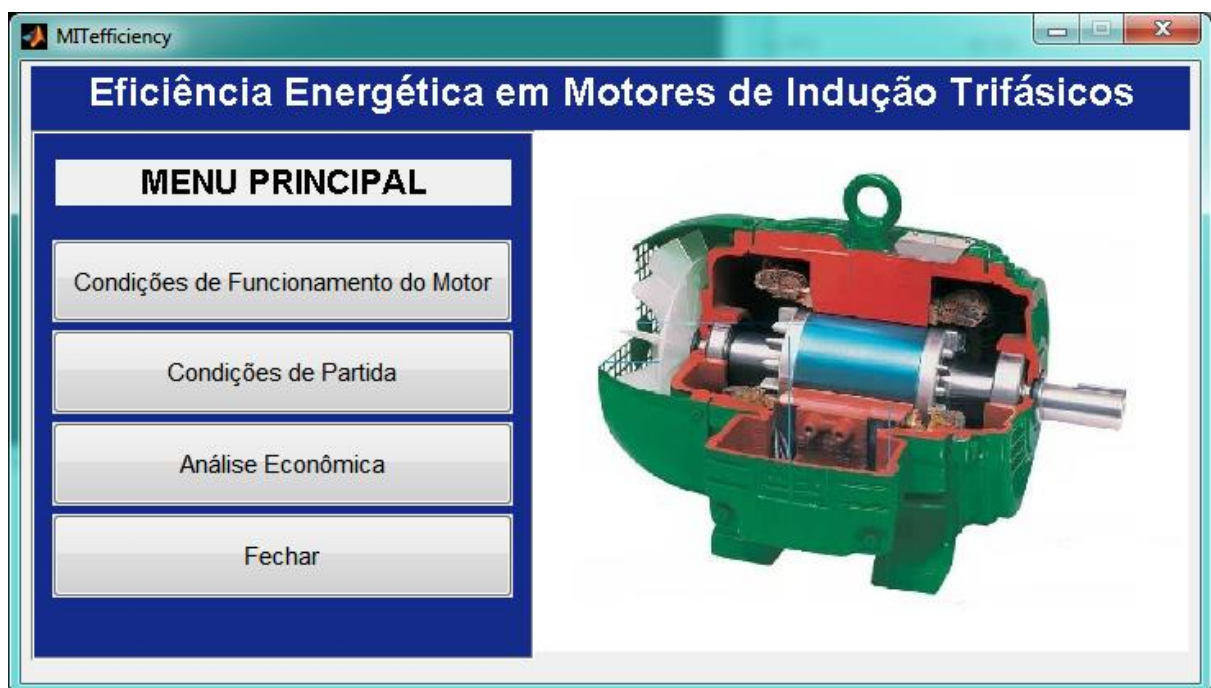


Figura 6.1 – Tela inicial de análise da eficiência energética em motores de indução trifásicos.

Selecionando o botão das “Condições de Funcionamento do Motor” será mostrada a interface apresentada na Figura 6.2. Para utilizar o recurso de gerar as curvas, basta preencher os campos pertencentes ao painel de “Dados de Catálogo” e clicar no botão “Gerar Curvas”. Caso se queira utilizar algum dos métodos de medição, seleciona-se o método desejado que pode ser “Medição de Corrente e Tensão” ou “Medição de Potência Elétrica”.

Após preencher os campos solicitados, clica-se no botão “Calcular” e os resultados obtidos das condições de funcionamento do motor de indução serão mostrados no painel de resultados, o qual compreende: o carregamento, rendimento, fator de potência e potência requerida pela carga. Com estas informações disponíveis, é possível concluir se seria vantajoso propor uma substituição do motor em atividade por outro que se adequasse melhor às exigências da carga acoplada.

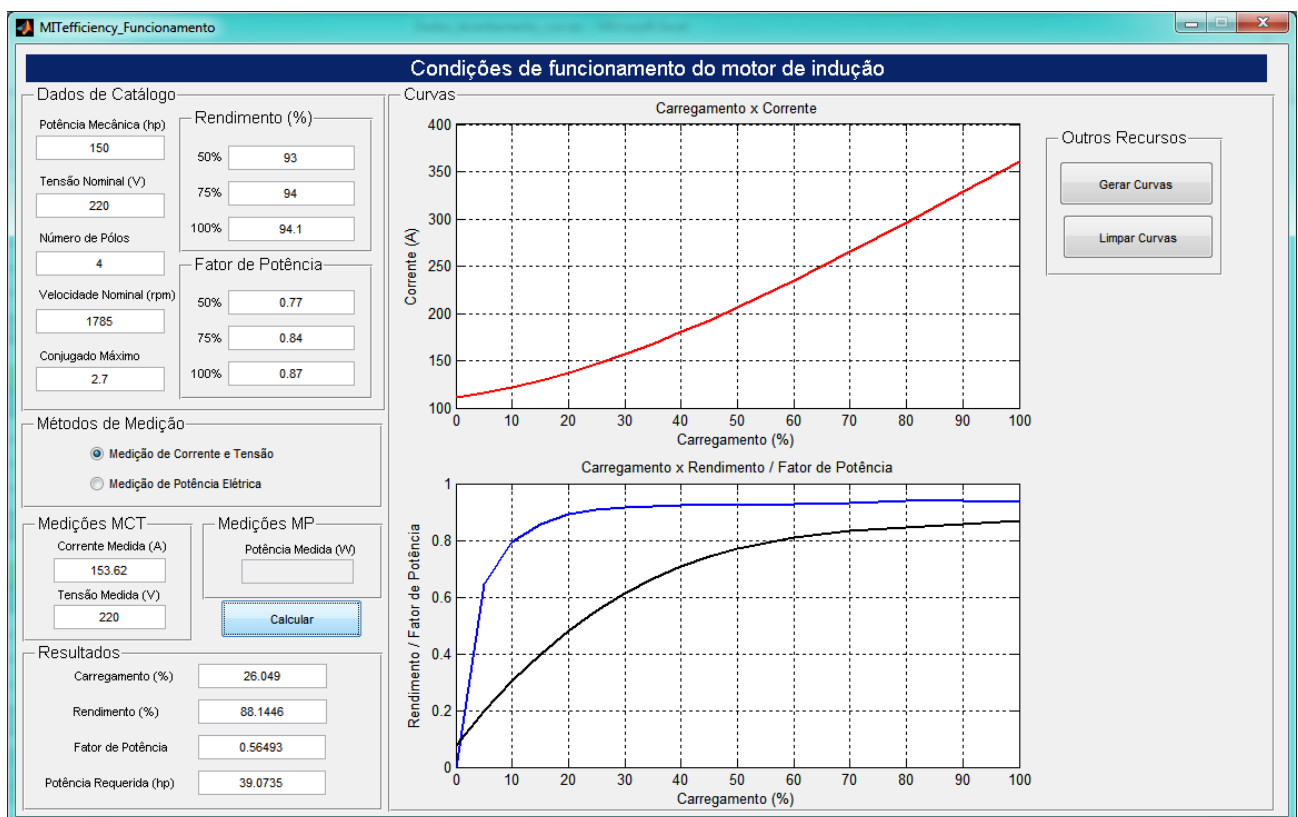


Figura 6.2 – Tela de verificação das condições de funcionamento do motor de indução.

Após utilizar estes recursos de verificação e, com um carregamento abaixo de 50% que foi o caso simulado no exemplo, convém considerar-se uma substituição imediata do motor em operação, no entanto, outros fatores devem ser levados em conta na tomada de decisão.

Outra opção disponível no menu principal é a verificação das condições de partida do motor, pois, propondo-se a utilização de um menor potência, deve-se ter certeza de que o mesmo seria

capaz de atender as condições de partida da carga. O procedimento de cálculo utilizado nesta etapa segue o que foi exposto no Capítulo 4. Para a verificação das condições de partida do motor conforme a carga, a tela a ser exibida será a ilustrada na Figura 6.3.

The screenshot shows a software window titled "MITefficiency_Partida" with a subtitle "Verificação das Condições de Partida do Motor Conforme a Carga". The interface is divided into two main sections: "Dados do Novo Motor" (New Motor Data) and "Dados da Carga" (Load Data). The "Dados do Novo Motor" section includes input fields for Potência Nominal (hp) (100), Velocidade Nominal (rpm) (1780), Momento de Inércia (kgm^2) (0.97982), Cp/Cn (3.2), Cmax/Cn (3.2), Categoria (N), Tempo Rotor Bloqueado (B) (8), and Alterar Classe de Isolamento (B). The "Dados da Carga" section includes a dropdown for Tipo do Conj. Resistente de Carga (Parabólico), Velocidade da Carga (1780), Rendimento do Acoplamento (1), a dropdown for Momento de Inércia, and an input field for Momento de Inércia (kgm^2) (25.076). There is a button "Estimar Momento de Inércia" and a large "Calcular" button. The "Resultado da Análise" section shows the Tempo de Aceleração (segundos) (5.02859) and the Conclusão (O motor está apto a acionar a carga).

Section	Field	Value
Dados do Novo Motor	Potência Nominal (hp)	100
	Velocidade Nominal (rpm)	1780
	Momento de Inércia (kgm ²)	0.97982
	Cp/Cn	3.2
	Cmax/Cn	3.2
	Categoria	N
	Tempo Rotor Bloqueado (B)	8
	Alterar Classe de Isolamento	B
Dados da Carga	Tipo do Conj. Resistente de Carga	Parabólico
	Velocidade da Carga	1780
	Rendimento do Acoplamento	1
	Momento de Inércia (kgm ²)	25.076
	Calcular	Button
Resultado da Análise	Tempo de Aceleração (segundos)	5.02859
	Conclusão	O motor está apto a acionar a carga

Figura 6.3 – Tela de verificação das condições de partida do motor conforme a carga.

Nesta etapa da avaliação, simulam-se possíveis motores que sejam capazes de suprir a demanda da carga. Para isso, toma-se por base a potência requerida encontrada anteriormente e se escolhe um motor de potência comercial imediatamente superior ao valor desta potência. Caso, o motor testado não esteja apto a acionar a carga, escolhe-se outro de potência superior e assim por diante, até encontrar o motor de menor potência que consegue acionar a carga. Os dados do novo motor são retirados do catálogo.

Como mencionado anteriormente, na prática há certa dificuldade em se obter o momento de inércia da carga por conta de uma deficiência dos fabricantes em disponibilizar este parâmetro. Sendo assim, uma opção para estimar o momento de inércia da carga foi implementado e sua tela é apresentada na Figura 6.4 a seguir.

MITefficiency_Estimativa_Momento_Inercia

Estimativa do Momento de Inércia da Carga

Dados do Motor Atual	Dados da Carga
Potência Nominal (hp) 150	Rendimento do Acoplamento 1
Velocidade Nominal (rpm) 1785	Tipo do Conj. Resistente de Carga Parabólico
Momento de Inércia (kgm ²) 2.57	Velocidade da Carga 1785
Cp/Cn 2.6	
Cmax/Cn 2.7	
Tempo de aceleração medido 4.5	
Categoria N	

Estimar

Resultado Estimado

Momento de Inércia (kgm²)
25.076

Figura 6.4 – Tela da estimativa do momento de inércia.

O tempo de aceleração medido é obtido na partida do motor atual e os outros dados solicitados são encontrados em seu catálogo. Todo procedimento de medição do tempo de aceleração já foi detalhado anteriormente no Capítulo 4. Dessa maneira, o momento de inércia da carga é conhecido e pode-se voltar à tela da Figura 6.3 para preencher o campo correspondente e, com isso, ter o diagnóstico final sobre o atendimento à demanda da carga na partida. No caso simulado, o motor de 100 hp seria suficiente para atender os requisitos de partida.

Após esta análise técnica, é oferecido, na tela inicial do programa, a opção de se realizar a análise econômica com os indicadores apresentados na Figura 6.5.

The screenshot displays the 'Análise Econômica' (Economic Analysis) window of the MITefficiency_Analise_Economica application. The interface is organized into several sections for input, calculation, and results.

Motor Atual (Current Motor):

- Potência nominal (hp): 150
- Carregamento (%): 26.05
- Rendimento (%): 88.14

Novo Motor (New Motor):

- Potência nominal (hp): 100
- Carregamento (%): 39.07
- Rendimento (%): 91.26
- Custo de Aquisição (R\$): 7500

Informações Adicionais (Additional Information):

- Vida Útil (anos): 28
- Taxa de Juros da Capitalização (mensal): 1

Tarifação (Billing):

- Tarifação Aplicada:**
 - ☒ Horossazonal Verde / Azul
 - ☐ Convencional
- Tarifa fora de ponta (R\$/kWh): 0.16
- Tarifa na ponta (R\$/kWh): 1.3
- Funcionamento fora de ponta (h/mês): 654
- Funcionamento na ponta (h/mês): 66

Resultados (Results):

Atual (Current)	Novo (New)
Potência Consumida Atual (kW): 33.0723	Potência Consumida Novo (kW): 31.9376
Consumo Atual (kWh/mês): 23812.1	Consumo Novo (kWh/mês): 22995
Consumo Atual (R\$/mês): 6298.29	Consumo Novo (R\$/mês): 6082.19
Energia Economizada (kWh/mês): 817.031	Energia Economizada (R\$/mês): 216.105
Energia Economizada na Vida Útil (kWh): 274522	Energia Economizada na Vida Útil (R\$): 72611.2
Tempo de retorno simples (meses): 34.7054	Tempo de retorno capitalizado (meses): 42.8389
Valor retornado simples (R\$): 65111.2	Valor retornado capitalizado (R\$): 13347.2

Figura 6.5 – Tela da análise econômica.

Analisando-se os indicadores econômicos, conclui-se sobre a viabilidade ou não da troca do motor em atividade. Observa-se que o rendimento do motor novo pode ser conhecido utilizando-se o recurso de gerar as curvas características já apresentado, tendo em vista que o carregamento já é conhecido.

6.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO VI

O programa desenvolvido tem por objetivo dinamizar todo processo de verificação do superdimensionamento e pode ser incrementado com outras opções, conforme a necessidade do usuário.

O objetivo principal do desenvolvimento desta interface foi mostrar que a metodologia pode facilmente ser implementada computacionalmente, na linguagem que for preferível ao implementador, e com isso a aplicação da metodologia se torna mais prática ainda, podendo ser

empregada a um montante maior de máquinas presentes nas indústrias e com mais agilidade na obtenção dos resultados.

CAPÍTULO VII

CONCLUSÕES

7 CONCLUSÕES

No trabalho apresentado é evidenciado que o superdimensionamento dos motores elétricos presentes na indústria acarreta a redução do rendimento do motor elétrico, uma vez que os motores possuem maior rendimento quando operam próximos a sua potência nominal. O fator de potência também é prejudicado, provocando a necessidade de instalação de mais equipamentos para a sua correção.

Existem mais de 200 milhões de motores instalados, os quais são responsáveis por um consumo anual de energia de aproximadamente dois bilhões de megawatts-hora [23]. Neste cenário, um aumento de 0,5% na eficiência dos sistemas motrizes é equivalente à construção de uma usina com capacidade de produção de 1140 MW, todo ano. Portanto, há um grande potencial de conservação de energia em motores de indução trifásicos.

O dimensionamento com excessiva margem de segurança, o desconhecimento do pleno comportamento das cargas, tamanhos preferenciais ou padronizados e requisitos de elevados conjugados de partida implicam que a grande quantidade dos motores atualmente instalados no Brasil opera com cargas inferiores a 50% da potência nominal e muitas vezes, por longos períodos, praticamente sem carga.

Este trabalho apresentou uma metodologia desenvolvida com o intuito de se verificar com mais praticidade e qualidade as condições de funcionamento dos motores. Para casos de superdimensionamento, é analisada a possibilidade dos motores serem substituídos por outros corretamente dimensionados, sendo que esta troca pode ser feita por meio da aquisição de um novo motor ou por realocação dentro da própria fábrica. No procedimento de análise é levado em conta o atendimento às condições de partida do conjunto motor-carga.

Destaca-se como grande vantagem dos métodos desenvolvidos, o fato de se poder avaliar a porcentagem do carregamento, rendimento e fator de potência, sem a dependência das curvas características muitas vezes não fornecidas pelos fabricantes. Portanto, facilidade de aplicação aliada ao uso de ferramentas comuns é o principal ponto para a utilização da metodologia apresentada que tem como objetivo o aumento do aproveitamento energético nos motores de indução.

O método de medição de potência (MP) gerou resultados mais precisos que o método de medição de corrente e tensão (MCT), no entanto, a grande vantagem do método MCT é que os parâmetros a serem medidos em campo são mais fáceis de serem adquiridos na prática.

O método desenvolvido é dependente de alguns dados fornecidos no catálogo do fabricante e de algumas medições. No entanto, tem a grande vantagem de não depender das curvas de desempenho dos motores - as quais são raramente disponibilizadas pelos fabricantes - na determinação do carregamento do motor em atividade.

Após a avaliação técnica e verificação da possibilidade de ser feita uma substituição do motor por outro melhor dimensionado, deve ser feita uma análise econômica que comprove a viabilidade econômica da proposta.

A análise largamente utilizada tanto pelas empresas, como pelos órgãos de financiamento, é baseada na interpretação de indicadores que evidenciem numericamente a realidade, principalmente, quando se trata de projetos de alta complexidade e custo.

A análise econômica é uma alternativa capaz de reduzir a incerteza, sem adição significativa de custo e tempo, necessitando apenas conhecimentos estatísticos para leitura dos resultados. Pode-se, portanto, concluir que com a utilização de indicadores econômicos conhecidos, o nível de incerteza no processo de decisão é reduzido e esta redução, por sua vez, proporcionará benefícios para o processo de tomada de decisão no gerenciamento de projetos.

Observou-se que é possível conseguir uma economia bastante significativa simplesmente utilizando equipamentos corretamente dimensionados. No entanto, na maioria dos sistemas há uma constante troca de equipamentos eletromecânicos que apresentam problemas técnicos, por outros de potência incorreta, já que não há o equipamento certo disponibilizado de imediato no almoxarifado. Portanto, é também de fundamental importância que a empresa implante um sistema de manutenção, de preferência preventiva ou preditiva, para evitar que o problema de utilização de equipamento inadequado volte a ocorrer.

Além de ser vantajoso para a empresa economicamente falando, um sistema mais eficiente energeticamente é favorável ao meio ambiente, já que a produção de energia implica, necessariamente, na exploração de recursos naturais e emissão de rejeitos no meio ambiente.

Constata-se que a indústria não é prioridade nos programas governamentais de eficiência energética apesar de ser o maior consumidor de energia. O setor industrial responde por 34,6% de toda energia consumida no Brasil [10]. No entanto, não existe uma política governamental de longo prazo específica para o uso eficiente da energia na indústria. Isso se reflete na baixa prioridade dos programas federais de eficiência energética, nos investimentos de fundos setoriais de eficiência energética e nas condições de financiamento. Os setores residencial, comercial e público, que têm

recebido maior prioridade nas políticas governamentais, respondem apenas por 15,0% do total do consumo de energia no País.

Diante do cenário energético apresentado e da perspectiva de constante elevação do consumo de energia, este trabalho é direcionado para ser aplicado no setor industrial, especificamente na forma de energia de força motriz.

Embora não se tenha uma avaliação precisa do potencial já explorado da efficientização de motores, há sinais de que muito já foi feito, mas que ainda resta um bom potencial a ser explorado.

Este trabalho vem contribuir para que seja repensado pela indústria a aceitação de projetos de eficiência energética, ao tornar todo procedimento de constatação de superdimensionamento mais acessível e rápido, e atentando para o quão significativo é o consumo de energia elétrica dos motores no cenário nacional.

É importante lembrar que o assunto tratado neste trabalho não se esgota com o mesmo e pode ser complementado com outros estudos, reflexões e pesquisas, tais como:

- Realização de um estudo atualizado sobre a porcentagem de motores elétricos superdimensionados na indústria brasileira;
 - Levantamento do potencial real de conservação de energia já explorado nacionalmente;
 - Implantação de manutenção preditiva ou diagnóstica concomitantemente com a correção do superdimensionamento, para que o problema diagnosticado não seja reincidente.
 - Criação de programas computacionais de análise de viabilidade de troca de motores superdimensionados, considerando também o fator de potência adquirido por meio da metodologia desenvolvida, já que este parâmetro também é prejudicado com o baixo carregamento e pode gerar custos adicionais para a indústria.
-

REFERÊNCIAS

- [1] 38ª Assembleia Nacional da ASSEMAE. Tipologia de Projetos de Eficiência Energética em Sistemas de Abastecimento de Água e de Esgotamento Sanitário - Utilização de Recursos da Reserva Global de Reversão – RGR. Salvador, 25 a 30 de maio de 2008.
 - [2] NATURESA, J. S.; Levantamento dos Programas de Eficiência Energética para Sistemas Motrizes na Indústria e os Principais Resultados do PROCEL Info. VI Congresso Brasileiro de Planejamento Energético - CBPE, 2008, Salvador.
 - [3] DIAS, R; Mattos, C. e Balestieri, J.; Uso racional da energia – Ensino e Cidadania. Editora Unesp, páginas 91 a 123, 2006.
 - [4] ANDREAS, John C.; Energy Efficient Motors - Selection and Applications, Marcel Dekker Inc., 1982.
 - [5] GELLER, H. S. Energy Revolution: Policies for a Sustainable Future. Washington: Island Press, 2003.
 - [6] BRASIL. Decreto 4.059 de 19.dez.01. Regulamenta a Lei no 10.295, de 17 de outubro de 2001, que dispõe sobre a Política Nacional de Conservação e Uso Racional de Energia, e dá outras providências. D.O.U., Brasília, DF, 20 de dezembro de 2001. Disponível em: <http://www.mme.gov.br>. Acesso em 25 de abril de 2010.
 - [7] BRASIL. Decreto 4.508 de 11.dez.02. Dispõe sobre a regulamentação específica que define os níveis mínimos de eficiência energética de motores elétricos trifásicos de indução rotor gaiola de esquilo, de fabricação nacional ou importados, para comercialização ou uso no Brasil, e dá outras providências. D.O.U., Brasília, DF, 12 de dezembro de 2002. Disponível em: <http://www.energiabrasil.gov.br/decretos/decreto4508.pdf>. Acesso em 01 de maio de 2010.
 - [8] Fazendo o Mundo Girar: WEG Motores Ltda. Mercosul Magazine. Disponível em: http://www.mercosulsearch.com.br/magazine/firma_semana3010.htm. Acesso em 24 de maio de 2010.
 - [9] WEG. Números. Disponível em: <http://www.weg.com.br/>. Acesso em 25 de maio de 2010.
 - [10] Ministério das Minas e Energia. Balanço Energético Nacional 2010: Ano Base 2009. Disponível em: <http://www.mme.gov.br>. Acesso em 09 de abril de 2011.
 - [11] Ministério das Minas e Energia. Balanço de Energia Útil. Ano Base 2004. Disponível em: <http://www.mme.gov.br>. Acesso em 01 de maio de 2011.
 - [12] PROCEL, 2001. Conservação de Energia: Eficiência de Instalações e Equipamentos. 2 ed. Itajubá, MG. Editora da EFEI.
-

-
- [13] LOPES, F. A. e LISBOA, M. L. V. O Projeto da Eletrobrás/Procel com Recursos do Banco Mundial e GEF. XVI SNPTEE. Campinas, 21 a 26 de outubro de 2010. Disponível em: http://www.xviisnp tee.com.br/acervo_tecnico/memoria/xvi/14_Secao_II_Sce/sce-002.pdf. Acesso em: 16 de novembro de 2010.
- [14] BRASIL. Lei 10.295, de 17.out.01 – “Lei de Eficiência Energética”. Dispõe sobre a Política Nacional de Conservação e Uso Racional de Energia e dá outras providências. D.O.U., Brasília, DF, 18.out.2001. Disponível em https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/leis_2001/l10295.htm. Acesso em 01 de agosto de 2011.
- [15] GARCIA, Agenor G. P.. Impacto da Lei de Eficiência Energética para Motores Elétricos no Potencial de Conservação de Energia na Indústria, Rio de Janeiro, 2003. Tese de Mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE.
- [16] MARTIGNONI, Alfonso. Máquinas de Corrente Alternada. São Paulo: Globo 7ª Ed., 2005. 410p.
- [17] KOSOW, Inwing L., Máquinas Elétricas e Transformadores. São Paulo: Globo 15ª Ed., 2005, 667p.
- [18] GUEDES, Manuel Vaz. O Motor de Indução Trifásico – seleção e aplicação. Faculdade do Porto – Portugal, 1994. 75p.
- [19] NISKIER, J.; Macintyre A. J. Instalações Elétricas. Rio de Janeiro: LTC 3ªEd., 1996. 532p.
- [20] AMERICO, M. Sistemas Motrizes: Eficiência Energética e Técnicas de Acionamento. Apresentações em Power-Point em curso Cepel/Sebrae-RJ/UFF. Niterói-RJ, 2003.
- [21] ELETROBRÁS. Conservação de Energia: Eficiência Energética de Instalações e equipamentos. Itajubá, MG: Editora da EFEI 2ª Ed., 2001. 467p.
- [22] MOREIRA, J. F, Soares G. A, Tabosa, R. P, Shinda, R. Guia operacional de motores elétricos. Rio de Janeiro. 1998.
- [23] NADEL, S. et al., 2002.; Energy-Efficient Motors Systems: A Handbook on Technology, Program and Policy Opportunities. 2nd ed. Washington, D.C. Editora ACEEE, 2002. 494 p.
- [24] Ministério de Minas e Energia. Plano Nacional de Energia 2030 / Ministério de Minas e Energia; Colaboração Empresa de Pesquisa Energética. Brasília: MME: EPE, 2007.
- [25] PROCEL Indústria. Metodologia de realização de diagnóstico energético. Guia avançado. Rio de Janeiro, dezembro/2004.
- [26] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7094: Máquinas elétricas girantes – Motores de indução - Especificação. Fevereiro de 2003.
- [27] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9884: Máquinas elétricas girantes - graus de proteção proporcionados pelos invólucros - Especificação. Junho de 1987. [34]
-

-
- [28] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15623-1: Máquina elétrica girante - Dimensões e séries de potências para máquinas elétricas girantes - Padronização. Outubro de 2008.
- [29] SÁ, J. S.; Contribuição à Análise do comportamento térmico de motores de indução trifásico com rotor do tipo gaiola. Tese de Doutorado, UNICAMP, 1989.
- [30] BORTONI, E. C., Filho, A. R., Tanaka, E. T.; Análise de Carregamento de Motores e Conservação de Energia. Quadrante Softwares Especializados Ltda. Itajubá, 1992.
- [31] KOSTENKO, M. P.; Piotrovski, L. M. – Máquinas Elétricas – Editorial Mir Moscou, 1976.
- [32] HOMEM, G. R. Avaliação técnico-econômica e análise locacional de unidade processadora de soro de queijo em Minas Gerais. 2004. 230 f. Tese (Doutorado em Ciência e Tecnologia de Alimentos) – Universidade Federal de Viçosa, 2004.
- [33] WEG, Guia Prático de Treinamento Técnico Comercial. Disponível em: <http://catalogo.weg.com.br/files/wegnet/WEG-guia-pratico-de-treinamento-tecnico-comercial-50009256-catalogo-portugues-br.pdf>. Acesso em: 25 de junho de 2011.
- [34] GUIMARÃES, R.; DELAIBA, Antonio Carlos; SILVA, S. F. P.; BISPO, D. Estimativa do Momento de Inércia de Cargas Mecânicas para Estudos em Eficiência Energética. III Congresso Brasileiro de Eficiência Energética, 2009, Belém.
- [35] BORTONI, E. C., 2004; Acionamento com motores de indução trifásicos. DIEEE - Disseminação de Informações sobre Eficiência Energética. PNUD/FUPAI/EFFICIENTIA.
- [36] AUGUSTO JÚNIOR, N. Motores Trifásicos de Indução – Dimensionamento. Integração, Ensino, Pesquisa e Extensão, São Paulo, 42, p. 243-250, 2006.
- [37] WEG Indústrias S.A. Centro de Treinamento de Clientes - Módulo 1- Comando e Proteção (Apostila).
- [38] SANTOS, A. H. M. ; BORTONI, E. DA C., *Analysis of three phase induction motors under conditions of technical and economical uncertainty aiming energy conservation*. Eletricidade Moderna, v. XXIII, p. 10, 1995.
- [39] BORTONI, E. C., *Motor oversizing outlook*. In: *International Conference on Electrical Machines and Systems 2007*. v. 1. p. 1385-1396. Seul, Coréia do Sul : KIEEE, 2007.
-

ANEXOS

ANEXO I

Artigo *Metodologia de Avaliação das Condições de Funcionamento dos Motores de Indução* apresentado no IV CBEE – Congresso Brasileiro de Eficiência Energética.
Juiz de Fora, Minas Gerais, 2011.

METODOLOGIA DE AVALIAÇÃO DAS CONDIÇÕES DE FUNCIONAMENTO DOS MOTORES DE INDUÇÃO

Ciciane Chiovatto, Décio Bispo, Victor de Paula e Silva e Wellington Maycon Santos Bernardes

*Universidade Federal de Uberlândia, Av. João Naves de Ávila, 2160 – Bloco 3N –
Campus Santa Mônica – CEP: 38.400-902 – Uberlândia – MG*

Abstract: This paper presents a methodology developed to obtain the characteristic curves of three-phase induction motors, in order to make it possible to diagnose the operating conditions of motors already installed in the industry. To execute the presented method it is needed data provided in the catalogs of motor manufacturers, as well as field measurements. The performance curves to be obtained are those of current, power factor and efficiency. The focus of this study is to analyze the motor's loading condition and attest if it is either oversized or not. The efficiency and power factor can be obtained through the loading, and the feasibility of swapping of the motor by another of an appropriate size is evaluated. The aim of this procedure is to increase the energy efficiency of the overall system. *Copyright © 2011 CBEE/ABEE*

Keywords: induction motor, energy efficiency, energy consumption, oversizing.

Resumo: Este trabalho apresenta uma metodologia desenvolvida para obtenção das curvas características de motores de indução trifásicos, a fim de tornar possível diagnosticar as condições de funcionamento dos motores já instalados na indústria. Para execução do método apresentado necessita-se de dados fornecidos nos catálogos de fabricantes de motores, além de medições em campo. As curvas de desempenho a serem obtidas são de corrente, fator de potência e rendimento. O foco deste trabalho é a análise do carregamento dos motores em funcionamento, de modo a verificar se há superdimensionamento. Tendo conhecimento do carregamento, é possível obter o respectivo rendimento e fator de potência, para analisar a viabilidade da troca do motor em estudo por outro melhor dimensionado, buscando assim alcançar uma maior eficiência energética no sistema.

Palavras Chaves: motor de indução, eficiência energética, consumo de energia, superdimensionamento.

1 INTRODUÇÃO

Os motores de indução são responsáveis por cerca de 63% da eletricidade em uso nas indústrias dos EUA (Hurst, 2007). Existem mais de 200 milhões de motores instalados, os quais são responsáveis por um consumo anual de energia de aproximadamente dois bilhões de megawatts-hora (Nadel, 2002). Neste cenário, um aumento de 0,5% na eficiência dos sistemas motrizes é equivalente à construção de uma usina com capacidade de produção de 1140 MW, todo ano.

O superdimensionamento é uma causa muito comum de operação ineficiente dos motores elétricos e implica na potência nominal do motor ser bem maior do que a potência solicitada pela carga mecânica.

As causas mais frequentes do superdimensionamento são (PROCEL, 2004):

- Desconhecimento das características da carga que será acionada pelo motor;
- Falta de conhecimento de métodos para um dimensionamento mais adequado;
- Aplicação de sucessivos fatores de segurança nas várias etapas de um projeto;
- Expectativa de um futuro aumento de carga;
- As equipes de manutenção substituírem um motor danificado por outro de potência maior, quando falta no estoque um sobressalente de potência adequada;
- Redução da produção por retração do mercado consumidor;

Com isso, várias consequências desfavoráveis decorrem do superdimensionamento dos motores de indução, dentre as quais se destacam (PROCEL, 2004):

- O maior custo, volume e peso do motor;
- A redução do fator de potência, provocando a necessidade de instalação de mais equipamentos para a sua correção;
- A redução do rendimento do motor, embora muitos motores apresentem seu rendimento máximo próximo a 75% da sua carga nominal;
- A maior corrente de partida, acarretando maior custo da instalação e proteção.

É escopo deste trabalho apresentar uma metodologia, a fim de se obter as condições de carregamento do motor, tornando assim possível avaliar o rendimento do sistema e propor medidas que aumentem a eficiência energética de todo sistema motor-carga.

Uma das vantagens desse método é não depender da disponibilidade das curvas de desempenho do motor, as quais são de conhecimento do fabricante, mas dificilmente disponibilizadas. Tais curvas de interesse podem ser geradas utilizando-se algumas medições e informações mais acessíveis dos fabricantes. Isso torna o procedimento mais dinâmico e prático, além disso, a qualidade dos resultados obtidos se mostrou melhor do que os encontrados por meio de outras metodologias usadas atualmente.

2 METODOLOGIA PROPOSTA

A metodologia proposta requer informações de placa do motor que se deseja analisar, valores encontrados por meio de medições, além de algumas estimativas para alguns parâmetros que serão necessários.

2.1 Dados do fabricante

Na placa do motor de indução são encontradas informações sobre o equipamento. A Tabela 1 mostra os dados geralmente disponíveis em catálogos de fabricantes e que necessitam ser coletados.

Tabela 1: Dados disponíveis em catálogos de fabricantes de motores.

Grandeza	Símbolo	Unidade
Potência nominal	P_n	W
Velocidade nominal	ω_n	rpm
Tensão nominal	U_n	V
Corrente nominal	I_n	A
Velocidade síncrona	ω_s	rpm
Frequência nominal	f_n	Hz
Fator de potência nominal	$\cos \phi_n$	-
Fator de potência 75%	$\cos \phi_{75}$	-
Fator de potência 50%	$\cos \phi_{50}$	-
Rendimento nominal	η_n	-
Rendimento 75%	η_{75}	-
Rendimento 50%	η_{50}	-
Conjugado nominal	M_n	N.m
Conjugado máximo	M_k	p.u. de M_n

2.2 Dados estimados

No motor de indução trifásico, a curva característica de rendimento em função do carregamento possui um declive mais acentuado abaixo de 50% de carga, não apresentando um comportamento similar aos pontos acima deste valor. Este fato dificulta a obtenção de uma equação que descreva esta curva.

Devido a isso, e tendo o intuito de se obter resultados mais refinados, é proposto utilizar mais um ponto para o rendimento e fator de potência, além dos três encontrados na placa do motor (50, 75 e 100%). Por conveniência, o quarto ponto escolhido é em 0% de carregamento.

1. Rendimento para carregamento nulo

Neste ponto de carregamento o rendimento é nulo.

2. Corrente a vazio

A corrente a vazio é comumente encontrada na literatura como uma porcentagem da corrente nominal, em torno de 30%. No entanto, foi verificado analisando-se motores com potências entre 1 a 500 hp, que há certa flutuação em torno desse valor para cada potência de motor. Sendo assim, essa estimativa não será adotada no presente trabalho, a fim de não prejudicar a qualidade dos resultados adquiridos. Propõe-se, portanto, a obtenção da corrente a vazio do motor em estudo de duas formas possíveis:

1º) Alguns fabricantes disponibilizam o valor da corrente a vazio no catálogo do equipamento.

2º) No caso da primeira forma não estar disponível ou ser de difícil acesso pode-se utilizar a Tabela 2 como referência.

Tabela 2: Porcentagem de referência para obtenção da corrente a vazio.

Potência	Corrente Nominal (I_n)	Corrente a Vazio (I_o)	Porcentagem (I_o/I_n)
1	3,00	1,90	0,633
5	14,13	6,80	0,481
10	26,50	14,00	0,528
15	39,93	17,00	0,426
20	52,30	21,00	0,402
25	64,80	26,00	0,401
30	76,75	30,00	0,391
40	100,36	36,00	0,359
50	123,05	42,00	0,341
60	145,02	52,00	0,359
75	179,22	54,00	0,301
100	240,67	80,00	0,332
125	303,36	106,00	0,349
150	358,71	110,00	0,307
175	422,91	125,00	0,296
200	481,28	160,00	0,332
250	601,60	200,00	0,332
300	710,61	216,00	0,304
350	828,18	240,00	0,290
400	933,77	224,00	0,240
450	1049,39	280,00	0,267
500	1165,99	300,00	0,633

Esta tabela foi elaborada com dados de um fabricante de motores, mas pode ser utilizada para outros fabricantes, sem que os resultados encontrados sejam muito desviados do valor real. Convém fazer uso da porcentagem da corrente a vazio em relação à nominal para uma dada potência de motor de outros fabricantes. Para obter a corrente a vazio é necessário apenas multiplicar a porcentagem encontrada pela corrente nominal do motor em análise.

3. Fator de potência a vazio

Dentre as diversas metodologias existentes para a obtenção de parâmetros do circuito equivalente de motores de indução trifásicos, optou-se por descrever a apresentada em (Sá, 1989), por ser bastante intuitiva e ter gerado bons resultados em testes.

O valor do escorregamento s_k , correspondente ao conjugado máximo M_k , para uma máquina operando como motor é obtido a partir de (1), com base nos dados apresentados em catálogos de fabricantes apresentados na Tabela 1.

$$s_k = s_n \cdot \left(\overline{M}_k + \sqrt{\overline{M}_k^2 - 1} \right) \quad (1)$$

Onde \overline{M}_k corresponde à relação entre o conjugado máximo e o nominal, conforme mostrado em (2).

$$\overline{M}_k = \frac{M_k}{M_n} \quad (2)$$

Para cálculo de alguns parâmetros do circuito equivalente do motor de indução trifásico necessários para obtenção das perdas a vazio, é utilizado o circuito equivalente apresentado na Fig. 1. Observa-se que esta é uma representação para cada fase do motor.

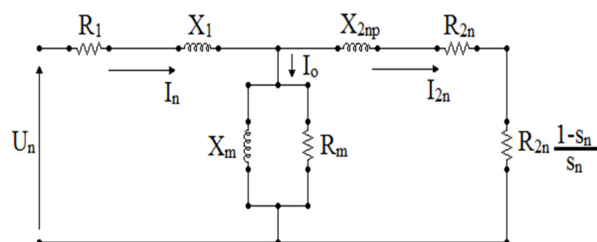


Figura 1: Circuito equivalente do motor de indução trifásico para operação nominal.

Utilizando o circuito equivalente válido para o funcionamento em condições nominais de operação, é deduzida a equação final (3) a ser usada para o cálculo da resistência R_{2n} . Esta equação encontra-se deduzida em (Sá, 1989).

$$R_{2n} = \left(\frac{s_n}{1-s_n} \right) \cdot \left(\frac{P_n}{3 \cdot I_{2n}^2} \right) \quad (3)$$

Já a corrente do circuito do rotor pode ser conhecida por meio de (4), retirada de (Sá, 1989).

$$I_{2n} = I_n \cdot f p_n \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{s_n}{s_k} \right)^2} \quad (4)$$

A determinação da resistência do enrolamento do estator R_1 pode ser feita a partir da consideração de que para o escorregamento s_k , correspondente ao conjugado máximo M_k , a corrente de magnetização é ainda muito pequena quando comparada com a corrente do enrolamento do rotor, podendo então ser desprezada (Sá, 1989). Com essa simplificação, o circuito equivalente ilustrado na Fig. 1, para esta condição, ficará reduzido ao indicado na Fig. 2.

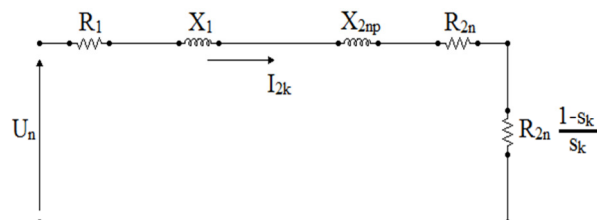


Figura 2: Circuito equivalente válido para o escorregamento s_k correspondente ao conjugado máximo M_k .

Partindo do circuito da Fig. 2, é obtida a expressão para cálculo da resistência do estator, a qual é apresentada em (5).

$$R_1 = \sqrt{\frac{180 \cdot R_{2n} \cdot U_n^2}{2 \cdot \pi \cdot s_k \cdot \omega_s \cdot \overline{M}_k \cdot M_n} - \left(\frac{R_{2n}}{s_k} \right)^2} - \frac{R_{2n}}{s_k} \quad (5)$$

As perdas totais nominais de um motor podem ser definidas por (6).

$$\sum P_m = P_n \cdot \left(\frac{1}{\eta_n} - 1 \right) \quad (6)$$

As perdas do motor podem ser distribuídas em três parcelas mais significativas:

- Perdas no enrolamento do estator;
- Perdas no enrolamento do rotor;
- Perdas a vazio.

O objetivo desta etapa do trabalho é determinar as perdas a vazio para, enfim ser obtido o fator de potência a vazio.

Definindo um fator K como sendo a relação entre as perdas nos enrolamentos (estator e rotor) e as perdas totais para condição nominal de operação, as perdas a vazio serão determinadas por (7).

$$W_o = (1 - K) \cdot \left(\frac{1}{\eta_n} - 1 \right) \cdot P_n \quad (7)$$

Dessa maneira, o valor de K pode ser obtido por (8).

$$K = \frac{P_{j1} + P_{j2}}{P_n \cdot \left(\frac{1}{\eta_n} - 1 \right)} \quad (8)$$

Diante da passagem da corrente nominal, as perdas por efeito Joule nos enrolamentos do estator podem ser calculadas respectivamente por (9) e (10).

$$P_{j1} = 3 \cdot R_1 \cdot I_n^2 \quad (9)$$

$$P_{j2} = 3 \cdot R_{2n} \cdot I_{2n}^2 \quad (10)$$

O total de perdas no motor funcionando em vazio é dado pela potência de entrada calculada por (11).

$$P_o = \sqrt{3} \cdot U_n \cdot I_o \cdot fp_o \quad (11)$$

A diferença entre a potência de entrada P_o e as perdas no estator devido à passagem da corrente a vazio P_{ojl} , resulta nas perdas em vazio W_o , que se tratam da soma das perdas por atrito e ventilação (mecânicas) e no núcleo (histerese e Foucault). Portanto, as perdas a vazio totais podem ser obtidas por (12).

$$P_o = W_o + 3 \cdot R_1 \cdot I_o^2 = W_o + P_{ojl} \quad (12)$$

Dessa forma é possível encontrar o valor do fator de potência a vazio fp_o , isolando-o em (12). A expressão final é mostrada em (13).

$$fp_o = \frac{W_o + 3 \cdot R_1 \cdot I_o^2}{\sqrt{3} \cdot U_n \cdot I_o} \quad (13)$$

Foram desenvolvidas duas opções para avaliação do carregamento, fator de potência e rendimento do motor de acordo com suas condições de operação. A partir desses resultados será possível verificar se o motor se encontra em boas condições de funcionamento ou se será preciso propor alguma modificação.

Tendo posse dos dados iniciais, de acordo com o meio de avaliação desejado (medição de corrente e tensão ou potência) é proposto utilizar recursos da matemática computacional na efetivação dos cálculos que virão adiante.

3 MÉTODO COMPUTACIONAL

A interpolação é uma ferramenta valiosa quando não se pode calcular rapidamente a função nos pontos intermediários desejados. Na interpolação parte-se do pressuposto de que os dados estejam corretos e procura-se alguma maneira de descrever o que acontece entre os pontos informados.

Dois tipos de interpolação serão utilizadas no presente trabalho. Em algumas situações a interpolação linear foi mais adequada, já em outras a interpolação por spline cúbica obteve resultados mais precisos.

1. Interpolação Linear

A interpolação linear considera que os valores intermediários caem em uma linha reta entre os pontos definidos. Neste método se torna claro que, à medida que se têm mais pontos de dados e a distância entre eles diminui, a interpolação linear se torna mais precisa.

2. Spline Cúbica

Uma spline cúbica é uma curva suave construída passando através do conjunto de pontos. A curva entre cada par de pontos é determinada por um polinômio do terceiro grau, que é calculado para fornecer uma curva suave entre os pontos ao invés de ligá-los simplesmente.

4 PROCEDIMENTO DE CÁLCULO

4.1 Método da Corrente e Tensão (MCT)

Na presente metodologia, devem ser efetuadas medições de corrente e tensão. A seguinte rotina deve ser seguida para efetuar as medições:

- O motor deve estar operando numa situação de maior carga;
- Devem ser medidas as correntes das três fases;
- Toma-se, para efeito de análise, a média aritmética simples dos três valores como o valor da corrente média;
- Caso as três correntes apresentem valores muito diferentes, isto pode indicar outro tipo de problema no motor, como por exemplo, um curto-circuito numa das fases ou desbalanceamento de tensão, o que é mais típico;
- É conveniente também medir as tensões entre as três fases e fazer-se a média entre elas.

Na medição por corrente, mede-se a corrente e tensão em uma das fases ou, preferencialmente, tira-se a média das três fases. Calcula-se, então as correntes elétricas para 3 pontos: a 50, 75 e 100% de carga nominal utilizando (14).

$$I_x = \frac{P_{hp} \cdot 746 \cdot X}{\sqrt{3} \cdot U_n \cdot fp_x \cdot \eta_x} \quad (14)$$

O quarto ponto para a corrente é obtido para carregamento de 0%, ou seja, utilizando-se a corrente a vazio I_o .

Estes pontos fazem parte de uma curva em função do carregamento do motor, a qual tem dependência direta com a tensão de funcionamento, ou seja, a tensão medida. Caso a tensão medida apresente uma diferença considerável em relação à tensão nominal, será necessário realizar um ajuste para os pontos de corrente coletados anteriormente. Para adaptar os dados retirados do fabricante (que considera uma tensão de referência fixa, por exemplo, 220 V) para outra tensão de funcionamento, calcula-se primeiramente a relação entre a tensão nominal e a tensão medida, conforme (15).

$$r = \frac{U_n}{U_{med}} \quad (15)$$

Em seguida, multiplica-se o valor de r encontrado por todos os dados iniciais de corrente I , obtendo dessa forma, novos valores constituintes do vetor I de

quatro elementos. Com esta adaptação dos dados iniciais de corrente, será possível comparar o valor medido da corrente com a real curva de desempenho para o motor em estudo.

Sendo assim, tem-se fator de potência, rendimento, carregamento e corrente elétrica, cada um com quatro valores conhecidos.

A partir disso, a seguinte sequência de procedimentos é realizada:

1. Avaliação do carregamento

Neste item, faz-se uso do método de interpolação por spline cúbica, onde os pontos conhecidos utilizados são os quatro da corrente elétrica I e os do carregamento X . Para se obter o respectivo carregamento para o motor em avaliação, entra-se com o valor da corrente medida. Dessa forma obtém-se o carregamento do motor de indução trifásico em funcionamento.

2. Avaliação do fator de potência

Conhecendo-se o carregamento, a avaliação do fator de potência é feita também por spline cúbica. Dessa forma, devem ser inseridos os quatro valores conhecidos do carregamento X e do fator de potência fp . Para saber o fator de potência do motor em funcionamento, entra-se também com o carregamento obtido no primeiro item. Assim é obtido o fator de potência para o respectivo carregamento informado.

3. Avaliação do rendimento

O rendimento pode ser calculado por meio de (16).

$$\eta_x = \frac{X \cdot P_{hp} \cdot 746}{\sqrt{3} \cdot U_{med} \cdot I_{med} \cdot fp_x} \quad (16)$$

Nota-se que todas variáveis das quais depende o cálculo do rendimento já são conhecidas neste ponto, tornando possível determinar o rendimento para um carregamento específico.

4.2 Método da Potência (MP)

Para este procedimento, é requerida que seja feita a medição da potência elétrica consumida pelo motor. Também é preciso ter-se o valor da potência elétrica a vazio, que corresponde às perdas com rotor livre. Esta informação pode ser adquirida fazendo-se o ensaio sem carga do motor, porém, seria uma maneira trabalhosa de se obter tal parâmetro. Para tornar o procedimento mais dinâmico, as perdas a vazio serão calculadas por meio de (11).

Observa-se que o valor de P_o depende de outras variáveis já definidas e estimadas, tornando assim, o cálculo possível.

Este método apresenta resultados um pouco mais precisos do que o da medição da corrente e tensão.

Deseja-se ter conhecidos as potências elétricas para 3 pontos inicialmente. Para tal, utiliza-se (17) para 50, 75 e 100% de carga nominal.

$$P_{el} = \frac{X \cdot P_{hp} \cdot 746}{N_x} \quad (17)$$

O quarto elemento da potência elétrica está situado a 0% de carregamento e pode ser obtido por (11).

Tendo-se o valor da potência elétrica consumida pelo motor, os demais parâmetros necessários para descrever o atual funcionamento do equipamento em uso podem ser conhecidos seguindo-se a seguinte sequência de ações.

1. Avaliação do Fator de potência

O fator de potência relacionado com a porcentagem de carga nominal do motor pode ser encontrado por meio de interpolação por spline cúbica, sendo os dados de entrada utilizados, nesse caso, os quatro pontos da potência elétrica e do fator de potência. Dessa maneira, é obtida para uma potência elétrica medida, o seu fator de potência correspondente.

2. Avaliação do carregamento

A fim de se obter o carregamento do motor de indução em questão, utiliza-se o método de interpolação linear. A interpolação é realizada entre os quatro pontos conhecidos de potência elétrica e carregamento. Para encontrar o carregamento relacionado com a potência elétrica medida, o valor desta deve ser inserido no processo de cálculo.

Observa-se que para o cálculo do carregamento, deve ser feita a correção do fator de potência a vazio substituindo o valor estimado inicialmente pelo valor obtido utilizando o item anterior sobre a avaliação do fator de potência, ou seja, o item sobre avaliação do fator de potência deve ser repetido para se obter o fator de potência a vazio pelo método de interpolação, sendo que para isso, deve-se entrar com a potência a vazio calculada e utilizar os quatro pontos do fator de potência e da potência elétrica na interpolação.

Com isso, ter-se-á um valor corrigido para o fator de potência a vazio e, consequentemente os resultados encontrados serão refinados, já que uma pequena divergência do fator de potência estimado com o real, já poderia gerar um erro mais visível nos resultados da curva de rendimento.

3. Avaliação do rendimento

Enfim, o rendimento pode ser conhecido com (18).

$$\eta_x = \frac{X \cdot P_{hp} \cdot 746}{P_{med}} \quad (18)$$

5 RESULTADOS

Para fins de comparação, serão utilizadas curvas características de um fabricante específico, devido a este disponibilizar as mesmas em seu site.

A seguir, será mostrado um exemplo de aplicação da metodologia para um motor com os dados apresentados na Tabela 3.

Tabela 3: Dados de Catálogo Para um Motor de 100 hp.

P_{hp}	100	hp
η_{50}	92,4	%
η_{75}	94	%
η_n	94	%
fp_{50}	0,75	-
fp_{75}	0,85	-
fp_n	0,87	-
ω_n	1780	rpm
ω_s	1800	rpm
M_k	$3,3 \times M_n$	-

O conjugado nominal pode ser encontrado por (19).

$$M_n = \frac{P_n \cdot 60}{\omega_n \cdot 2\pi} \quad (19)$$

As medições de campo são mostradas na Tabela 4.

Tabela 4: Medições de Campo para um Motor de 100 hp.

I_{med}	125,82	A
U_{med}	220	A
P_{med}	32505,45	W

5.1 Resultados para o método MCT

As Fig. 3 e 4 apresentam as curvas geradas pelo método MCT.

Observa-se que as curvas levantadas pelo método MCT se aproximaram bastante das curvas de referência. É possível notar que para carregamentos abaixo de 50%, o erro apresentado pelo método é um pouco maior. No entanto, a maioria dos motores instalados na indústria apresenta carregamento superior a 10% e, acima deste valor, não houve grande discrepância entre os valores calculados pelo método MCT e os valores de referência.

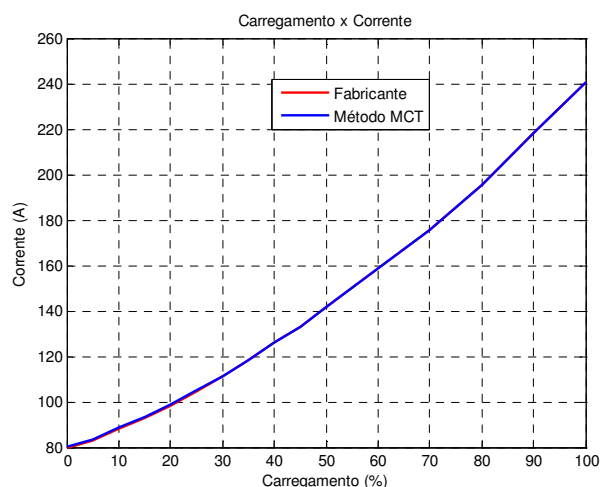


Figura 3: Curvas de corrente versus carregamento pelo método MCT (em azul) e de referência do fabricante (em vermelho).

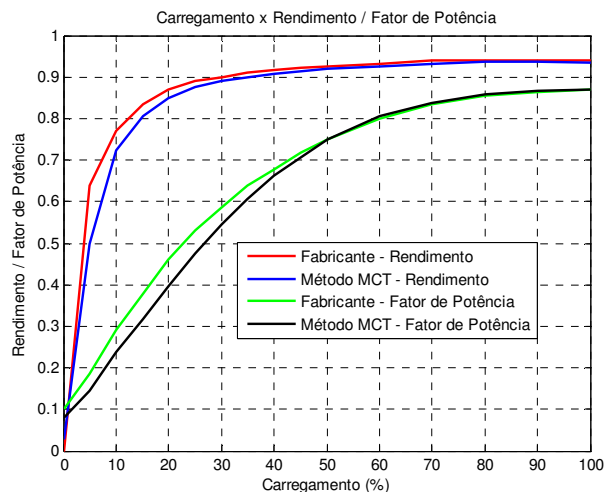


Figura 4: Curvas de rendimento e fator de potência versus carregamento pelo método MCT (em azul e preto) e de referência do fabricante (em vermelho e verde).

Para a realização de uma estimativa de eficiência energética do sistema, a curva do rendimento necessita de resultados mais refinados do que as demais. Neste exemplo, o maior erro encontrado acima de 10% de carregamento foi de aproximadamente 5%, o que não compromete a fidedignidade dos resultados. E acima de 30% de carregamento, que é onde se encontra a maioria dos motores em funcionamento, o erro foi inferior a 1,2%.

Para o motor de 100 hp em estudo, ao utilizar o método MCT é obtido que este motor funciona com um carregamento de 39 %, 0,66 de fator de potência e rendimento de 0,91.

5.2 Resultados para o método MP

As Fig. 5 e 6 mostram as curvas obtidas pelo método MP.

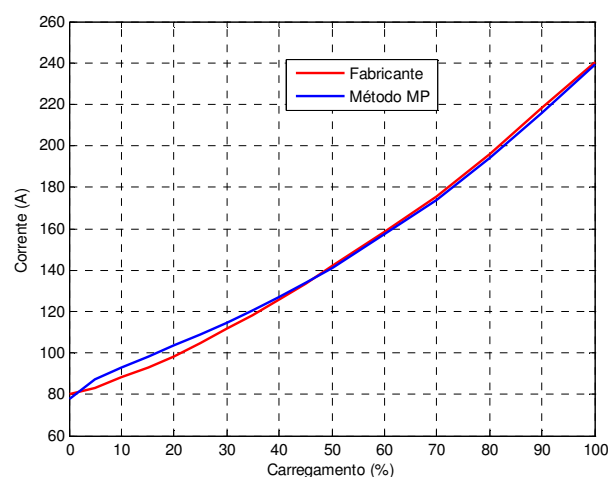


Figura 5: Curvas de corrente versus carregamento pelo método MP (em azul) e de referência do fabricante (em vermelho).

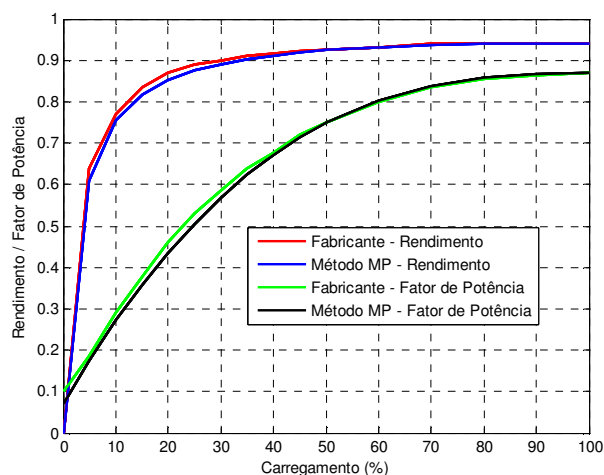


Figura 6: Curvas de rendimento e fator de potência versus carregamento pelo método MP (em azul e preto) e de referência do fabricante (em vermelho e verde).

Como dito anteriormente, o método MP apresenta resultados mais precisos, o que pode ser comprovado analisando-se as curvas de desempenho geradas. O maior erro obtido foi de aproximadamente 1,76%, encontrado para o carregamento de 20%.

Analisando a situação de funcionamento do motor em estudo pelo método MP, obtém-se que este motor opera com um carregamento de aproximadamente 39%, fator de potência igual a 0,67 e rendimento de 0,91.

Verificou-se, portanto, que esse motor apresenta valor inferior a 40% de potência fornecida em relação à nominal. A partir dessa informação, considera-se a substituição imediata do motor.

A escolha de um motor mais adequado pode ser feita através do cálculo da potência real solicitada pela carga, que é calculada multiplicando-se a potência nominal do motor pelo seu carregamento.

Potência requerida = 100 hp x 0,39 = 39,0 hp.

A partir desses resultados, escolhe-se o motor imediatamente superior a este valor e que também atenda as características da carga que está sendo acionada, a fim de que o motor seja capaz suprir as condições de partida da mesma. Dessa forma, será escolhido o motor de potência 50 hp.

Este novo motor funcionará com carregamento de 39/50, que equivale a cerca de 78% de potência fornecida em relação a nominal.

Isso representa uma economia de 4185,35 kWh anualmente, ou seja, cerca de 1,5% para um único motor em funcionamento. Para uma indústria na qual há motores em piores condições de funcionamento do que o motor do exemplo, e também possui um número muito grande de máquinas em atividade, o potencial de economia é maior e mais representativo.

A Tabela 5 apresenta resumidamente os resultados de consumo do motor em atividade e do motor de nova potência sugerido. Foi considerado para cálculo da

energia um funcionamento de 24 horas por dia para o período de um ano.

Tabela 5: Resultados Comparativos.

100 hp			50 hp		
X (%)	η (%)	Energia (MWh)	X (%)	η (%)	Energia (MWh)
39	91	276,23	78	92,4	272,05

6 CONCLUSÕES

É sabido que existe um grande potencial de conservação de energia em motores de indução trifásicos. A falta de informação pode ser considerada a principal causa da má especificação dos sistemas.

Este artigo apresenta uma metodologia para obter as condições de funcionamento dos motores. Para casos de superdimensionamento, os motores podem ser substituídos por outros corretamente dimensionados ou realocados na fábrica, sempre atentando para os casos em que o superdimensionamento é realmente necessário diante das condições de partida.

Dois métodos foram propostos, sendo que o MP apresentou resultados um pouco mais precisos, no entanto o método MCT possui a vantagem de depender de medições que são mais fáceis de serem adquiridas.

Os métodos desenvolvidos permitem avaliar a porcentagem do carregamento, rendimento e fator de potência, sem a dependência das curvas características fornecidas pelos fabricantes. Portanto, facilidade de aplicação aliada ao uso de ferramentas comuns é o principal ponto para a utilização da metodologia apresentada que tem como objetivo o aumento do aproveitamento energético nos motores de indução.

7 REFERÊNCIAS

- Hurst, J. (2007). *Raising the standard for electric motor efficiency*. pp 30-34. InTech,
- Nadel, S., Elliott e outros (2002). *Energy efficient motor systems: A handbook on technology, program, and policy opportunities*, 2nd Edition. ACEEE. Washington, D.C., USA.
- PROCEL (2004), *Metodologia de Realização de Diagnóstico Energético – Guia Avançado*, Rio de Janeiro.
- Sá, J. S. (1989). *Contribuição à Análise do comportamento térmico de motores de indução trifásico com rotor do tipo gaiola*. Tese de Doutorado, UNICAMP.
- Bortoni, E. C., Filho, A. R., Tanaka, E. T. (1992). *Análise de Carregamento de Motores e Conservação de Energia*. Quadrante Softwares Especializados Ltda. Itajubá.

ANEXO II

*Artigo **Análise de Sistemas de Bombeamento sob o Enfoque da Eficiência Energética**, SAE – Araguari, MG* apresentado no IV CBEE – Congresso Brasileiro de Eficiência Energética. Juiz de Fora, Minas Gerais, 2011.

ANÁLISE DE SISTEMAS DE BOMBEAMENTO SOB O ENFOQUE DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA, SAE – ARAGUARI, MG

Ciciane Chiovatto, Décio Bispo, Jan Henrique Santos Ferraz e Wellington Maycon Santos Bernardes

*Universidade Federal de Uberlândia, Av. João Naves de Ávila, 2160 – Bloco 3N –
Campus Santa Mônica – CEP: 38.400-902 – Uberlândia – MG*

Abstract: This paper presents an energy efficiency study at a water service company, aiming to reduce its energy consumption and minimize the waste without the final production is impaired. The developed methodology is based on the context of energy efficiency and is divided in two stages: administrative and operational actions. The best option of energy tariff is chosen and it is also made energy diagnostic for the water pumps. At the end, this work presents general indicators of consumption and energy costs before and after program implementation. *Copyright © 2011 CBEE/ABEE*

Keywords: energy efficiency, tariff, water wells, pumping efficiency.

Resumo: Este trabalho apresenta um estudo de eficiência energética para uma empresa municipal de água, que visa reduzir o consumo de energia e minimizar o desperdício, sem que a produção final seja prejudicada. A metodologia utilizada baseia-se no contexto de eficiência energética e divide-se em duas etapas: ações administrativas e operacionais. É feita a adequação tarifária da empresa e são elaborados diagnósticos energéticos para os equipamentos de bombeamento. Ao final deste trabalho são apresentados indicadores gerais de consumo e de custo da energia antes e depois da aplicação do programa.

Palavras Chaves: eficiência energética, tarifação, poços tubulares, bombeamento eficiente.

1 INTRODUÇÃO

Analizando o crescimento da produção de energia elétrica e o respectivo consumo, observa-se uma função exponencial a qual, admitindo um crescimento mundial anual da ordem de 7%, por um período de 10 anos, implica na obrigação de instalação de uma capacidade geradora igual à que foi instalada desde o início da era tecnológica (Andreas, 1982).

O Setor Industrial é responsável por 44% do consumo final de energia elétrica do país, e dentro deste setor, a força motriz responde por aproximadamente 42% do consumo (BEN, 2010).

No Brasil, o problema de investimento no setor energético revela-se crítico ao longo dos últimos anos, razão pela qual se reveste da maior importância a criação de políticas que visem o combate ao desperdício de energia, em suas vertentes humana e tecnológica.

Existe uma tendência internacional de crescimento da preocupação com a eficiência de sistemas de

saneamento devido à grande parcela do consumo de energia que esse setor representa.

Um programa de eficiência energética analisa todos os processos envolvidos na produção, com o intuito de buscar oportunidades de se manter ou aumentar a produção, porém com a mesma qualidade e com menor consumo de energia. Este estudo procura verificar condições de operação dos equipamentos e especificá-los de maneira adequada, proporcionando assim uma redução de gastos e de consumo de energia elétrica.

2 INFORMAÇÕES SOBRE A EMPRESA

Em Araguari, o órgão responsável pela captação, tratamento e distribuição de água, além da coleta e tratamento de esgoto é a Superintendência de Água e Esgoto de Araguari (SAE).

Atualmente a SAE atende a mais de 32.000 ligações de água diariamente, com capacidade de produção de água de 26,88 milhões de litros de água por dia.

A SAE, assim como diversos sistemas públicos de abastecimento de água de cidades brasileiras, utiliza majoritariamente ou exclusivamente água subterrânea, captada em poços tubulares profundos, sendo que a grande maioria desses poços necessita de equipamentos de bombeamento para efetuar a elevação da água até a superfície e a partir daí, outros equipamentos cumprem o papel de bombear a água para reservatórios elevados, ou diretamente para as residências. Todo esse sistema apresenta um custo operacional elevado, relativo às despesas com energia elétrica, o que justifica a aplicação de um estudo de eficiência energética.

3 AUDITORIA ENERGÉTICA

É escopo de um projeto de eficiência energética a implementação de várias ações, iniciando-se com um diagnóstico do sistema existente e a identificação dos pontos de uso excessivo de energia, os quais podem oferecer oportunidades de melhoria.

Com o melhor entendimento do funcionamento do sistema, iniciam-se as ações administrativas, as quais, em geral, não necessitam de investimento inicial, mas por outro lado, não geram redução do consumo de energia elétrica.

A otimização dos equipamentos eletromecânicos, como a melhoria em seus rendimentos, constitui as ações que requerem investimento inicial e geram uma economia no consumo de energia elétrica.

Assim, a operacionalização da eficiência energética passa necessariamente por uma mínima estrutura gerencial, de porte e abrangência compatíveis à empresa, e que visa, em relação aos fluxos energéticos, identificar e quantificar os fluxos energéticos ao longo do processo produtivo de bens e serviços (Marques, 2006).

Na Fig. 1 são apresentadas algumas ações a serem seguidas para se ter economia de energia elétrica em uma instalação.

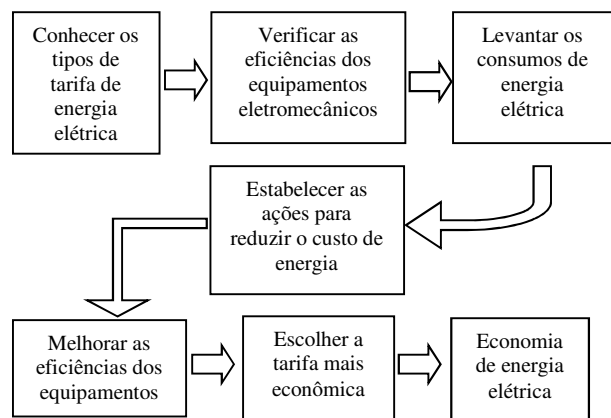


Figura 1: Ações iniciais para reduzir o custo de energia elétrica.

4 TARIFICAÇÃO

A tarifação trata-se de uma medida administrativa e geralmente não exige investimentos iniciais. É a primeira ação executada devido à sua simplicidade e rapidez de retorno positivo dos resultados. Os problemas encontrados nessa primeira etapa, geralmente são solucionados através de correspondência encaminhada à concessionária, mas para isso, é necessário que haja uma análise prévia das contas de energia para detecção de alguma anormalidade e possibilidade de melhoria contratual.

Para se ter uma idéia mais real do comportamento de consumo de energia dos vários pontos consumidores da SAE, a análise levou em consideração 15 faturas de energia que vão dos meses de janeiro de 2007 até março de 2008.

Foram executadas as seguintes ações para cada instalação (Tsutiya, 2001):

1. Classificação - consiste na verificação da classe em que se enquadra a instalação, pois as instalações classificadas como de água, esgoto e saneamento, possuem desconto de 15% na tarifa.
2. Regularização da demanda contratada: consiste na adequação da demanda contratada e registrada, a fim de se evitar pagamento de uma demanda não utilizada, ou ainda, no caso de tarifação horossazonal, da demanda de ultrapassagem.
3. Alteração da estrutura tarifária - o enquadramento tarifário, em alguns casos, é feito pela opção do próprio consumidor que visa uma maior economia. A escolha da tarifa de uma determinada instalação é normalmente definida através de simulações em software específicos.
4. Desativação - trata-se do corte da ligação de energia, uma vez que não esteja sendo utilizada e permaneça assim por período superior a seis meses. Apesar de não haver consumo de energia ativa, paga-se o consumo mínimo de baixa tensão e, no caso de alta tensão, a demanda contratada.
5. Erro de leitura - é detectado a partir da conferência dos dados da conta de energia elétrica com os dados de campo das instalações. São comuns erros nas leituras de demanda, energia ativa, energia reativa e data de leitura.

Ao longo das etapas foram detectados os principais pontos responsáveis pelos gastos com energia na empresa, os quais totalizaram 7 localidades que apresentavam contrato de alta tensão e tarifa horossazonal verde.

Logo foi possível verificar que uma dessas localidades encontrava-se em desuso, enquadrando-se no item 4 descrito anteriormente. Por isso, apesar do consumo de energia ativa estar sendo nulo, todos os meses a empresa pagava uma taxa pela disponibilização da demanda contratada, mesmo não sendo utilizada.

Após ser observado que esta unidade encontrava-se nesta situação desde junho de 2007 e não havia

previsão de reativação, foi solicitada junto à concessionária de energia elétrica de Minas Gerais (CEMIG) a rescisão contratual do local em questão.

Outra constatação foi a de que em duas unidades, todos os meses havia ultrapassagem da demanda contratada. Sabendo-se que o valor cobrado por kW de ultrapassagem é cerca de 3,5 vezes o valor do kW contratado, alterações de aumento das demandas contratadas foram solicitadas à CEMIG.

No mês de Junho de 2008, entraram em vigor as alterações solicitadas e foi possível verificar a eficácia das modificações.

Analisando as Fig. 2 e 3, é possível notar que mesmo com o aumento do valor pago pela demanda contratada, a parcela de multa de ultrapassagem de demanda foi eliminada.

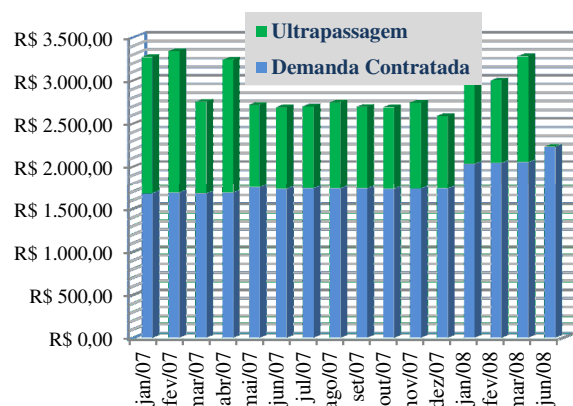


Figura 2: Valor mensal gasto pela demanda contratada (azul) e o referente à multa de ultrapassagem (verde) na Unidade 1.

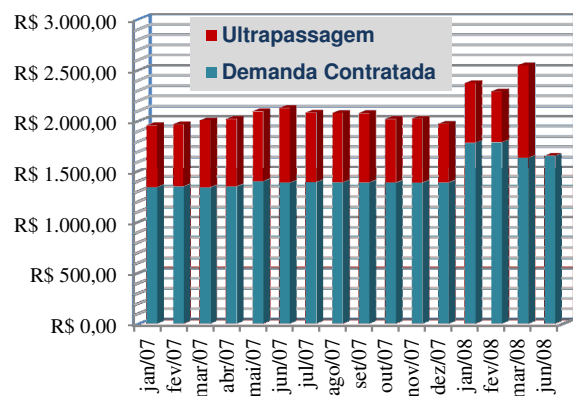


Figura 3: Valor mensal gasto pela demanda contratada (azul) e o referente à multa de ultrapassagem (vermelho) na Unidade 7.

Como resultado, houve uma economia mensal de R\$ 3.491,53 para uma das localidades, denominada de “Unidade 1”, comparando o valor referente ao mês de junho de 2008 com o valor médio obtido da amostra.

Para outra localidade, a “Unidade 7”, onde foi solicitado também um aumento da demanda contratada, a economia foi de R\$ 4.687,92.

Assim, conseguiu-se uma economia de 13% para a “Unidades 1” e 26,5% para a “Unidade 7”.

A Fig. 4 mostra a comparação do valor médio mensal pago pelas unidades, considerando uma amostra de 15 contas e o valor referente ao mês de Junho de 2008. É possível observar que as colunas representadas pelos números 1 e 7 apresentaram maior discrepância, enquanto que as demais permaneceram bem próximas. Essa diferença se deve às alterações realizadas no contrato de demanda das duas localidades supracitadas, sendo que as colunas 1 e 7 correspondem à “Unidade 1” e “Unidade 7”, respectivamente. Nota-se também que a coluna 6 que já apresentava um baixo valor, passou para zero. Essa coluna representa a localidade que se encontrava em desuso e teve seu contrato rescindido.

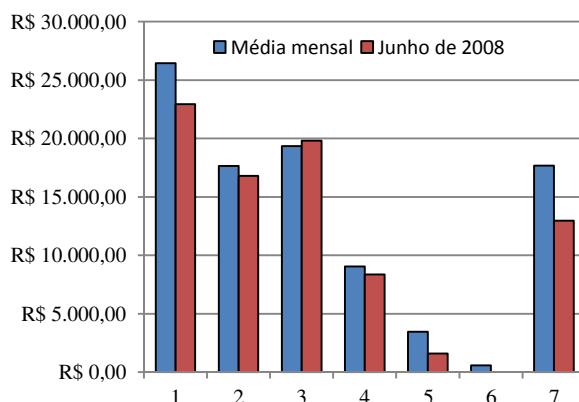


Figura 4: Comparação do valor mensal antes (azul) e depois (vermelho) das alterações contratuais.

5 BOMBAS

A avaliação da evolução da performance dos poços da SAE Araguari foi baseada nas medidas de nível estático, nível dinâmico e vazão instantânea, obtidas em levantamento feito em junho de 2006 e informações do arquivo da empresa.

Na área de estudos escolhida, foram selecionados 10 poços para análise. Primeiramente, foram coletados os dados necessários para a verificação da situação de funcionamento dos poços e bombas submersas.

Por meio de pesquisas em arquivos de manutenções e informações passadas por funcionários da empresa, foram obtidos os dados apresentados na Tabela 1.

Tabela 1: Dados coletados dos poços.

Poço	Comprimento	Altura recalque	Nível Estático	Nível dinâmico	Vazão (m³/h)	Profundidade
3	52 m	3 m	24 m	17 m	11	60 m
10	100 m	3 m	24 m	17 m	21	57 m
11	132 m	3 m	25 m	10 m	14	58 m
13	74,4 m	3 m	26 m	10 m	22	58 m
14	132,4 m	3 m	26 m	10 m	20	62 m
15	125,3 m	3 m	25 m	9 m	12	60 m
16	120,8 m	3 m	26 m	20 m	15	60 m
17	80,1 m	3 m	25 m	10 m	15	60 m
18	89,2 m	3 m	25 m	10 m	12	60 m
19	87,5 m	3 m	25 m	10 m	11	61 m

5.1 Cálculo das perdas nos poços

A seguir, é mostrado um exemplo de cálculo para um dos poços que foram avaliados. Os dados são:

- Vazão desejada: 22 m³/h;
- Nível dinâmico: 10 m;
- Diâmetro da tubulação: 3";
- Altura de recalque (H_r): 3 m;
- Comprimento da tubulação de recalque: 74,4 m;
- Profundidade de colocação da bomba: 58 m.

1. Altura manométrica total de recalque (AMR):

As perdas por atrito em tubulações e conexões são obtidas em tabelas específicas para cada diâmetro em particular. Analisando as tabelas específicas, a porcentagem de perdas adquirida foi de 3%, portanto: Perda por atrito em 74,4 m de tubulação de 3" = 0,03 x 74,4 m = 2,232 m.

2. Perdas de pressão em cada conexão no recalque:

- Registro de gaveta 3" = 0,12 m;
- Cinco curvas de 90° = 5 x 0,06 m = 0,3 m;
- Válvula de retenção 3" = 0,2 m;

Dessa forma, obtem-se AMR, que equivale à soma das perdas por atrito na tubulação de recalque, com a soma das perdas de pressão em cada conexão no recalque, acrescida ainda da altura (desnível) de recalque. Assim, tem-se:

$$AMR = 2,232 + 0,12 + 0,3 + 0,2 + 3 = 5,852 \text{ m.}$$

De posse da AMR, calcula-se a altura manométrica total (AMT), que equivale à soma de AMR com o nível dinâmico (Nd):

$$AMT = AMR + Nd = 5,852 + 10 = 15,852 \text{ m.}$$

Seguindo esse procedimento para todas as bombas submersas do sistema, serão obtidas todas as AMT desejadas. Os resultados são exibidos na Tabela 2.

Tabela 2: Perdas calculadas para cada poço.

Poço	Perdas por conexões	AMR	AMT
3	0,000	3,416	20,416
10	0,620	6,620	23,620
11	0,200	4,652	14,652
13	0,620	5,852	15,852
14	0,380	6,028	16,028
15	0,000	4,002	13,002
16	0,200	4,529	24,529
17	0,200	4,081	14,081
18	0,000	3,714	13,714
19	0,000	3,700	13,700

5.2 Cálculo do rendimento do sistema

O próximo passo é o cálculo do rendimento do equipamento de bombeamento. Para tal, serão necessários os dados de vazão, AMT e potência consumida (P_c). Sendo assim, falta obter a potência consumida de cada bomba.

Com um alicate amperímetro, as correntes e tensões de cada fase (R, S e T) foram medidas. Para o cálculo da P_c o fator de potência adotado foi de 0,87. Feito isso, e aplicando todos dados para obtenção do rendimento do sistema (η) utilizando a Equação 1, a Tabela 3 foi construída.

$$\eta = \frac{9,8 \times Q \times AMT}{P_c \times 3600} \quad (1)$$

Onde:

Q - Vazão (m³/h).

AMT - Altura manométrica total (m).

P_c - Potência consumida (kW).

Observa-se que o valor de rendimento calculado não pode ser interpretado como se fosse o rendimento do equipamento de bombeamento, pois equivale ao rendimento hidráulico-eletrico-mecânico, real e global que seria resultante do produto dos rendimentos: da bomba, do motor, da transmissão mecânica, da transmissão elétrica (cabos de alimentação) e do sistema de acionamento.

Tabela 3: Correntes e tensões medidas para cálculo do rendimento real do sistema.

Poço	I_R (A)	I_S (A)	I_T (A)	$I_{\text{médio}}$ (A)	P_c (kW)	η (%)
3	11,9	11,4	11,6	11,63	3,85	15,87
10	15,1	16,5	16,0	15,87	5,25	25,70
11	17,0	16,8	16,7	16,83	5,57	10,02
13	21,3	20,5	20,9	20,90	6,92	13,72
14	14,9	15,6	15,4	15,30	5,07	17,22
15	12,2	11,6	11,6	11,80	3,91	10,87
16	14,5	13,4	13,9	13,93	4,61	21,71
17	14,7	15,3	15,3	15,10	5,00	11,50
18	11,9	12,6	12,0	12,17	4,03	11,12
19	12,0	12,5	12,3	12,27	4,06	10,10

5.3 Cálculo da potência hidráulica absorvida pela bomba

Para fins de comparação, será calculada a potência requerida por cada sistema. Para isso, calcula-se primeiro a potência hidráulica absorvida pela bomba (BHP) em kW, por meio da Equação 2.

$$BHP = \frac{9,8 \times Q \times AMT}{3600} \quad (2)$$

5.4 Especificações da bomba

É necessário saber o valor da potência elétrica para ser possível efetuar as comparações com o sistema atual. Dessa forma, esta potência elétrica (P_e) será calculada com base na Equação 3.

$$P_e = \frac{BHP}{\eta_b \times \eta_s} \quad (3)$$

Onde:

η_b - Rendimento da bomba.

η_s - Rendimento das demais partes do sistema.

Para se obter o rendimento dos sistemas, serão feitas escolhas de bombas com base na potência hidráulica absorvida calculada, vazão e altura manométrica.

Analisando-se catálogos e curvas fornecidas por fabricantes de bombas, para este caso, são dimensionadas bombas da marca Leão, que são as utilizadas na SAE.

A seguir será exemplificada a escolha de uma das bombas cujos dados são:

- Vazão desejada: 22 m³/h;
- AMT: 15,852 m;
- BHP: 0,950 kW.

De acordo com a Tabela 4 fornecida pelo fabricante da bomba Leão (modelo r20), é possível optar pela bomba que melhor atende aos requisitos calculados. O mais conveniente neste caso é, portanto, a opção de potência 1,47 kW e que suporta, para uma vazão de 22 m³/h, uma AMT de até 17 m.

Tabela 4: Tabela de seleção de bomba Leão, modelo r20.

Potência (kW)	20	22	24	Vazão (m ³ /h)
0,74	10,0	8,5	7,0	Altura Manométrica Total (m)
1,47	20,0	17,0	13,0	
2,21	29,5	25,0	19,0	

Escolhida a bomba que será adotada, analisa-se então qual será o seu rendimento para operação na vazão desejada. Essa análise é feita estudando-se a curva de rendimento fornecida pelo fabricante do equipamento. Como é possível visualizar na Fig. 5, esse rendimento da bomba é de aproximadamente de 73%.

No entanto, precisa-se ter conhecimento do rendimento global do sistema e não somente do rendimento da bomba. Sendo assim, será considerado um rendimento resultante de 40% para as demais partes do sistema, tanto para a situação de instalação atual, quanto para a nova situação que está sendo dimensionada.

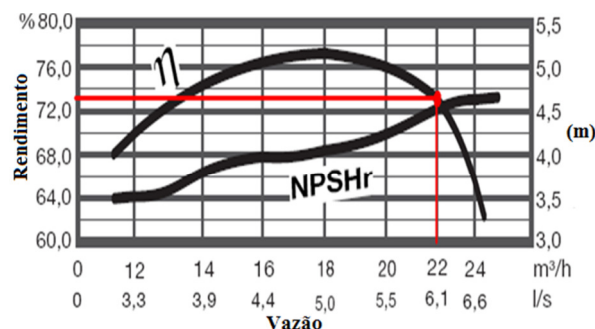


Figura 5: Curva de rendimento x vazão da bomba Leão.

A Tabela 5 mostra todos os rendimentos obtidos, tanto para o sistema atualmente em funcionamento, quanto para o sistema proposto.

Tabela 5: Rendimentos antes e após as modificações.

Rendimento Sistema Atual			Rendimento Sistema Modificado		
Global (%)	Demais Sistemas (%)	Bomba (%)	Global (%)	Demais Sistemas (%)	Bomba (%)
15,87	40,0	39,677	28,0	40,0	70,0
25,70	40,0	64,252	29,2	40,0	73,0
10,02	40,0	25,046	27,2	40,0	68,0
13,72	40,0	34,295	29,2	40,0	73,0
17,23	40,0	43,062	30,4	40,0	76,0
10,87	40,0	27,176	28,4	40,0	71,0
21,71	40,0	54,274	30,4	40,0	76,0
11,50	40,0	28,749	30,4	40,0	76,0
11,12	40,0	27,800	28,4	40,0	71,0
10,10	40,0	25,250	28,0	40,0	70,0

Assim, é possível calcular para o exemplo a potência elétrica do sistema utilizando a Equação 3.

$$Pe = \frac{0,950}{0,73 \times 0,40} = 3,251 \text{ kW}$$

Esse procedimento foi feito para as demais bombas e as Tabelas 6 e 7 mostram os resultados encontrados.

Tabela 6: Gastos do sistema de bombeamento atual.

Potência Consumida (kW)	Consumo HFP (kWh)	Consumo HP (kWh)	Preço (R\$)
3,852	2426,793	346,68	R\$ 1.057,39
5,254	3309,896	472,84	R\$ 1.442,17
5,574	3511,549	501,65	R\$ 1.530,03
6,920	4359,883	622,84	R\$ 1.899,66
5,066	3191,685	455,95	R\$ 1.390,66
3,907	2461,561	351,65	R\$ 1.072,54
4,614	2906,589	415,23	R\$ 1.266,44
5,000	3149,964	449,99	R\$ 1.372,48
4,029	2538,050	362,58	R\$ 1.105,86
4,062	2558,911	365,56	R\$ 1.114,95
TOTAL	30.414,88	4.344,98	R\$ 13.252,20

Tabela 7: Gastos do sistema de bombeamento modificado.

Potência Consumida (kW)	Consumo HFP (kWh)	Consumo HP (kWh)	Preço (R\$)
2,183	1375,528	196,50	R\$ 599,34
4,624	2913,268	416,18	R\$ 1.269,35
2,053	1293,362	184,77	R\$ 563,54
3,251	2048,274	292,61	R\$ 892,46
2,871	1808,422	258,35	R\$ 787,96
1,496	942,187	134,60	R\$ 410,52
3,295	2075,686	296,53	R\$ 904,41
1,891	1191,558	170,22	R\$ 519,18
1,577	993,782	141,97	R\$ 433,01
1,465	923,038	131,86	R\$ 402,18
TOTAL	15.565,11	2.223,59	R\$ 6.781,94

Nos cálculos para se chegar ao preço pago pela empresa mensalmente, foi considerado um funcionamento de 24h por dia e uma tarifa de R\$0,19

para o horário fora de ponta (HFP) e R\$1,72 para o horário de ponta (HP). A Tabela 6 faz referência ao atual equipamento utilizado na SAE, já a Tabela 7 considera os equipamentos com a melhoria do rendimento das bombas.

Observa-se, portanto, que a modificação do rendimento do conjunto motor-bomba resulta em uma economia mensal superior a 50%. Anualmente, seria economizado cerca de R\$77.643,12.

6 ANÁLISE ECONÔMICA

A fim de verificar a viabilidade econômica da solução proposta, são calculados indicadores que facilitam a análise e tomada de decisão. Para os cálculos seguintes, será adotada uma taxa de juros (i) de 1% ao mês e vida útil de 5 anos para o equipamento.

6.1 Tempo de retorno simples

O tempo de retorno simples (Trs) considera a taxa de juros igual a zero e é dado pela Equação 4.

$$Trs = Ca / Ee \quad (4)$$

Onde:

Ca - Custo do investimento em Reais.

Ee - Economia por mês em Reais.

6.2 Tempo de retorno capitalizado

O tempo de retorno capitalizado (Trc) considera uma determinada taxa de juros e representa o tempo em que o investimento de aquisição é reembolsado na forma de parcelas mensais, conforme a Equação 5.

$$Trc = \frac{\log\left(\frac{Ee}{Ee - Ca \cdot i/100}\right)}{\log(1 + i/100)} \quad (5)$$

6.3 Energia economizada ao longo da vida útil

A energia economizada ao longo da vida útil (Evu) do equipamento é dada pela Equação 6.

$$Evu = 12 \times E_{kWh} \times Vu \quad (6)$$

Onde:

E_{kWh} - Economia de energia mensal.

Vu - Vida útil do equipamento em anos.

6.4 Valor retornado simples

O valor retornado simples (Vrs) é obtido ao longo da vida útil do equipamento. Ele é calculado sem se considerar a capitalização por meio da Equação 7.

$$Vrs = Ee \times 12 \times Vu - Ca \quad (7)$$

6.5 Valor retornado capitalizado

O valor líquido retornado capitalizado (Vrc) pode ser conhecido por meio da Equação 8.

$$Vrc = \frac{\left[\left(1 + i/100\right)^{12 \cdot Vu} - 1 \right]}{(i/100) \cdot \left(1 + i/100\right)^{12 \cdot Vu}} \cdot Ee - \Delta C_a \quad (8)$$

6.6 Resultados da Análise Econômica

As Tabelas 8 e 9 mostram os valores utilizados e calculados conforme exposto nos itens anteriores da análise econômica.

Tabela 8: Dados necessários para a análise econômica.

Potência Bombas (cv)	Economia Mensal		Custo Aquisição (R\$)
	R\$	kWh	
1,5	458,05	1.201	2.685,00
3,0	172,82	453,2	3.180,00
1,5	966,50	2.535	2.685,00
3,0	1.007,20	2.641	3.180,00
2,0	602,71	1.580	2.850,00
1,5	662,01	1.736	2.685,00
2,0	362,04	949,6	2.850,00
2,0	853,31	2.238	2.850,00
1,5	672,86	1.764	2.685,00
1,5	712,77	1.869	2.685,00
TOTAL	6.470,26	16.97	28.335,00

Tabela 9: Resultados da análise econômica.

Trs	Trc	$Evu (kWh)$	$Vrs (R\$)$	$Vrc (R\$)$
6	6	72.086,75	24.798,07	17.906,71
18	20	27.197,30	7.188,97	4.588,96
3	3	152.104,22	55.304,74	40.763,85
3	3	158.510,37	57.252,08	42.098,77
5	5	94.852,29	33.312,44	24.244,73
4	4	104.185,63	37.035,77	27.075,81
8	8	56.976,20	18.872,18	13.425,36
3	3	134.290,65	48.348,31	35.510,37
4	4	105.892,66	37.686,58	27.563,43
4	4	112.174,17	40.081,40	29.357,75
4	5	1.018.270,26	359.880,54	262.535,74

Quanto maior o tempo de funcionamento, e maior a potência, mais rápido acontecerá o retorno dos investimentos. Haverá casos, porém, em que o retorno acontecerá em um tempo muito grande, maior do que a vida útil do equipamento, caracterizando assim a inviabilidade da troca (Freitas, 2008).

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Observou-se que é possível conseguir uma economia bastante significativa simplesmente utilizando equipamentos corretamente dimensionados. No entanto, na maioria dos sistemas de saneamento há uma constante troca de bombas e motores que apresentam problemas técnicos, por outros de potência incorreta, já que não há o equipamento certo disponibilizado de imediato no almoxarifado. Portanto, é também de fundamental importância que a empresa implante um sistema de manutenção, de preferência preventiva ou preditiva, para evitar que o problema de utilização de equipamento inadequado volte a ocorrer.

Com a adequação tarifária da empresa utilizada no estudo de caso, foram tomadas medidas corretivas, com as quais obteve-se uma economia de 9,6% sobre o total da fatura das amostras analisadas, sem custo algum para a empresa.

Na proposta de melhoria de rendimento do conjunto motor-bomba dos poços artesianos ou semi-artesianos, o estudo de caso se concentrou em uma unidade, na qual os 10 sistemas de bombeamento de poços foram redimensionados.

O resultado obtido foi uma economia de 51% na parcela da conta de energia referente ao bombeamento dos poços, e de 29,33% em relação ao total da fatura da unidade estudada.

Os resultados das duas etapas de ações propostas são expostos na Tabela 10 abaixo.

Tabela 10: Resultados obtidos com as soluções propostas.

Item	Redução de consumo (MWh)	Redução de Consumo	Redução total na conta de energia	Redução no sistema específico modificado
Tarifação	0,0	0,0%	9,6%	19,0%
Bombas	16,97	48,8%	29,3%	51,0%

Com a análise econômica, verificou-se que o tempo de retorno do capital investido foi inferior a 6 meses, o que é muito menor que o tempo de vida útil estimada para os equipamentos.

Baseando-se nos cálculos de tempo de retorno do investimento, no valor retornado e energia economizada ao longo da vida útil, é comprovada a viabilidade econômica da implantação de um sistema mais eficiente de bombeamento para o estudo de caso apresentado.

Além de ser vantajoso para a empresa economicamente falando, é favorável ao meio ambiente, já que a produção de energia implica, necessariamente, na exploração de recursos naturais e emissão de rejeitos no meio ambiente.

8 REFERÊNCIAS

- Andreas, John C. (1982). *Energy Efficient Motors - Selection and Applications*, Marcel Dekker Inc.
- Ministério das Minas e Energia. Balanço Energético Nacional (BEN) (2010). Disponível em 10 de março de 2011 em: <<http://www.mme.gov.br>>.
- Marques, M. S. C. e Outros (2006). *Conservação de Energia: Eficiência Energética de Equipamentos e instalações*. 3. ed. Itajubá: FUPAI.
- Procel, Centrais Elétricas Brasileiras. *Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica*. Disponível em 29 de outubro de 2008, em: <www.eletrobras.com/procel>.
- Tsutiya, Milton Tomoyuki (2001). *Redução do custo de energia elétrica em sistemas de abastecimento de água*, São Paulo, Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental.
- Leão. Catálogo de bombas. Disponível em 22 de setembro de 2010, em: <www.bombasleao.com.br>.
- Freitas, P. C. F. e Outros. (2008). *Análise comparativa dos rendimentos dos motores da linha padrão e de alto rendimento sob o enfoque da eficiência energética*. In: Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos, Belo Horizonte, p. 1 - 4.