

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE A REDAÇÃO FINAL DA
TESE DEFENDIDA POR Renato Archanjo
de Castro E APROVADA
PELA COMISSÃO JULGADORA EM 30/06/08...

.....
ORIENTADOR

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
COMISSÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA
PLANEJAMENTO DE SISTEMAS ENERGÉTICOS

Análise de Viabilidade de Troca de Motores Elétricos Superdimensionados e a Influência da Energia Reativa

Autor: Renato Archanjo de Castro
Orientador: Moacyr Trindade de Oliveira Andrade



**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
COMISSÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA
PLANEJAMENTO DE SISTEMAS ENERGÉTICOS**

Análise de Viabilidade de Troca de Motores Elétricos Superdimensionados e a Influência da Energia Reativa

Autor: Renato Archanjo de Castro
Orientador: Moacyr Trindade de Oliveira Andrade

Curso: Planejamento de Sistemas Energéticos.

Dissertação de mestrado acadêmico apresentada à comissão de Pós Graduação da Faculdade de Engenharia Mecânica, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Planejamento de Sistemas Energéticos.

Campinas, 30/06/2008
S.P. – Brasil

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA E ARQUITETURA - BAE - UNICAMP

C279a Castro, Renato Archanjo de
Análise de viabilidade de troca de motores elétricos
superdimensionados e a influência da energia reativa /
Renato Archanjo de Castro. --Campinas, SP: [s.n.], 2008.

Orientador: Moacyr Trindade de Oliveira Andrade
Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de
Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica.

1. Motores elétricos de indução 2. Potência reativa
(Engenharia elétrica). 3. Fator de potência. 4. Energia
elétrica – Conservação. I. Andrade, Moacyr Trindade de
Oliveira. II. Universidade Estadual de Campinas.
Faculdade de Engenharia Mecânica. III. Título.

Título em Inglês: Analysis of feasibility of the change of super dimensioned
electrical engines and the influence of reactive energy

Palavras-chave em Inglês: Super dimensioned electrical engines, Reactive
energy, Conservation energy

Área de concentração:

Titulação: Mestre em Planejamento e Sistemas Energéticos

Banca examinadora: Ana Lúcia Rodrigues da Silva, Carlos Márcio Vieira Tahan

Data da defesa: 30/06/2008

Programa de Pós-Graduação: Engenharia Mecânica



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
COMISSÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA
PLANEJAMENTO DE SISTEMAS ENERGÉTICOS
DISSERTAÇÃO DE MESTRADO ACADÊMICO

**Análise de Viabilidade de Troca de Motores
Elétricos Superdimensionados e a Influência da
Energia Reativa**

Autor: Renato Archanjo de Castro
Orientador: Moacyr Trindade de Oliveira Andrade

A Banca Examinadora, composta pelos membros abaixo aprovou esta Dissertação:



Prof. Dr. Moacyr Trindade de Oliveira Andrade
Instituição: UNICAMP



Prof. Dra. Ana Lucia Rodrigues da Silva
Instituição: UNICAMP



Prof. Dr. Carlos Márcio Vieira Tahan
Instituição: USP

Campinas, 30 de Junho de 2008.

Dedicatória:

Dedico este trabalho à minha querida filha Isabela que em seus 3 aninhos muitas vezes não entendia o motivo que me levava a ficar horas e horas em frente ao computador, privando-a de minha companhia, e a minha querida esposa Silmara, que além de me ajudar supria esta lacuna enquanto eu desenvolvia este trabalho.

Ao meu irmão e amigo Roberto que atualmente está lutando contra um câncer, que Deus continue lhe dando força e determinação para vencer esta luta em prol de sua vida.

Agradecimentos

Aos meus queridos pais, Antonio e Anita, que muitas vezes deixaram de realizar seus sonhos para realizar os meus.

Ao meu orientador Moacyr, pela sua paciência e seu bom humor sempre presentes em nossas conversas e por ter me mostrado os passos a serem seguidos.

Aos professores Ana Lúcia e Márcio Tahan por participarem da banca examinadora e por seus comentários muito oportunos.

Aos meus Irmãos João, Antonio, Roberto e Paulo e minhas Irmãs Maria e Lúcia que me incentivaram nesta caminhada.

As minhas sobrinhas Eliane, Daiane, Jéssica e Carol e também meu sobrinho Matheus que participaram de forma direta na conclusão deste trabalho.

Ao amigo Wagner proprietário da Elétrica Demarchi por sua colaboração nos orçamentos e discussões sobre o tema.

Ao Sr. Paulo Campos proprietário da Meta Materiais Elétricos de Americana pelo incentivo para a conclusão deste trabalho.

A Deus, autor da vida, que está sempre ao meu lado, renovando-me as forças, e sempre fortalecendo meus passos.

*“Se vi mais longe do que outros,
é porque estava apoiado nos ombros de gigantes.”*

Sir Isaac Newton

Resumo

CASTRO, Renato Archanjo. *Análise de Viabilidade de Troca de Motores Elétricos Superdimensionados e a Influência da Energia Reativa*, Campinas,: Faculdade de Engenharia Mecânica, Unicamp, 2008. 120 p. Dissertação (Mestrado).

Este trabalho mostra a importância do motor elétrico de indução trifásico rotor gaiola de esquilo, que é o principal responsável pelo consumo de energia elétrica no seguimento industrial, apresenta suas características elétricas, mecânicas e sua evolução ao longo dos anos. Relata ainda a problemática do superdimensionamento destes motores instalados na indústria brasileira, ao qual tem como principal inconveniente a alta requisição de energia reativa nas instalações elétricas, apresenta a forma de faturamento da energia reativa aplicada pelas concessionárias de energia, bem como as principais formas de sua compensação aplicadas atualmente pela indústria nacional e seus efeitos na instalação existente. O trabalho apresenta uma análise comparativa entre o motor Alto Rendimento e o motor Standard, com ênfase na adequação da potência nominal em relação à demanda industrial, bem como em relação ao consumo de energia reativa das opções avaliadas. O suporte proveniente de pesquisas e adequações de instalações industriais aplicada pelo autor, em empresas da região de Americana, em relação à energia elétrica reativa, se constituem como base para o desenvolvimento deste trabalho. A conclusão final busca demonstrar que estas ações de conservação e adequação em motores elétricos industriais, são fundamentais para o processo de efficientização das próprias indústrias, do setor elétrico e da economia do país, de forma geral, uma vez que as mesmas implicam na redução da energia requerida pela indústria sem prover restrições a produção, resultando em significativa economia de recursos no provimento de novas fontes de energia e de melhor utilização do sistema elétrico nacional.

Palavras Chave: Motor Superdimensionado, Energia Reativa, Conservação de Energia.

Abstract

CASTRO, Renato Archanjo, *Analysis of Feasibility of the change of Super dimensioned Electrical Engines and the Influence of Reactive Energy*, Campinas,,: Faculdade de Engenharia Mecânica, Unicamp, 2008. 120 p. Dissertation for Master Degree.

This study shows the importance of the electrical engine of triphasic induction rotor (squirrel cage), which is the main responsible for the waste of electrical energy in industry; it presents its electrical and mechanical characteristics and its evolution along the years, as well. The study describes the problem of the super dimensioning of these engines that exist at the Brazilian industry, which has the major inconvenience of the high required of reactive energy in the electrical systems, presenting the way of invoicing the reactive energy applied by the power suppliers, as well as the main ways of its compensation applied presently by the national industry and its consequences for the existent installation. The study presents a comparative analysis between the engine of high efficiency and the Standard engine, focusing the adaptation of nominal power in relation to the industrial demand, as well as in what concerns the waste of reactive energy by the evaluated options. The background for the development of this study came from researches and adaptation of industrial plants applied by the Author in companies of the American region, as far as reactive electrical energy is concerned. The final conclusion tries to demonstrate that these actions of conservation and adaptation in industrial electrical engines are fundamental for the process of improving the efficiency of the very same industries, the electrical sector and the economy of the country as a whole, since that the same actions imply the reduction of the energy required by the industry without restrictions to the production, resulting into a significant saving of resources in what concerns the supply of new sources of energy and a better utilization of the national electrical system.

Key Words: Super dimensioned Electrical Engines, Reactive Energy, Energy of Conservation.

Índice

Lista de Figuras	xiii
Lista de Tabelas	xv
Lista de Anexos	xvi
Nomenclatura	xvii
Capítulo 1: Introdução	1
1.1 – Problema do trabalho	1
1.2 – Objetivos	2
1.3 – Justificativa	2
1.4 – Metodologia	2
1.5 - Estrutura do trabalho	3
1.6 - A Influência da energia reativa	4
Capítulo 2: O Motor Elétrico de Indução	6
2.1 - Do magnetismo ao motor elétrico	7
2.2 – O universo tecnológico dos motores elétricos	8
2.3 – A família dos motores CA trifásicos	10
2.3.1 - Motor síncrono	11
2.3.2 - Motor assíncrono	11
2.4 – Aspectos construtivos do motor trifásico rotor gaiola de esquilo	14
2.4.1 - Estator	15
2.4.2 – Rotor	15

Capítulo 3: Motor Alto Rendimento x Motor Standard	16
3.1 - Escorregamento	16
3.2 - Funcionamento do motor de indução conforme a carga solicitada	17
3.3 - Perdas de potência no motor de indução	18
3.4 - Rendimento do motor de indução	22
3.5 - O surgimento do motor de Alto Rendimento	24
3.6 - Metodologia de ensaio dos motores elétricos	26
3.6.1 - Métodos de ensaio da IEEE-112	27
3.6.2 - Método de ensaio da JEC-37	27
3.6.3 - Método de ensaio da IEC 34-2	28
3.6.4 - Método de ensaio da NBR-5383	28
3.7 – O desenvolvimento do motor elétrico no Brasil	29
3.8 – O motor de Alto Rendimento	30
3.9 – Comparativo de rendimento e fator de potência dos principais fabricantes nacionais	32
3.10 - Comparativo de rendimento e fator de potência dos principais fabricantes americanos	34
3.11 - Comparativo de rendimento da norma americana NEMA x Decreto 4.508	35
3.12 - A energia reativa	38
3.12.1 – A Tarifação da energia reativa	40
3.13 - Correção do fator de potência	45
3.14 - Distorções harmônicas	50
3.15 - O efeito das harmônicas na correção do fator de potência	52
Capítulo 4: Características Predominantes na Avaliação da Adequação dos Motores	55
4.1 – A adequação de motores elétricos a carga acionada	55
4.2 – Ambiente de trabalho do motor	56
4.2.1 – Temperatura	56
4.2.2 – Altitude da instalação	57
4.2.3 – Ambiente variado e grau de proteção (IP)	58
4.3 – Características mecânicas da carga	58
4.3.1 - Tipos de cargas mecânicas	59

4.3.2 – Conjugado x Categoria	59
4.3.3 – Inércia da carga	60
4.3.4 – Regime de partida	60
4.3.5 – Regime de serviço	60
4.4 – Características elétricas do motor	61
4.4.1 – Fator de serviço (FS)	61
4.4.2 – Frequência nominal do motor	61
4.4.3 – Número de pólos do motor	62
4.4.4 – Número de pontas do motor	62
4.4.5 - Tensão nominal do motor	62
4.5 – Características construtivas do motor	63
4.6 – Características da rede elétrica	63
4.7 - Custo médio da energia elétrica	63
4.7.1 – Grupo “A”	64
4.7.2 – Grupo “B”	64
4.7.3 – Estrutura tarifária do grupo A	65
4.7.4 – Fator de carga da instalação	66
4.7.5 - Custo médio da energia elétrica no grupo A	67
Capítulo 5: Análise Técnica e Econômica da Adequação de carga	69
5.1 – Coleta de dados do motor em funcionamento	69
5.2 – Cálculos elétricos do motor em funcionamento	71
5.3 – Substituição por motor Standard – Alternativa 1	77
5.4 – Substituição por motor Alto Rendimento – Alternativa 2	80
5.5 – Comparação dos resultados obtidos	83
5.6 – Indicadores da análise de viabilidade	86
5.6.1 – Valor presente (VP) e valor presente líquido (VPL)	86
5.6.2 – Taxa interna de retorno (TIR)	87
5.7 – Cálculo da análise de viabilidade	87
5.7.1 – Análise do VPL e TIR desconsiderando a energia reativa	87

5.7.2 – Análise do VPL e TIR considerando a correção da energia reativa com capacitores	90
5.7.3 – Análise do VPL e TIR considerando a multa da energia reativa	93
Capítulo 6: Conclusões	95
Anexos	98
Referências Bibliográficas	113

Lista de Figuras

2.1	Uso final da energia elétrica na indústria brasileira	6
2.2	Universo tecnológico dos motores elétricos	9
2.3	Esquema elétrico de ligação do motor de rotor bobinado	12
2.4	Rotor gaiola de esquilo	13
2.5	Principais componentes do MITRGE	14
3.1	Perdas no motor de indução	19
3.2	Principais perdas no motor de indução	21
3.3	Curva característica do MITRGE em relação a potência nominal	23
3.4	Evolução do peso dos motores elétricos	24
3.5	Comparação do rendimento dos motores americanos TEFC – 4 pólos conforme Norma NEMA	26
3.6	Rendimento dos motores nacionais TEFC - 4 pólos conforme Decreto 4.508	30
3.7	Comparação entre o motor AR e o motor Standard	31
3.8	Rendimento dos motores nacionais TEFC - 4 pólos Alto Rendimento (AR)	32
3.9	Fator de potência dos motores nacionais TEFC - 4 pólos Standard (Std)	33
3.10	Média do fator de potência dos motores TEFC - 4 pólos dos principais fabricantes nacionais	33
3.11	Rendimento do motor TEFC – 4 pólos Premium Efficiency	34
3.12	Fator de potência do motor TEFC – 4 pólos Premium Efficiency	35
3.13	Comparação do rendimento dos motores TEFC – 4 pólos NEMA x Decreto 4.508	36
3.14	Média do fator de potência dos motores TEFC - 4 pólos dos principais fabricantes americanos x brasileiros	36

3.15	Média do fator de potência dos motores TEFC - 4 pólos NEMA dos principais fabricantes americanos	37
3.16	Média do fator de potência dos motores TEFC - 4 pólos NEMA Premium x Standard dos principais fabricantes	37
3.17	Triângulo de potência	39
3.18	Diagrama de potência, identificando-se os desperdícios decorrentes de um baixo fator de potência	42
3.19	Acréscimo na conta de energia em instalações com baixo fator de potência	45
3.20	Diagrama unifilar da correção do FP com banco fixo de capacitores	46
3.21	Diagrama unifilar da correção do FP com banco automático de capacitores	47
3.22	Diagrama unifilar da correção do FP por grupos de cargas	48
3.23	Diagrama unifilar da correção do FP de forma localizada	49
3.24	Diagrama unifilar da correção do FP de forma mista	50
3.25	Onda deformada e suas componentes harmônicas	51
3.26	Diagrama unifilar representando as ressonâncias: série e paralelo	53
4.1	Classe de isolamento e temperatura de operação	56
4.2	Tipos de cargas mecânicas	59
5.1	Curva característica do motor 50cv / 220 V / 4 Pólos	71
5.2	Triângulo de potência do motor a ser substituído	74
5.3	Curva característica do motor Standard (15 kW / 4 Pólos / 220 V)	77
5.4	Curva característica do motor Alto Rendimento (15 kW / 4 Pólos / 220 V)	81
5.5	Análise da TIR para motores 4 Pólos (TEFC) sem correção da energia reativa	89
5.6	Análise da TIR para motores 4 pólos (TEFC) considerando a correção da energia reativa com capacitores	92
5.7	Análise da TIR para motores 4 pólos (TEFC) considerando a multa da energia reativa	94

.....

Lista de Tabelas

3.1	Rendimento de motores elétricos determinado por diferentes métodos de ensaio	28
3.2	Valores para os sinais 1, 5 e T da figura 3.25	51
3.3	Ordem, frequência e seqüência das harmônicas características	52
4.1	Custos médios em R\$/MWh das tarifas de energia elétrica praticadas pela CPFL Paulista	68
5.1	Grandezas elétricas do motor em funcionamento	76
5.2	Grandezas elétricas do motor Standard – Alternativa 1	80
5.3	Grandezas elétricas do motor AR – Alternativa 2	83
5.4	Comparativo dos 3 motores avaliados sem considerar a energia reativa	84
5.5	Comparativo dos 3 motores avaliados considerando a energia reativa	85
5.6	Comparativo da análise do VPL e TIR desconsiderando a energia reativa	88
5.7	Comparativo da análise do VPL e TIR considerando a correção da energia reativa com capacitores	91
5.8	Comparativo da análise do VPL e TIR considerando a multa da energia reativa	93

.....

Lista de Anexos

Anexo I	Grau de proteção	98
Anexo II	Tipos de categoria	99
Anexo III	Regime de trabalho dos motores elétricos	100
Anexo IV	Efeito da variação da tensão sobre o motor elétrico	105
Anexo V	Preços de tarifas de energia elétrica praticadas na CPFL - Paulista	106
Anexo VI	Custo da correção do FP com banco fixo de capacitores	108
Anexo VII	Custo da correção do FP com banco automático de capacitores	109
Anexo VIII	Custo da correção do FP por grupos de cargas	110
Anexo IX	Custo da correção do FP de forma localizada	111
Anexo X	Custo da correção do FP de forma mista	112

.....

Nomenclatura

Letras Gregas

$\Theta_{\text{máx}}$ – temperatura máxima atingida durante o ciclo

η – Rendimento do motor (%)

ε – Escorregamento do motor (%)

Σ^T - Somatório

$\text{Cos } \varphi$ – Fator de Potência

.....

Abreviações

ΔE_p – Energia ativa liberada

ΔQ_t – Energia reativa tarifada

ΔQ_{mt} – Energia reativa mensal tarifada

AR – Alto rendimento

C – Custo

$C\Delta Q_t$ – Custo da energia reativa tarifada

$C\Delta Q_{\text{mt}}$ – Custo da energia reativa mensal tarifada

CA – Corrente Alternada

CC – Corrente Contínua

C_{ia} – Custo inicial de aquisição

C_{ii} – Custo inicial de instalação

C_{it} – Custo inicial total

CTL – Custo total líquido

C_t – Valor total da conta de energia

C_{mea} – Custo mensal da energia ativa

E – Energia

E_c – Energia consumida

E_{Qc} – Energia reativa consumida

E_{Qmc} – Energia reativa mensal consumida

E_s – Energia aparente

f – Frequência da rede (Hz)

FC_i – Quantidade a ser paga mensalmente pelo consumo ou perda de energia (R\$)

f.e.m. – Força eletromotriz

FP – Fator de potência

FP_r – Fator de potência de referência

FS – Fator de serviço

HP – Horse power

Hz – Hertz (frequência)

i – Taxa de juros ao mês (%)

IP – Grau de proteção dos equipamentos elétricos

I_t – Corrente de trabalho

M_c – Conjugado da carga (Nm)

n – Rotação (rpm)

N – Número de meses de funcionamento do motor considerado na análise

NP – Número de pólos formados pelo grupo de enrolamentos

Nr – Velocidade do Rotor (rpm)

Ns – Velocidade do campo magnético girante, ou velocidade síncrona (rpm)

ODP – Aberto a prova de gotejamento

P – Potência ativa, em W

P_{in} – Potência total recebida por um motor

P_{out} – Potência útil entregue pelo motor para executar o trabalho

P_{perdas} – Perda total produzida dentro do motor

Q – Potência reativa, em VAR

s – Velocidade de escorregamento (rpm)

S – Potência aparente em VA

Std – Standard (Padrão)

T – A vida útil do projeto

TEFC – Totalmente fechado com ventilação

t_D – Tempo de partida

t_F – Tempo de frenagem elétrica

TIR – Taxa interna de retorno

t_N – Tempo de Funcionamento em carga constante

t_R – Tempo de repouso

t_V – Tempo de funcionamento em vazio

V – Volts

VA – Volt Ampère

VAh – Volt Ampère hora

VAR - Volt Ampère Reativo

VARh – Volt Ampère Reativo hora

VP – Valor presente

VPL – Valor presente líquido

W – Watts

Wh – Watt hora

.....

Siglas

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica

IEC – International Electrotechnical Commission

IEEE – Institute of Electrical and Electronics Engineers

JEC – Japanese Electrotechnical Committee

MITRGE - Motor de Indução Trifásico Rotor Gaiola de Esquilo

NEMA – National Electrical Manufacturers Association

NBR – Norma Brasileira Regulamentadora

.....

Capítulo 1

Introdução

A energia permeia a vida humana, sua utilização de forma racional, pode representar a continuidade da existência da espécie humana, sobre a terra. Os padrões de consumo de energia crescem a cada dia e conforme Geller (2003) não são sustentáveis, há que se buscar uma maior eficiência energética, pois esta reduziria o crescimento do consumo de energia, diminuiria a demanda de investimento e melhoraria os serviços de energia para as nações e famílias mais carentes. Buscar uma maior eficiência energética é conseguir um melhor rendimento, ou seja, perder o mínimo de energia possível. Este trabalho demonstra a busca da eficiência dentro da indústria, especificamente no motor elétrico, que é o maior consumidor de energia deste setor.

1.1 Problema do trabalho

Este trabalho visa responder se do ponto de vista econômico é vantajosa a substituição de motores existentes e superdimensionados, por motores Standards ou Alto Rendimento dimensionados adequadamente? E quais os efeitos da energia reativa nesta análise de viabilidade?

1.2 Objetivos

Dar subsídios técnicos para que o leitor possa estar apto a desenvolver uma análise econômica criteriosa da substituição de motores existentes superdimensionados por novos motores adequados a carga;

Incentivar a adequação de carga de motores elétricos superdimensionados, visando a economia de energia e a compensação da energia reativa;

Comparar o fator de potência e o rendimento dos motores Standards e Alto Rendimento dos grandes fabricantes de motores elétricos vendidos atualmente.

1.3 Justificativa

O tema adotado dá-se devido ao conhecimento e experiência obtidos pelo autor ao longo dos anos em projetos de efficientização, promovidos em indústrias da região de Americana, envolvendo a substituição de motores elétricos antigos e superdimensionados por motores Standards ou Alto Rendimento dimensionados adequadamente a carga acionada, bem como nos projetos de análise e correção do fator de potência.

1.4 Metodologia

Para o trabalho apresentado é utilizado um motor típico, ao qual é realizado um levantamento da porcentagem de carga deste motor em relação a sua potência nominal. Para tal é utilizada a curva característica deste motor fornecido pelo seu fabricante e a máxima corrente elétrica medida durante seu ciclo completo de funcionamento. Uma vez obtido sua porcentagem de carga e respeitando-se suas condições mecânicas e elétricas de operação, é feita uma proposta de substituição deste motor por um motor de rendimento Standard e também por um de Alto Rendimento, ambos adequados à carga acionada.

Em seguida são calculados os custos mensais de operação de cada um dos novos motores propostos e realizada uma comparação dos resultados obtidos. Logo após é inserido nos cálculos os custos mensais da energia reativa, considerando-se que a mesma não seja compensada.

Na seqüência é feita uma análise de viabilidade através da VPL e TIR, demonstrando como a energia reativa influencia na opção de troca do motor superdimensionado.

1.5 Estrutura do trabalho

Este trabalho se constitui de 6 capítulos, sendo este primeiro uma apresentação do escopo, através de um breve resumo dos aspectos de influência da energia reativa nos sistemas de transmissão, distribuição e geração de energia elétrica e das características de desperdício energético promovido pelas indústrias em decorrência do superdimensionamento de motores e da não atenção ao consumo de energia reativa requerido pela produção como resultado do superdimensionamento do maquinário.

O capítulo 2 descreve um pequeno histórico do surgimento do motor elétrico, a extensa variedade de motores existentes, as principais características do motor de indução trifásico rotor gaiola de esquilo, que segundo Garcia (2003) é responsável por mais de 90% da energia motriz produzida por energia elétrica na indústria nacional, bem como as principais vantagens deste motor em relação aos demais motores elétricos existentes atualmente.

No capítulo 3 se faz uma apresentação das características elétricas e mecânicas do motor de indução gaiola de esquilo, sua evolução que culminou no surgimento do motor de Alto Rendimento, comparativos de rendimento e fator de potência entre o motor Standard e o motor Alto Rendimento, tanto nacionais quanto americanos e ainda a forma de faturamento empregada pelas concessionárias de energia às empresas que possuem baixo fator de potência, bem como as principais formas de compensação da energia reativa aplicadas atualmente pela indústria nacional.

O capítulo 4 aponta a necessidade de análise de diversas grandezas elétricas do motor e da rede elétrica que o alimenta, características mecânicas tanto da carga acionada quanto do motor analisado, e ainda as condições do ambiente de trabalho do motor analisado, para que se possa ter

sucesso na adequação de carga de um motor elétrico, e ainda as tarifas de energia aplicadas atualmente pelas concessionárias de energia.

O capítulo 5 apresenta os resultados da análise técnica e econômica da adequação de carga desenvolvidas pelo autor nas indústrias da região de Americana, que redundam em maior eficiência dos maquinários, redução de interferência nas redes do setor elétrico e redução dos custos do suprimento de energia elétrica, tornando estas indústrias mais competitivas.

O capítulo 6 apresenta uma discussão dos resultados obtidos, bem como as principais conclusões e sugestões para novos trabalhos neste objetivo.

1.6 A Influência da energia reativa

O sistema elétrico brasileiro é composto por uma extensa rede de extra alta tensão, denominado de sistema interligado e compreende o processo de transmissão de energia elétrica às regiões Sul, Sudeste, Centro Oeste, Nordeste e parte interligada da região Norte, onde também se localizam os denominados sistemas isolados.

O maior percentual de consumo de energia elétrica do Brasil localiza-se na região sudeste, principalmente no Estado de São Paulo, concentrando atualmente, cerca de 30% da energia nacional (SECRETARIA DE SANEAMENTO E ENERGIA, 2007).

O Brasil é um país com produção de energia elétrica lastreada em Usinas Hidroelétricas, decorrente do grande potencial de recursos hídricos disponíveis. Atualmente, a participação das usinas hidroelétricas na formação da capacidade geradora disponível se encontra na ordem de 76% (BEN, 2007).

Esta condição caracteriza o país como condições ímpares em relação a maior parte das demais nações do globo, frente a possibilidade de produção de energia renovável com reduzidos impactos operativos, apesar da extensa ocupação requerida pelos reservatórios das usinas hidroelétricas.

Em contrapartida, em face da impossibilidade de alteração do ponto ideal de implantação das usinas hidráulicas, a integração entre a fonte produtora e os pontos de consumo, requer a constituição de extensas linhas de transmissão para prover o transporte de grandes blocos de energia produzidos até o entorno dos grandes centros de consumo onde, visando a viabilização de

introdução desta energia, se prove a redução do nível de tensão de transporte para os denominados sistemas de subtransmissão e de distribuição, visando a complementação da integração entre a fonte e as unidades de consumo.

O setor produtivo, em particular a indústria que requer a energia elétrica para prover os resultados econômicos e sociais almejados, faz uso da energia elétrica que é composta de duas parcelas: uma parcela da energia que efetivamente produz “Trabalho” e outra parcela que é requerida decorrente das leis da física para criar as condições operativas de diversos equipamentos, também conhecida como energia reativa. A energia reativa é inerente aos processos de geração, transporte e consumo de energia elétrica, porém não produz trabalho.

A utilização de equipamentos superdimensionados no setor produtivo possui influência direta na geração de energia reativa, uma vez que a energia reativa requerida por uma máquina está fortemente associada a sua construção, e quando esta máquina trabalha com potência inferior à nominal¹, a componente reativa permanece associada à capacidade total do equipamento. Isto implica na necessidade de instalação de acessórios para compensação de energia reativa para se evitar multas da concessionária de energia. Esta condição poderia ser evitada, pela aquisição de maquinário com potência diretamente integrada à produção efetiva, reduzindo os custos de aquisição dos equipamentos de produção e os acessórios de compensação.

Entretanto, em face da maior efetividade do setor comercial das empresas vendedoras de equipamentos, o empresário é normalmente convencido a adquirir maquinário com potência muito superior àquela requerida por sua produção, pois a arte de vendas faz com que o mesmo acredite numa rápida expansão dos negócios e assim evitaria a necessária substituição do maquinário produtivo. Esta atitude provoca um superdimensionamento dos equipamentos e, conseqüentemente, das instalações elétricas requeridas para acioná-los, causando, adicionalmente, outro sobre custo para a implantação de equipamentos corretivos ou simplesmente para o pagamento das multas de faturamento do fornecimento desta energia adicional, desnecessária ou improdutiva, pelo não cumprimento do limite regulatório do fator de potência².

¹ nominal: valor utilizado para elaboração do projeto do equipamento.

² Fator de potência: é a razão da potência ativa pela potência total disponibilizada ou potência aparente;

$$\text{Fator de potência} = \frac{\text{Potência Ativa (W)}}{\text{Pot. Aparente (VA)}}$$

A Resolução 456 da ANEEL estabelece como limite regulatório (valor mínimo) do fator de potência o valor de 0,92.

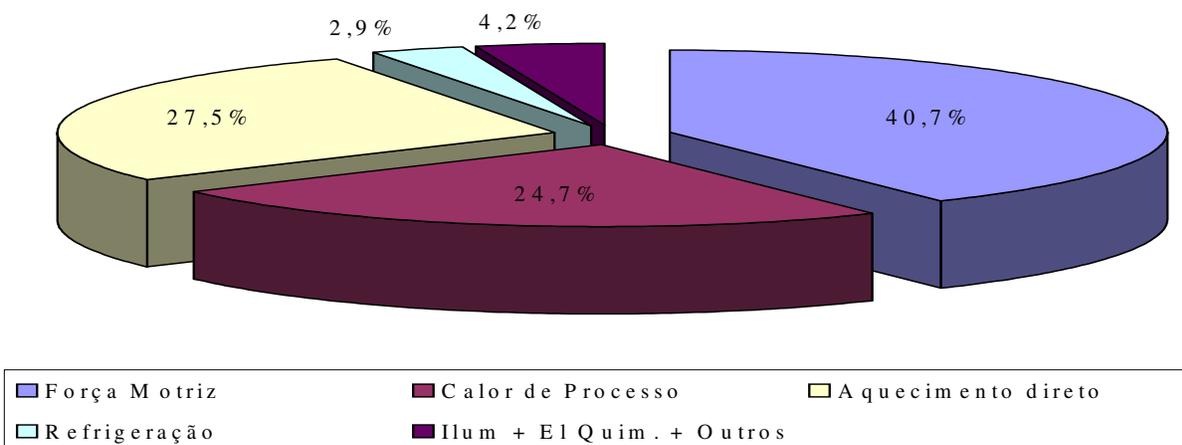
Capítulo 2

O Motor Elétrico de Indução

O Motor elétrico é uma máquina destinada a transformar energia elétrica em mecânica. É o mais usado de todos os tipos de motores (hidráulico, pneumático, combustão interna, entre outros), pois combina as vantagens da utilização de energia elétrica - baixo custo, facilidade de transporte, limpeza e simplicidade de comando com sua construção simples, grande versatilidade de adaptação às cargas dos mais diversos tipos e melhores rendimentos (WEG, 2005).

Devido a estas vantagens o motor elétrico é o maior consumidor de energia elétrica no segmento industrial, (figura 2.1) ao qual é responsável atualmente por 40,7% do consumo total de energia elétrica na indústria brasileira (BEU, 2004).

Figura 2.1 - Uso final da energia elétrica na indústria brasileira.



Fonte: Elaborado a partir dos dados extraídos de BEU, 2004.

2.1 Do magnetismo ao motor elétrico

O físico dinamarquês Hans Christian Oersted (1777-1851) que tentava desde 1807 relacionar a eletricidade com o magnetismo obteve êxito somente em 1820, ao aproximar uma agulha magnética de um fio em que passava uma corrente elétrica, ele percebeu que a agulha apresentava uma deflexão. Misturando experiências de eletricidade e magnetismo, Oersted mostrou que um fenômeno afetava o outro.

Dominique Jean Arago (1786-1853) reproduziu as experiências de Oersted em 1822, mostrando que um fio pelo qual passasse uma corrente atraía pequenos pedaços de ferro.

O francês André Marie Ampère (1775-1836) idealizou o eletroímã, ao mostrar que um fio enrolado numa espiral comportava-se exatamente como um ímã comum, desde que nele se produzisse uma corrente. A esse equipamento, Ampère chamou de “solenóide”.

O eletroímã foi inventado em 1823 pelo inglês William Sturgeon (1783-1850) que baseando-se na descoberta de Oersted, constatou que um núcleo de ferro envolvido por um fio condutor elétrico transformava-se em um ímã quando se aplicava uma corrente elétrica, observando também que a força do ímã cessava tão logo a corrente fosse interrompida. Estava inventado o eletroímã, que seria de fundamental importância na construção de motores elétricos.

O eletroímã de Sturgeon foi aperfeiçoado por Joseph Henry (1797-1878), em 1829, que introduziu uma isolação entre os fios utilizados, eliminando os curtos-circuitos entre espiras. Se o eletroímã de Sturgeon podia levantar 5 quilos de ferro, o de Henry chegou a levantar uma tonelada (CHERMAN, 2004).

Joseph Henry descobriu também o princípio do motor elétrico, ao converter energia elétrica em movimento.

Em 1831 Michael Faraday (1791-1867) constatou que ao se movimentar um condutor elétrico em um campo magnético, surge uma diferença de potencial (tensão) nos terminais deste condutor, é a descoberta da indução eletromagnética (WOLFF, 2004).

Em 1832, o cientista italiano S. Dal Negro construiu a primeira máquina de corrente alternada com movimento de vaivém.

Grande sucesso obteve o motor elétrico desenvolvido pelo arquiteto e professor de física Moritz Hermann von Jacob que em 1838, aplicou-o a um bote. Alimentado por células de

baterias, o bote transportou 14 passageiros e navegou em uma velocidade de 4,8 quilômetros por hora.

Em 1866 Werner Siemens baseando-se na descoberta de Faraday constrói um dínamo capaz de gerar a tensão necessária para produzir magnetismo em seu enrolamento, proporcionando maiores potências de geração uma vez que os dínamos com ímãs naturais eram de pequenas potências (WOLFF, 2004).

A possibilidade prática de utilização da eletricidade se torna possível somente em 1881 e 1883, quando o francês Marcel Deprez demonstrou a possibilidade de transportar energia a longa distância, por meio de alta tensão (CABRAL et al., 1988).

Em 1885, o engenheiro eletricitista Galileu Ferraris construiu um motor de corrente alternada de duas fases. Ferraris, apesar de ter inventado o motor de campo girante, concluiu erroneamente que os motores construídos segundo este princípio poderiam, no máximo, obter um rendimento de 50% em relação a potência consumida.

O iugoslavo Nikola Tesla apresentou, em 1887, um pequeno protótipo de motor de indução bifásico, com rotor em curto-circuito. Este motor apresentou rendimento insatisfatório, mas impressionou de tal modo a empresa norte-americana Westinghouse, que esta lhe pagou um milhão de dólares pelo privilégio da patente (WIKIPÉDIA, 2008).

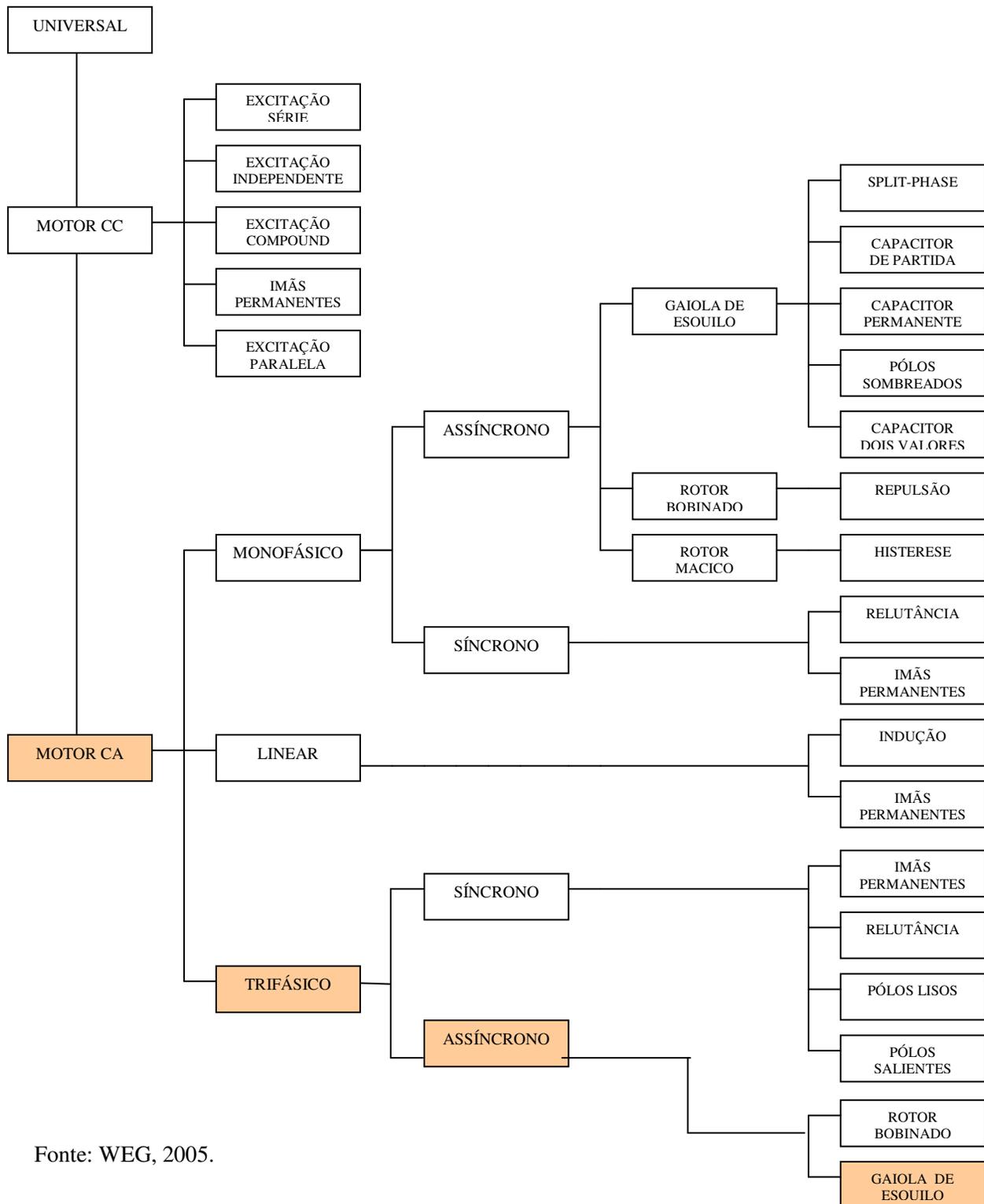
Foi o engenheiro eletricitista russo Michael von Dolivo Dobrowolsky, da empresa AEG, de Berlim, que entrou em 1889 com o pedido de patente de um motor trifásico com rotor de gaiola. O motor apresentado tinha uma potência de 80 Watts, um rendimento aproximado de 80% em relação à potência consumida e um excelente conjugado de partida (WOLFF, 2004).

2.2 O universo tecnológico dos motores elétricos

Desde seu descobrimento o motor elétrico passou por inúmeras alterações e para que atendessem as necessidades que surgiram ao longo dos anos foram desenvolvidos vários tipos de motores elétricos. Atualmente estes motores são divididos em 3 grupos (C.A., C.C. e Universal) conforme as características da rede de alimentação no aspecto de frequência. Cada grupo possui ainda ramificações internas com características que atendem as mais variadas exigências. Com

isso pode-se notar que o tipo de aplicação é que define qual o motor mais adequado. A figura 2.2 apresenta o universo tecnológico dos motores elétricos existentes.

Figura 2.2 - Universo tecnológico dos motores elétricos.



Fonte: WEG, 2005.

Motor universal (CA; CC)

Este motor é projetado para frequências comerciais³, variando de 60 Hz até zero (CC – Corrente Contínua) e para faixas de nível de tensão entre 250 V até 1,5 V. As potências nominais mais utilizadas em aspiradores e máquinas de costura industriais, são da ordem de até ¾ HP, principalmente. As furadeiras elétricas portáteis, por exemplo requerem capacidades inferiores, da ordem de até ¼ HP (KOSOW, 2005).

Motor de corrente contínua (CC)

São muito utilizados na indústria, quando se faz necessário exercer o controle fino (efetivo) da velocidade, num processo qualquer de fabricação. Como exemplo, cita-se a indústria de papel (MAMEDE FILHO, 1997).

Motor de corrente alternada (CA)

São utilizados na maioria das aplicações industriais, e podem ser divididos em 3 grupos (MAMEDE FILHO, 1997): Motor Trifásico; Motor Linear; e Motor Monofásico.

O objetivo deste estudo se restringirá ao motor trifásico, por este possuir uma maior aplicação no segmento industrial. Na figura 2.1 se destaca a cadeia a ser utilizada como base para este trabalho.

2.3 A família dos motores CA trifásicos

Os motores trifásicos são aqueles alimentados por um sistema trifásico a três fios, em que as tensões estão equilibradas⁴. Este motores podem ser:

- Síncrono (velocidade constante e igual a velocidade de sincronismo);

³ Frequência Comercial: é a frequência de operação, ou trabalho da rede elétrica de um determinado país, no Brasil a frequência comercial é 60 hertz, enquanto que no país vizinho, Paraguai a frequência é 50Hz.

⁴ Sistema Trifásico Equilibrado: Módulos de tensão iguais em todas as fases (linhas) defasados entre si de 120° elétricos.

- Assíncrono (velocidade pouco abaixo da velocidade de sincronismo).

2.3.1 Motor síncrono

Este motor 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 (MARTIGNONI, 2005).

Este motor normalmente é utilizado para grandes potências principalmente devido ao seu alto custo em pequenas potências (WEG, 2005).

Uma vantagem do motor síncrono é que além dele produzir força motriz pode ser utilizado para compensar a energia reativa requisitada por outras cargas indutivas, ou seja ele proporciona uma melhora no fator de potência da instalação que o alimenta (KOSOW, 2005).

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 C.C.), ou um enrolamento de compensação, afim de fazê-lo alcançar sua velocidade de sincronismo (MARTIGNONI, 2005).

2.3.2 Motor assíncrono

O Motor Assíncrono ou de Indução, é o motor que possui apenas seu estator ligado a rede elétrica, seu rotor não possui nenhum tipo de alimentação e as correntes que nele circulam são oriundas da indução eletromagnética do estator, por isto o nome de motor de indução.

Sua velocidade é praticamente constante, sofrendo pequena variação conforme a carga mecânica aplicada ao seu eixo. Devido as suas qualidades – robustez, baixo custo e simplicidade de manutenção - é largamente utilizado na indústria, sendo adequado para quase todos os tipos de aplicações (WEG, 2005).

Atualmente com o auxílio de inversores de frequência⁵ é possível controlar a velocidade de funcionamento dos motores de indução.

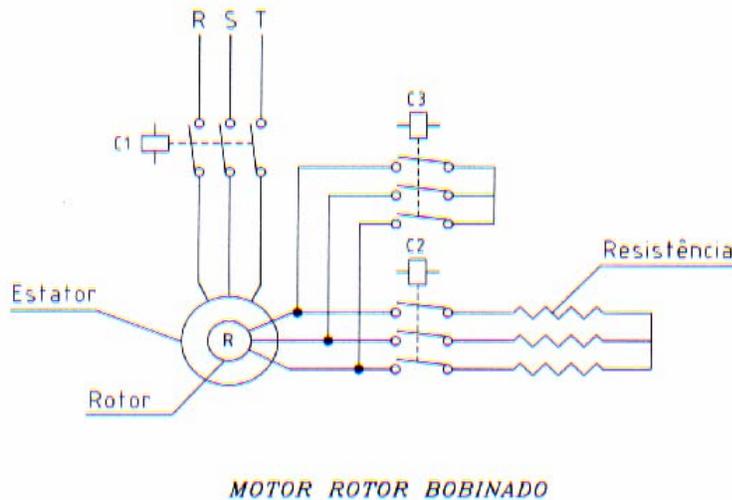
Os motores assíncronos ou de indução podem ainda serem divididos em:

- Motor de Rotor Bobinado ou;
- Motor Rotor Gaiola de Esquilo.

Motor trifásico assíncrono de rotor bobinado, este motor é composto de um rotor de ferro laminado, com ranhuras onde se alojam condutores de cobre isolados entre si formando 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 grafítico (GUEDES, 1994).

Conforme se observa na figura 2.3 que apresenta o esquema elétrico de ligação deste motor, é ligada ao conjunto de escovas uma resistência trifásica que proporciona o controle da resistência rotórica deste motor.

Figura 2.3 - Esquema elétrico de ligação do motor de rotor bobinado.



Variando-se a resistência do rotor é possível reduzir a velocidade deste motor para até 50% do valor nominal e também diminuir sua corrente de partida.

⁵ Inversor de frequência é um dispositivo eletrônico utilizado para acionar o motor elétrico, no qual altera a frequência e a tensão sobre o motor, possibilitando o controle de sua velocidade.

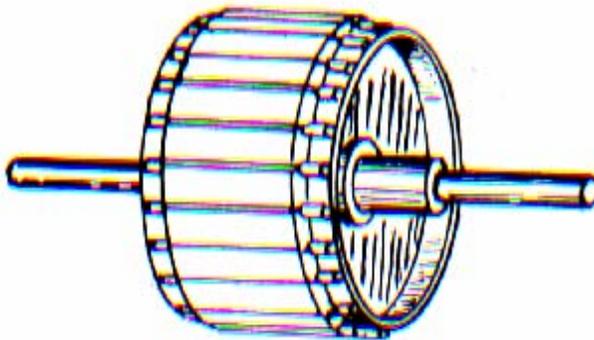
Os motores de rotor bobinado são aplicados onde se necessitam de conjugados (torque⁶) de partida elevados, com corrente de partida reduzida, tais como: bombas de êmbolo, bombas centrífugas, compressores, guindastes, esteiras transportadoras, etc. (NISKIER e MACINTYRE, 1996).

Embora este motor possua as aplicações citadas, o mesmo não fará parte da análise deste trabalho, por possuir uma aplicação menos representativa que o motor com rotor gaiola de esquilo, devido a sua maior necessidade de manutenção e seu maior custo.

Motor de indução trifásico assíncrono rotor gaiola de esquilo

Este motor também é conhecido como Motor de Indução Trifásico Rotor Gaiola de Esquilo (MITRGE) é o mais simples dos motores no aspecto construtivo, pois não possui comutador⁷, 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 (KOSOW, 2005).

Figura 2.4 - Rotor gaiola de esquilo.



Fonte: Martignoni, 2005.

⁶ Torque ou conjugado é a medida do esforço necessário para girar um eixo.

⁷ Comutador é um dispositivo que inverte a alimentação das bobinas do motor de positivo para negativo, sucessivamente a cada meia volta do rotor.

O MITRGE é composto por um rotor, que possui uma barra em cada canal. Estas barras possuem o comprimento maior que a carcaça do rotor conforme exposto na figura 2.4, e são conectadas em curto-circuito entre si, nas duas extremidades do rotor, por meio de anéis de cobre ou alumínio. Este conjunto de barras e anéis de curto-circuito nas duas extremidades deste rotor adquire o aspecto de duas gaiolas de esquilo; por esta razão, o rotor assim constituído, é denominado *rotor gaiola de esquilo* ou rotor em curto-circuito (MARTIGNONI, 2005).

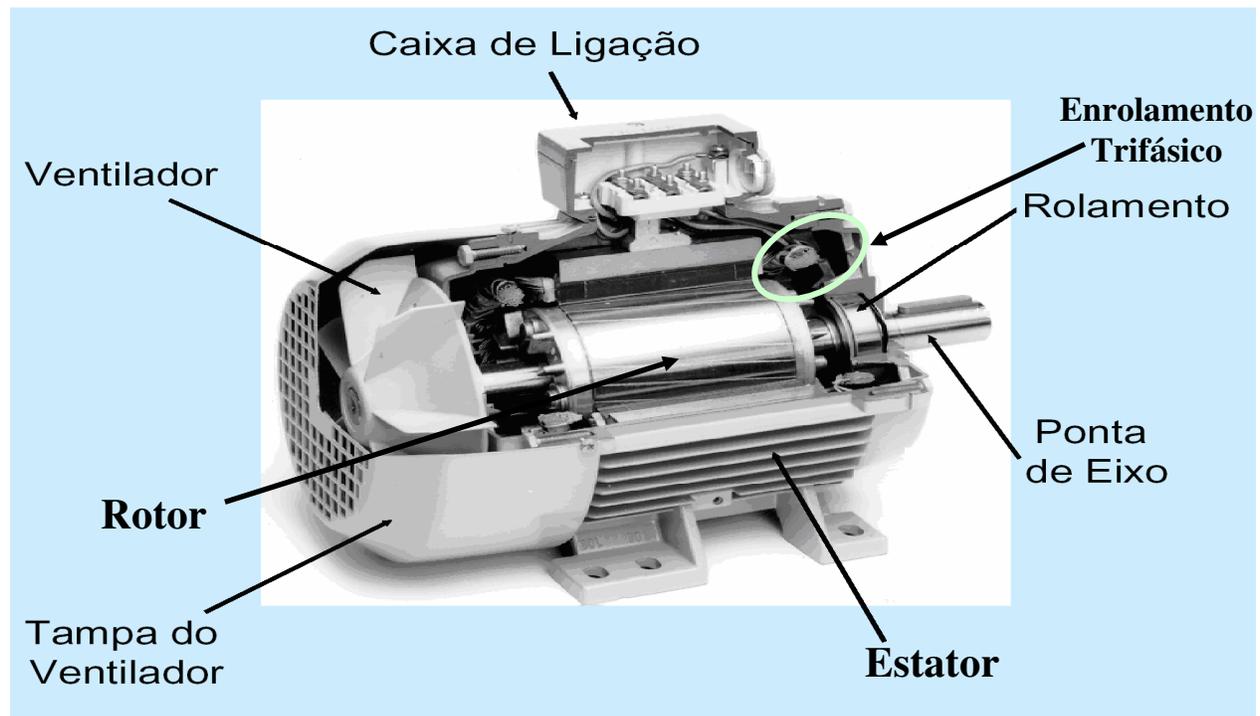
Uma vantagem do MITRGE quando comparado ao motor síncrono, é o fato de poder partir sozinho, mesmo com carga (MARTIGNONI, 2005).

2.4 Aspectos construtivos do motor trifásico rotor gaiola de esquilo

O motor de indução trifásico rotor gaiola de esquilo (**MITRGE**) é composto, fundamentalmente, de 2 partes:

- Estator e;
- Rotor.

Figura 2.5 - Principais componentes do MITRGE.



Fonte: Siemens Mundo em Movimento, 2005.

A Figura 2.5 apresenta o MITRGE, identificando-se seus principais componentes, integrados ao rotor ou ao estator.

2.4.1 Estator

É a parte fixa do motor, sendo composto por:

- a) Carcaça que normalmente é de ferro fundido, ou alumínio injetado, resistentes a corrosão e com aletas para facilitar a dissipação do calor;
- b) Núcleo de chapas de aço magnético;
- c) Enrolamento trifásico, constituído de três conjuntos iguais de bobinas (uma para cada fase) defasadas de 120° elétricos entre si;
- d) Caixa de ligação, onde se efetuará a conexão elétrica do enrolamento trifásico com a rede elétrica.

2.4.2 Rotor

É a parte girante do motor, o rotor é suportado por dois rolamentos localizados nas extremidades do estator.

No eixo do rotor é instalado na parte traseira um ventilador para realizar a ventilação do conjunto e na parte frontal tem-se a ponta de eixo onde será acoplada a carga a ser acionada.

Pelas razões citadas anteriormente, o motor trifásico assíncrono é o motor mais largamente utilizado na indústria, conforme Garcia (2003) seguramente é responsável por mais de 90% da energia motriz produzida por eletricidade na indústria nacional e, portanto, se proverá a análise deste equipamento, suas características técnicas e seu desempenho.

Capítulo 3

Motor Alto Rendimento x Motor Standard

O motor de indução trifásico rotor gaiola de esquilo (MITRGE) como visto no capítulo anterior é muito utilizado na indústria nacional, devido as suas vantagens frente aos demais motores. Este capítulo apresenta o comportamento de suas grandezas elétricas conforme a carga mecânica aplicada a seu eixo, os principais métodos de ensaio de seu rendimento, a evolução deste motor ao longo do tempo e os comparativos de rendimento e fator de potência entre o motor AR e o motor Standard, tanto nacionais como americanos.

Ainda neste capítulo é apresentada a forma de tarifação da energia reativa, os métodos usuais de efetuar sua compensação, bem como os efeitos desta compensação a instalação elétrica.

3.1 Escorregamento

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

Segundo Kosow (2005) o motor de indução é um motor que mantém praticamente constante sua velocidade, desde a vazio até a 100% de carga.

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 3.1.

$$N_s = \frac{120 \cdot f}{NP}$$

Equação 3.1

Onde:

Ns: Velocidade do campo magnético girante ou velocidade síncrona (rpm);

f: frequência da rede (Hz); e **NP:** 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 (s) e é normalmente expressa como uma porcentagem da velocidade síncrona (KOSOW, 2005).

$$\epsilon = \frac{\text{velocidade de escorregamento} \times 100}{\text{velocidade síncrona}} = \frac{(\text{velocidade síncrona} - \text{velocidade do rotor}) \times 100}{\text{velocidade síncrona}}$$

$$\epsilon = \frac{(N_s - N_r) \times 100}{N_s}$$

Equação 3.2

Onde:

Ns: Velocidade do campo magnético girante ou velocidade síncrona (rpm);

ε: Escorregamento percentual (%); e **Nr:** Velocidade do rotor (rpm).

3.2 Funcionamento do motor de indução conforme a carga solicitada

O motor de indução pode operar desde a vazio (sem carga) até mesmo por algum tempo com carga acima de sua capacidade nominal, com isto suas grandezas elétricas e mecânicas se alteram. A vazio, o escorregamento do motor é muito pequeno (uma fração de 1%), logo sua velocidade é muito próxima da velocidade do campo magnético girante. Seu rendimento, corrente, potência ativa e fator de potência são baixos.

Na condição de plena carga, o motor girará a um valor de escorregamento que promova o equilíbrio entre o torque desenvolvido e o torque aplicado. À medida que mais carga for aplicada, aumentará o escorregamento porque o torque aplicado excede ao torque desenvolvido, suas grandezas elétricas aumentarão 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 (KOSOW, 2005).

3.3 Perdas de potência no motor de indução

Segundo Kosow (2005) o motor é um dispositivo dinâmico, portanto não desenvolve uma conversão de potência (ou energia) quando não há movimento. Ele 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) mais a sua perda total de potência. Isto significa que um motor nunca pode converter toda a potência de entrada em potência útil. A equação 3.3 apresenta a lei de conservação de potência:

$$P_{in} = P_{out} + P_{perdas}$$

Equação 3.3

Onde:

P_{in}: Potência total recebida por um motor;

P_{out}: Potência útil entregue pelo motor para executar o trabalho;

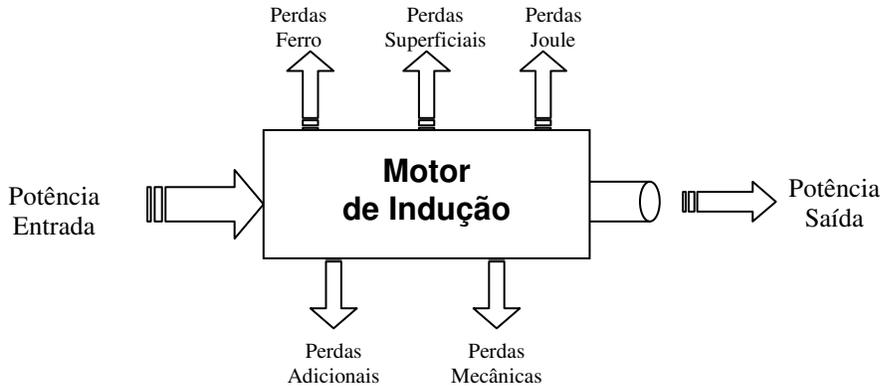
P_{perdas}: Perda total produzida dentro do motor, como resultado da conversão de energia, isto é, $P_{in} - P_{out}$.

Segundo Martignoni (2005), as perdas que se produzem no funcionamento do motor assíncrono são:

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

A figura 3.1 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 3.1 - Perdas no motor de indução.



a) Perdas no ferro

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 rotórico⁸ dos motores assíncronos são pouco significativas.

Perdas no ferro do estator: Compõem-se das perdas por correntes parasitas e das perdas por histerese magnética.

Perdas por correntes parasitas: Numa massa metálica sujeita a variação de fluxo, geram-se forças eletromotrizes (f.e.m.)⁹ que produzem, dentro da própria massa metálica, correntes altas, chamadas correntes parasitas.

Estas correntes produzem uma força magnetomotriz¹⁰ 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 de potência, é necessária a construção do induzido com lâminas de ferro isoladas entre si. Com esta construção, o valor da f.e.m. produzida

⁸ Rotórico: que ocorre no rotor.

⁹ Forças eletromotrizes (f.e.m.): quando se tem um circuito elétrico percorrido por uma corrente elétrica de intensidade variável no tempo, verifica-se que esta variação é contrariada por uma força gerada no próprio circuito, a este fenômeno dá-se o nome de auto-indução ou f.e.m. (GUEDES, 1996).

¹⁰ Força Magnetomotriz: Conforme Guedes (1996) é a força gerada em uma bobina devido a passagem da corrente elétrica.

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: Conforme Martignoni (2005) 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*.

b) Perdas por efeito Joule no estator e no rotor

As perdas por efeito Joule¹¹, são as que se verificam nos condutores estatóricos e rotóricos por efeito da passagem da corrente elétrica.

É importante lembrar 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.

Estas perdas são constantes e variam apenas na proporção direta da variação da velocidade Kosow (2005).

d) Perdas superficiais no estator e no rotor

¹¹ Efeito Joule: é o nome dado ao calor “gerado” pela passagem da corrente elétrica em um determinado material. Este efeito é indesejado quando se trata de condutores elétricos, e pode ser apreciado quando se utiliza uma resistência para aquecer determinado local, ex.: ferro de passar ou chuveiro.

Perdas superficiais no estator: Estas perdas são produzidas pela variação do fluxo que se produz na ponta dos dentes estatóricos¹² por efeito da passagem, em sua frente, dos dentes rotóricos. Se o rotor for de canais fechados, estas perdas são desprezíveis. Se o rotor possuir canais abertos ou semi fechados, as perdas superficiais estatóricas podem ser consideradas como sendo iguais a 30% das perdas que se verificam nos dentes do estator.

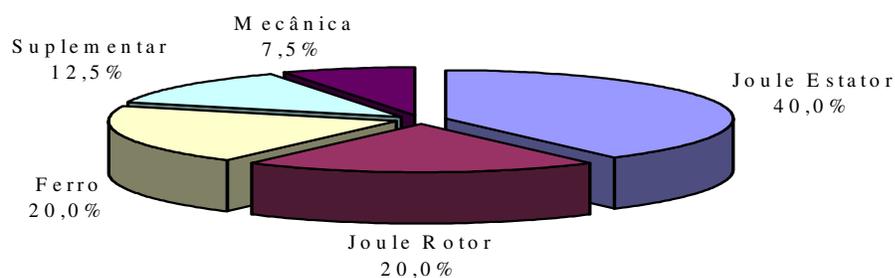
Perdas superficiais no rotor: As perdas superficiais do rotor são devidas à variação do fluxo que se produz na superfície periférica rotórica, por efeito da passagem desta sob os dentes e rasgos estatóricos.

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.

Figura 3.2 - Principais perdas no motor de indução.



Fonte: Eletrobrás (2001 apud RAMOS, 2005).

¹² Dentes estatóricos: dentes do estator.



A fim de avaliar globalmente estas perdas, as mesmas são consideradas como sendo de 0,5% a 1,0% da potência elétrica total absorvida pelo motor quando o mesmo é acima de 200 HP, abaixo deste valor são consideradas desprezíveis.

A figura 3.2 extraída de Eletrobrás (2001 apud RAMOS, 2005), mostra em percentual a importância de cada uma das perdas citadas anteriormente, evidenciando que as perdas Joules são responsáveis por aproximadamente 60% das perdas do motor de indução. As perdas suplementares citadas são a soma das perdas superficiais com as perdas adicionais.

3.4 Rendimento do motor de indução

O rendimento de um motor assíncrono é fornecido pela relação da potência de saída pela potência de entrada:

$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}}$	Equação 3.4
---------------------------------	-------------

Onde:

η : Rendimento do motor;

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

P_{in} : Potência total recebida por um motor (W).

O rendimento altera com a variação da potência fornecida; assim sendo, é possível traçar uma curva que representa a variação do rendimento do motor com a variação da potência mecânica fornecida.

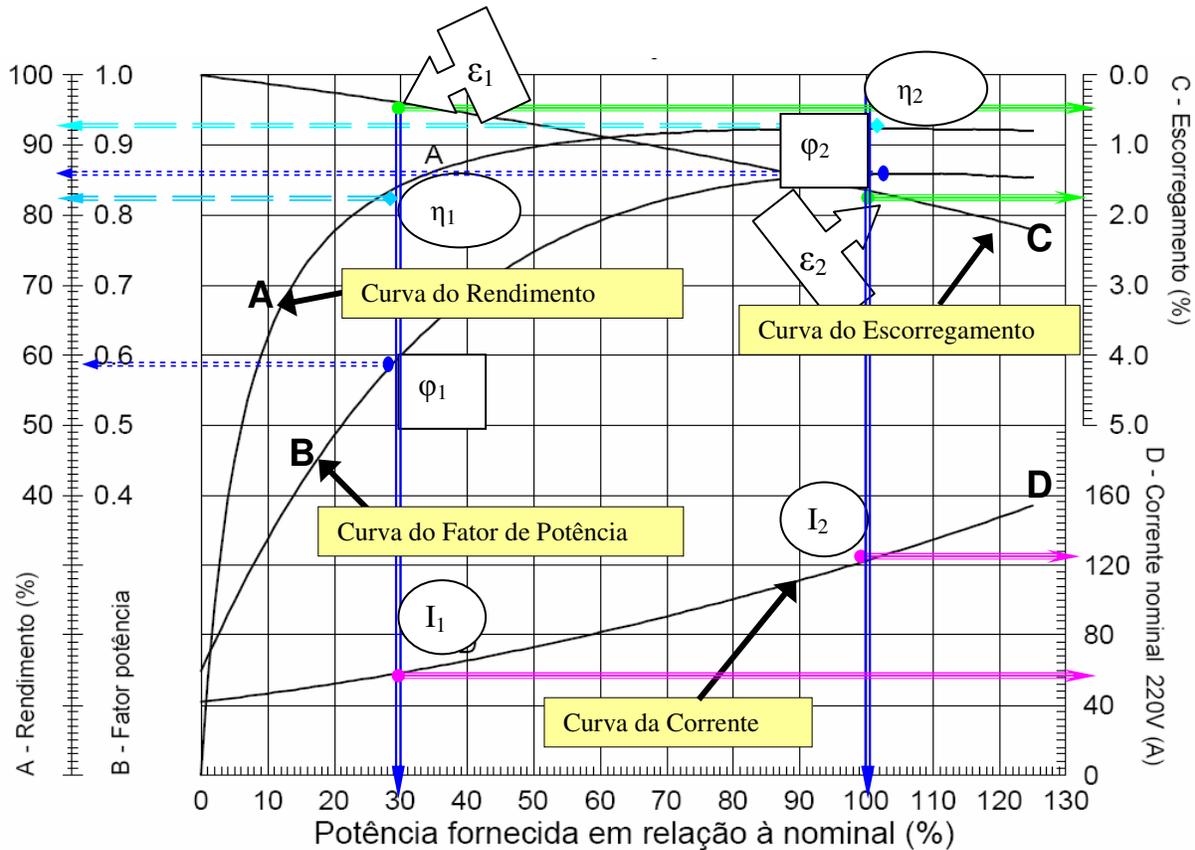
A figura 3.3 apresenta 4 curvas (A, B, C e D), ao qual demonstra a evolução do fator de potência, rendimento, corrente e escorregamento respectivamente, em função da carga aplicada ao eixo do motor.

Para facilitar o entendimento é referenciado nesta figura dois pontos para exemplificação, o motor trabalhando a 30% de carga e um segundo ponto com o motor trabalhando na condição ideal, ou seja 100% de carga.

Ao analisar a curva A que define o rendimento (η) se observa que há um aumento no rendimento de $\eta_1 = 88\%$ para $\eta_2 = 92\%$.

Ao se fazer a mesma análise na curva B, que expressa o fator de potência (φ) se tem um aumento maior que no rendimento ($\cos \varphi_1 = 60\%$ e $\cos \varphi_2 = 86\%$).

Figura 3.3 - Curva característica do MITRGE em relação a potência nominal.



Fonte: WEG, 2008.

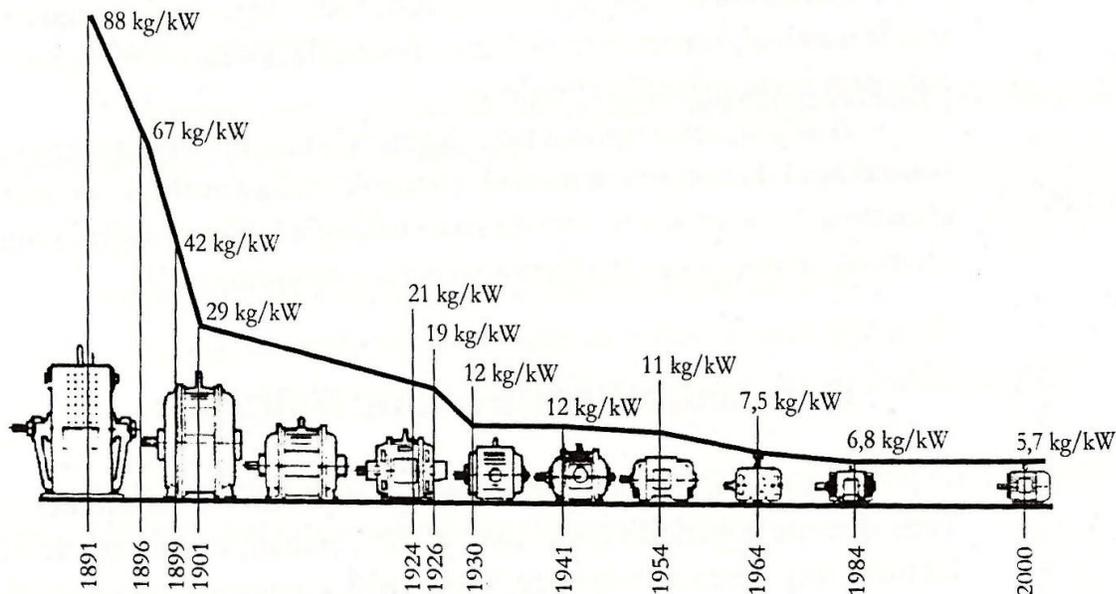
Com isto se pode observar que o simples fato de dimensionar adequadamente um motor elétrico, proporciona um aumento significativo no seu rendimento, proporcionando uma economia na energia elétrica consumida por determinada máquina ou equipamento, e também um aumento no fator de potência da instalação, evitando-se 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.

3.5 O surgimento do motor de Alto Rendimento

Quando estudada a evolução dos projetos dos motores produzidos nos países industrializados a partir do final da década de 40 até o início dos anos 70, verifica-se uma gradativa e significativa redução no tamanho e peso destes equipamentos conforme visualizado na figura 3.4, esta 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 em relação ao seu custo de operação, tendo em vista o alto nível da oferta e o relativo baixo custo da eletricidade que caracterizaram este período.

Esta compactação dos motores foi conseguida graças, principalmente, ao surgimento de novos materiais isolantes capazes de suportar temperaturas duas ou mais vezes maiores e com melhores características dielétricas que aqueles utilizados até então. A consequência imediata foi a possibilidade de operação dos motores em temperaturas mais elevadas, admitindo-se, então, nos projetos, um maior nível de perdas internas com a diminuição dos volumes de ferro e cobre empregados na fabricação (HERSZTERG, 1996).

Figura 3.4 – Evolução do peso dos motores elétricos.



Fonte: Eletrobrás, 2001.

Conforme Andreas (1992) 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.

No ano de 1974 é introduzida a primeira grande linha de montagem de motores eficientes (FELLOW, 1994).

Em 1977 a NEMA – *National Electrical Manufacturers Association*, estabeleceu um programa de etiquetagem para os tipos mais comuns de motores, de 1 a 125 HP. Antes do programa, a eficiência nominal de um motor e a eficiência mínima eram anotadas na placa de identificação da máquina. A estratégia do programa de etiquetagem era promover um padrão de medida da performance de um motor para comparação com motores de diferentes fabricantes (SANTOS, 2005).

Um ponto fraco do programa foram as poucas compras baseadas na placa de identificação do motor, pois a maioria delas eram feitas com base nos catálogos de fabricantes. Para solucionar este problema, em 1997, uma lei exigiu uma listagem da eficiência nominal dos motores em catálogos.

Segundo McCoy (1990) em 1989 a NEMA desenvolveu uma definição padrão para o motor de Alto Rendimento, ao qual tinha como objetivo auxiliar o usuário na comparação dos motores eficientes, foi incluída uma tabela com os valores mínimos de rendimentos exigidos a 100% de carga.

Conforme Bartos (2001) os Estados Unidos com a iniciativa de colocar a eficiência energética na legislação como parte de questões mais vastas a conservação de energia promulgou em 1992 a “Energy Policy and Conservation Act (EPAAct)” que se tornou efetiva em 1997, o alvo foi os motores elétricos utilizados na indústria. O EPAAct como ficou conhecido o programa foi um regulamento inovador ao motor de eficiência padrão.

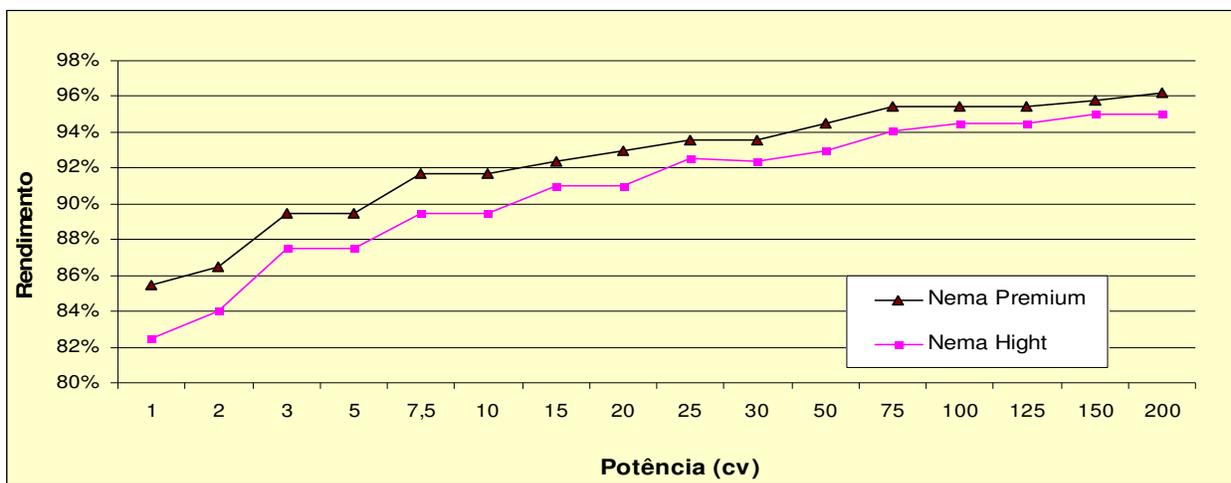
Essencialmente o EPAAct abrangia os motores trifásicos de 1 a 200 HP, com 2, 4 e 6 pólos, para aplicações gerais ODP (aberto, à prova de gotejamento) e TEFC (totalmente fechados com ventilação). Também contemplava os motores IEC importados para os EUA.

Em 2003 a NEMA publica as tabelas 12-12 e 12-13 ao qual estabelece os valores mínimos de rendimentos aos motores classificados como Premium (ou eficiência melhorada), esta tabela

abrangeu os motores de indução trifásico gaiola de esquilo (MITRGE) de 1 a 500 HP, 2, 4 e 6 pólos TEFC e ODP.

Os valores de rendimento estabelecidos por esta norma aos motores Premium e Hight Efficiency podem ser visualizados na Figura 3.5, onde se observa a superioridade do motor NEMA Premium.

Figura 3.5 - Comparação do rendimento dos motores americanos TEFC - 4 pólos conforme Norma NEMA.



Fonte: Elaborado a partir dos dados obtidos em NEMA, 2003.

3.6 Metodologia de ensaio dos motores elétricos

Existem no mundo várias normas técnicas que determinam os procedimentos que devem ser adotados durante a realização dos ensaios que definem os valores de rendimento dos motores elétricos trifásicos, as principais normas são:

- IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) nos Estados Unidos;
- JEC 37 (Japanese Electrotechnical Committee) no Japão;
- IEC (International Electrotechnical Commission) na Europa;
- NBR-5383 (Norma Brasileira Regulamentadora) no Brasil.

As normas citadas apresentam diversos métodos para a definição do rendimento dos motores de indução trifásicos, os principais métodos utilizados são:

3.6.1 Métodos de ensaio da IEEE-112

a) Método A: Freio

Neste método um freio mecânico é utilizado como carga para o motor, sendo dissipado sobre ele toda a potência do motor, é um método utilizado apenas para pequenos motores, normalmente menor que 1,0 HP.

b) Método B: Dinamômetro

Este método é o mais utilizado dentre os métodos da IEEE-112, por ser o que apresenta melhores resultados para motores 1 a 500 HP. Consiste na transferência da potência mecânica presente no eixo do motor para uma máquina girante (dinamômetro), que atua como um gerador dissipando energia em um banco de resistências. Através de uma célula de carga ou um torquímetro é medido o conjugado de reação.

O ensaio citado pode ser realizado a vazio (para obtenção das perdas no núcleo, por ventilação e atrito) e com carga (variando-se de 25% a 150% da potência nominal).

c) Método C: Máquina dupla

Neste método são utilizadas duas máquinas acopladas mecanicamente e ligadas eletricamente a duas fontes de energia, sendo uma delas com frequência ajustável. Uma máquina é operada como motor em tensão e frequência nominais, e a outra é operada como gerador, mas com baixa frequência a fim de produzir a carga desejada.

3.6.2 Método de ensaio da JEC-37

A JEC-37 também especifica os métodos básicos da IEEE-112, com exceção do método C (máquina dupla). O método preferido é o método do diagrama circular, que consiste na obtenção de todas as características operativas dos motores de indução através de simples relações lineares

e trigonométricas a partir dos dados obtidos através de dois ensaios: ensaio de rotor livre e ensaio de rotor bloqueado, este método não considera as perdas suplementares.

3.6.3 Método de ensaio da IEC 34-2

Os métodos básicos delineados pela IEEE-112 também são permitidos pela IEC 34-2. Entretanto a preferência se dá pelo método que assume valores para as perdas suplementares, normalmente estas perdas são subestimadas, resultando em valores mais altos de rendimento (SCHAEFFER et al, 2005).

3.6.4 Método de ensaio da NBR-5383

A norma brasileira segue o padrão do método B do IEEE-112, ou seja, o método de medição das perdas através do dinamômetro, que é considerado o método mais rigoroso de medição do rendimento.

A tabela 3.1 apresenta um comparativo entre os 3 métodos de ensaio citados anteriormente, é notável a diferença de até 3% no rendimento do motor de 75 HP quando comparado o método JEC-37 com o método B da IEEE-112. Esta diferença se deve principalmente ao fato da JEC-37 não considerar as perdas suplementares, enquanto que o método B da IEEE-112 mede estas perdas. Isto serve também como um alerta na comparação da performance de motores elétricos de diferentes países.

Tabela 3.1 – Rendimento de motores elétricos determinado por diferentes métodos de ensaio

HP	JEC-37 Diagrama Circular	IEC 34-2 Previsão de perdas	IEEE-112 Método B
5	88,8	88,3	86,2
10	89,7	89,2	86,9
20	91,9	91,4	90,4
75	93,1	92,7	90,0

Fonte: Osterlei (1980 apud ANDREAS, R.E. 1992).

3.7 O desenvolvimento do motor elétrico no Brasil

Conforme Hertzberg (1996) os motores de indução fabricados no Brasil tiveram uma trajetória tecnológica semelhante à verificada nos países industrializados, no que diz respeito as dimensões, peso e rendimento. Deve ser destacada, porém, uma importante mudança de direcionamento dos projetos, ocorrida a partir de meados da década de 70, e que teve forte influência nas dimensões e características operacionais dos motores de indução trifásicos aqui produzidos. Esta mudança foi determinada pela incorporação às normas brasileiras (ABNT) dos critérios sugeridos pelas normas IEC européias; até então as normas brasileiras eram baseadas nas normas americanas – NEMA.

A adoção da normalização européia teve como conseqüências a diminuição dos custos de produção, o aumento dos conjugados e correntes de partida e a diminuição do rendimento da máquina. Outro fato importante relacionado aos projetos foi a adoção de materiais isolantes da classe “B”, até hoje em dia predominantes.

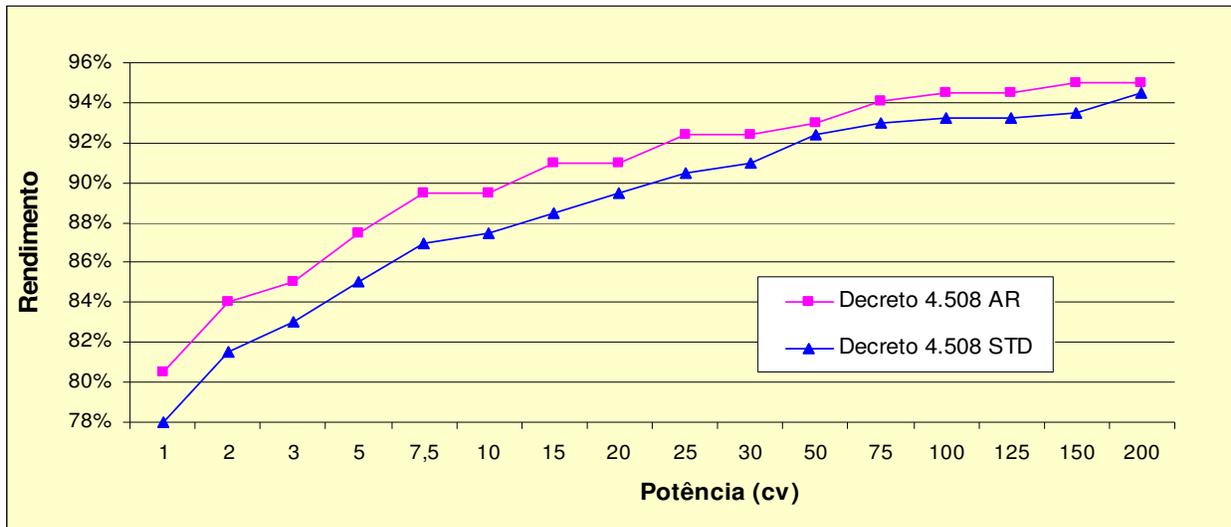
Segundo Schaeffer et al. (2005) a partir de 1990 os dois maiores fabricantes nacionais de motores trifásicos seriados – WEG Motores S.A e EBERLE S.A – lançaram, efetivamente, no mercado interno suas linhas de motores de Alto Rendimento; em média 35 a 50 % mais caras que as suas respectivas linhas “Standard”.

Em 17 de outubro de 1997, houve a aprovação da “Lei de Eficiência Energética” (Lei nº 10.295), cuja tramitação no Congresso Nacional iniciou em 1990, instituindo o estabelecimento de níveis mínimos de eficiência energética ou máximos de consumo no Brasil, mecanismo de reconhecida eficácia para tornar mais eficiente o uso de energia.

O primeiro equipamento a ser regulamentado foi o motor elétrico de indução trifásico rotor gaiola de esquilo, através do Decreto 4.508, de 11 de dezembro de 2002 (BRASIL, 2002).

O Decreto 4.508 estabelece, no Art. 3º, que “o indicador de eficiência energética a ser utilizado é o rendimento nominal” (BRASIL, 2002). Foram estabelecidas duas tabelas de rendimentos nominais mínimos, uma para os motores padrão e outra para os motores de Alto Rendimento, estes valores podem ser observados na figura 3.6.

Figura 3.6 - Rendimento dos motores nacionais TEFC - 4 pólos conforme Decreto 4.508.



Fonte: Elaborado a partir dos dados obtidos no decreto 4.508 (BRASIL, 2002).

3.8 O motor de Alto Rendimento

Conforme Eletrobrás (2001) os motores de Alto Rendimento se apresentam como uma boa alternativa, muito embora não sejam a solução definitiva para todos os problemas energéticos relacionados ao motor de indução, posto que sejam tão susceptivos a fatores exógenos (condição do alimentador, método de partida, ambiente de trabalho) quanto os motores de projeto padronizado.

Segundo WEG (2005) os motores de Alto Rendimento são motores especialmente projetados para, fornecerem a mesma potência útil (na ponta do eixo) que outros tipos de motores, consumindo menos energia elétrica da rede. Isto é possível reduzindo-se suas principais perdas citadas no item 3.3. Construtivamente os motores de Alto Rendimento possuem as seguintes características:

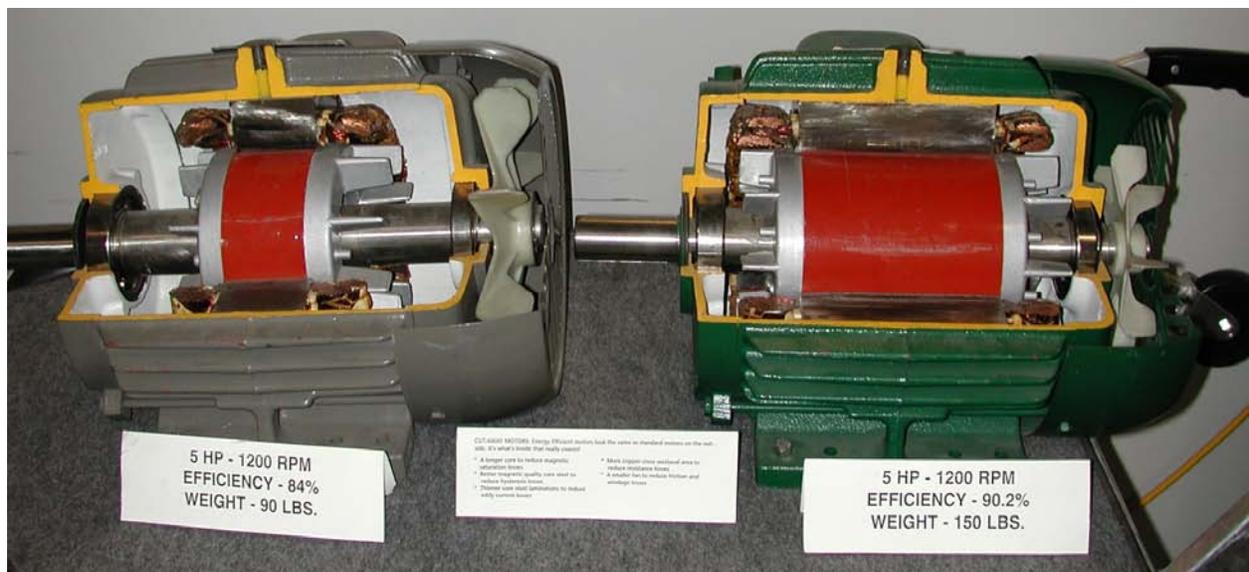
- Chapas magnéticas de melhor qualidade (aço silício);
- Maior volume de cobre, que reduz a temperatura de operação;
- Super dimensionamento das barras do rotor para diminuir as perdas por efeito Joule;
- Enrolamentos especiais, que produzem menos perdas estatóricas;

- Rotores tratados termicamente, reduzindo perdas rotóricas;
- Altos fatores de enchimento das ranhuras, que provém melhor dissipação do calor gerado;
- Anéis de curto circuito dimensionados para reduzir as perdas Joule;
- Projetos de ranhuras otimizados para incrementar o rendimento;
- Emprego de rolamentos adequados e otimização do projeto dos ventiladores para diminuir as perdas por atrito.

Com todas estas melhorias cita Américo (2003 apud GARCIA, 2003), é natural que o motor Alto Rendimento custe mais caro. A sua utilização em lugar de um motor padrão (ou até mesmo, a troca de um motor em operação), no entanto pode ser economicamente viável em função do custo de energia economizado ao longo de sua vida útil (o custo da energia consumida por um motor chega a mais de 100 vezes o seu preço de aquisição).

A figura 3.7 mostra dois motores de 5 HP, sendo o motor da esquerda com rendimento Standard 84% e o da direita Alto Rendimento 90,2%, são perceptíveis as maiores dimensões do rotor e das bobinas do motor de Alto Rendimento, proporcionando-lhe um acréscimo de aproximadamente 66% no seu peso, também é possível observar um design diferenciado para a ventoinha do motor AR.

Figura 3.7 – Comparação entre o motor AR e o motor Standard.

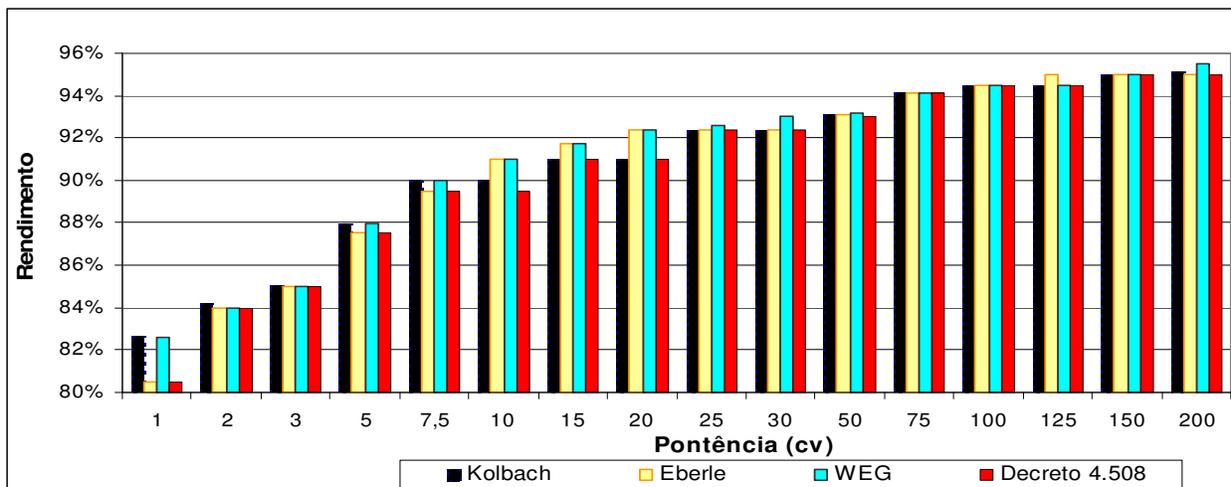


Fonte: Advanced Energy, 2008.

3.9 Comparativo de rendimento e fator de potência dos principais fabricantes nacionais

A figura 3.8 apresenta o rendimento nominal para os motores Alto Rendimento (AR) dos principais fabricantes de motores elétricos nacionais, sendo eles: Kolbach, Eberle e WEG, bem como os valores mínimos de rendimento estabelecido pelo Decreto 4.508.

Figura 3.8 - Rendimento dos motores nacionais TEFC - 4 pólos Alto Rendimento (AR).



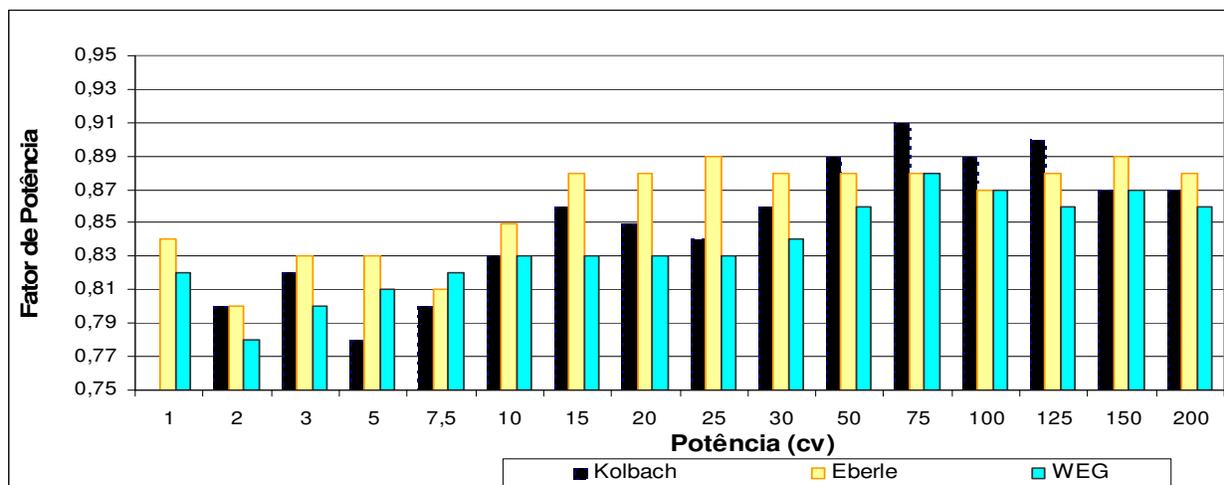
Fonte: Elaborado a partir dos catálogos (Kolbach, Eberle e WEG) e Decreto 4.508 (BRASIL, 2002).

Assim como já observado por Herszterg (1996) na análise da figura 3.8, é possível notar que há variações significativas no rendimento de um fabricante para outro, portanto esta passa ser mais uma preocupação na escolha do motor a ser instalado. Isto porque normalmente são relacionados apenas os principais dados técnicos para a compra do motor (tensão, potência, velocidade e carcaça entre outros) o que pode causar até mesmo a inviabilidade do projeto de troca do motor.

Como um dos principais objetivos deste trabalho é demonstrar a contribuição da energia reativa no processo de adequação de carga do motor, objeto de melhor detalhamento no próximo capítulo, não se pode deixar de observar o comportamento do fator de potência dentre estes fabricantes, pois como será visto posteriormente este dado também pode ser decisivo no processo de troca do motor elétrico. Para tanto ao se analisar a figura 3.9 que apresenta o fator de potência para os mesmos motores citados anteriormente, também pode ser notado uma significativa diferença entre os valores apresentados de um fabricante para outro.

Isto faz com que a substituição de um motor elétrico visando eficiência energética, seja mais complexa do que aparenta ser.

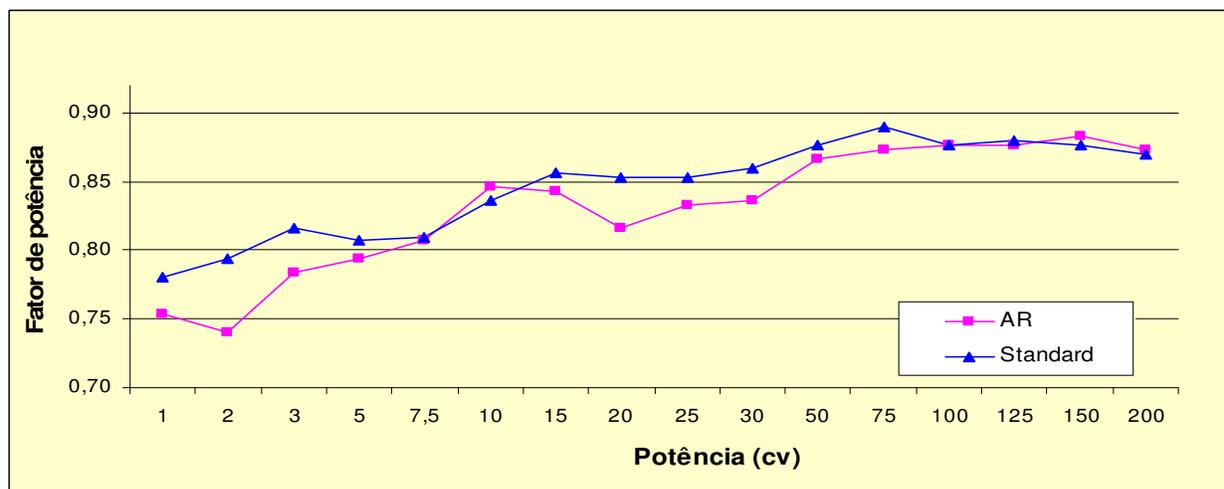
Figura 3.9 - Fator de potência dos motores nacionais TEFC - 4 pólos Standard (Std).



Fonte: Elaborado a partir dos catálogos dos fabricantes (Kolbach, Eberle e WEG).

Para facilitar a comparação do fator de potência entre os motores AR e Standard foi criado a figura 3.10 ao qual apresenta de forma gráfica a média do fator de potência dos três fabricantes citados anteriormente para os motores AR e Standard.

Figura 3.10 - Média do fator de potência dos motores TEFC - 4 pólos dos principais fabricantes nacionais.



Fonte: Elaborado a partir dos catálogos dos fabricantes (Kolbach, Eberle e WEG).

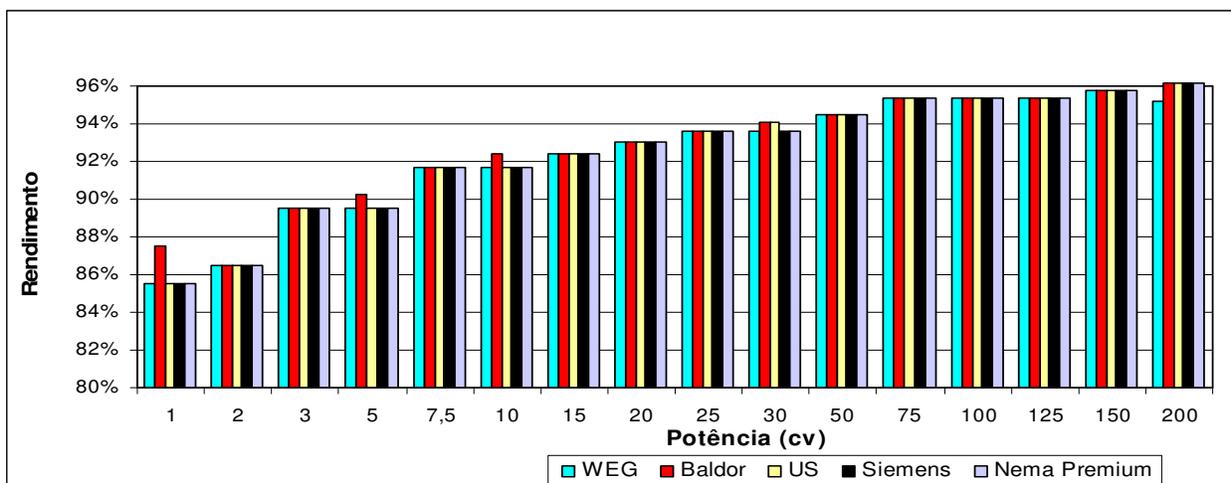
Neste gráfico observa-se uma predominância de menor de fator de potência para os motores AR em comparação com o motor Standard, o que acabou sendo de certa forma uma surpresa, pois se esperava que além de um melhor rendimento o motor AR fornecesse um melhor fator de potência. Com isto conclui-se que ao se substituir um motor Standard por um AR na maior parte dos casos haverá uma redução no fator de potência médio da instalação.

Conforme Kreutzfeld (1998 apud RAMOS, 2005), não existe vantagem nenhuma em adquirir um motor de Alto Rendimento e acoplá-lo a um equipamento ineficiente ou trabalhar sobredimensionado, provocando maiores gastos com energia, tendência esta muito comum, propositalmente ou por desconhecimento, sob a alegação de se manter uma potência reserva que poderia aumentar a confiabilidade do acionamento.

3.10 Comparativo de rendimento e fator de potência dos principais fabricantes americanos

Assim como os motores nacionais os motores americanos também apresentam variações de rendimento entre seus principais fabricantes, muito embora estas variações sejam apenas para algumas potências.

Figura 3.11 - Rendimento motor TEFC - 4 pólos - Premium Efficiency.



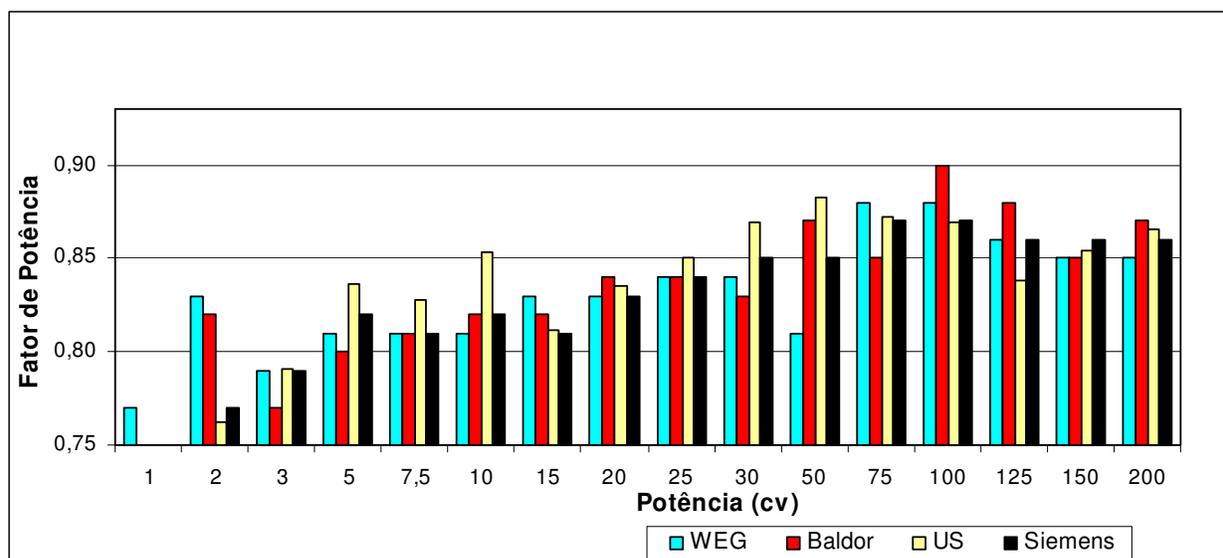
Fonte: Elaborado a partir dos dados extraídos dos catálogos dos fabricantes (WEG, Baldor, US Motor, Siemens) e NEMA, 2003.

A figura 3.11 apresenta os valores de rendimento para os motores elétricos dos principais fabricantes que atuam no mercado americano, sendo eles: WEG, US Motors, Baldor e Siemens.

As principais características destes motores são: 4 pólos, TEFC, 60 Hz.

A variação no fator de potência dos motores Premium Efficiency pode ser observada na figura 3.12 que evidencia variações de até 7% para algumas potências.

Figura 3.12 - Fator de potência motor TEFC - 4 pólos Premium Efficiency.



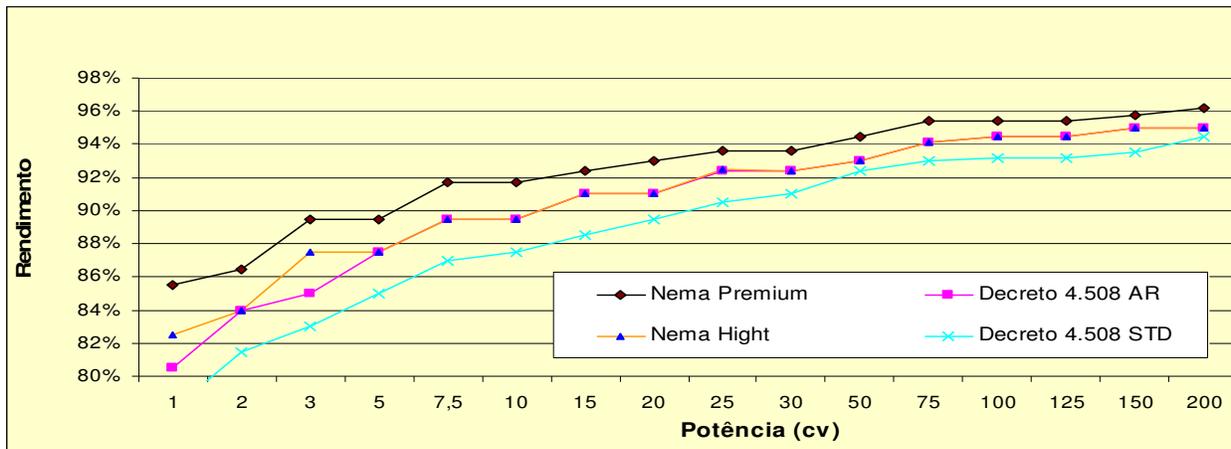
Fonte: Elaborado a partir dos dados extraídos dos catálogos dos fabricantes (WEG, Baldor, US Motor, Siemens).

3.11 Comparativo de rendimento da norma americana NEMA x Decreto 4.508

Para facilitar a comparação entre a norma americana NEMA que possui o motor High Efficiency e o Motor Premium Efficiency com o decreto 4.508 que possui os motores Standard e Alto Rendimento foi criada a figura 3.13 que apresenta estas 4 curvas de rendimento.

Na análise observa-se que o motor Standard brasileiro apresenta rendimento abaixo dos demais motores e que o motor Alto Rendimento produzido segundo as exigências do decreto 4.508 apresenta um rendimento muito semelhante ao motor NEMA High Efficiency. Também se destaca nesta figura os melhores valores de rendimento apresentados pelo motor Nema Premium.

Figura 3.13 - Comparação do rendimento dos motores TEFC - 4 pólos NEMA x Decreto 4.508.

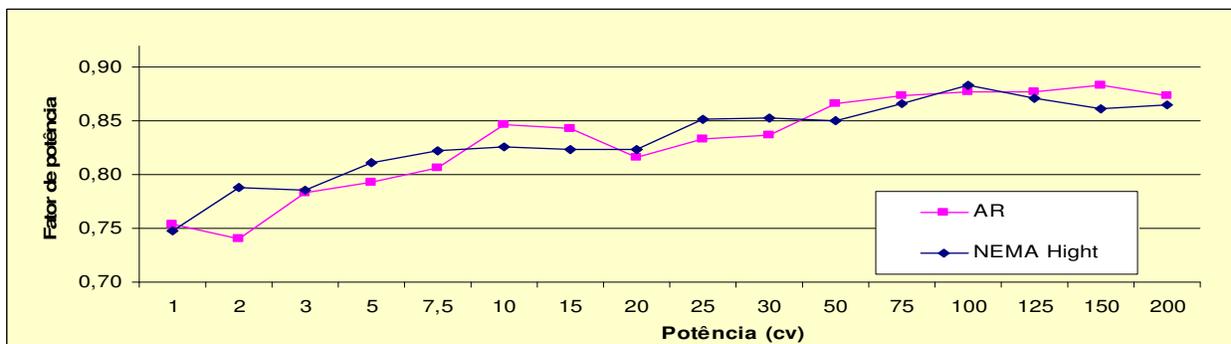


Fonte: Elaborado a partir dos dados extraídos da norma NEMA e Decreto 4.508 (Brasil, 2002).

Após a constatação da equivalência de rendimento do motor AR nacional com o Hight Efficiency americano foi elaborado a figura 3.14, ao qual utiliza a média do fator de potência dos principais fabricantes de motores nacionais (WEG, Eberle, Kolbach) e americanos (WEG, US Motors, Baldor, Siemens). É importante destacar que tanto a NEMA quanto o decreto 4.508 não disponibilizam o valor do fator de potência destes motores.

Na análise da figura 3.14 se constata que o fator de potência médio destes motores é semelhante.

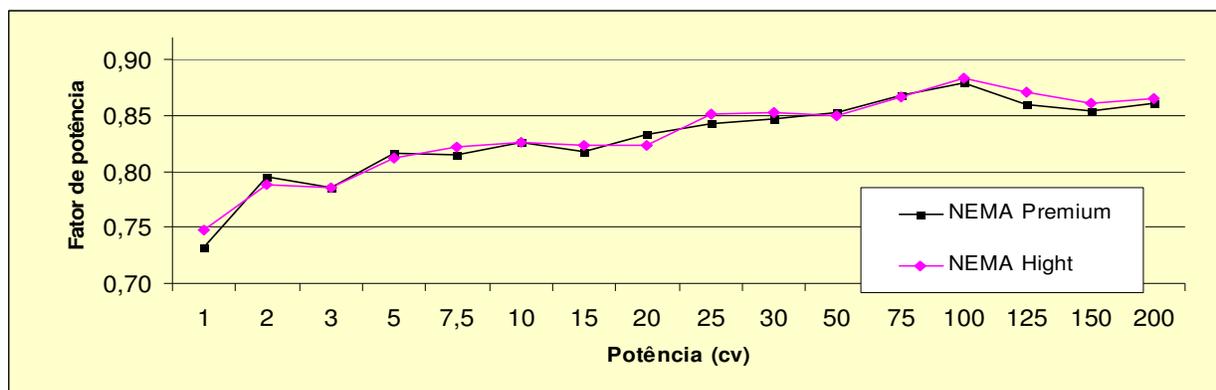
Figura 3.14 - Média do fator de potência dos motores TEFC 4 pólos dos principais fabricantes americanos x brasileiros.



Fonte: Elaborado a partir dos catálogos dos fabricantes (US Motor, WEG, Baldor, Siemens, Eberle e Kolbach).

Continuando as comparações de fator de potência entre os motores NEMA foi confeccionada a figura 3.15 onde se compara o fator de potência dos motores NEMA Premium com os motores High Efficiency e constata-se que o fator de potência praticamente não sofre alterações.

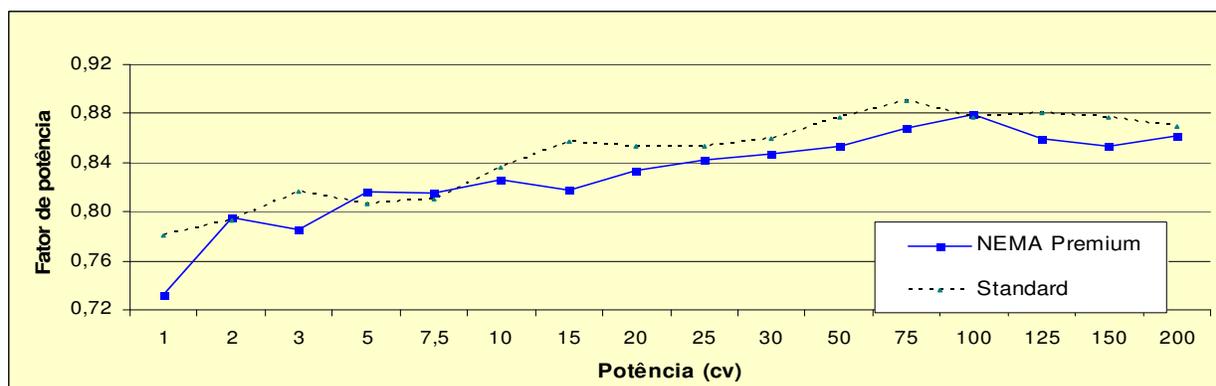
Figura 3.15 - Média do fator de potência dos motores TEFC - 4 pólos NEMA dos principais fabricantes americanos.



Fonte: Elaborado a partir dos catálogos dos fabricantes (US Motor, WEG, Baldor e Siemens).

Para concluir as comparações propostas, na figura 3.16 é feita uma última comparação do fator de potência entre os motores NEMA Premium e a média do fator de potência apurada nos motores nacionais Standard. Nesta figura observa-se que o fator de potência do motor Standard é ligeiramente maior que o NEMA Premium, diferente do que apresenta Capehart e Barney (1996).

Figura 3.16 - Média do fator de potência dos motores TEFC 4 pólos NEMA Premium x Standard dos principais fabricantes.



Fonte: Elaborado a partir dos catálogos (US Motor, WEG, Baldor, Siemens, Eberle e Kolbach.)

3.12 A energia reativa

Conforme Andrade (1993) a energia elétrica alternada, sob o ponto de vista conceitual, é formada pela composição de dois fasores que representam as grandezas elétricas fundamentais:

Energia ativa: nos processos produtivos que utilizam a energia elétrica, somente esta forma de energia é responsável pela transformação em energia mecânica, térmica e luminosa.

Energia reativa: é o componente responsável pela formação dos campos eletromagnéticos, necessários ao funcionamento de certos equipamentos como motores, transformadores, reatores, capacitores, lâmpadas fluorescentes, fornos de indução, etc. Esta componente não produz trabalho.

A energia elétrica reativa, portanto, é caracterizada como um mal necessário, pois determinados tipos de equipamentos elétricos requerem, para viabilizar a realização de trabalho, esta forma de energia.

Um motor elétrico, por exemplo, quando em operação sem carga, consome quase que exclusivamente energia reativa. Este consumo mantém-se praticamente constante nas diversas condições de carregamento do motor.

A composição vetorial dessas duas grandezas elétricas produz, como resultante, a energia elétrica aparente ou total, que é a responsável pelo dimensionamento dos sistemas elétricos trifásicos equilibrados.

A sua representação vetorial é dada por:

$$\overrightarrow{\text{Energia Aparente}} = \overrightarrow{\text{Energia Ativa}} + \overrightarrow{\text{Energia Reativa}}$$

ou

$$\overrightarrow{\text{Energia Total}} = \overrightarrow{\text{Trabalho}} + \overrightarrow{\text{Campo Eletromagnético}}$$

ou ainda, em unidades físicas de potência:

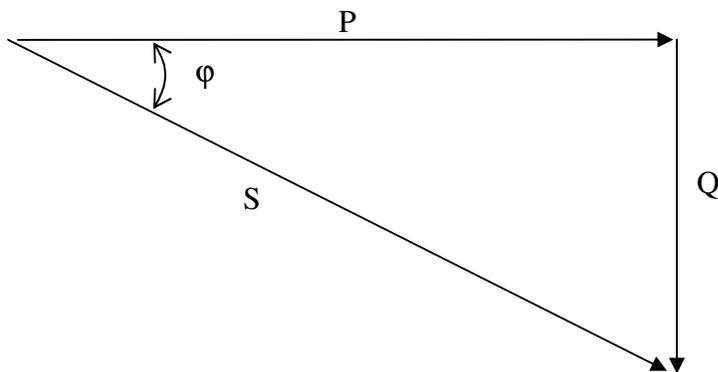
$$\overrightarrow{\text{Volt Ampère (VA)}} = \overrightarrow{\text{Watt (W)}} + \overrightarrow{\text{Volt Ampère reativo (VAr)}}$$

$$\overrightarrow{\text{Volt Ampère hora (VAh)}} = \overrightarrow{\text{Watt hora (Wh)}} + \overrightarrow{\text{Volt Ampère reativo hora (VARh)}}$$

Esta mesma relação pode ser obtida através da soma vetorial gráfica, ou triângulo de potência, entre as potências ativa e reativa, ver figura 3.17.

Do triângulo de potência observa-se que, mantendo constante o valor da potência ativa, isto é, para um determinado volume de trabalho requerido, quanto menor for a potência reativa, menor será a potência aparente solicitada pela unidade consumidora.

Figura 3.17 - Triângulo de potência.



Onde:

P = Potência ativa, em W

S = Potência aparente ou total em VA

Q = Potência reativa, em VAr

Sendo os valores ativos responsáveis pela realização do trabalho e os valores aparentes resultados do total de energia elétrica requisitada do gerador ou sistema de suprimento, conclui-se que a situação ideal é aquela em que a componente ativa é igual a componente aparente, ou seja, toda energia gerada e transmitida aquela unidade consumidora é convertida em trabalho, não havendo consumo de energia reativa.

Esta situação ideal, na prática, é impossível. Para medir o desempenho de uma instalação elétrica, em termos de energia reativa, utiliza-se a relação entre as componentes ativa e aparente, buscando-se conhecer a eficiência na utilização da energia posta à disposição deste consumidor, ou seja, que parcela da energia total está sendo transformada em trabalho. Tradicionalmente esta relação se denomina fator de potência:

Do triângulo de potência tem-se:

$\text{Fator de potência (FP)} = \frac{\text{Potência Ativa}}{\text{Potência aparente}} = \frac{\text{Watt}}{\text{Volt Ampère}} \quad \text{Equação 3.5}$
--

Segundo Andreas (1992) esta definição de fator de potência somente é válida quando a tensão e a corrente são senoidais e equilibradas. Quando a tensão e a corrente são não senoidais, o fator de potência é reduzido a uma resultante da tensão e correntes harmônicas do sistema.

Pode-se, então, afirmar que num circuito com tensão e correntes senoidais quanto mais próxima a potência ativa estiver da potência aparente, ou seja, mais próxima a relação P / S estiver da unidade maior será a eficiência do equipamento ou instalação elétrica, ou ainda, maior será a transformação de energia elétrica em trabalho Moulet e EDP (1989 apud ANDRADE, 1993).

Em função desta eficiência, os investimentos nos sistemas elétricos de produção e transporte serão maiores ou menores para atender os requisitos do mercado consumidor.

Anular potência reativa em um sistema elétrico é impossível na prática, dada a sua grande variação no tempo em função da variação do montante de máquinas e solicitações feitas ao sistema elétrico. Pode-se, entretanto, utilizar as características inversas dos capacitores e indutores (reatores), que, associados de forma conveniente, podem vir a reduzir as necessidades de potência reativa requisitadas pelos equipamentos ou sistemas elétricos consumidores (ANDRADE, 1980).

Ou ainda quando a fonte de consumo reativo forem cargas motoras superdimensionadas lançar mão da adequação de carga destes motores, para reduzir ao máximo o consumo de energia reativa do circuito ou instalação, sendo este o objeto de estudo deste trabalho.

3.12.1 A tarifação da energia reativa

A relação entre a energia produtiva (Wh) e a energia total disponibilizada por aquele equipamento ou indústria (Volt Ampère hora) identifica a eficiência produtiva do equipamento ou instalação analisada e é denominado de Fator de Potência (FP), é importante ressaltar que energia é a multiplicação da potência pelo tempo de utilização, logo também se pode obter.

$$FP = \frac{\text{Energia Ativa (Wh)}}{\text{Energia Total disponibilizada (VAh)}} = \frac{\text{Potência Ativa (W)}}{\text{Potência Aparente (VA)}}$$

Esta relação é controlada por regulação, Resolução 456/00 da ANEEL, e requer que a mesma se situe em valores superiores a 0,92, caracterizando uma eficiência produtiva da ordem de 92%.

A energia reativa pode ser: indutiva, cuja característica básica é a produção de energia magnética ou capacitiva, cuja característica é a produção de campo elétrico. A integração destes dois efeitos, indutivo e capacitivo, tende a prover compensações, isto é, o efeito capacitivo tende a fornecer a energia requerida pelo efeito indutivo sendo factível, inclusive, a completa integração, porém de forma teórica sendo condição praticamente impossível na prática.

Assim, a energia reativa requerida por um motor, por exemplo, pode ser suprida de duas formas: pela rede elétrica de fornecimento ou pela integração ao equipamento de um capacitor conveniente, ou melhor, adequado à condição operativa deste motor.

No primeiro caso a energia reativa fornecida pelo sistema elétrico deverá ser gerada nas linhas de transmissão, na usina hidroelétrica ou em capacitores instalados nas redes de transmissão, subtransmissão ou distribuição para o fornecimento da energia total (VAh) requerida pelo equipamento. Obviamente, a energia a ser transmitida por estes sistemas será a associação da energia ativa (Wh) e energia reativa (VARh – Volt Ampère reativo hora) que comporão a energia aparente (VAh), ou total, solicitada pela máquina. A transmissão de um montante de energia superior àquele requerido para a produção de trabalho, implicará na ampliação de cabos, transformadores, torres de transmissão, postes de distribuição e equipamentos de geração.

No caso do fornecimento de energia reativa requerida pela máquina ser efetivado pela instalação de capacitores no ponto de consumo, se evitará o transporte deste requisito por parte dos sistemas elétricos, viabilizando a redução de custos e otimizando a energia disponibilizada para produção.

Conforme Andrade (1993) a argumentação técnica para a adoção de uma tarifa de energia reativa tem como objetivo, a ampliação do atual montante de fornecimento de energia ativa para a produção de mais trabalho, além de otimizar o desempenho do sistema como um todo, tanto para o setor elétrico quanto para o próprio consumidor.

Deixar prevalecer o uso inadequado de energia reativa em detrimento da utilização de energia ativa é desperdiçar essa energia e imputar um grande prejuízo a toda sociedade (CARDEAL, 1992 apud ANDRADE, 1993).

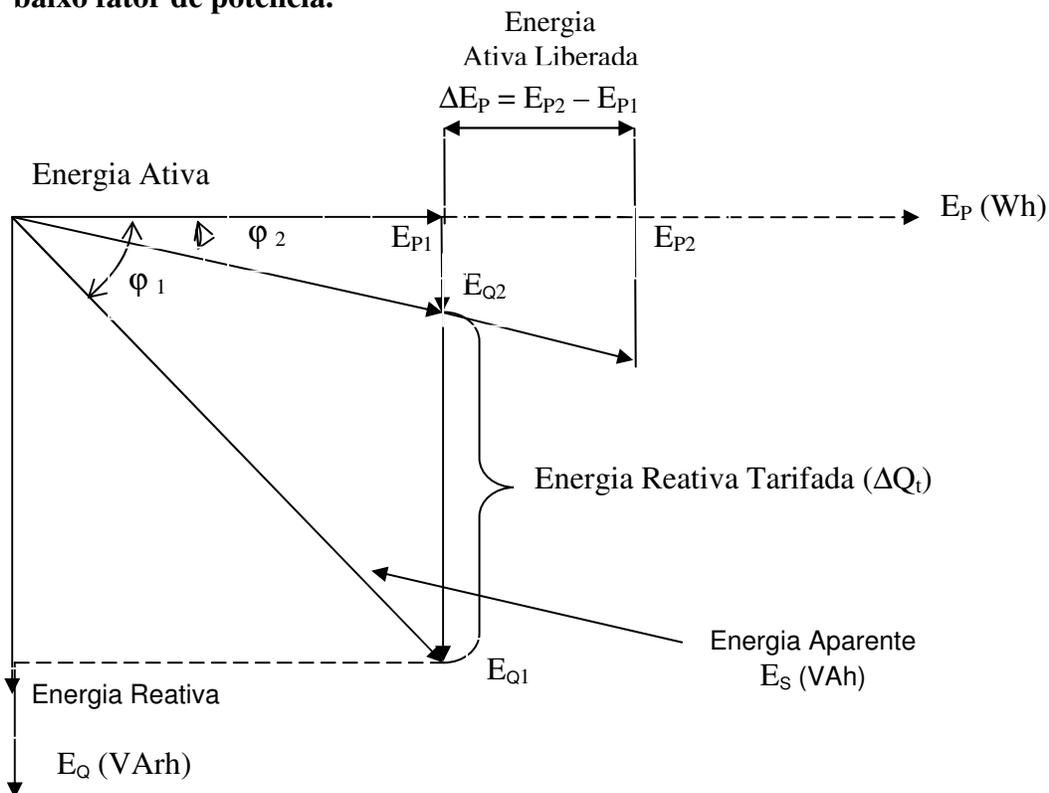
Com base nessa argumentação, entende-se que o valor de energia reativa utilizada além de limites pré-estabelecidos deve corresponder ao valor da energia ativa que se está desperdiçando.

O diagrama da figura 3.18 elucidada o exposto. Ressalta-se que a potência elétrica ativa desperdiçada pode, também, ser considerada como disponível, caso seja efetuada a compensação

reativa, ao se elevar o fator de potência verificado nas instalações consumidoras para o valor de referência.

Portanto, o montante de compensação reativa, (ΔQ_t) na figura 3.18, que eleva o fator de potência para o novo valor de referência, quando não instalado pelo consumidor, exigindo o suprimento desse montante pela concessionária, deve ser valorado pelo montante da energia ativa que se está desperdiçando, reprimindo a sua comercialização a outros consumidores.

Figura 3.18 - Diagrama de potência, identificando-se os desperdícios decorrentes de um baixo fator de potência.



Fonte: Andrade, 1993.

Onde:

$\cos \varphi_1$ = Fator de potência sem correção

$\cos \varphi_2$ = Fator de potência corrigido

ΔE_P = Energia ativa liberada

$E_{P2} = E_{P1} + \Delta E_P$ = Total de energia disponível após compensação.

Não é objetivo de uma concessionária fornecer e vender energia reativa, mas sim a energia ativa. A não correção do fator de potência das unidades consumidoras implica em se reprimir a oferta, pela concessionária, de energia ativa.

A energia ativa (ΔE_p) a ser liberada na instalação é igual a:

$\Delta E_p = E_S \times (1 - FP)$	Equação 3.6
------------------------------------	-------------

Onde:

E_S : Energia aparente (VAh);

FP: Fator de potência da instalação.

Considerando que, em virtude do reduzido peso da energia elétrica sobre o custo final dos produtos, na maior parte dos consumidores industriais, e da possível dificuldade de disponibilidade de recursos por parte de um consumidor ou setor industrial, pode haver interesses do consumidor em manter a condição de fator de potência existente, pelo menos temporariamente, não promovendo a instalação da compensação reativa exigida pela legislação.

Neste caso, o consumidor é responsável pelo próprio consumo de energia reativa, valorada em função da energia ativa reprimida, sendo ainda mantida uma parte subsidiada pela sociedade, que se refere ao valor da energia reativa requerida até o valor de referência do fator de potência atual, no caso 0,92. Para esta tarifação temos a seguinte equação.

A energia reativa tarifada (ΔQ_t) pelas concessionárias é igual a:

$\Delta Q_t = E_S \times (FPr - FP)$	Equação 3.7
--------------------------------------	-------------

Onde:

E_S : Energia aparente (VAh);

FPr: Fator de potência de referência (0,92); e FP: Fator de potência da instalação.

Para exemplificar o exposto anteriormente, a seguir é calculado o custo adicional com energia reativa de uma empresa alimentada em baixa tensão classificada como grupo B industrial, que possui um fator de potência ($\cos \phi$) médio de 0,55 e um consumo mensal de energia ativa de 10 MWh.

- Para o cálculo da energia reativa tarifada (ΔQ_t) é necessário calcular a energia aparente (E_s), conforme equação 3.5 tem-se:

$$\text{Fator de potência (FP)} = \frac{\text{Energia ativa (E}_p\text{)}}{\text{Energia aparente (E}_s\text{)}} \quad \rightarrow \quad 0,55 = \frac{10 \text{ MWh}}{E_s}$$

$$E_s = 18,18 \text{ MVAh}$$

Segundo a equação 3.7 a energia reativa tarifada pela concessionária é igual a:

$$\Delta Q_t = E_s \times (\text{FPr} - \text{FP})$$

$$\Delta Q_t = 18,18 \text{ MVAh} \times (0,92 - 0,55)$$

$$\Delta Q_t = 6,73 \text{ MWh}$$

Sabendo-se que o valor a ser pago pela energia reativa tarifada é o mesmo da energia ativa e considerando-se o custo do MWh de R\$ 249,76¹³ a seguir é calculado o custo adicional na conta de energia:

$$C_{\Delta Q_t} = \Delta Q_t \times \text{R\$ } 249,76 = 6,73 \text{ MWh} \times \text{R\$ } 249,76$$

$$C_{\Delta Q_t} = \text{R\$ } 1.680,88$$

O valor total da conta de energia (C_t) será a soma do custo com a energia ativa (C_{E_p}) com o custo da energia reativa faturada ($C_{\Delta P_t}$):

$$C_t = C_{E_p} + C_{\Delta P_t} = (10 \times \text{R\$ } 249,76) + \text{R\$ } 1.680,88$$

$$C_t = \text{R\$ } 4.178,48$$

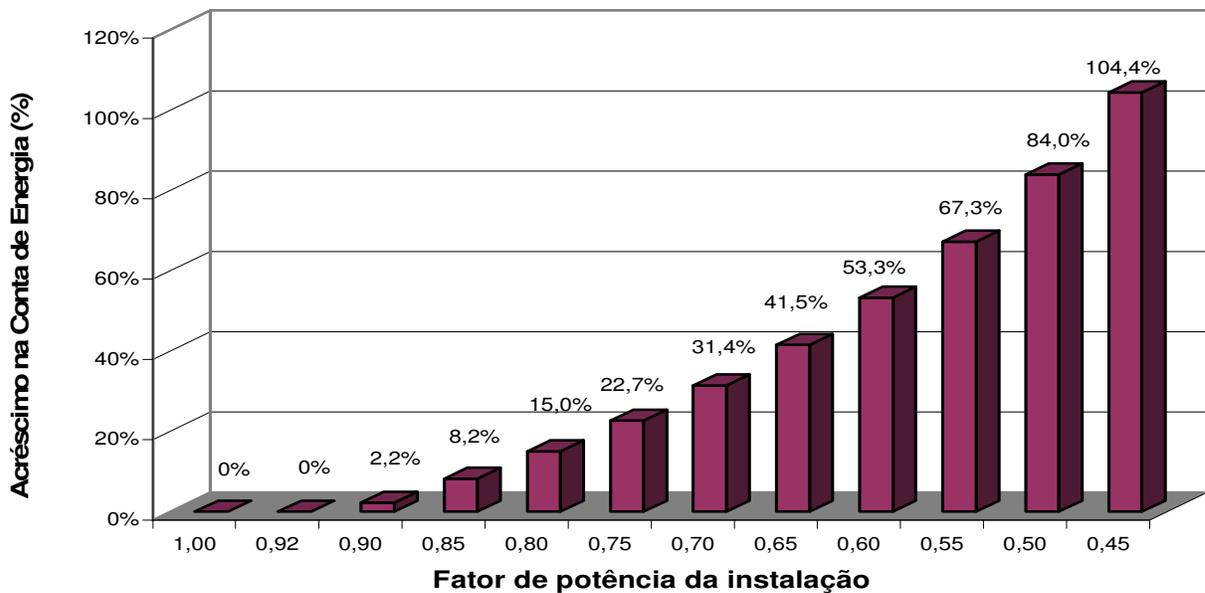
Observa-se que neste exemplo a unidade consumidora teve um aumento de 67,3% na sua fatura de energia por não ter a correção do fator de potência até o valor de referência (0,92).

Com base na equação 3.7, utilizando-se fator de potência de 0,45 a 1,0 foi elaborada a figura 3.19, que apresenta os valores percentuais a serem acrescentados a conta de energia, caso a

¹³ Custo da Concessionária CPFL Paulista para Grupo B - Industrial conforma anexo V, sem os impostos (PIS, Cofins e ICMS).

empresa que possua medição de fator de potência por parte da concessionária¹⁴, opte por não fazer a correção. Os valores apresentados referem-se as empresas classificadas como grupo A (média tensão) ou grupo B (baixa tensão).

Figura 3.19 – Acréscimo na conta de energia em instalações com baixo fator de potência.



3.13 Correção do fator de potência

Como visto na figura 3.19 a energia reativa pode ser responsável por acréscimos superiores a 100% na fatura de energia, logo se faz necessário fazer sua compensação, esta compensação da energia reativa, também conhecida como correção do fator de potência, pode ser feita através de 3 maneiras distintas:

- a) Instalação de motores síncronos (não muito usual por possuir altos custos);
- b) Adequação dos motores existentes na instalação a carga mecânica solicitada (conforme este trabalho apresenta faz-se necessário um estudo detalhado da carga mecânica solicitada nos motores e apresenta um custo inicial que pode ser alto se a quantidade de motores for grande, além de necessitar de mão de obra qualificada);

¹⁴ Existem empresas classificadas como grupo B (baixa tensão) que não possuem medição de energia reativa, embora gradativamente esteja sendo instalado medições de energia reativa nos consumidores grupo B com classificação comercial e industrial.

c) Instalação de capacitores (esta forma é mais usual por apresentar um custo menor que as alternativas anteriores, embora nem sempre seja a mais indicada).

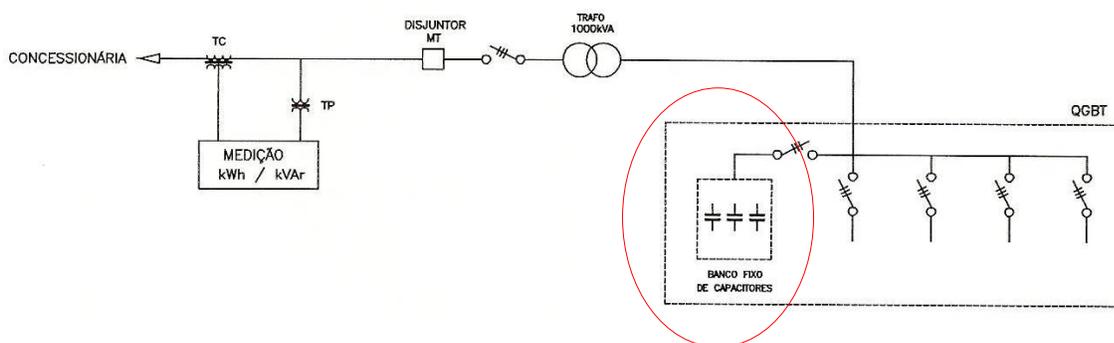
A correção do fator de potência em baixa tensão através da instalação de capacitores possui 5 principais formas de instalação, cada uma destas apresentam uma relação custo/benefício que podem ser aplicadas em determinadas situações:

- a) Correção do FP com banco fixo de capacitores;
- b) Correção do FP com banco automático de capacitores;
- c) Correção do FP por grupos de cargas;
- d) Correção do FP de forma localizada;
- e) Correção do FP de forma Mista.

a) Correção do FP com banco fixo de capacitores:

Este tipo de correção consiste na instalação de um banco de capacitores ao lado ou juntamente com o painel geral de entrada, figura 3.20, é recomendada apenas em instalações elétricas com elevado número de cargas com potências pequenas (<10cv) e elevado fator de carga.

Figura 3.20 - Diagrama unifilar da correção do FP com banco fixo de capacitores.



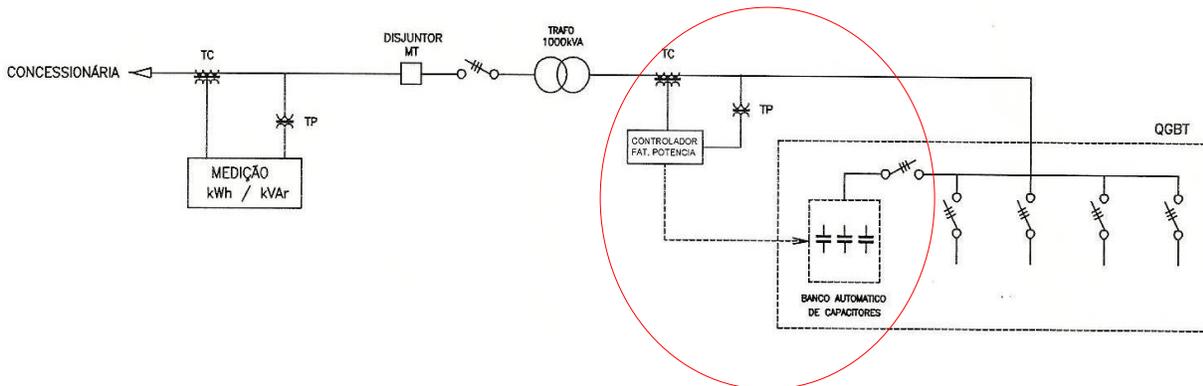
Esta forma de correção é interessante do ponto de vista econômico, mas não do ponto de vista técnico, embora em algumas aplicações apresente resultados razoáveis como, por exemplo, em uma empresa que trabalhe ininterruptamente e com carga fixa durante todo o período (se pode citar as tecelagens que normalmente trabalham com fator de carga de 90%). Permite uma

correção confiável e com baixo custo inicial (aproximadamente R\$ 44,00/ kVAr, conforme anexo VI), a principal desvantagem consiste em não haver alívio na corrente elétrica dos circuitos alimentadores de cada equipamento.

b) Correção do FP com banco automático de capacitores:

Este tipo de correção, conforme visualizado na figura 3.21, consiste na instalação de um banco automático de capacitores ao lado ou juntamente com o painel geral de entrada, é recomendado para instalações elétricas com elevado número de cargas com potências pequenas (<10cv) e regime de utilização pouco uniforme.

Figura 3.21 - Diagrama unifilar da correção do FP com banco automático de capacitores.



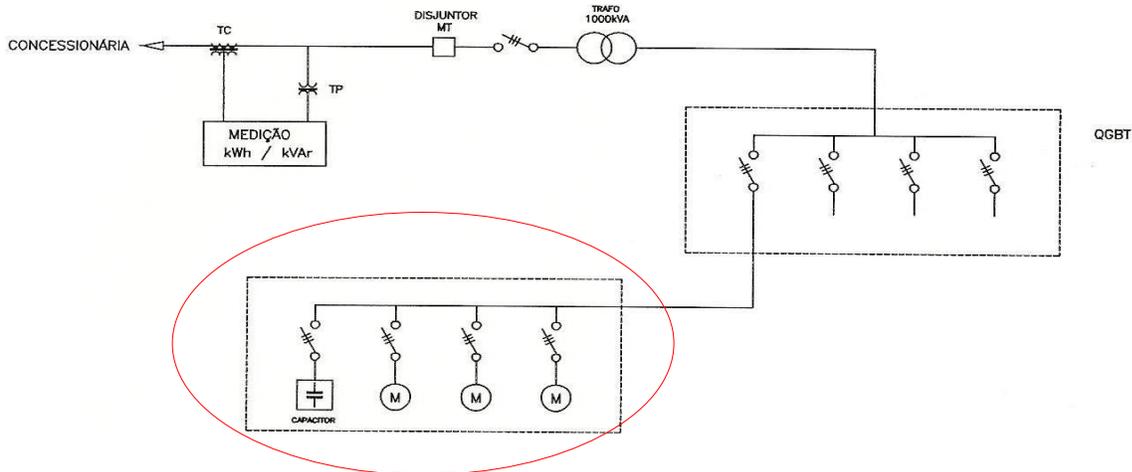
Caso ocorra a queima de capacitores ou a falha de algum componente do sistema que não permita a manutenção na faixa de correção desejada o equipamento pode emitir um alarme de mau funcionamento informando a equipe de manutenção para a devida correção evitando o pagamento de multas adicionais.

Esta forma de correção embora seja mais onerosa inicialmente (em média R\$ 89,00/ kVAr, conforme anexo VII), também é interessante do ponto de vista econômico, mas do ponto de vista técnico não é considerada ideal, pois também possui a desvantagem em não aliviar a instalação interna, mantendo-se as perdas nos circuitos alimentadores.

c) Correção do FP por grupos de cargas:

Nesta forma de correção os capacitores são instalados de forma a corrigir um setor ou um conjunto de pequenas máquinas (<10cv), ou ainda uma única máquina com diversos motores, figura 3.22.

Figura 3.22 – Diagrama unifilar da correção do FP por grupos de cargas.



É uma aplicação que requer um estudo detalhado dos pontos de correção e de como será controlada esta correção, seu custo é de aproximadamente R\$ 53,00/ kVAr, conforme anexo VIII.

Possui a vantagem de reduzir as perdas do circuito alimentador da máquina, mas mantém as perdas do ponto de correção até os motores. É normalmente instalado junto ao quadro de distribuição que alimenta estes equipamentos. Tem como desvantagem não diminuir a corrente nos circuitos de alimentação de cada equipamento.

d) Correção do FP de forma localizada:

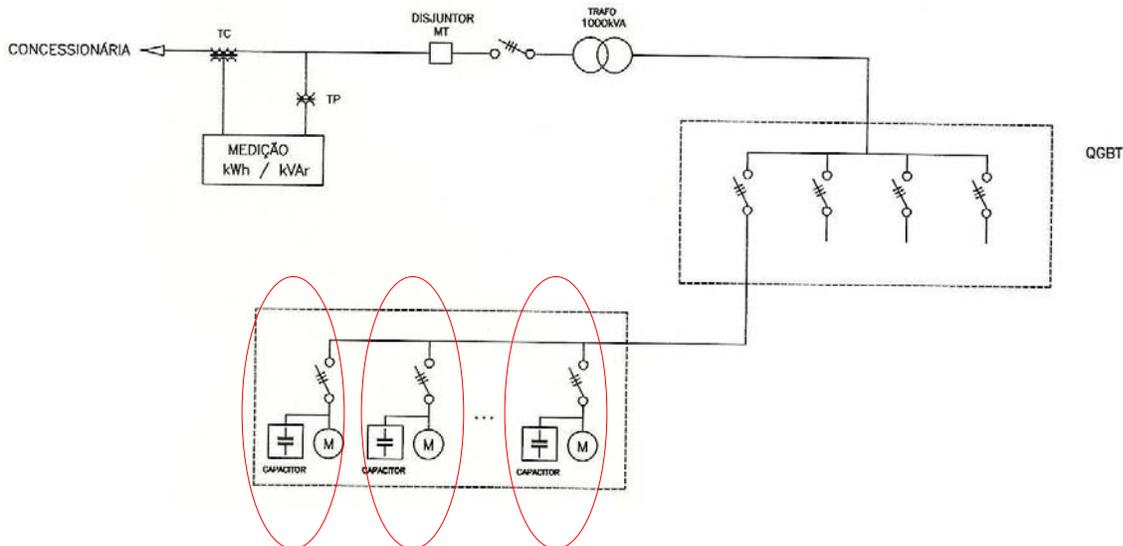
A correção localizada do ponto de vista técnico é considerada a forma ideal de correção, pois conforme exposto na figura 3.23, os capacitores são instalados junto aos equipamentos que se pretende corrigir o baixo fator de potência, esta forma de correção apresenta as seguintes vantagens:

- Redução das perdas energéticas em toda a instalação;
- Diminuição da carga nos circuitos de alimentação dos equipamentos;

- Fornecimento da potência reativa somente onde é necessário;
- Utilização opcional de um sistema único de acionamento para a carga e o capacitor, economizando-se um equipamento de manobra.

Este tipo de correção possui a desvantagem de possuir um custo elevado (R\$ 77,00/kVAR, conforme anexo IX), principalmente em empresas que possuem muitos motores menores que 10 cv (a escala comercial de capacitores inicia em 0,3 kVAR com custos superiores aos capacitores de maior potência).

Figura 3.23 - Diagrama unifilar da correção do FP de forma localizada.



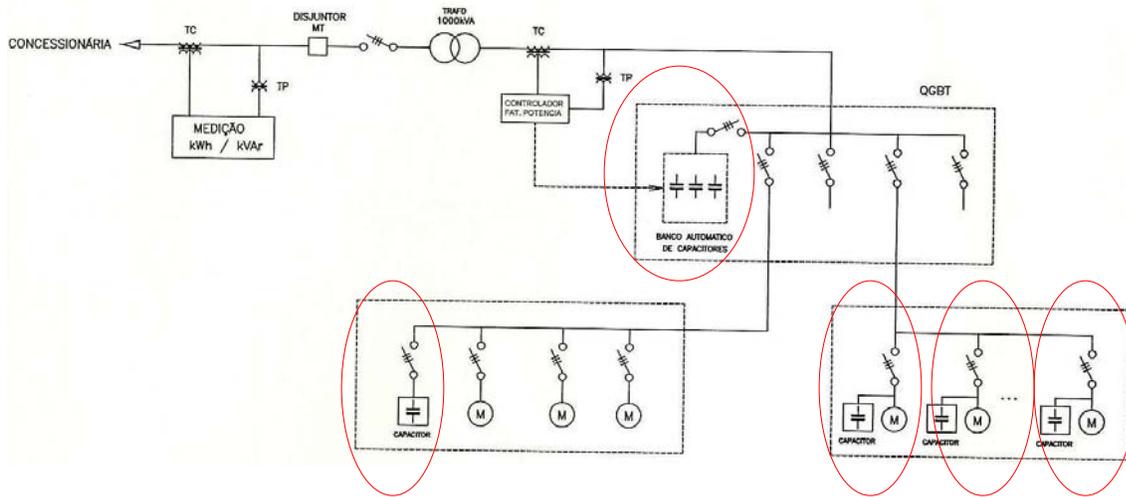
e) Correção do FP de forma mista:

Conforme WEG (2005) do ponto de vista "Conservação de Energia", considerando aspectos técnicos, práticos e financeiros, a aplicação da correção mista torna-se a melhor solução a ser empregada, conforme demonstrado na figura 3.24, esta configuração é uma composição das formas anteriores de correção, sendo composta de:

- Um capacitor fixo diretamente no secundário do transformador;
- Capacitores instalados junto a grupo de motores com menos de 10 cv;
- Um banco automático de pequena potência na entrada para um melhor ajuste do fator de potência total a ser medido pela concessionária de energia;

- Correção local para motores maiores que 10 cv (cuidado com motores de alta inércia, pois não se deve dispensar o uso de contatores para manobra dos capacitores sempre que a corrente nominal dos mesmos for superior a 90% da corrente de excitação do motor).

Figura 3.24 – Diagrama unifilar da correção do FP de forma mista.



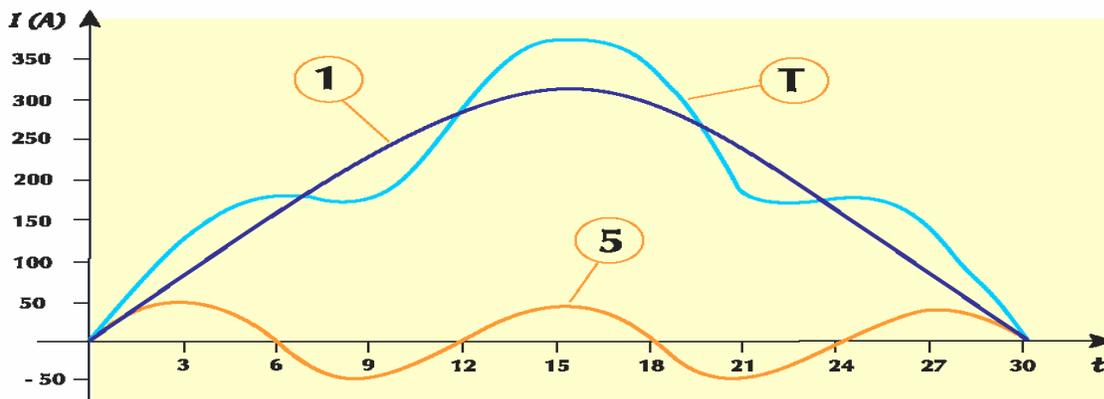
Esta forma de correção é a que apresenta o maior custo inicial na ordem de R\$ 98,00/kVAr, conforme anexo X.

Para que a correção do fator de potência apresente um resultado satisfatório deve-se elaborar um projeto de correção do fator de potência, ao qual devem ser levados em consideração todos os fatores citados anteriormente e ainda particularidades da empresa ou da rede elétrica que a alimenta. Uma informação importante a ser considerada é o nível de Distorção Harmônica presente na instalação onde será realizada a correção do fator de potência, este assunto será mais bem esclarecido no próximo tópico.

3.14 Distorções harmônicas

Conforme Moreno (2001) uma tensão ou corrente harmônica pode ser definida como um sinal senoidal cuja frequência é múltiplo inteiro da frequência fundamental do sinal de alimentação.

Figura 3.25 - Onda deformada e suas componentes harmônicas.



Fonte: Moreno 2.001.

A forma de onda de tensão ou de corrente em um dado ponto de uma instalação pode ter o aspecto do sinal T que está mostrado na figura 3.25 (onda deformada).

Observando essa situação, vemos que o sinal T é a soma ponto a ponto dos sinais 1 e 5 formados por senóides perfeitas de amplitudes e freqüências diferentes, chamadas de harmônicas. Com isso, é possível construir o sinal T a partir dos valores dos sinais 1 e 5 indicados na tabela 3.2.

Tabela 3.2 – Valores para os sinais 1, 5 e T da figura 3.25

T	Sinal 1 (A)	Sinal 5 (A)	Sinal T (A) (sinal 1 + sinal 5)
3	90	50	140
6	190	0	190
9	230	-50	180
12	300	0	300
15	310	50	360
18	300	0	300
21	230	-50	180
24	190	0	190
27	90	50	140
30	0	0	0

Fonte: Moreno, 2001.

Dessa forma pode-se dizer que um sinal contém harmônicas quando ele é deformado em relação a um sinal senoidal.

Os sinais harmônicos característicos são classificados quanto a sua ordem, frequência e seqüência, conforme indicado na tabela 3.3.

Tabela 3.3 – Ordem, frequência e seqüência das harmônicas características.

Ordem	Frequência (Hz)	Seqüência
1	60	+
2	120	-
3	180	0
4	240	+
5	300	-
6	360	0
n	n*60	

Fonte: Moreno, 2001.

Equipamentos elétricos produtores de harmônicas

Dias (1998) cita que uma carga produtora de harmônicas pode afetar outras cargas se uma distorção significativa é produzida. Alguns efeitos das distorções harmônicas são:

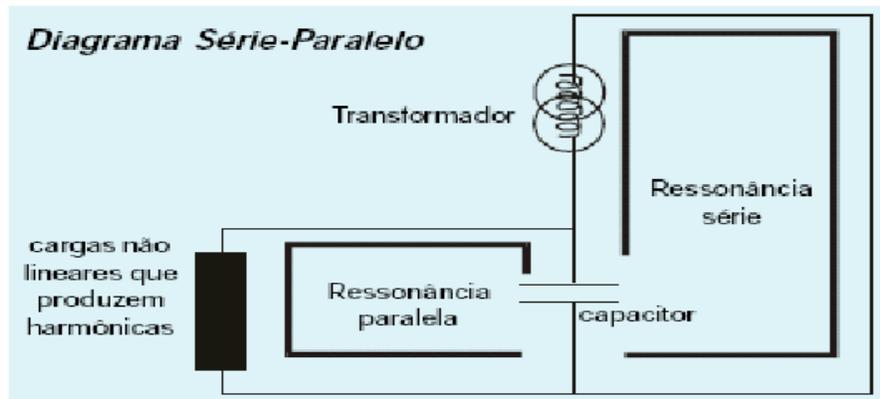
- a) Interferência em sistemas de controle computadorizados;
- b) Aquecimento de motores elétricos;
- c) Interferências em redes telefônicas;
- d) Perdas adicionais em linhas e transformadores;
- e) Erros em medidores de energia;
- f) Sobreaquecimento ou falhas de bancos de capacitores.

3.15 O efeito das harmônicas na correção do fator de potência

Segundo (KUSCO e MEDORA, 1995) quando uma planta possuir problemas de baixo fator de potência e altos níveis de distorção harmônica a primeira recomendação é a não instalação de capacitores para correção do fator de potência, pois isto normalmente agrava os problemas harmônicos. A segunda e mais preferível solução é a instalação de um reator em série com o banco de capacitores (também conhecida como filtragem desintonizada).

Conforme TLA (2008) quando se tem harmônicas presentes na rede elétrica acima dos valores preestabelecidos por normas, corre-se o risco que ocorra ressonância série entre o transformador e o banco de capacitores ou ressonância paralela entre os mesmos e as cargas (motores, etc.) figura 3.26. Nesta situação, usam-se indutores anti-harmônicas em série com os capacitores, os quais evitam a ressonância do(s) capacitor(es) em todo o espectro de harmônicas que possa ser gerado.

Figura 3.26 – Diagrama unifilar representando as ressonâncias: série e paralelo.



Fonte: TLA (2008).

Ressonância série: é a condição na qual as reatâncias capacitiva e indutiva de um circuito RLC são iguais. Quando isso ocorre, as reatâncias se cancelam entre si e a impedância do circuito se torna igual à resistência, a qual é um valor muito pequeno.

Conforme Epcos (2004) devido a esta condição de ressonância uma alta corrente fluirá pelos ramos do circuito (L: transformador e C: banco de capacitores), sobrecarregando-os, elevando a tensão sobre estes e sobre todo o sistema elétrico que está conectado em paralelo.

A ressonância série, ocorre entre o transformador de força e os capacitores ou ligados num mesmo barramento.

Ressonância paralela: baseia-se na troca de energia entre um indutor e um capacitor ligados em paralelo com uma fonte de tensão. Na condição ressonância paralela a corrente de linha é nula porque a soma vetorial das correntes no circuito é zero (TLA, 2008).

O fenômeno da ressonância série ou paralela também pode ocorrer em instalações livres de harmônicas e com fator de potência unitário.

Conforme Epcos (2004) a filtragem desintonizada para PFC (correção do fator de potência) é uma técnica usada para evitar o risco da condição de ressonância.

Esta é feita pelo deslocamento da frequência de ressonância a valores menores onde correntes harmônicas não estão presentes. Isso é alcançado através da modificação do circuito LC básico composto pelo transformador e banco de capacitores, introduzindo um filtro (reator) em série com os capacitores. Assim se faz um filtro ressonante mais complexo, mas com a característica desejada de ter uma frequência ressonante abaixo da primeira harmônica existente.

Dessa maneira é evitada uma condição de ressonância.

Como se pode observar a inserção de capacitores no circuito para correção do fator de potência pode ocasionar maiores problemas na instalação existente.

Com isso observa-se que a adequação de potência do motor a carga traz um benefício indireto a instalação, pois com a melhoria no fator de potência devido a adequação do motor a carga reduz-se a necessidade da instalação de capacitores para correção do fator de potência diminuindo-se o risco de ressonância entre estes e o transformador.

Capítulo 4

Características Predominantes na Avaliação da Adequação dos Motores

Como visto nos capítulos anteriores os motores elétricos são mais eficientes quando estão trabalhando próximos de sua potência nominal, portanto é importante identificar quais motores estão superdimensionados para que se faça uma proposta de adequação de carga deste motor.

Neste capítulo serão apresentados os cuidados a serem tomados antes da decisão de substituição de um motor elétrico, pois há que se avaliar o ambiente de trabalho do motor, as características mecânicas da carga, as características elétricas e construtivas do motor, as características da rede elétrica e o custo médio da energia elétrica da empresa que pretende fazer a adequação.

4.1 A adequação de motores elétricos a carga acionada

A adequação é a substituição de um motor elétrico, danificado ou não, por outro motor de potência diferente que, normalmente, será de potência inferior ao anterior, visando a economia de energia e a melhoria das grandezas elétricas, tais como: corrente, fator de potência, energia reativa, potência ativa e energia consumida.

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.

4.2 Ambiente de trabalho do motor

Estas características estão relacionadas diretamente com o ambiente onde está instalado o motor elétrico e devem ter uma atenção muito especial, pois a não observação destes pode trazer conseqüências indesejáveis, tais como: redução de vida útil ou até mesmo a queima do motor elétrico.

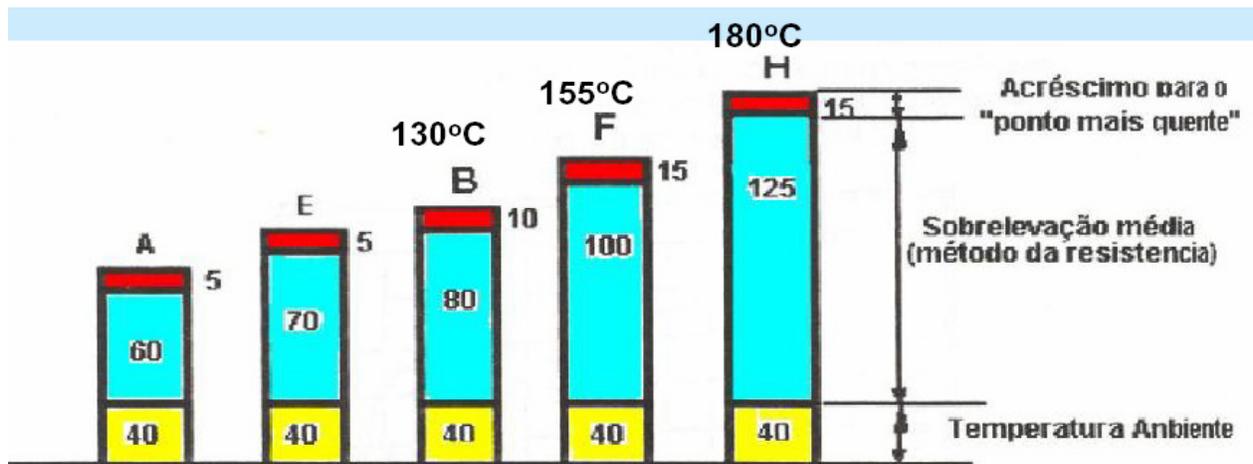
4.2.1 Temperatura

Segundo WEG (2005) para garantir o bom funcionamento do motor, deve-se verificar a sua elevação de temperatura durante todo o regime de operação através de uma análise térmica.

Um fator importante é a temperatura do ambiente. Os motores possuem potência nominal referida a temperatura ambiente de 40°C. Caso a temperatura ambiente seja superior, deverão ser aplicados fatores de correção na potência disponível, ou a escolha por uma classe de isolamento adequada.

As características que definem as classes de isolamento utilizadas em máquinas elétricas e os respectivos limites de temperatura são definidas pela NBR-7034 que é apresentada na figura 4.1.

Figura 4.1 - Classe de isolamento e temperatura de operação.



Fonte: Siemens Mundo em Movimento, 2005.

O calor gerado pelas perdas no interior do motor é dissipado para o ambiente através da superfície externa da carcaça. Em motores fechados essa dissipação é normalmente auxiliada pelo ventilador montado no próprio eixo do motor. Uma boa dissipação depende da:

- Eficiência do sistema de ventilação;
- Área total de dissipação da carcaça;
- Diferença de temperatura entre a superfície externa da carcaça e do ar ambiente.

4.2.2 Altitude da instalação

Conforme WEG (2005) motores funcionando em altitudes acima de 1.000 m apresentam problemas de aquecimento causado pela rarefação do ar e, conseqüentemente, diminuição do seu poder de arrefecimento¹⁵.

A insuficiente troca de calor entre o motor e o ar circundante, leva à exigência de redução de perdas, o que significa, também, redução de potência.

Os motores têm aquecimento diretamente proporcional às perdas e estas variam, aproximadamente, numa razão quadrática com a potência, existem ainda três soluções possíveis:

- A instalação de um motor em altitudes acima de 1.000 metros pode ser feita usando-se material isolante de classe superior.
- Motores com fator de serviço maior que 1,0 (1,15 ou maior) trabalharão satisfatoriamente em altitudes acima de 1.000 m com temperatura ambiente de 40°C desde que seja requerida pela carga, somente a potência nominal do motor.
- Segundo a norma NBR-7094, a redução necessária na temperatura ambiente deve ser de 1% dos limites de elevação de temperatura para cada 100 m de altitude acima de 1.000 m. Esta regra é válida para altitudes até 4.000 m.

¹⁵ Arrefecimento: esfriamento.

4.2.3 Ambiente variado e grau de proteção (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. Por exemplo, um equipamento a ser instalado num local sujeito a jatos d'água, deve possuir um invólucro capaz de suportar tais jatos, sob determinados valores de pressão e ângulo de incidência, sem que haja penetração de água.

A norma NBR-9884 define os graus de proteção dos equipamentos elétricos por meio das letras características IP, seguidas por dois algarismos. O anexo I apresenta a designação utilizada.

Existem ambientes que são agressivos aos componentes do motor elétrico, tais como instalações portuárias, indústrias químicas, petroquímicas, etc. Nestes casos, os motores devem ser adequados às condições destas instalações (motores especiais).

Os motores instalados em área aberta devem ser a prova de intempéries, conhecidos comumente como motor de uso naval.

Em ambientes explosivos, normalmente por conterem gases, vapores, poeiras ou fibras inflamáveis ou explosivas, também se faz necessário prover a adequada proteção destes equipamentos, visando garantir segurança operativa, a manutenção do patrimônio e a preservação da vida humana.

Nestes ambientes devem ser utilizados os motores que possuem invólucros à prova de explosão, não permitindo que uma eventual explosão interna se propague ao ambiente externo.

4.3 Características mecânicas da carga

Para o estudo de viabilidade técnica de substituição de motores elétricos para fins de conservação de energia, é de fundamental importância o conhecimento das características das cargas mecânicas, como as condições de partida, ou seja: o novo motor é capaz de atender o torque de partida; manter o tempo de aceleração e o ciclo de operação?

4.3.1 Tipos de cargas mecânicas

Em um ambiente industrial existem praticamente quatro tipos de cargas mecânicas, como apresentadas nas figuras 4.2a, b, c, d.

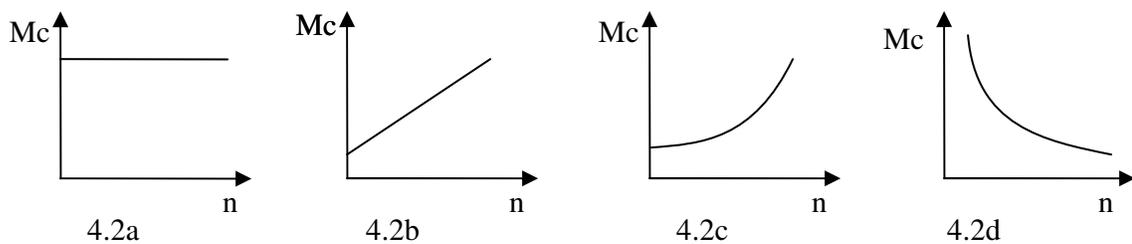
4.2a Cargas do tipo conjugado constante, dentre as quais se podem citar: pontes rolantes, esteiras, guinchos, elevadores e semelhantes.

4.2b Cargas de variação linear, tais como: moinhos de rolo, bombas de pistão, plainas e serras.

4.2c Cargas de variação quadrática, dentro desta classificação se encontram os ventiladores, misturadores, centrífugas, bombas centrífugas, exaustores e compressores.

4.2d Cargas de variação inversa com a rotação, tais como: máquinas operatrizes, frezadoras, mandrilhadoras e bobinadeiras.

Figura 4.2 - Tipos de cargas mecânicas.



Fonte: Eletrobrás, 2001.

4.3.2 Conjugado x Categoria

Segundo WEG (2005) conforme as suas características de conjugado em relação à velocidade e a corrente de partida, os motores de indução trifásicos com rotor de gaiola, são classificados em categorias, cada uma adequada a um tipo de carga. Estas categorias são definidas em norma (NBR-7094), e suas especificações encontram-se disponíveis no anexo II.

4.3.3 Inércia da carga

O momento de inércia da carga acionada é uma das características fundamentais para verificar, através do tempo de aceleração, se o motor consegue acionar a carga dentro das condições exigidas pelo ambiente ou pela estabilidade térmica do material isolante.

Momento de inércia é uma medida da resistência que um corpo oferece a uma mudança em seu movimento de rotação em torno de um dado eixo. A unidade do momento de inércia é kgm^2 .

O momento de inércia total do sistema é a soma dos momentos de inércia da carga e do motor.

4.3.4 Regime de partida

Devido ao valor elevado da corrente de partida dos motores de indução, o tempo gasto na aceleração de carga com inércia apreciável, resulta na elevação da temperatura do motor. Se o intervalo entre partidas sucessivas for muito reduzido, redundará em excessiva elevação de temperatura nos enrolamentos, danificando-os ou reduzindo a sua vida útil. Logo, não se pode desconsiderar esta informação na análise da substituição do motor existente.

4.3.5 Regime de serviço

Muitas vezes, em lugar de um funcionamento contínuo, o motor elétrico, é solicitado em diferentes condições (potências), durante diferentes intervalos de tempo.

Segundo Lobosco (1988) a NBR-5457 define os regimes tipo, e a ABNT NBR-7094 apresenta o comportamento da carga solicitada, das perdas elétricas e da temperatura da máquina quando esta é um motor de indução. A IEC Publ. 34-1 é cônica¹⁶ e essa última especificação brasileira.

O parâmetro de diferenciação dos regimes ali descritos é a variação da carga com o tempo; paradas e frenagens elétricas também constituem um parâmetro de classificação desses regimes,

¹⁶ Cônica: coerente.

mas reversões não são consideradas. Regimes reais são usualmente mais irregulares que os regimes-tipo, porém, quando testando e estabelecendo o desempenho de um motor ou procedendo a sua seleção, o regime-tipo a ser considerado é aquele que mais se aproxima do regime real do ponto de solicitação térmica.

As diferentes condições operativas dos motores e suas implicações em termos de temperatura estão dispostas no anexo III.

4.4 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, dentre elas tem-se:

4.4.1 Fator de serviço (FS)

É um número que pode ser multiplicado pela potência nominal do motor, a fim de se obter a carga permissível que o mesmo pode acionar, em regime contínuo, dentro de condições estabelecidas por norma.

O fator de serviço não está ligado a capacidade de sobrecarga própria dos motores, valor, em geral situado entre 140% a 160% da carga nominal durante períodos curtos. Na realidade o fator de serviço representa uma potência adicional contínua (MAMEDE FILHO, 1997).

4.4.2 Frequência nominal do motor

É a frequência para qual o motor foi dimensionado. Embora no Brasil a frequência seja padronizada na frequência 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 geral (corrente, potência, velocidade, torque, etc.).

4.4.3 Número de pólos do motor

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

4.4.4 Número de pontas do motor

O motor elétrico pode ter 3, 6, 9 ou 12 pontas, quanto maior a quantidade de pontas existentes no motor, maior a possibilidade de ligações em tensões diferentes, por exemplo, um motor 12 pontas pode ser ligado em 4 tensões diferentes de acordo com a combinação de ligação de suas pontas, enquanto que um motor de 3 pontas somente permite a ligação a uma única tensão de alimentação.

4.4.5 Tensão nominal do motor

É importante saber a tensão nominal do motor, pois um motor com 6 pontas e tensão nominal 380 V, permite uma segunda opção em 660 V enquanto que um motor com 6 pontas e tensão nominal 220 V permite ligação nas tensões 220 V e 380 V, não operando, portanto na tensão de 660 V.

4.5 Características construtivas do motor

Os motores elétricos possuem suas dimensões padronizadas conforme a NBR-5432, que acompanha a norma IEC-60072. 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.

4.6 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. Os dados de influência da variação de tensão nos motores podem ser visualizados no anexo IV.

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 (ELETROBRÁS, 2001).

4.7 Custo médio da energia elétrica

Para se conhecer o custo médio da energia elétrica é importante saber a concessionária de energia que atende a empresa, seu horário de trabalho, seu fator de carga e a tarifa que se encontra enquadrada a empresa.

Conforme ANEEL (2000) a estrutura tarifária atual classifica os consumidores de energia em 2 classes de fornecimento conhecidas como - Grupo “A” e Grupo “B”.

4.7.1 Grupo “A”

São as unidades consumidoras com fornecimento em tensão igual ou superior a 2,3 kV, ou, ainda, atendidas em tensão inferior a 2,3 kV a partir de sistema subterrâneo de distribuição e faturadas neste Grupo nos termos definidos no art. 82, caracterizado pela estruturação tarifária binômia¹⁷ e subdividido nos seguintes subgrupos:

- a) Subgrupo A1 - tensão de fornecimento igual ou superior a 230 kV;
- b) Subgrupo A2 - tensão de fornecimento de 88 kV a 138 kV;
- c) Subgrupo A3 - tensão de fornecimento de 69 kV;
- d) Subgrupo A3a - tensão de fornecimento de 30 kV a 44 kV;
- e) Subgrupo A4 - tensão de fornecimento de 2,3 kV a 25 kV;
- f) Subgrupo AS - tensão de fornecimento inferior a 2,3 kV, atendidas a partir de sistema subterrâneo de distribuição e faturadas neste Grupo em caráter opcional.

4.7.2 Grupo “B”

São as unidades consumidoras com fornecimento em tensão inferior a 2,3 kV, ou, ainda, unidades consumidoras pertencentes ao Grupo “A”, faturadas neste Grupo, desde que satisfaçam as seguintes condições:

- Seja localizada em área de veraneio ou turismo (oficialmente reconhecida como estância balneária, climática ou turística), em que sejam explorados serviços de hotelaria ou pousada;
- Tenha potência instalada em transformadores igual ou inferior a 112,5 kVA;

¹⁷ Tarifa Binômica: conjunto de tarifas de fornecimento constituído por preços aplicáveis ao consumo de energia elétrica ativa (kWh) e a demanda faturável (kW).

- Seja classificada como cooperativa de eletrificação rural, quando a potência instalada em transformadores for igual ou inferior a 750 kVA;
- Possua instalações permanentes para a prática de atividades esportivas ou parques de exposições agropecuárias, desde que a potência instalada em projetores utilizados na iluminação dos locais seja igual ou superior a 2/3 (dois terços) da carga instalada na unidade consumidora.

As unidades consumidoras atendidas em grupo “B” caracterizam pela estruturação tarifária monômnia, ou seja, sua conta de energia é constituída por preços aplicáveis unicamente ao consumo de energia elétrica ativa (kWh) e são subdivididas nos seguintes subgrupos:

- a) Subgrupo B1 - residencial;
- b) Subgrupo B1 - residencial baixa renda;
- c) Subgrupo B2 - rural;
- d) Subgrupo B2 - cooperativa de eletrificação rural;
- e) Subgrupo B2 - serviço público de irrigação;
- f) Subgrupo B3 - demais classes;
- g) Subgrupo B4 - iluminação pública.

As indústrias que atendem os requisitos citados se encontram enquadradas no subgrupo B3 e na área de concessão da CPFL Paulista possuem um custo de R\$ 249,76 / MWh, conforme anexo V.

4.7.3 Estrutura tarifária do grupo A

A estrutura tarifária do grupo A é caracterizada por um preço para o consumo (kWh) e um preço para a demanda (kW), a empresa enquadrada neste grupo pode optar entre 3 diferentes tarifas denominadas:

- Tarifa Convencional;
- Tarifa Horo-sazonal Verde;
- Tarifa Horo-sazonal Azul.

a) Tarifa convencional

Modalidade caracterizada pela aplicação de tarifas de consumo de energia elétrica e/ou demanda de potência independentemente das horas de utilização do dia e dos períodos do ano, para que a empresa possa ser classificada nesta tarifa sua demanda tem que ser menor ou igual a 300 kW.

b) Tarifa horo-sazonal verde

Esta modalidade tarifária possui aplicação de tarifas diferenciadas de consumo de energia elétrica de acordo com as horas de utilização do dia (Horário Ponta¹⁸ e Fora de Ponta¹⁹) e os períodos do ano (período Seco²⁰ e Úmido²¹), bem como de uma única tarifa de demanda de potência.

c) Tarifa horo-sazonal azul

Esta modalidade tarifária possui aplicação de tarifas diferenciadas de consumo de energia elétrica de acordo com as horas de utilização do dia (Horário Ponta e Fora de Ponta) e os períodos do ano (período Seco e Úmido), bem como a aplicação de duas tarifas de demanda de potência para o horário de ponta e fora de ponta.

4.7.4 Fator de carga da instalação

O fator de carga da instalação é a razão entre a demanda média e a demanda máxima da unidade consumidora, ocorridas no mesmo intervalo de tempo especificado.

¹⁸ Horário de Ponta: período definido pela concessionária e composto por 3 (três) horas diárias consecutivas, exceção feita aos sábados, domingos e feriados nacionais.

¹⁹ Horário Fora de Ponta: período composto pelo conjunto das horas diárias consecutivas e complementares àquelas definidas no horário de ponta.

²⁰ Período Seco: período de 7 (sete) meses consecutivos, compreendendo os fornecimentos abrangidos pelas leituras de maio a novembro.

²¹ Período Úmido: período de 5 (cinco) meses consecutivos, compreendendo os fornecimentos abrangidos pelas leituras de dezembro de um ano a abril do ano seguinte.

Uma instalação possui fator de carga de 100% quando se tem uma demanda média igual a demanda máxima, na prática o fator de carga máximo apresentado por uma empresa que trabalha a uma carga constante durante 24 horas no dia e 30 dias no mês, fica em torno de 95%.

Nas tarifas azul e verde é necessário saber o fator de carga no horário de ponta, para que se possa calcular o custo da energia elétrica. Atualmente a CPFL Paulista disponibiliza em seu site a simulação de custo nas três tarifas existentes.

Para efeito de cálculo deste trabalho é utilizado 3 fatores de carga que caracterizam 3 cenários diferentes, sendo eles:

a) **Cenário 1** - Fator de carga de 95% na ponta e fora de ponta.

Caracterizando uma empresa que trabalha ininterruptamente durante 30 dias no mês;

b) **Cenário 2** - Fator de carga de 53% fora de ponta e 95% na ponta.

Caracterizando uma empresa que trabalha em dois turnos iniciando às 6:00h da manhã e encerrando as 22:00h, de segunda a sexta e aos sábados até as 14:00h;

c) **Cenário 3** - Fator de carga de 32% fora de ponta e sem consumo na ponta.

Caracterizando uma empresa que trabalha em um único turno das 7:00 às 17:00h de segunda a sexta-feira.

4.7.5 Custo médio da energia elétrica no grupo A

Como visto anteriormente o grupo A é subdividido em outros grupos, para efeito de cálculo são utilizados os valores para o subgrupo A4 (2,3 a 25 kV), onde se encontra enquadrada a maior parte das indústrias, que se deseja atingir com o presente estudo.

Na tabela 4.1 é apresentado os custos médios para cada uma das 3 tarifas, nos três cenários citados anteriormente, estes custos são referenciados a CPFL Paulista, sem os impostos, conforme anexo V.

Tabela 4.1 - Custos médios em R\$ / MWh das tarifas de energia elétrica praticadas pela CPFL Paulista

Período	Cenário 1 Tarifas			Cenário 2 Tarifas			Cenário 3 Tarifas		
	Conv.	Verde	Azul	Conv.	Verde	Azul	Conv.	Verde	Azul
Seco	191,63	221,03	204,67	210,00	267,75	240,39	253,46	180,09	297,18
Úmido	191,63	206,30	189,94	210,00	252,41	225,05	253,46	166,26	283,35
Média Anual	191,63	214,89	198,53	210,00	261,36	234,00	253,46	174,33	291,42
Média Cenários	201,69			235,12			239,74		
Média Geral	225,51								

Fonte: Elaborado a partir dos dados extraídos de CPFL (2008).

Como se pode ver nesta tabela os custos de cada tarifa apresenta resultados diferentes em cada um dos três cenários citados, quando não se conhece a tarifa utilizada pela empresa, mas sabe seu período de trabalho, para efeito de cálculo pode ser utilizado a média de custo do cenário que mais se adequar à empresa.

O presente trabalho utilizará a média geral dos três cenários apresentados (R\$ 225,51) nas análises de viabilidade que se seguirão.

Capítulo 5

Análise Técnica e Econômica da Adequação de Carga

Este capítulo visa demonstrar a aplicação prática de uma análise técnica na adequação de um motor à carga mecânica aplicada em seu eixo.

São abordadas as atuais condições operativas do motor a ser substituído e, posteriormente, se identifica o equipamento que melhor se adequar às condições impostas pela carga requerida.

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 Standard e na seqüência por um motor Alto Rendimento. A avaliação se completa com a análise do Valor Presente Líquido (VPL) e da taxa interna de retorno (TIR), bem como se identificando os benefícios adicionais com a introdução da compensação reativa.

5.1 Coleta de dados do motor em funcionamento

O equipamento selecionado para análise da adequação é um motor que está em funcionamento a mais de 10 anos, e foram tomados todos os cuidados necessários, sendo analisados todos os parâmetros elétricos e mecânicos do motor e da carga, para evitar prejuízos na proposta de substituição. Os parâmetros obtidos foram:

a) Características do ambiente do motor instalado:

- Temperatura máxima do ambiente: 38°C;
- Altitude de instalação: 550 m;

- Ambiente não explosivo, sem intempéries e não agressivo;
- Ambiente com pequena quantidade de partículas de algodão suspensas no ar.

b) Características mecânicas da carga acionada:

- Tipo de carga: Carga de variação linear;
- Conjugado de partida: Conjugado Normal;
- Inércia da carga: Baixa inércia;
- Regime de partida: 10 a 20 partidas diárias;
- Regime de serviço: S1 (Regime de tempo contínuo).

c) Características elétricas do motor existente:

- Potência nominal: 37 kW (50 cv);
- Tensão nominal: 220 V;
- Corrente nominal: 58 A;
- Frequência nominal: 60 Hz;
- Fator de potência nominal: 0,87;
- Rendimento nominal: 0,92;
- Número de pólos: 4 pólos;
- Fator de serviço: 1,15;
- Número de pontas: 6 pontas;
- Classe de isolamento: B (130°C);
- Categoria: N;
- Grau de Proteção do motor: IP54.

d) Características da rede elétrica:

- Tensão nominal: 220 V;
- Frequência nominal: 60 Hz;
- Equilíbrio de tensão: < 1%;
- Distorção Harmônica de tensão: < 5%;
- Distorção Harmônica de corrente: < 10%.

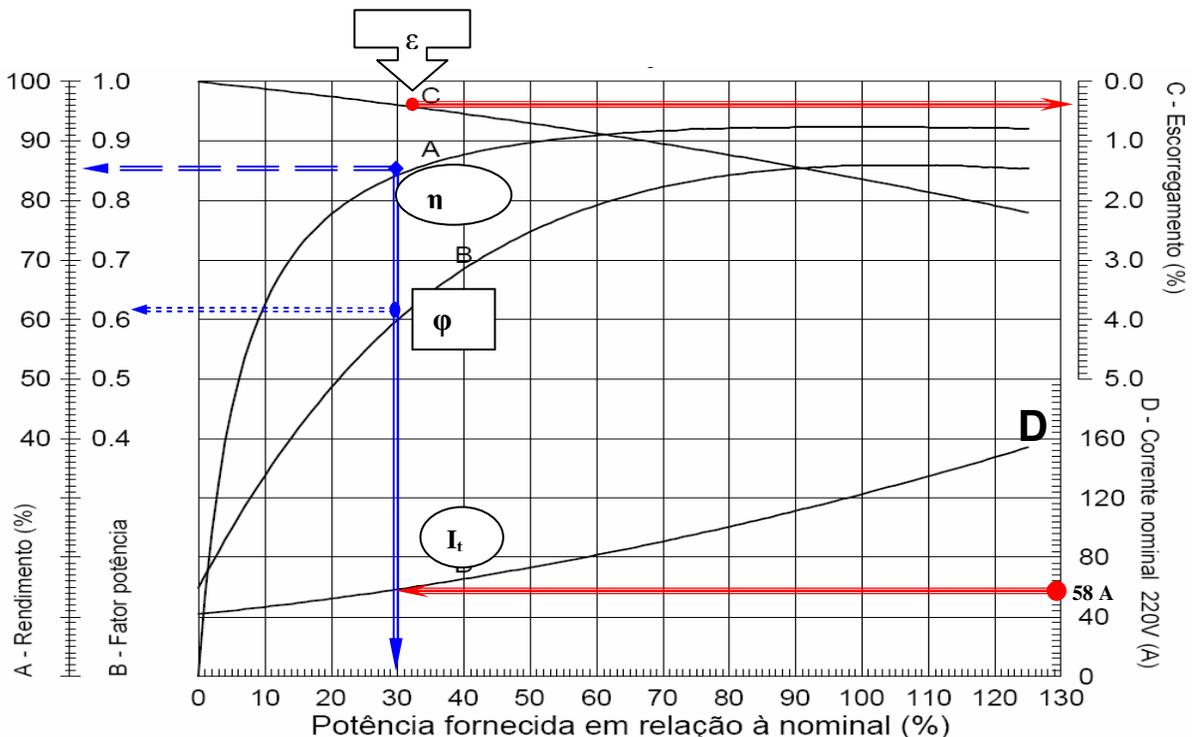
De posse destes dados, ressalta-se que o motor a ser adquirido deve atender integralmente as características indicadas, sob pena de não apresentar um funcionamento e um resultado satisfatório.

5.2 Cálculos elétricos do motor em funcionamento

Após a obtenção destes dados, foi realizada uma análise da variação de corrente durante todo ciclo de funcionamento da carga, identificando-se como valor máximo de operação 58 A. A partir deste dado, foi realizada a análise do carregamento do motor, através da curva de desempenho do motor, impressa no site do fabricante, no caso a WEG.

Ao se identificar o valor máximo de corrente (58 A) na curva D da figura 5.1, é determinado o ponto **I_t** (corrente de trabalho). Traçando uma perpendicular a este ponto, se obtém o percentual de carga no eixo das abscissas (x) e, no cruzamento desta perpendicular com as curvas A, B e C se identifica no eixo das coordenadas (y) os valores do rendimento (**η**); o fator de potência (**cos φ**); e o escorregamento (**ε**).

Figura 5.1 - Curva característica do motor 50cv / 220 V / 4 Pólos.



Fonte: WEG, 2008.

E através desta curva, se observa que este motor está operando a 30% de sua potência nominal, e se extrai os seguintes dados:

- Fator de Potência ($\cos \varphi$): 0,60
- Rendimento do motor (η): 84%
- Escorregamento do motor (ε): 0,3%

a) Potência mecânica

A potência encontrada no gráfico é a potência fornecida ao eixo do motor (potência mecânica), e a mesma é de 30% da potência nominal, logo se tem:

$$P_{\text{mecânica}} = 37,0 \text{ kW} \times 0,3 \quad \rightarrow \quad P_{\text{mecânica}} = 11,10 \text{ kW}$$

b) Potência elétrica

Segundo Andreas (1992) a potência elétrica absorvida pelo motor da rede elétrica (potência ativa) é igual a potência mecânica de saída, dividida pelo rendimento do motor (η), logo:

$P_{\text{elétrica}} = \frac{P_{\text{mecânica}}}{\eta}$	Equação 5.1
--	-------------

$$P_{\text{elétrica}} = \frac{11,10 \text{ kW}}{0,84} \quad \rightarrow \quad P_{\text{elétrica}} = 13,21 \text{ kW}$$

c) Energia ativa consumida (kWh)

Uma vez obtida a potência ativa (kW) para obter a energia mensal consumida, basta multiplicar pelo tempo de funcionamento do motor neste período em horas.

Para o estudo de caso apresentado adotou-se um tempo de funcionamento mensal²² de 576 h, que corresponde a 24 horas de funcionamento durante 24 dias no mês.

$$E_{\text{consumida}} = 13,21 \text{ kW} \times 576 \text{ h} \quad \rightarrow \quad E_{\text{consumida}} = 7.608,96 \text{ kWh}$$

d) Custo mensal da energia ativa (C_{mea})

Para a obtenção do custo mensal de funcionamento deste motor, multiplica-se a energia consumida no mês pelo custo médio do kWh. O custo médio adotado do kWh foi de R\$ 0,2255, correspondente ao arredondamento de R\$ 225,51 / MWh, cujo valor representa a média geral das 3 tarifas existentes nos três cenários apresentados no capítulo anterior e tabela 4.1.

$$C_{\text{mea}} = 7.608,96 \text{ kWh} \times \text{R\$ } 0,2255 \quad \rightarrow \quad C_{\text{mea}} = \text{R\$ } 1.715,82$$

e) Potência aparente (S)

Conforme Andrade (1993) a potência aparente absorvida da rede elétrica é expressa pela equação:

$S = \frac{P}{\cos \varphi}$	Equação 5.2
------------------------------	-------------

Onde:

P: Potência elétrica do motor;

$\cos \varphi$: Fator de potência do motor.

Logo para o exemplo, se terá:

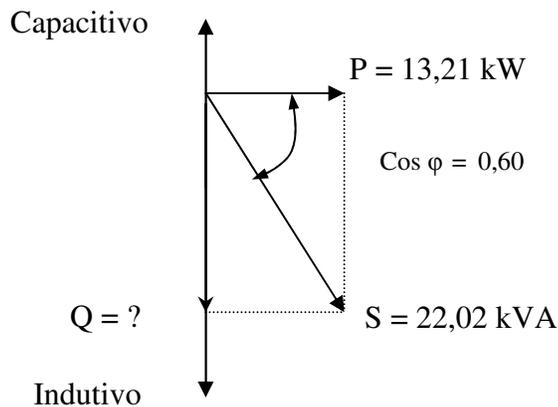
$$S = \frac{13,21 \text{ kW}}{0,60} \quad \rightarrow \quad S = 22,02 \text{ kVA}$$

²² Neste estudo adotou-se um período de 576 h de funcionamento mensal, o que resulta em aproximadamente 6912 h de funcionamento por ano. Este valor pode ser maior ou menor dependendo da utilização do motor.

f) Potência reativa (Q)

Conhecendo-se que a potência aparente ($S = VA$) e a potência elétrica ($P = Watt$) se pode desenhar o triângulo de potências e, através de cálculos trigonométricos, calcular a potência reativa ($Q = VAr$) fornecida a este motor, como demonstrado na figura 5.2.

Figura 5.2 - Triângulo de potência do motor a ser substituído.



A equação utilizada para cálculo da potência reativa é:

$Q = \sqrt{(S)^2 - (P)^2}$	Equação 5.3
----------------------------	-------------

Substituindo os dados disponíveis temos:

$$Q = \sqrt{(22,02)^2 - (13,21)^2} \quad \rightarrow \quad Q = 17,61 \text{ kVAr}$$

g) Energia reativa mensal consumida (E_{Qmc})

Uma vez obtida a potência reativa (kVAr), assim como no cálculo da energia ativa, para obter a energia reativa mensal consumida, basta multiplicar pelo tempo de funcionamento mensal do motor em horas.

$$E_{Q_{mc}} = 17,61 \text{ kVAr} \times 576 \text{ h}$$



$$E_{Q_{mc}} = 10.143,36 \text{ kVArh}$$

h) Energia reativa mensal tarifada (ΔQ_{mt})

Embora seja evidente que a geração de energia reativa acrescenta um custo adicional às instalações, muitas vezes este valor deixa de ser contabilizado.

Para a contabilização da energia reativa existem duas formas distintas, uma delas é através do levantamento do custo de correção do fator de potência através de capacitores e das perdas elétricas relacionadas a esta correção, e a outra forma é contabilizar o que seria pago de multa a concessionária, caso este não faça a correção através de capacitores.

Como visto no capítulo anterior a multa por energia reativa é calculada como o valor a ser pago pela energia ativa não transportada. Após substituição de valores na equação 3.7 tem-se a equação 5.4 que calcula a energia reativa tarifada (ΔQ_t), baseando-se na energia consumida (E_c) e o fator de potência da instalação (F_p).

$\Delta Q_{mt} = \frac{E_c \times (F_{pr} - F_p)}{F_p}$	Equação 5.4
---	-------------

Onde:

F_{pr} : fator de potência de referência (0,92)

Substituindo os valores:

$$\Delta Q_{mt} = \frac{7.608,96 \times (0,92 - 0,6)}{0,6}$$



$$\Delta Q_{mt} = 4.058,11 \text{ kVArh}$$

i) Custo da energia reativa mensal tarifada ($C\Delta Q_{mt}$)

Para a obtenção do custo em R\$ da Energia reativa mensal tarifada ($C\Delta Q_t$), basta multiplicar (ΔQ_{mt}) pelo custo do kWh, no caso R\$ 0,2255, com isto temos o custo que está sendo adicionado na fatura deste consumidor, caso ele opte pela não correção da energia reativa gerada pelo motor elétrico em funcionamento.

$$C\Delta Q_{mt} = 4.058,11 \text{ kVArh} \times R\$ 0,2255$$



$$C\Delta Q_{mt} = R\$ 915,10$$

A seguir é apresentada a tabela 5.1 que apresenta um resumo dos cálculos anteriores para o motor em funcionamento.

Tabela 5.1 - Grandezas elétricas do motor em funcionamento

Descrição	Motor Atual Standard
Potência Elétrica Nominal (kW)	37
Escorregamento (%)	0,3%
Fator de Potência ($\cos \varphi$)	0,60
Rendimento (η)	84%
Potência Elétrica (kW)	13,21
Cons. Mensal En. Ativa (kWh)	7.608,96
Custo Mensal Energia Ativa (C_{mea})	R\$ 1.715,82
Potência Aparente (kVA)	22,02
Potência Reativa (kVAr)	17,61
En. Reativa Mensal Consumida (kVArh)	10.143,36
En. Reativa Mensal Tarifada (kVArh)	4.058,11
Custo En. Reativa Mensal Tarifada	R\$ 915,10
Custo Mensal Total (Ativa + Reativa)	R\$ 2.630,92

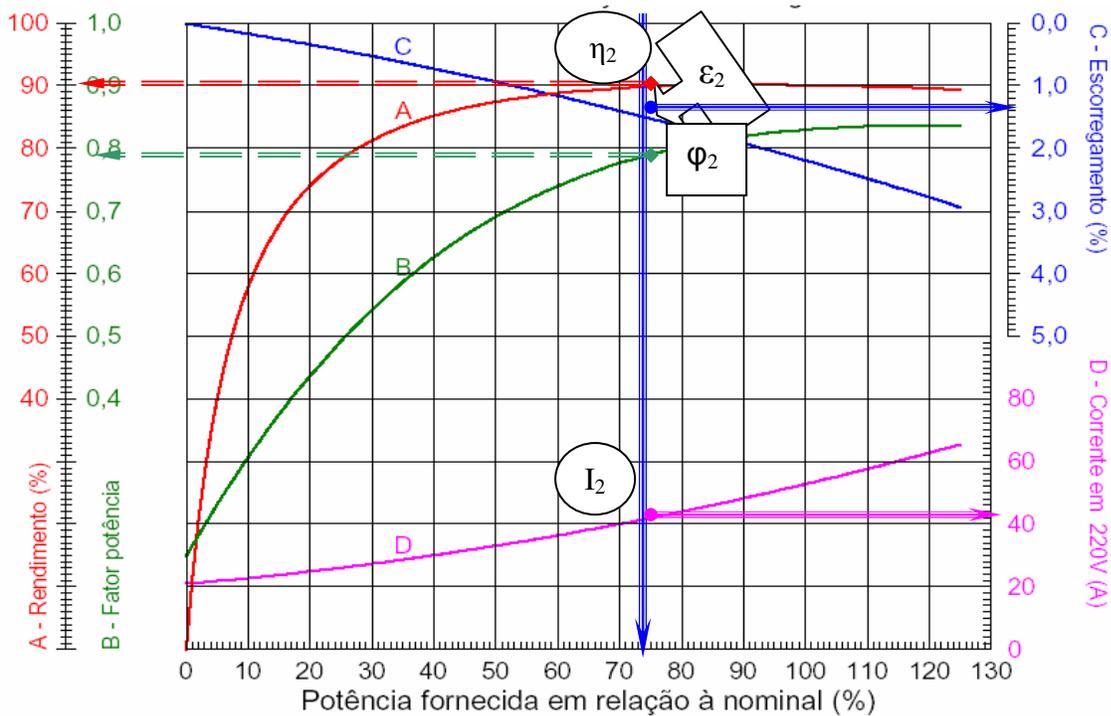
Na tabela 5.1 pode-se verificar que o motor utilizado apresenta um baixo fator de potência (0,6), com isto tem-se uma geração de energia reativa mensal de 10.143,36 kVArh, que se não for corrigida acarreta em um acréscimo mensal na conta de energia de R\$ 915,10 o equivalente a aproximadamente 53% do custo da energia ativa necessária para o funcionamento deste motor.

Observa-se neste caso que o superdimensionamento do motor traz além de custos adicionais na instalação e manutenção (maior custo do motor e de seus componentes elétricos e mecânicos), um custo de adequação ao fator de potência mínimo exigido pela ANEEL, no caso 0,92.

5.3 Substituição por motor Standard – Alternativa 1

Este estudo visa analisar a substituição do motor elétrico existente, operando a 30% de sua carga nominal, por um motor de menor potência, visando obter um melhor rendimento. O novo motor estará operando a aproximadamente 75% da carga nominal, conforme recomenda Garcia (2003).

Figura 5.3 - Curva característica do motor Standard (15 kW / 4 pólos / 220 V).



Fonte: WEG, 2008.

O motor escolhido é um motor elétrico trifásico Standard (padrão), com Potência Nominal de 15 kW (22 cv); 4 pólos; 220 V, e cuja curva característica de desempenho é apresentada pela figura 5.3.

Através desta curva foi simulada uma situação de trabalho deste motor operando com uma potência mecânica de 11,10 kW, ou seja, aproximadamente 75% de sua potência nominal.

Com a curva se obtém os seguintes dados a 75% de carga:

$I_2 = 42 \text{ A}$	$\cos \varphi_2 = 0,78$	$\eta_2 = 90\%$	$\varepsilon_2 = 1,6\%$
----------------------	-------------------------	-----------------	-------------------------

a) Potência mecânica

Embora a carga acionada seja a mesma do motor anterior, a potência fornecida ao eixo do motor (potência mecânica), pode sofrer alterações pelo fato de haver um aumento no escorregamento do motor de 0,3% para 1,6% este aumento no escorregamento causa uma diminuição na velocidade e dependendo da carga acionada poderá haver uma menor solicitação mecânica.

Outro fator relevante segundo Honnicke (1996, apud DELGADO, 1996), é que no caso de motores elétricos Standard, a queda de rendimento em função do uso se dá principalmente, devido à descarbonetação das chapas, acarretando aumento de perdas da ordem de 5% e devido a queda de rendimento dos rolamentos do motor²³.

Com isto observa-se que quanto mais velho o motor instalado melhor serão os resultados obtidos na substituição, mas como esta análise não é objeto deste estudo, para efeito de cálculo será considerado que a potência mecânica não sofreu alteração, logo se tem:

$$P_{\text{mecânica}} = 11,10 \text{ kW}$$

b) Potência elétrica

$$P_{\text{elétrica}} = \frac{11,10 \text{ kW}}{0,90} \rightarrow P_{\text{elétrica}} = 12,33 \text{ kW}$$

c) Energia ativa mensal consumida (kWh)

$$E_{\text{consumida}} = 12,33 \text{ kW} \times 576 \text{ h} \rightarrow E_{\text{consumida}} = 7.102,08 \text{ kWh}$$

d) Custo mensal da energia ativa (C_{mea})

$$C_{\text{mea}} = 7.102,08 \text{ kWh} \times \text{R\$ } 0,2255 \rightarrow C_{\text{mea}} = \text{R\$ } 1.601,51$$

²³ A vida útil do rolamento é indicada em horas de funcionamento. Para os motores elétricos com oito horas de serviço diário, os rolamentos são em média, de 25.000 h e, para os de serviço contínuo (24 horas), os rolamentos são dimensionados para 60.000 h Faires (1971, apud DELGADO, 1996). Pode-se observar uma vida útil aproximada de 10 e 8 anos respectivamente.

e) **Potência aparente (S_1)**

$$S_1 = \frac{12,33 \text{ kW}}{0,78} \quad \rightarrow \quad S_1 = 15,80 \text{ kVA}$$

f) **Potência reativa (Q_1)**

$$Q_1 = \sqrt{(15,80)^2 - (12,33)^2} \quad \rightarrow \quad Q_1 = 9,89 \text{ kVAr}$$

g) **Energia reativa mensal consumida ($E_{Q_{mc}}$)**

$$E_{Q_{mc}} = 9,89 \text{ kVAr} \times 576 \text{ h} \quad \rightarrow \quad E_{Q_{mc}} = 5.696,64 \text{ kVArh}$$

h) **Energia reativa mensal tarifada (ΔQ_{mt})**

$$\Delta Q_{mt} = \frac{7.102,08 \times (0,92 - 0,78)}{0,78} \quad \rightarrow \quad \Delta Q_{mt} = 1.274,73 \text{ kVArh}$$

i) **Custo da energia reativa mensal tarifada ($C\Delta Q_{mt}$)**

$$C\Delta Q_{mt} = 1.274,73 \text{ kVArh} \times \text{R\$ } 0,2255 \quad \rightarrow \quad C\Delta Q_{mt} = \text{R\$ } 287,45$$

A seguir é apresentada a tabela 5.2 que apresenta um resumo dos cálculos anteriores para o motor Standard.

A tabela 5.2 mostra que houve um aumento no escorregamento (ϵ) deste motor, ou seja, após a troca tem-se uma velocidade inferior a anterior de aproximadamente 1,3%, esta é uma informação que deve ser considerada e corrigida caso o processo não aceite esta variação.

Também se observa um aumento no fator de potência (0,60 para 0,78) e no rendimento (84% para 90%), estes melhores resultados são responsáveis pelo menor consumo mensal de energia reativa e energia ativa respectivamente, quando comparados com o motor em funcionamento (tabela 5.1).

Tabela 5.2 - Grandezas elétricas do motor Standard – Alternativa 1

Descrição	Motor Proposto 1 Standard
Potência Elétrica Nominal (kW)	15
Escorregamento (ϵ)	1,6%
Fator de Potência ($\cos \phi$)	0,78
Rendimento (η)	90%
Potência Elétrica (kW)	12,33
Cons. Mensal En. Ativa (kWh)	7.102,08
Custo Mensal Energia Ativa	R\$ 1.601,52
Potência Aparente (kVA)	15,81
Potência Reativa (kVAr)	9,89
Cons. Mensal En. Reativa (kVArh)	5.696,64
En. Reativa Mensal Tarifada (kVArh)	1.274,73
Custo En. Reativa Mensal Tarifada	R\$ 287,45
Custo Mensal Total (Ativa + Reativa)	R\$ 1.888,97

5.4 Substituição por motor Alto Rendimento – Alternativa 2

Neste exemplo é feita a análise de troca do motor existente por um motor de Alto Rendimento com a mesma potência do motor Standard proposto na alternativa 1.

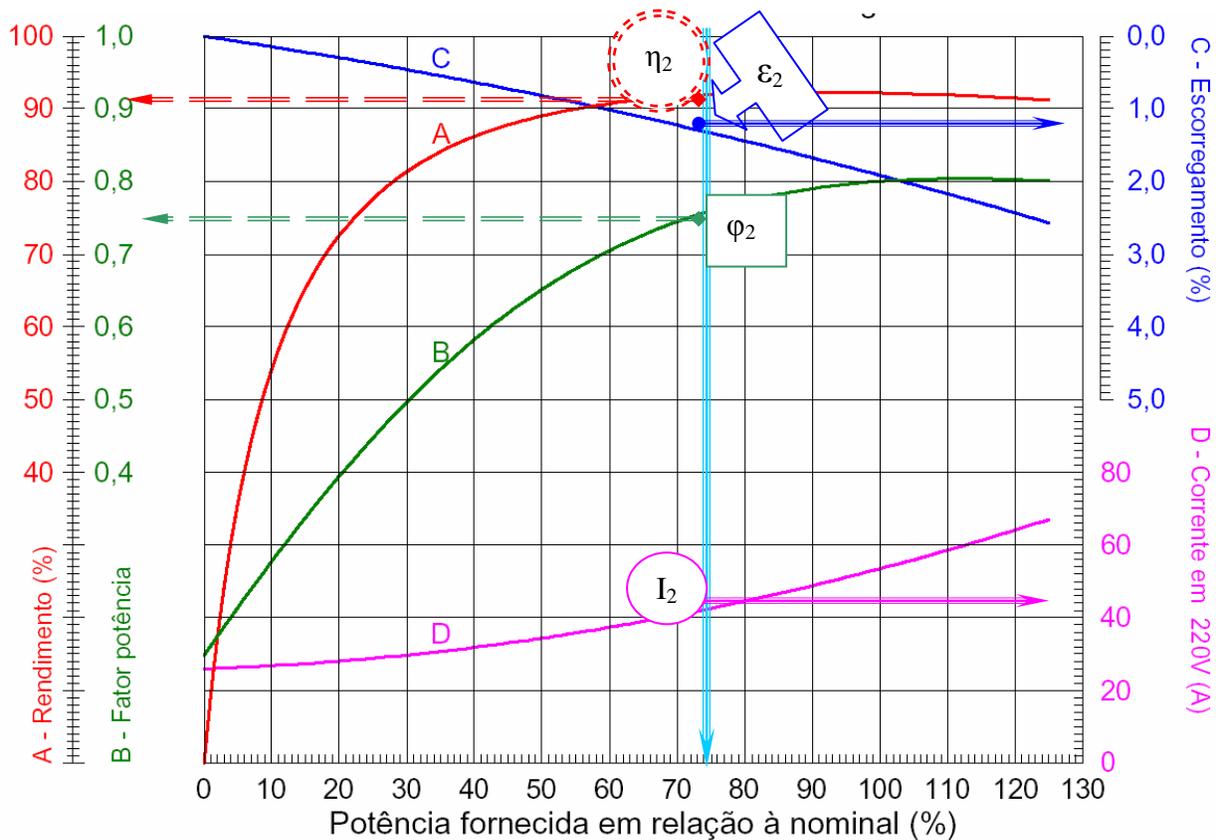
Na seqüência é apresentada a curva característica de desempenho do motor elétrico trifásico de Alto Rendimento 15 kW (22 cv) / 4 pólos / 220 V.

E através desta curva foi simulada uma situação de trabalho deste motor operando com uma potência mecânica de 11,10 kW, ou seja, aproximadamente 75% de sua potência nominal.

Da curva característica deste motor (figura 5.4), se obtém os seguintes dados, a 75% de carga:

$I_2 = 43 \text{ A}$	$\cos \phi_2 = 0,76$	$\eta_2 = 92\%$	$\epsilon_2 = 1,4\%$
----------------------	----------------------	-----------------	----------------------

Figura 5.4 - Curva característica do motor Alto Rendimento (15 kW / 4 pólos / 220 V).



De posse dos dados citados elaboram-se os cálculos das grandezas elétricas envolvidas, bem como os custos relacionados ao funcionamento do motor Alto Rendimento.

a) **Potência mecânica**

$$P_{\text{mecânica}} = 11,10 \text{ kW}$$

b) **Potência elétrica**

$$P_{\text{elétrica}} = \frac{11,10 \text{ kW}}{0,92}$$

$$\rightarrow P_{\text{elétrica}} = 12,07 \text{ kW}$$

c) Consumo mensal de energia ativa

$$E_{\text{consumida}} = 12,07 \text{ kW} \times 576 \text{ h} \quad \rightarrow \quad E_{\text{consumida}} = 6.952,32 \text{ kWh}$$

d) Custo mensal da energia ativa (C_{mea})

$$C_{\text{mea}} = 6.952,32 \text{ kWh} \times \text{R\$ } 0,2255 \quad \rightarrow \quad C_{\text{mea}} = \text{R\$ } 1.567,74$$

e) Potência aparente (S_2)

$$S_2 = \frac{12,07 \text{ kW}}{0,76} \quad \rightarrow \quad S_2 = 15,88 \text{ kVA}$$

f) Potência reativa (Q_2)

$$Q_2 = \sqrt{(15,88)^2 - (12,07)^2} \quad \rightarrow \quad Q_2 = 10,32 \text{ kVAr}$$

g) Energia reativa mensal consumida ($E_{Q_{\text{mc}}}$)

$$E_{Q_{\text{mc}}} = 10,32 \text{ kVAr} \times 576 \text{ h} \quad \rightarrow \quad E_{Q_{\text{mc}}} = 5.944,32 \text{ kVArh}$$

h) Energia reativa mensal tarifada (ΔQ_{mt})

$$\Delta Q_{\text{mt}} = \frac{6.952,32 \times (0,92 - 0,76)}{0,76} \quad \rightarrow \quad \Delta Q_{\text{mt}} = 1.463,65 \text{ kVArh}$$

i) Custo da energia reativa mensal tarifada ($C\Delta Q_{\text{mt}}$)

$$C\Delta Q_{\text{mt}} = 1.463,65 \text{ kVArh} \times \text{R\$ } 0,2255 \quad \rightarrow \quad C\Delta Q_{\text{mt}} = \text{R\$ } 330,05$$

A tabela 5.3 apresenta o resumo das grandezas elétricas obtidas com o motor AR. Na comparação com o motor instalado (tabela 5.1), pode-se observar que o motor AR proporcionou uma melhora no rendimento (84% para 92%) e conseqüentemente um menor custo mensal de energia ativa. Este motor também proporcionou uma melhora no fator de potência (0,60 para 0,76) o que também resultou em uma menor requisição de energia reativa.

Tabela 5.3 - Grandezas elétricas do motor AR – Alternativa 2

Descrição	Motor Proposto 2 Alto Rendimento
Potência Elétrica Nominal (kW)	15
Escorregamento (%)	1,4%
Fator de Potência (cos ϕ)	0,76
Rendimento (η)	92%
Potência Elétrica (kW)	12,07
Cons. Mensal En. Ativa (kWh)	6.952,32
Custo Mensal Energia Ativa (C_{mea})	R\$ 1.567,75
Potência Aparente (kVA)	15,88
Potência Reativa (kVAr)	10,32
En. Reativa Mensal Consumida (kVArh)	5.944,32
En. Reativa Mensal Tarifada (kVArh)	1.463,65
Custo Mensal En. Reativa Tarifada	R\$ 330,05
Custo Mensal Total (Ativa + Reativa)	R\$ 1.897,80

É importante destacar que o motor AR apresentou um escorregamento maior que o motor o motor instalado (0,3% contra 1,4%), o que representou uma diminuição na velocidade de aproximadamente 1%, como citado anteriormente é necessário avaliar se esta diferença não prejudicará o processo.

5.5 Comparação dos resultados obtidos

A tabela 5.4 apresenta um resumo das grandezas elétricas das 3 situações avaliadas, e se observa que conforme relatado nos capítulos anteriores, a adequação de potência a carga acionada proporcionou uma melhora significativa no rendimento dos motores propostos; 90% no Standard e 92% no AR.

Destaca-se também o aumento no fator de potência nos dois motores propostos, conseqüentemente observa-se uma menor requisição de energia reativa na rede elétrica do circuito alimentador do motor existente, outro fato que chamou a atenção foi que neste caso o

motor Standard apresentou um melhor fator de potência 0,78 contra 0,76 do motor AR (Alto Rendimento).

Tabela 5.4 - Comparativo dos 3 motores avaliados sem considerar a energia reativa

Descrição	Motor em Funcionamento	Motor Proposto 1 Standard	Motor Proposto 2 Alto Rendimento
Potência Elétrica Nominal (kW)	37	15	15
Escorregamento (%)	0,3%	1,6%	1,4%
Fator de Potência ($\cos\phi$)	0,60	0,78	0,76
Rendimento (η)	84%	90%	92%
Potência Elétrica (kW)	13,21	12,33	12,07
Consumo Mensal En. Ativa (kWh)	7.608,96	7.102,08	6.952,32
Custo Mensal Energia Ativa (C_{mea})	R\$ 1.715,82	R\$ 1.601,52	R\$ 1.567,75
Economia Mensal	-	R\$ 114,30	R\$ 148,07
Diferença (Std x AR)			R\$ 33,77

Na análise da economia mensal observa-se que os dois motores propostos apresentam vantagem financeira em relação ao motor em funcionamento.

Ao se comparar os resultados entre o motor Std e AR observa-se uma economia mensal de R\$ 33,77 maior para o motor AR, o que poderia justificar no decorrer de alguns anos a compra do motor AR mesmo que este possua um custo inicial maior de aproximadamente 30% em relação ao motor Standard.

Como o objetivo do trabalho é apresentar a contribuição da energia reativa na análise de viabilidade de troca de motores elétricos superdimensionados, a seguir é feita uma nova comparação de resultados, considerando-se o a geração de energia reativa.

A tabela 5.5 acrescenta a tabela anterior os valores para energia reativa, bem como seus custos adicionais caso o cliente não opte pela instalação de capacitores para a correção do fator de potência.

Tabela 5.5 - Comparativo dos 3 motores avaliados considerando a energia reativa

Descrição	Motor Atual Standard	Motor Proposto 1 Standard	Motor Proposto 2 Alto Rendimento
Potência Elétrica Nominal (kW)	37	15	15
Escorregamento (%)	0,3%	1,6%	1,4%
Fator de Potência (cos ϕ)	0,60	0,78	0,76
Rendimento (η)	84%	90%	92%
Potência Elétrica (kW)	13,21	12,33	12,07
Consumo Mensal En. Ativa (kWh)	7.608,96	7.102,08	6.952,32
Custo Mensal Energia Ativa (C_{mea})	R\$ 1.715,82	R\$ 1.601,52	R\$ 1.567,75
Potência Aparente (kVA)	22,02	15,81	15,88
Potência Reativa (kVAr)	17,61	9,89	10,32
Consumo Mensal En. Reativa	10.143,36	5.696,64	5.944,32
En. Reativa Mensal Tarifada (kVArh)	4.058,11	1.274,73	1.463,65
Custo En. Reativa Mensal Tarifada	R\$ 915,10	R\$ 287,45	R\$ 330,05
Custo Mensal Total (Ativa + Reativa)	R\$ 2.630,92	R\$ 1.888,97	R\$ 1.897,80
Economia Mensal	-	R\$ 741,95	R\$ 733,12
Diferença (Std x AR)	-	R\$ 8,83	-

Com isto ao se analisar a Energia Reativa Mensal Tarifada, observa-se um consumo maior para o motor proposto de Alto Rendimento (1.463,65 kVArh) que para o motor proposto Standard (1.274,73 kVArh), muito embora ambos os valores sejam menores que para o motor em funcionamento.

Ao se multiplicar estes valores pelo custo do kWh adotado (R\$ 0,2255), têm-se os valores do Custo Mensal da Energia Reativa Tarifada, ou seja, as ‘Multas Mensais’ para cada motor pela não correção do fator de potência. Constata-se que este valor que normalmente não é contabilizado é significativo e pode ser decisivo na substituição do motor superdimensionado, pois no exemplo citado quadruplicou a economia mensal obtida.

Na comparação realizada entre os dois motores propostos (AR x Std), observa-se uma inversão em relação à tabela 5.4, pois nesta avaliação a vantagem financeira agora passa a ser em favor do motor Standard em R\$ 8,83.

5.6 Indicadores da análise de viabilidade

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, considerou-se um período de 120 meses, ou seja, 10 anos que normalmente é a vida útil média de um motor elétrico.

Para tanto, se recorrerá a dois conceitos da engenharia econômica para a avaliação dos resultados, sendo eles:

- Valor Presente Líquido (VPL);
- Taxa Interna de Retorno (TIR).

5.6.1 Valor presente (VP) e 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.

Conforme Monteiro (1997) para se obter o valor presente líquido (VPL) de cada projeto basta somar o custo inicial (C_i) com o valor presente (VP).

O valor presente (VP) representa o valor hoje de um fluxo ou uma série futura de fluxos de caixa, considerando uma taxa de juros “ i ” e um período “ n ”.

Conforme Matemática Essencial (2008) a determinação do valor presente (VP) é dada por:

$$VP = FC_i \cdot \frac{[(1+i)^N - 1]}{[i \cdot (1+i)^N]} \quad \text{Equação 5.4}$$

Onde:

FC_i = quantidade a ser paga mensalmente pelo consumo ou perda de energia (R\$);

N = número de meses de funcionamento do motor considerado na análise;

i = taxa de juros ao mês (%).

5.6.2 Taxa interna de retorno (TIR)

Segundo Galesne (1999) a taxa interna de retorno (TIR) de um investimento é a taxa i que torna o valor presente das entradas líquidas de caixa associadas ao projeto igual ao investimento inicial ou, equivalente, à taxa i que torna o VPL do projeto igual a zero.

A TIR é identificada através de várias tentativas e erros e exige uma série de aproximações sucessivas, sendo difícil de ser calculada manualmente.

O caráter rentável ou não de um projeto depende da posição relativa da taxa interna de retorno do projeto e da taxa mínima de rentabilidade que o dirigente da empresa exige para seus investimentos.

5.7 Cálculo da análise de viabilidade

Para uma melhor identificação da influência da energia reativa no processo de decisão de troca de um motor elétrico são apresentados três cenários, sendo eles:

5.7.1 Análise do VPL e TIR desconsiderando a energia reativa;

5.7.2 Análise do VPL e TIR considerando a correção da energia reativa com capacitores;

5.7.3 Análise do VPL e TIR considerando a multa da energia reativa.

5.7.1 Análise do VPL e TIR desconsiderando a energia reativa

De posse dos cálculos anteriores e do custo de aquisição²⁴ e instalação²⁵ dos motores elétricos Standard e AR, tem-se o custo inicial total, que é utilizado na análise econômica de viabilidade. A tabela 5.6 apresenta os resultados obtidos do VPL e TIR.

²⁴ Os custos de aquisição são referenciados a data de novembro de 2.007 obtidos via e-mail através de um distribuidor de motores elétricos da WEG e um distribuidor da Eberle (atual Metal Corte).

²⁵ Os custos de instalação foram obtidos junto a empresa Eletromecânica Demarchi LTDA, ao qual efetua este tipo de adaptação que consiste na confecção e troca da polia, adaptação no painel elétrico com troca do relê térmico e teste de funcionamento do conjunto completo.

Tabela 5.6 - Comparativo da análise do VPL e TIR desconsiderando a energia reativa

Descrição	Motor Atual Standard	Motor Proposto 1 Standard	Motor Proposto 2 Alto Rendimento
Custo inicial de aquisição (C_{ia})	R\$ -	R\$ 1.600,00	R\$ 2.400,00
Custo inicial de instalação (C_{ii})	R\$ -	R\$ 1.200,00	R\$ 1.200,00
Custo inicial Total (C_{iT})	R\$ -	R\$ 2.800,00	R\$ 3.600,00
Custo mensal energia ativa (C_{mea})	R\$ 1.715,82	R\$ 1.601,52	R\$ 1.567,75
Custo mensal total (CT)	R\$ 1.715,82	R\$ 1.601,52	R\$ 1.567,75
Período de análise (meses)	120	120	120
Taxa de juros mensal (%)	1,00%	1,00%	1,00%
Valor Presente Líquido (VPL)	R\$ 119.593,55	R\$ 114.426,78	R\$ 112.872,99
Economia no período	-	R\$ 5.166,77	R\$ 6.720,56
Taxa Interna de Retorno (TIR)	-	4,05%	4,08%

Na tabela 5.6 observa-se uma economia de R\$ 5.166,77 para o motor Standard e R\$ 6.720,56 para o motor AR, identificando-se que para ambos os casos há viabilidade na troca do motor existente por um novo motor adequado a carga.

Este quadro também mostra que a taxa interna de retorno mensal (TIR) para esta troca é praticamente a mesma, ou seja, 4,05% para o motor Standard e 4,08% para o Alto Rendimento.

Mesmo com essa pequena diferença na TIR (0,03%) o VPL apresenta uma vantagem econômica de R\$ 1.553,79 a favor do motor AR.

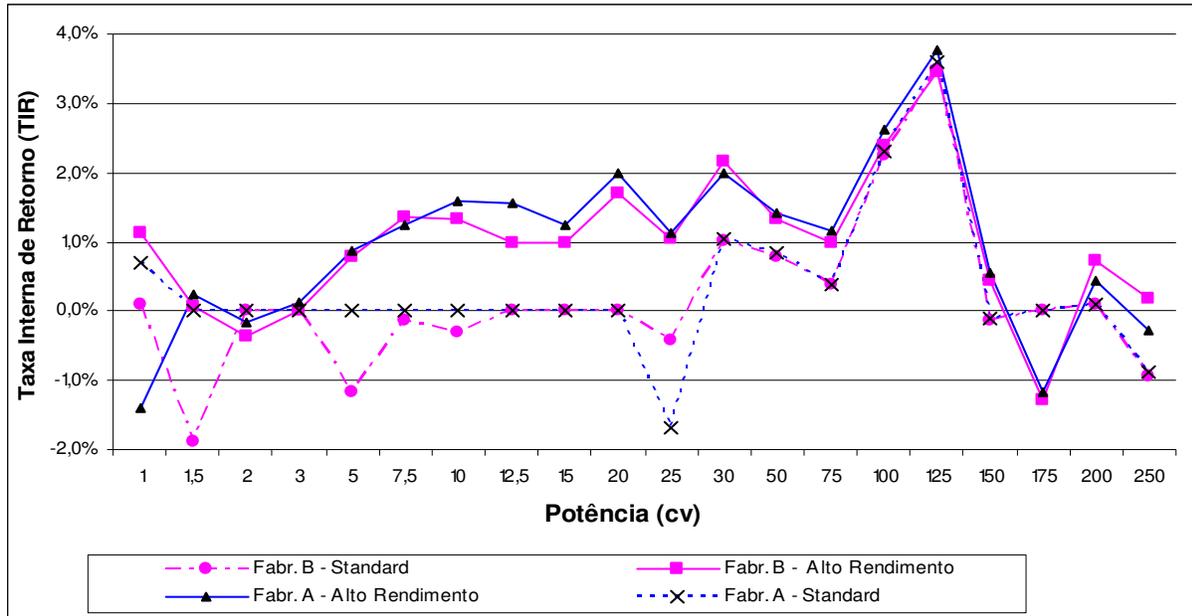
Análise da TIR para outras potências de motores e outro fabricante

Para que os resultados apresentados não fossem conotados como um ponto fora da curva, ou seja, que o estudo realizado atendesse apenas o caso apresentado, foi desenvolvido um estudo complementar, onde foram realizados os cálculos da taxa interna de retorno (TIR) com outras potências de motores de dois grandes fabricantes de motores elétricos nacionais denominados A e B, onde não foi considerada a energia reativa requerida por estes motores.

Para efeito de cálculo, foram considerados motores de 4 pólos (TEFC), que trabalhavam a 50% da potência nominal e que foram substituídos por outros motores a 100% de carga (Exemplo: substituiu-se um motor de 100cv a 50% de carga por um de 50cv), respeitando todas

as suas características mecânicas, elétricas, construtivas e do ambiente de trabalho, conforme citado no capítulo 4.

Figura 5.5 – Análise da TIR para motores 4 Pólos (TEFC) sem correção da energia reativa.



Analisando a figura 5.5 se observa que a taxa interna de retorno (TIR) apresenta resultados muito próximos à zero para os motores de 1,5 a 3 cv, a partir desta potência, até 20 cv, os motores Alto Rendimento (Fabr. A e B) apresentam uma TIR na ordem de 1 a 2%, enquanto que os motores Standards (Fabr. A e B) possuem uma TIR próxima ou igual à zero.

Nas potências de 50 cv até 150 cv observa-se uma menor diferença na TIR entre os motores AR e Std, e uma taxa de atratividade maior que 2% nas potências 100 e 125 cv. Nota-se também que para a potência de 175 cv os motores Alto Rendimento (Fabr. A e B) possuem uma TIR negativa, menor que os motores Stds que possuem uma taxa de atratividade próxima a zero.

Estas constatações indicam uma necessidade de estudos detalhados para as adequações de carga visando vantagens econômicas. Também é importante ressaltar que a análise realizada está utilizando os dados elétricos de motores novos, que normalmente não é o caso da maioria das indústrias brasileiras, pois quando o motor a ser substituído é velho seu rendimento é menor, acarretando em maiores vantagens econômicas na sua substituição.

Também se considera na análise anterior a compra de um novo motor para substituir o motor superdimensionado existente, mas se for possível a empresa pode simplesmente optar por remanejar os motores existentes, o que reduziria o custo inicial e conseqüentemente aumentaria a TIR.

Os dados elétricos (potência, rendimento e fator de potência) utilizados para os cálculos da TIR foram obtidos nos catálogos destes fabricantes²⁶, os custos dos motores foram fornecidos pelos distribuidores de cada fabricante, enquanto que os custos de adaptação e instalação destes motores foram obtidos junto a empresa de montagem Eletromecânica Demarchi LTDA de Americana – S.P.

5.7.2 Análise do VPL e TIR considerando a correção da energia reativa com capacitores

Geralmente as empresas ou consumidores optam pela correção do fator de potência, neste caso as literaturas recomendam a inserção do custo de ajuste do fator de potência na análise de viabilidade. Conforme citado no item 3.13, o custo desta correção varia de R\$ 43,00 / kVAr (correção com banco fixo) à R\$ 98,00 / kVAr (correção mista).

Na análise proposta optou-se pelo valor encontrado para a correção local do fator de potência que possui um custo aproximado de R\$ 77,00 / kVAr.

A tabela 5.7 apresenta os resultados finais após a inserção deste custo de correção do fator de potência no custo inicial total de instalação, onde considerou a elevação do fator de potência para o valor unitário. Como o motor analisado encontrava-se em funcionamento, considerou-se que seu fator de potência estivesse corrigido para o valor unitário, logo com a adequação do motor a carga acionada é disponibilizada uma potência reativa conforme cálculo a seguir:

a) Potência Reativa Disponibilizada no Motor Standard (Q_{DStd}):

$$Q_{DStd} = 17,61 \text{ kVAr} - 9,89 \text{ kVAr} = \mathbf{7,72 \text{ kVAr}}$$

$$\text{Custo da Potência Reativa Disponibilizada} = 7,72 \text{ kVAr} \times \text{R\$ } 77,00 / \text{ kVAR} = \mathbf{\text{R\$ } 594,44}$$

²⁶ Os fabricantes de motores elétricos normalmente disponibilizam em seus catálogos o rendimento e o fator de potência para carregamentos de 50, 75 e 100% de sua potência nominal.

b) Potência Reativa Disponibilizada no Motor AR (Q_{DAR}):

$$Q_{DAR} = 17,61 \text{ kVAr} - 10,32 \text{ kVAr} = 7,29 \text{ kVAr}$$

$$\text{Custo da Potência Reativa Disponibilizada} = 7,29 \text{ kVAr} \times \text{R\$ } 77,00 / \text{kVAR} = \text{R\$ } 561,33$$

Para a composição do custo inicial total (C_{iT}), é somado o custo de aquisição e instalação do motor e subtraído o custo da potência disponibilizada.

Tabela 5.7 - Comparativo da análise do VPL e TIR considerando a correção da energia reativa com capacitores

Descrição	Motor Atual Standard	Motor Proposto 1 Standard	Motor Proposto 2 Alto Rendimento
Potência Reativa (kVAr)	17,61	9,89	10,32
Pot. Reativa Disponibilizada (kVAr)	-	7,72	7,29
Custo Pot. Reat. Disponibilizada	R\$ -	R\$ 594,44	R\$ 561,33
Custo inicial de aquisição (C_{ia})	R\$ -	R\$ 1.600,00	R\$ 2.400,00
Custo inicial de instalação (C_{ii})	R\$ -	R\$ 1.200,00	R\$ 1.200,00
Custo inicial Total (C_{iT})	R\$ -	R\$ 2.205,56	R\$ 3.038,67
Custo mensal energia ativa (C_{mea})	R\$ 1.715,82	R\$ 1.601,52	R\$ 1.567,75
Custo mensal da correção	R\$ -	R\$ -	R\$ -
Custo mensal total (CT)	R\$ 1.715,82	R\$ 1.601,52	R\$ 1.567,75
Economia mensal		R\$ 114,30	R\$ 148,07
Período de análise (meses)	120	120	120
Taxa de juros mensal (%)	1,00%	1,00%	1,00%
Valor Presente Líquido (VPL)	R\$ 119.593,55	R\$ 113.832,34	R\$ 112.311,66
Economia no período	-	R\$ 5.761,21	R\$ 7.281,89
Taxa Interna de Retorno (TIR)	-	5,17%	4,85%

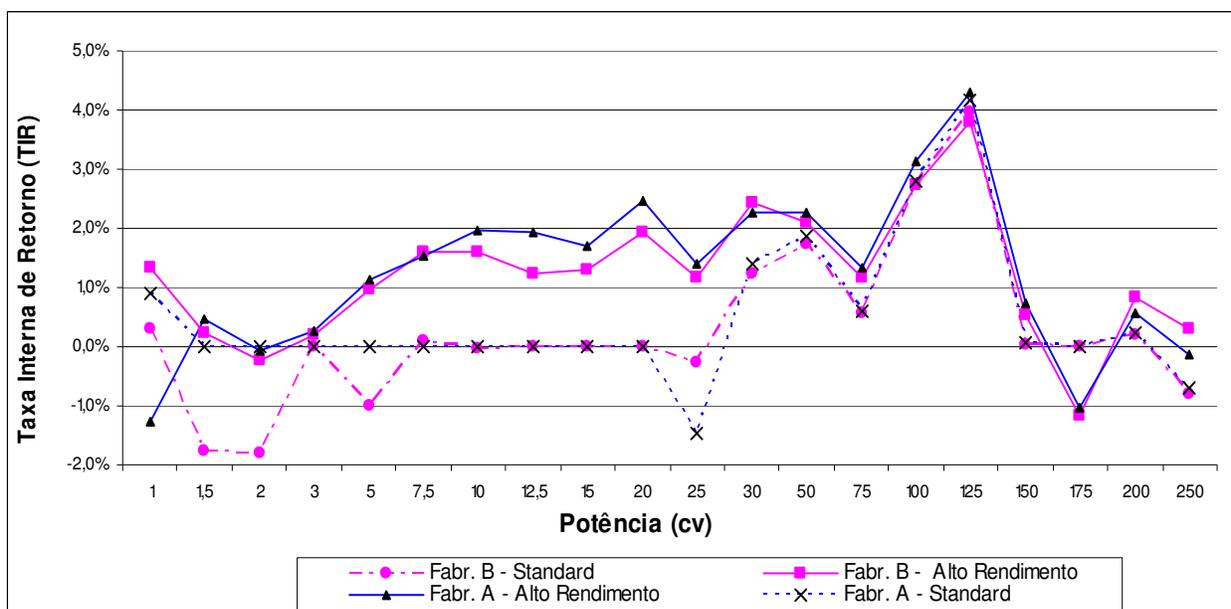
Percebe-se neste caso que houve uma pequena variação em relação a tabela 5.6, esta variação foi de aproximadamente de 1,0 % na TIR, só que nesta tabela observa-se uma melhor TIR para o motor Std (5,17%) contra (4,85%) para o motor AR.

Há que se destacar que na análise do VPL observa-se uma economia no período de R\$ 7.281,89 para o motor AR contra R\$ 5.761,21 para o motor Standard.

É importante lembrar que o custo de correção do fator de potência agregado a esta tabela leva em consideração apenas o custo inicial da correção, desprezando-se as perdas elétricas atribuídas a esta correção, tais como: perdas Joule (nos cabos e resistores de descarga²⁷) e as perdas dielétricas²⁸ ocorridas internamente aos capacitores.

Assim como nos cenários anteriores foi calculado a TIR para outras potências de motores e um outro fabricante de motor, na figura 5.6 é apresentado os resultados encontrados.

Figura 5.6 – Análise da TIR para motores 4 Pólos (TEFC) considerando a correção da energia reativa com capacitores.



Na análise da figura 5.6 observa-se grande semelhança com figura 5.5, com um pequeno aumento médio na TIR na ordem de 0,3%, isto demonstra que a inserção do custo inicial de correção da energia reativa aumenta a taxa de atratividade da análise de viabilidade de adequação de carga dos motores elétricos.

Esta constatação é importante, pois ao contabilizar as perdas Joule e dielétricas associadas aos capacitores ao longo do período de análise (10 anos), haverá um aumento na TIR do projeto de adequação de carga, ajudando a difundir esta prática nas indústrias brasileiras.

²⁷ Resistor de descarga: Resistor instalado em paralelo com os capacitores para descarregar a tensão nos seus terminais após seu desligamento.

²⁸ Perdas dielétricas: Perdas elétricas que ocorrem internamente no dielétrico do capacitor.

Devido a dificuldade de contabilizar estas perdas ao longo do período de análise optou-se por definir o quanto seria pago a concessionária de energia através de multa compensatória, sendo este o objeto de estudo a seguir.

5.7.3 Análise do VPL e TIR considerando a multa da energia reativa

O principal objetivo deste trabalho é identificar a influência da energia reativa na análise de viabilidade de troca de motores elétricos superdimensionados, e para tal na tabela 5.8 é acrescido os valores obtidos anteriormente no custo da energia reativa, caso a mesma não seja corrigida. Na sequência é realizada a análise de viabilidade econômica desta substituição.

Tabela 5.8 - Comparativo da análise do VPL e TIR considerando a multa da energia reativa

	Motor Atual Standard	Motor Proposto 1 Standard	Motor Proposto 2 Alto Rendimento
Descrição			
Custo inicial de aquisição (C_{ia})	R\$ -	R\$ 1.600,00	R\$ 2.400,00
Custo inicial de instalação (C_{ii})	R\$ -	R\$ 1.200,00	R\$ 1.200,00
Custo inicial Total (C_{iT})	R\$ -	R\$ 2.800,00	R\$ 3.600,00
Custo mensal energia ativa (C_{mea})	R\$ 1.715,82	R\$ 1.601,52	R\$ 1.567,75
Custo en. Reativa mensal tarifada	R\$ 915,10	R\$ 287,45	R\$ 330,05
Custo mensal total (CT)	R\$ 2.630,92	R\$ 1.888,97	R\$ 1.897,80
Período de análise (meses)	120	120	120
Taxa de juros mensal (%)	1,00%	1,00%	1,00%
Valor Presente Líquido (VPL)	R\$ 183.376,50	R\$ 134.462,20	R\$ 135.877,65
Economia no período	-	R\$ 48.914,30	R\$ 47.498,85
Taxa Interna de Retorno (TIR)	-	26%	20%

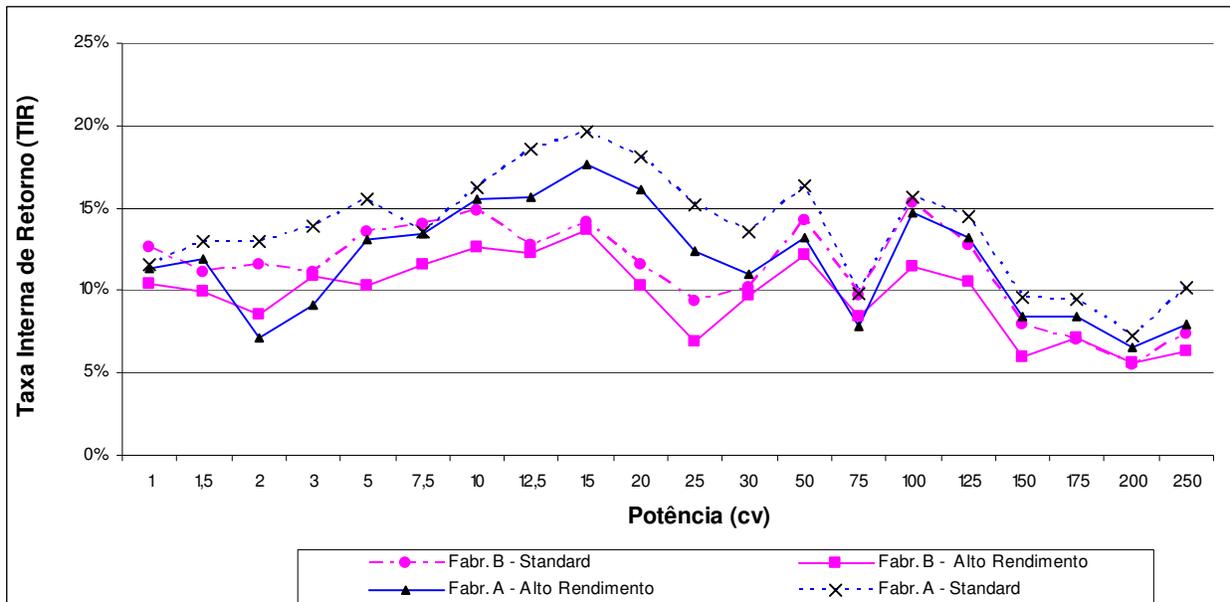
Na análise da tabela 5.8 se observa que a adequação de carga do motor instalado é vantajosa para ambos os casos e apresentam uma economia num período de 10 anos de R\$ 48.914,30 para o motor Standard e de R\$ 47.498,85 para o motor AR.

Neste caso se verifica uma maior vantagem econômica para o motor Standard, isto se deve ao fato do motor Standard adequado a carga requerer menos energia reativa do que o motor Alto Rendimento.

Observa-se ainda que a taxa interna de retorno mensal apresentou altos valores, sendo de 26% para o motor Standard e 20% para o motor AR, o que certamente motiva a adequação dos motores a carga acionada.

Para uma melhor avaliação deste cenário, também foi realizada uma avaliação para outras potências e outro fabricante de motores elétricos, e os resultados são apresentados na figura 5.7.

Figura 5.7 – Análise da TIR para motores 4 Pólos (TEFC) considerando a multa da energia reativa.



Fonte: Elaborado a partir dos catálogos dos fabricantes, WEG e Eberle.

Na análise desta figura observa-se que o motor Standard do fabricante “A” apresentou uma melhor taxa interna de retorno (TIR) em praticamente todas as potências, onde a mesma ficou situada entre 7,0% e 20%.

Neste gráfico se observa ainda que entre 5 e 250 cv o motor Alto Rendimento do fabricante “B” apresenta uma TIR menor ou igual que todos os demais motores.

Também se destaca que a taxa de atratividade para a adequação de carga nos casos que não se prevê a correção do fator de potência é elevada, ficando acima de 5% para qualquer potência e apresenta grandes diferenças entre os fabricantes analisados.

Estes resultados ressaltam que a análise de viabilidade de troca de um motor elétrico deve ser rigorosa e cada caso deve ser tratado individualmente.

Capítulo 6

Conclusões

No trabalho apresentado é evidenciado que o superdimensionamento dos motores elétricos presentes na indústria brasileira, acarreta em maior requisição de energia reativa nas instalações destas indústrias, aumentando suas perdas elétricas internas. Este superdimensionamento também diminui o rendimento do motor elétrico uma vez que os motores elétricos particularmente os nacionais possuem maior rendimento quando operam próximos a sua potência nominal, conforme curva característica do rendimento apresentada na figura 3.3.

Este trabalho também apresentou que a adequação de carga de um motor existente superdimensionado, ou seja, sua troca por outro motor de menor potência normalmente é vantajosa para ambos os casos, tanto para o motor Standard quanto para o motor Alto Rendimento (AR), e traz vários benefícios à empresa, tais como:

- Menor consumo de energia ativa (kWh);
- Aumento no fator de potência da instalação, ou seja, menor requisição de energia reativa (kVARh);
- Redução nos custos futuros com a manutenção, tanto dos motores como de seus equipamentos elétricos e mecânicos utilizados para seu funcionamento (rolamentos, contadores, relè térmico, disjuntor motor, etc.);
- Redução nos riscos de problemas com distorções harmônicas, uma vez que, como citado no capítulo 3, a correção do fator de potência com capacitores, aumenta o risco de ressonância na instalação.

Outra constatação foi que na análise de viabilidade apresentada sem a contabilização da energia reativa obteve-se uma maior vantagem econômica na instalação do motor AR, mas ao se contabilizar a multa pela não correção da energia reativa, a instalação do motor Standard se tornou mais vantajosa financeiramente que o motor AR, o que de certa forma foi surpreendente.

Esta inversão na viabilidade se deve ao fato de que o motor Standard adequado a carga possui um maior fator de potência, logo apresenta resultados mais satisfatórios na requisição de energia reativa do que o motor Alto Rendimento. Esta inferioridade no fator de potência foi observada na maioria das potências dos motores AR nacionais conforme demonstrado na figura 3.10 e também na maioria dos motores americanos (NEMA Premium) quando comparados ao motor Standard nacional figura 3.16.

Portanto é importante salientar que o motor Alto Rendimento embora possua um melhor rendimento que o motor Standard normalmente possui um menor fator de potência, logo projetos de substituição de motores devem estar atentos a este parâmetro e contabilizá-lo sempre que necessário.

Diante do exposto observa-se que a inserção da energia reativa nesta análise é importante, pois interfere diretamente na taxa interna de retorno (TIR) do investimento, quantificando um dado que até então era conhecido apenas como uma vantagem adicional nos projetos de adequação dos motores a carga aplicada. No estudo de caso apresentado a TIR elevou-se de 4% para 20%, demonstrando que a adequação de carga é um bom negócio para a indústria e que deve ser mais difundida e incentivada através de financiamentos e incentivos governamentais, pois a economia de energia interessa ao país, a indústria, ao meio ambiente e todos os cidadãos, que indiretamente são beneficiados.

Ainda neste trabalho se constatou que existem grandes diferenças técnicas entre os fabricantes de motores elétricos, logo ao se propor um estudo de troca de motores ou adequação de carga, deve ser avaliado e contabilizado todos os dados técnicos, tanto dos motores existentes quanto dos motores propostos para substituição, optando pelo motor do fabricante que apresentar melhor resultado financeiro na análise. Ressalta-se que ao se comparar os dados de rendimento com fabricantes de motores importados deve-se ter o cuidado de analisar o método de ensaio do rendimento adotado pelo fabricante, conforme citado no capítulo 2, a fim de não prejudicar os resultados da análise.

Pelo exposto reafirma-se que a decisão de troca de um motor tem que ser muito bem avaliada, e cada caso deve ser analisado como se fosse único e contabilizado todos os dados citados, para evitar erros ou distorções na análise de viabilidade de troca do motor elétrico.

Como demonstrado no trabalho a adequação de carga não deve ser confundida com a troca de motores Standards por motores de Alto Rendimento, pois para a adequação pode ser utilizado motores Standards já existentes (desde que não esteja no final de sua vida útil) o que diminui os custos iniciais, tornando o projeto mais atrativo financeiramente, além do fato de evitar que seja descartado um motor que possa trabalhar normalmente, o que do ponto de vista ambiental não é adequado.

Este trabalho vem, portanto contribuir para que seja repensado pelos fabricantes de motores elétricos uma forma de melhorar o rendimento dos motores sem reduzir o fator de potência dos mesmos ou ainda se possível elevá-lo a um valor mais próximo do valor de referência vigente atualmente no Brasil (0,92) conforme resolução 456 da ANEEL.

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;
- Criação de programas computacionais de análise de viabilidade de troca de motores superdimensionados considerando a energia reativa;
- Estudo detalhado do custo total de correção da energia reativa através de capacitores;
- Estudo detalhado de comparação dos métodos de ensaio de rendimento utilizados em outros países.

Anexo I – Grau de proteção

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

	1º Algarismo	2º Algarismo
Algarismo	Indicação	Indicação
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 ²⁹
7	-	Imersão temporária
8	-	Imersão permanente

Fonte: WEG, 2005.

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

IP21 - IP22 - IP23 --→ Também classificados como motores abertos

IP44 -IP55 --→ Também classificados como motores fechados

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.

²⁹ Vagalhões: grandes ondas de mar muito agitado.

Anexo II - Tipos de categoria

Categoria D

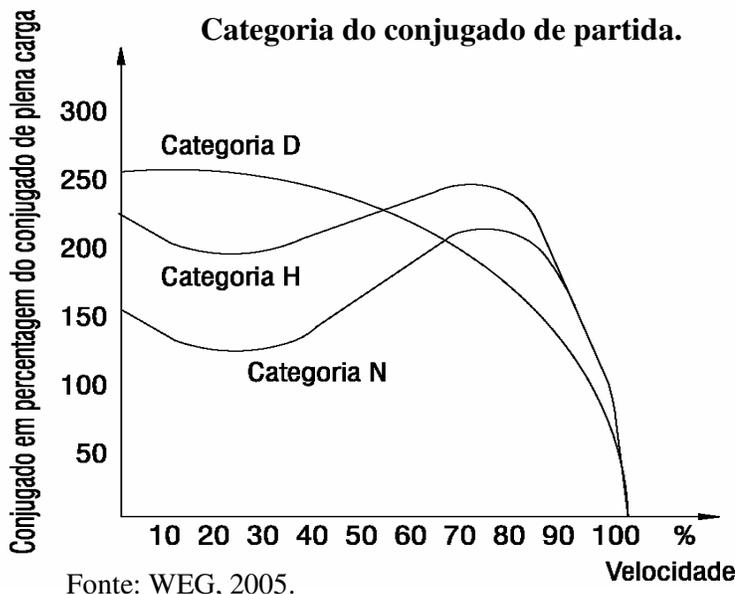
Conjugado de partida alto, corrente de partida normal; alto escorregamento (+ de 5%). Usados em prensas excêntricas e máquinas semelhantes, onde a carga apresenta picos periódicos. Usados também em elevadores e cargas que necessitam de conjugados de partida muito altos e corrente de partida limitada. As curvas conjugado X velocidade das diferentes categorias podem ser vistas na figura a seguir.

Categoria H

Conjugado de partida alto, corrente de partida normal; baixo escorregamento. Usados para cargas que exigem maior conjugado na partida, como peneiras, transportadores carregadores, cargas de alta inércia, britadores, etc.

Categoria N

Conjugado de partida normal, corrente de partida normal; baixo escorregamento. Constituem a maioria dos motores encontrados no mercado e prestam-se ao acionamento de cargas normais, como bombas, máquinas operatrizes, ventiladores.

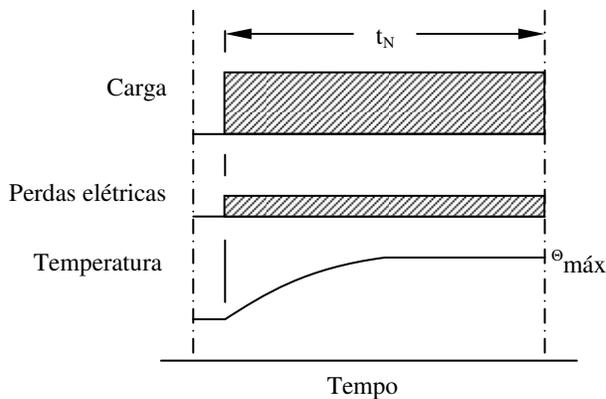


Anexo III – Regime de trabalho dos motores elétricos

Regime de tempo contínuo (S1)

O regime S1 pode ser exemplificado pelo acionamento de um sistema de bombeamento de água de grande porte, que usualmente permanece em operação com potência constante por períodos muito maiores que muitas constantes térmicas de tempo do motor que, quando é desligado, somente volta a ser religado após o motor ter entrado em equilíbrio térmico com o ambiente.

Regime de funcionamento S1.



Fonte: Lobosco, 1988.

Onde:

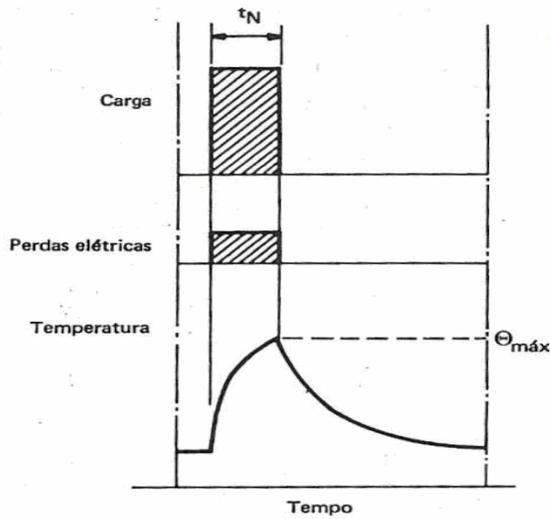
t_N = funcionamento em carga constante
 $\theta_{\text{máx}}$ = temperatura máxima atingida

Regime de tempo limitado (S2)

O regime S2 caracteriza-se pelo funcionamento a carga constante, durante certo tempo, inferior ao necessário para atingir o equilíbrio térmico, seguido de um período de repouso de duração suficiente para restabelecer a igualdade de temperatura com o meio refrigerante.

Este regime tem como exemplo o acionamento de comporta de vertedouro de barragem, onde as operações são de curta duração e, tão pouco frequentes que certamente a temperatura do motor retornará a do ambiente antes de uma operação subsequente.

Regime de funcionamento S2.



Onde:

t_N = funcionamento em carga constante.

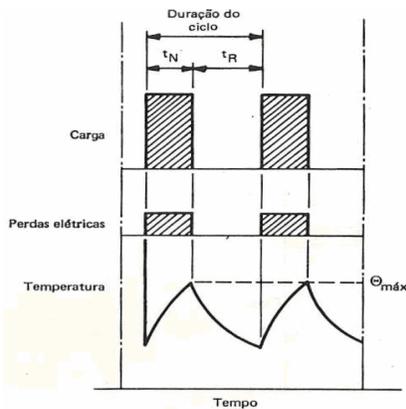
$\Theta_{máx}$ = temperatura máxima atingida durante o ciclo.

Fonte: Lobosco, 1988.

Regime intermitente periódico (S3)

Seqüência de ciclos de regime idênticos, cada qual consistindo de um período de partida, um período de funcionamento a carga constante, e um período de repouso, sendo tais períodos muito curtos para que se atinja o equilíbrio térmico durante um ciclo de regime e no qual a corrente de partida não afete de modo significativo a elevação de temperatura;

Regime de funcionamento S3.



Onde:

t_N = tempo de funcionamento em carga constante.

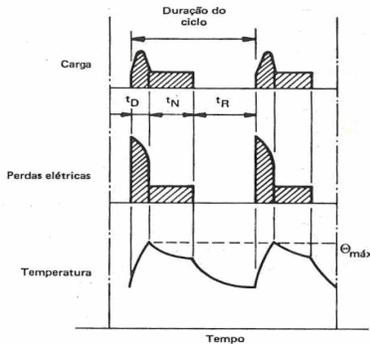
t_R = tempo de repouso.

$\Theta_{máx}$ = temperatura máxima atingida durante o ciclo.

Fonte: Lobosco, 1988.

Regime intermitente periódico com partidas (S4)

Regime de funcionamento S4.



Onde:

t_D = Partida.

t_N = Funcionamento em carga constante.

t_R = Repouso.

$\Theta_{m\acute{a}x}$ = temperatura máxima atingida durante o ciclo.

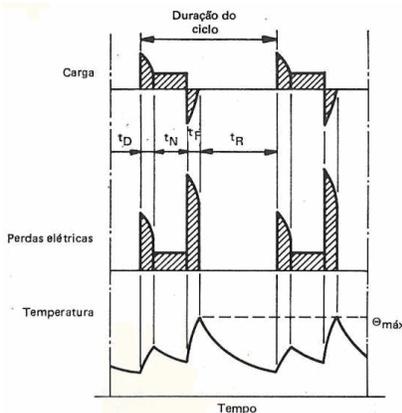
Fonte: Lobosco, 1988.

Seqüência de ciclos de regime idênticos, cada qual consistindo de um período de partida, um período de funcionamento a carga constante e um período de repouso, sendo tais períodos muito curtos para que atinja o equilíbrio térmico.

Regime intermitente periódico com frenagem elétrica (S5)

Seqüência de ciclos de regime idênticos, cada qual consistindo de um período de partida, um período de funcionamento a carga constante, um período de frenagem elétrica e um período de repouso, sendo tais períodos muito curtos para que atinja o equilíbrio térmico.

Regime de funcionamento S5.



Onde:

t_D = Partida.

t_N = Funcionamento em carga constante.

t_F = Frenagem elétrica.

t_R = Repouso.

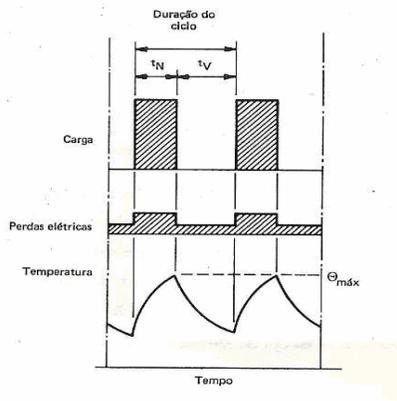
$\Theta_{m\acute{a}x}$ = temperatura máxima atingida durante o ciclo.

Fonte: Lobosco, 1988.

Regime de funcionamento contínuo periódico com carga intermitente (S6)

Seqüência de ciclos de regime idênticos, cada qual consistindo de um período de funcionamento a carga constante e de um período de funcionamento em vazio, não existindo período de repouso. S6 é usualmente caracterizado como contínuo com carga intermitente.

Regime de funcionamento S6.



Onde:

t_F = tempo de frenagem elétrica.

t_V = tempo de funcionamento em vazio.

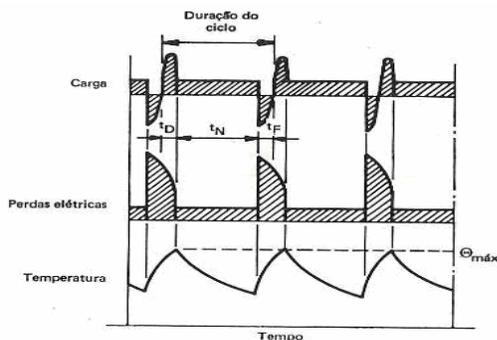
$\Theta_{máx}$ = temperatura máx. atingida durante o ciclo.

Fonte: Lobosco, 1988.

Regime de funcionamento contínuo periódico com frenagem elétrica (S7)

Seqüência de ciclos de regimes idênticos, cada qual consistindo de um período de partida, de um período de funcionamento a carga constante e um período de frenagem elétrica, não existindo o período de repouso.

Regime de funcionamento S7.



Onde:

t_D = tempo de partida.

t_N = tempo de funcionamento em carga constante.

t_F = tempo de frenagem elétrica.

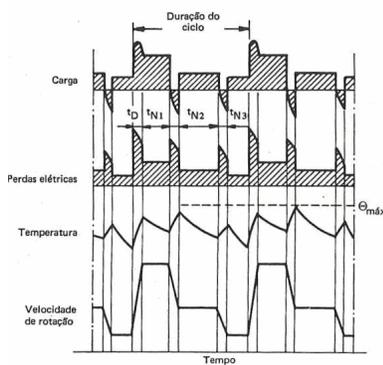
$\Theta_{máx}$ = temperatura máx. atingida durante o ciclo.

Fonte: Lobosco, 1988.

Regime de funcionamento contínuo com mudança periódica na relação carga/velocidade de rotação (S8)

Sequência de ciclos de regimes idênticos, cada ciclo consistindo de um período de partida e um período de funcionamento a carga constante, correspondendo a uma velocidade de rotação pré-determinada, seguidos de um ou mais períodos de funcionamento a outras cargas constantes, correspondentes a diferentes velocidades de rotação. Não existe período de repouso.

Regime de funcionamento S8.



Onde:

t_{F1} , t_{F2} = tempo de frenagem elétrica.

t_D = tempo de partida.

t_{N1} , t_{N2} , t_{N3} = tempo de funcionamento em carga constante

$\Theta_{máx}$ = temperatura máxima atingida durante o ciclo.

Fonte: Lobosco, 1988.

Anexo IV – Efeito da variação da tensão sobre o motor elétrico

Característica	Variação da tensão nominal	
	110%	90%
Torque		
- De partida, máximo e de operação.	Aumenta 21%	Diminui 19%
Rotação		
- Plena carga	Aumenta 1%	Diminui 1,5%
- Escorregamento	Diminui 17%	Aumenta 23%
Rendimento		
- Plena carga	Aumenta 0,5 a 1 ponto	Decresce 2 pontos
- ½ carga	Diminui 1 a 2 pontos	Aumenta 1 a 2 pontos
Fator de potência		
- Plena carga	Diminui 3 pontos	Aumenta 1 ponto
- ½ carga	Diminui 5 a 6 pontos	Aumenta 4 a 5 pontos
Corrente		
- Partida	Aumenta 10 a 12%	Diminui 10 a 12%
- Plena carga	Diminui 7%	Aumenta 11%
Temperatura		
	Diminui 3 a 4 °C	Aumenta 6 a 7 °C
Capacidade de sobrecarga		
	Aumenta 21%	Diminui 19%

Fonte: Eletrobrás, 2001.

Anexo V - Preços de tarifas de energia elétrica praticadas na CPFL – Paulista

Resolução No. 627/ANEEL DOU de 08/04/2008.

Estrutura Horo-Sazonal	Demanda R\$/ kW		Consumo - R\$/ MWh				Ultrapassagem R\$/ kW	
			Período Seco		Período Úmido			
AZUL	Ponta	Fora de Ponta	Ponta	Fora de Ponta	Ponta	Fora de Ponta	Ponta	Fora de Ponta
A2 (88 a 138 kV)	14,61	1,86	245,48	151,57	221,63	137,74	43,83	5,58
A2 (88 a 138 kV) - Classe Residencial e Rural	13,93	1,78	234,10	144,55	211,36	131,36	41,79	5,34
A3 (69 kV)	20,46	3,80	245,48	151,57	221,63	137,74	61,38	11,40
A3 (69 kV) - Classe Residencial e Rural	19,51	3,62	234,10	144,55	211,36	131,36	58,53	10,86
A3a (30 a 44 kV)	20,48	4,61	245,48	151,57	221,63	137,74	61,44	13,83
A3a (30 a 44 kV) - Classe Residencial e Rural	19,54	4,40	234,10	144,55	211,36	131,36	58,62	13,20
<u>A4 (2,3 a 25 kV)</u>	<u>24,88</u>	<u>6,06</u>	<u>245,48</u>	<u>151,57</u>	<u>221,63</u>	<u>137,74</u>	<u>74,64</u>	<u>18,18</u>
A4 (2,3 a 25 kV) - Classe Residencial e Rural	23,73	5,78	234,10	144,55	211,36	131,36	71,19	17,34
AS (Subterrâneo)	26,05	9,29	256,83	158,58	231,93	144,10	78,15	27,87
AS (Subterrâneo) - Residencial e Rural	24,84	8,86	244,93	151,23	221,18	137,42	74,52	26,58
VERDE								
A3a (30 a 44 kV)	4,61		721,13	151,57	697,29	137,74		13,83
A3a (30 a 44 kV) - Classe Residencial e Rural	4,40		687,72	144,55	664,98	131,36		13,20
<u>A4 (2,3 a 25 kV)</u>	<u>6,06</u>		<u>823,21</u>	<u>151,57</u>	<u>799,37</u>	<u>137,74</u>		<u>18,18</u>
A4 (2,3 a 25 kV) - Classe Residencial e Rural	5,78		785,07	144,55	762,33	131,36		17,34
A4 (2,3 a 25 kV) - Coop Eletrificação Rural	4,67		416,30	43,75	409,47	38,66		14,01
AS (Subterrâneo)	9,29		861,45	158,58	836,54	144,10		27,87
AS (Subterrâneo) - Classe Residencial e Rural	8,86		821,53	151,23	797,78	137,42		26,58
Grupo A Convencional					Consumo	Demanda	Ultrapassagem	
					R\$ / MWh	R\$ / kW	R\$ / kW	
A3a (30 kV a 44 kV)					166,28	14,33	42,99	
A3a (30 kV a 44 kV) - Classes Residencial e Rural					158,57	13,67	41,01	
<u>A4 (2,3 kV a 25 kV)</u>					<u>164,32</u>	<u>18,94</u>	<u>56,82</u>	
A4 (2,3 kV a 25 kV) - Classes Residencial e Rural					156,70	18,07	54,21	
A4 (2,3 kV a 25 kV) - Coop Eletrificação Rural					77,73	5,31	15,93	
AS (Subterrâneo)					171,92	28,01	84,03	

Grupo B	Consumo	Demanda
	R\$/MWh	R\$/kW
Residencial - Normal	276,40	
Baixa Renda		Desconto
0 a 30 kWh	92,15	66,66
31 a 80 kWh	159,64	42,24
81 a 100 kWh	161,17	41,69
101 a 200 kWh	241,75	12,54
201 a 220 kWh	268,61	2,82
> 220 kWh	268,61	2,82
Rural	149,30	
Coop Eletrificação Rural	96,55	
Serviço Público de Irrigação	137,32	
<u>Demais Classes</u>	<u>249,76</u>	
Iluminação Pública		
B4a - Rede de Distribuição	122,75	
B4b - Bulbo da Lâmpada	134,71	

Resolução No. 627/ANEEL DOU de 08/04/2008. Tarifas SEM os tributos Federais PIS e COFINS, inclusos no preço. ANEXOS I, IA e IB.

Vigência: A partir de 08/04/2008.

A CPFL Paulista adicionará, mensalmente, os valores de PIS/COFINS.

Anexo VI - Custo da correção do FP com banco fixo de capacitores

Potência do Banco: 210 kVAr / 380 V

Composição: 14 capacitores de 15 kVAr ligados manualmente através de disjuntores.

item	Unid.	Qde.	Material	Valor Unit.	Subtotal
1.1	pç	14	Disjuntor tripolar caixa moldada 50 A Fabr. WEG	R\$ 156,00	R\$ 2.184,00
1.2	pç	14	Capacitor 15 kVAr / 380 V - Fabr. WEG	R\$ 148,00	R\$ 2.072,00
1.3	kg	1	Barra de cobre 2" x 1/4" 2,100 kg/m	R\$ 63,80	R\$ 63,80
1.4	pç	2	Canaleta de PVC 50x50 mm	R\$ 14,20	R\$ 28,40
1.5	pç	1	Trilho para fixação DIN	R\$ 9,58	R\$ 9,58
1.6	pç	50	Terminal de compressão 10 mm ²	R\$ 0,40	R\$ 20,00
1.7	pç	40	Terminal olhal 10 mm ² pré isolado	R\$ 0,43	R\$ 17,20
1.8	m	50	Cabo Flexível 10 mm ² / 750 V - Preto	R\$ 2,16	R\$ 108,00
1.9	m	50	Cabo Flexível 1 mm ² / 750 V - Vermelho	R\$ 0,29	R\$ 14,50
1.10	m	20	Cabo Flexível 1 mm ² / 750 V - Branco	R\$ 0,29	R\$ 5,80
1.11	pç	50	Terminal pino tubular 1 mm ²	R\$ 0,07	R\$ 3,50
1.12	pç	30	Abraçadeira plástica T18R	R\$ 0,05	R\$ 1,50
1.13	m	5	Spiraduto 1/4" preto	R\$ 0,87	R\$ 4,35
1.14	pç	50	Arrebite POP alumínio 5x10 mm	R\$ 0,05	R\$ 2,50
1.15	pç	4	Parafuso cabeça redonda 1/4" x 3/4"	R\$ 0,13	R\$ 0,52
1.16	pç	25	Arruela lisa 1/4"	R\$ 0,05	R\$ 1,25
1.17	pç	3	Isolador Paralelo IBTP 30 x 60 mm 3/8" - Fabr. Cebel	R\$ 4,00	R\$ 12,00
1.18	pç	1	Vergalhão roscado 1/4" x 3 m	R\$ 4,69	R\$ 4,69
1.19	pç	30	Porca sextavada 1/4"	R\$ 0,10	R\$ 3,00
1.20	m	4	Tubo termoencolhível 1x4"	R\$ 3,24	R\$ 12,96
1.21	pç	10	Parafuso 3/16" x 1/2" cabeça redonda	R\$ 0,05	R\$ 0,50
1.22	pç	10	Parafuso 3/16" x 3/4" cabeça sextavada de latão	R\$ 1,15	R\$ 11,50
1.23			Instalação (cabos + acessórios)		R\$ 1.700,00
Total do Material					R\$ 6.281,55

Custo M. Obra Montagem		R\$ -
Custo M. Obra Instalação		R\$ 2.800,00
Total Mão de Obra		R\$ 2.800,00

Total Geral (210 kVAr / 380V)		R\$ 9.081,55
Custo Médio (R\$ / kVAr)		R\$ 43,25

Anexo VII - Custo da correção do FP com banco automático de capacitores

Potência do Banco: 210 kVAr / 380 V

Composição: 10 estágios de 15 kVAr + 2 estágios de 30 kVAr.

Item	Unid.	Qde.	Material	Valor Unitário	Subtotal
1.1	pc	1	Painel de montagem 1900x800x400 mm completo	R\$ 1.820,00	R\$ 1.820,00
1.2	pc	1	Controlador de fator de potência 12 estágios	R\$ 1.254,00	R\$ 1.254,00
1.3	pc	1	Alarme bitonal 220 V	R\$ 129,00	R\$ 129,00
1.4	pc	1	TC tipo janela 800/5A x 3" - Fabr. Kron	R\$ 178,00	R\$ 178,00
1.5	pc	1	Disjuntor Bipolar 6 A / 3 kA - Fabr. Siemens	R\$ 63,10	R\$ 63,10
1.6	pc	14	Disjuntor tripolar caixa moldada 50 A Fabr. WEG	R\$ 156,00	R\$ 2.184,00
1.7	pc	14	Contator capacitivo 15 kVAr / 380 V - Fabr. WEG	R\$ 196,00	R\$ 2.744,00
1.8	pc	14	Capacitor 15 KVAR / 380 V - Fabr. WEG	R\$ 148,00	R\$ 2.072,00
1.9	kg	1	Barra de cobre 2" x 1/4" 2,100 kg/m	R\$ 63,80	R\$ 63,80
1.10	pc	2	Canaleta de PVC 50x50 mm	R\$ 14,20	R\$ 28,40
1.11	pc	1	Trilho para fixação DIN	R\$ 9,58	R\$ 9,58
1.12	pc	80	Terminal de compressão 10 mm ²	R\$ 0,40	R\$ 32,00
1.13	pc	80	Terminal olhal 10 mm ² pré isolado	R\$ 0,43	R\$ 34,40
1.14	m	80	Cabo Flexível 10 mm ² / 750 V - Preto	R\$ 2,16	R\$ 172,80
1.15	m	80	Cabo Flexível 1 mm ² / 750 V - Vermelho	R\$ 0,29	R\$ 23,20
1.16	m	30	Cabo Flexível 1 mm ² / 750 V - Branco	R\$ 0,29	R\$ 8,70
1.17	pc	80	Terminal pino tubular 1 mm ²	R\$ 0,07	R\$ 5,60
1.18	pc	60	Abraçadeira plástica T18R	R\$ 0,05	R\$ 3,00
1.19	m	2	Spiraduto 1/4" preto	R\$ 0,87	R\$ 1,74
1.20	pc	50	Arrebite POP alumínio 5x10 mm	R\$ 0,05	R\$ 2,50
1.21	pc	4	Parafuso cabeça redonda 1/4" x 3/4"	R\$ 0,13	R\$ 0,52
1.22	pc	25	Arruela lisa 1/4"	R\$ 0,05	R\$ 1,25
1.23	pc	14	Supressor RC 130-250 V Fabr. WEG	R\$ 22,71	R\$ 317,94
1.24	pc	1	Chave 2 posições 5A - Fabr. Margirus	R\$ 17,87	R\$ 17,87
1.25	pc	3	Isolador Paralelo IBTP 30 x 60 mm 3/8" - Fabr. Cebel	R\$ 4,00	R\$ 12,00
1.26	pc	1	Vergalhão roscado 1/4" x 3 m	R\$ 4,69	R\$ 4,69
1.27	pc	30	Porca sextavada 1/4"	R\$ 0,10	R\$ 3,00
1.28	m	4	Tubo termoencolhível 1x4"	R\$ 3,24	R\$ 12,96
1.29	pc	4	Spray de tinta esmalte (vermelho, branco, azul e verde)	R\$ 13,53	R\$ 54,12
1.30	pc	1	Ventilador de painel 120x120 mm	R\$ 41,30	R\$ 41,30
1.31	pc	2	Grelha para ventilador 120x120 mm	R\$ 35,23	R\$ 70,46
1.32	pc	20	Parafuso 3/16" x 1/2" cabeça redonda	R\$ 0,05	R\$ 1,00
1.33	pc	70	Parafuso 3/16" x 3/4" cabeça sextavada de latão	R\$ 1,15	R\$ 80,50
1.34	pc	70	Arruela lisa 3/16" de latão	R\$ 0,52	R\$ 36,40
1.35	pc	6	Parafuso 5 mm x12 mm de cabeça redonda	R\$ 0,07	R\$ 0,42
1.36	pc	70	Arruela de pressão 3/16" inox	R\$ 0,06	R\$ 4,20
1.37	pc	1	Placa de acrílico 250x300 mm	R\$ 58,00	R\$ 58,00
1.38	litro	0,5	Nitrato de Prata	R\$ 69,30	R\$ 34,65
1.39	pc	1	Chave comutadora com chave 2 posição	R\$ 25,35	R\$ 25,35
1.40	pc	1	Chave seccionadora NH 630 A - Fabr.Siemens	R\$ 393,45	R\$ 393,45
1.41	pc	3	Fusível NH 600 A - Fabr. Siemens	R\$ 32,05	R\$ 96,15
1.42			Instalação (cabos + acessórios)		R\$ 1.800,00
Total do Material					R\$ 13.896,05

Custo M. Obra Montagem	R\$ 2.900,00
Custo M. Obra Instalação	R\$ 1.900,00
Total Mão de Obra	R\$ 4.800,00
Total Geral (210 kVAr / 380 V)	R\$ 18.696,05
Custo Médio (R\$ / kVAr)	R\$ 89,03

Anexo VIII - Custo da correção do FP por grupos de cargas

Potência do Banco: 210 kVAr / 380 V

Composição: 8 grupos de 15 kVAr + 9 grupos de 10 kVAr

item	Unid.	Qde.	Material	Valor Unitário	Subtotal
1.1	pç	8	Disjuntor tripolar caixa moldada 50 A Fabr. WEG	R\$ 156,00	R\$ 1.248,00
1.2	pç	9	Disjuntor tripolar caixa moldada 40 A Fabr. WEG	R\$ 156,00	R\$ 1.404,00
1.3	pç	17	Contator capacitivo 15 kVAr / 380 V - Fabr. WEG	R\$ 196,00	R\$ 3.332,00
1.4	pç	8	Capacitor 15 kVAr / 380 V - Fabr. WEG	R\$ 147,00	R\$ 1.176,00
1.5	pç	9	Capacitor 10 kVAr / 380 V - Fabr. WEG	R\$ 126,00	R\$ 1.134,00
1.8	pç	1	Trilho para fixação DIN	R\$ 9,58	R\$ 9,58
1.9	pç	50	Terminal de compressão 10 mm ²	R\$ 0,40	R\$ 20,00
1.10	pç	50	Terminal olhal 10 mm ² pré isolado	R\$ 0,43	R\$ 21,50
1.11	m	50	Cabo Flexível 10 mm ² / 750 V - Preto	R\$ 2,16	R\$ 108,00
1.12	m	50	Cabo Flexível 1 mm ² / 750 V - Vermelho	R\$ 0,29	R\$ 14,50
1.13	m	10	Cabo Flexível 1 mm ² / 750 V - Branco	R\$ 0,29	R\$ 2,90
1.14	pç	30	Terminal pino tubular 1 mm ²	R\$ 0,07	R\$ 2,10
1.15	pç	20	Abraçadeira plástica T18R	R\$ 0,05	R\$ 1,00
1.16	m	2	Spiraduto 1/4" preto	R\$ 0,87	R\$ 1,74
1.17	pç	20	Arrebite POP alumínio 5x10 mm	R\$ 0,05	R\$ 1,00
1.18	pç	4	Parafuso cabeça redonda 1/4" x 3/4"	R\$ 0,13	R\$ 0,52
1.19	pç	10	Arruela lisa 1/4"	R\$ 0,05	R\$ 0,50
1.22	pç	3	Isolador Paralelo IBTP 30 x 60 mm 3/8" - Fabr. Cebel	R\$ 4,00	R\$ 12,00
1.23	pç	1	Vergalhão roscado 1/4" x 3m	R\$ 4,69	R\$ 4,69
1.24	pç	10	Porca sextavada 1/4"	R\$ 0,10	R\$ 1,00
1.25	m	1	Tubo termoencolhível 1x4"	R\$ 3,24	R\$ 3,24
1.29	pç	15	Parafuso 3/16" x 1/2" cabeça redonda	R\$ 0,05	R\$ 0,75
1.30	pç	20	Parafuso 3/16" x 3/4" cabeça sextavada de latão	R\$ 1,15	R\$ 23,00
1.39			Instalação (cabos + acessórios)		R\$ 800,00
Total do Material					R\$ 9.322,02

Custo M. Obra Montagem		R\$ 2.250,00
Custo M. Obra Instalação		R\$ -
Total Mão de Obra		R\$ 2.250,00

Total Geral (210 kVAr / 380 V)		R\$ 11.572,02
Custo Médio (R\$ / kVAr)		R\$ 55,10

Anexo IX - Custo da correção do FP de forma localizada

Potência do Banco: 210 kVAr / 380 V

Composição: Capacitores (2 x 15 kVAr + 7 x 10 kVAr + 11 x 5 kVAr + 22 x 2,5 kVAr)

item	Unid.	Qde.	Material	Valor Unitário	Subtotal
1.1	pç.	2	Disjuntor tripolar caixa moldada 50 A Fabr. WEG	R\$ 156,00	R\$ 312,00
1.2	pç.	7	Disjuntor tripolar caixa moldada 40 A Fabr. WEG	R\$ 156,00	R\$ 1.092,00
1.3	pç.	33	Disjuntor tripolar caixa moldada 32 A Fabr. WEG	R\$ 156,00	R\$ 5.148,00
1.4	pç.	2	Capacitor 15 kVAr / 380 V - Fabr. WEG	R\$ 147,00	R\$ 294,00
1.5	pç.	7	Capacitor 10 kVAr / 380 V - Fabr. WEG	R\$ 126,00	R\$ 882,00
1.6	pç.	11	Capacitor 5 kVAr / 380 V - Fabr. WEG	R\$ 116,00	R\$ 1.276,00
1.7	pç.	22	Capacitor 2,5 kVAr / 380 V - Fabr. WEG	R\$ 94,00	R\$ 2.068,00
1.8	pç.	1	Trilho para fixação DIN	R\$ 9,58	R\$ 9,58
1.9	pç.	40	Terminal de compressão 10 mm ²	R\$ 0,40	R\$ 16,00
1.10	pç.	150	Terminal de compressão 6 mm ²	R\$ 0,23	R\$ 34,50
1.11	pç.	50	Terminal olhal 10 mm ² pré isolado	R\$ 0,43	R\$ 21,50
1.12	m	40	Cabo Flexível 10 mm ² / 750 V - Preto	R\$ 2,16	R\$ 86,40
1.13	m	95	Cabo Flexível 6 mm ² / 750 V - Preto	R\$ 1,16	R\$ 110,20
1.14	m	70	Cabo Flexível 1 mm ² / 750 V - Vermelho	R\$ 0,29	R\$ 20,30
1.15	m	20	Cabo Flexível 1 mm ² / 750 V - Branco	R\$ 0,29	R\$ 5,80
1.16	pç.	30	Terminal pino tubular 1 mm ²	R\$ 0,07	R\$ 2,10
1.17	pç.	20	Abraçadeira plástica T18R	R\$ 0,05	R\$ 1,00
1.18	m	2	Spiraduto 1/4" preto	R\$ 0,87	R\$ 1,74
1.19	pç.	30	Rebite POP alumínio 5x10 mm	R\$ 0,05	R\$ 1,50
1.20	pç.	4	Parafuso cabeça redonda 1/4" x 3/4"	R\$ 0,13	R\$ 0,52
1.21	pç.	10	Aruela lisa 1/4"	R\$ 0,05	R\$ 0,50
1.22	pç.	1	Vergalhão roscado 1/4" x 3 m	R\$ 4,69	R\$ 4,69
1.23	pç.	10	Porca sextavada 1/4"	R\$ 0,10	R\$ 1,00
1.24	m	4	Tubo termoencolhível 1/4"	R\$ 3,24	R\$ 12,96
1.25	pç.	20	Parafuso 3/16" x 1/2" cabeça redonda	R\$ 0,05	R\$ 1,00
1.26	pç.	20	Parafuso 3/16" x 3/4" cabeça sextavada de latão	R\$ 1,15	R\$ 23,00
1.27			Instalação (cabos + acessórios)		R\$ 1.100,00
Total do Material					R\$ 12.526,29

Custo M. Obra Montagem		R\$ 3.600,00
Custo M. Obra Instalação		R\$ -
Total Mão de Obra		R\$ 3.600,00

Total Geral (210 kVAr / 380 V)		R\$ 16.126,29
Custo Médio (R\$ / kVAr)		R\$ 76,79

Anexo X - Custo da correção do FP de forma mista

Potência Total do Banco de Capacitores: 210 kVAr / 380 V

Composição: 6 estágios 15 kVAR (automáticos) + 4 de 10 kVAr (correção em grupo) + 2 de 15 KVAR (fixo) + 6 estágios de 5 kVAr + 8 de 2,5 kVAr (correção na carga).

item	Unid.	Ode.	Material	Valor Unitário	Subtotal
1.1	pc.	1	Painel de montagem 1700x800x400 mm completo	R\$ 1.650,00	R\$ 1.650,00
1.2	pc.	1	Controlador de fator de potência 12 estágios	R\$ 1.254,00	R\$ 1.254,00
1.3	pc.	1	Alarme bitonal 220 V	R\$ 129,00	R\$ 129,00
1.4	pc.	1	TC tipo janela 400/5A x 3" - Fabr. Kron	R\$ 178,00	R\$ 178,00
1.5	pc.	2	Disjuntor Bipolar 6 A / 3 kA - Fabr. Siemens	R\$ 63,10	R\$ 126,20
1.6	pc.	8	Disjuntor tripolar caixa moldada 50 A Fabr. WEG	R\$ 156,00	R\$ 1.248,00
1.7	pc.	4	Disjuntor tripolar caixa moldada 40 A Fabr. WEG	R\$ 156,00	R\$ 624,00
1.8	pc.	14	Disjuntor tripolar caixa moldada 32 A Fabr. WEG	R\$ 156,00	R\$ 2.184,00
1.9	pc.	10	Contator capacitivo 15 kVAr / 380 V - Fabr. WEG	R\$ 196,00	R\$ 1.960,00
1.10	pc.	8	Capacitor 15 kVAr / 380 V - Fabr. WEG	R\$ 147,00	R\$ 1.176,00
1.11	pc.	4	Capacitor 10 kVAr / 380 V - Fabr. WEG	R\$ 126,00	R\$ 504,00
1.12	pc.	6	Capacitor 5 kVAr / 380 V - Fabr. WEG	R\$ 116,00	R\$ 696,00
1.13	pc.	8	Capacitor 2,5 kVAr / 380 V - Fabr. WEG	R\$ 94,00	R\$ 752,00
1.14	kg	0,5	Barra de cobre 2" x 1/4" 2,100 kg/m	R\$ 63,80	R\$ 31,90
1.15	pc.	1	Canaleta de PVC 50x50 mm	R\$ 14,20	R\$ 14,20
1.16	pc.	1	Trilho para fixação DIN	R\$ 9,58	R\$ 9,58
1.17	pc.	50	Terminal de compressão 10 mm ²	R\$ 0,40	R\$ 20,00
1.18	pc.	50	Terminal olhal 10 mm ² pré isolado	R\$ 0,43	R\$ 21,50
1.19	m	100	Cabo Flexível 10 mm ² / 750 V - Preto	R\$ 2,16	R\$ 216,00
1.20	m	100	Cabo Flexível 1 mm ² / 750 V - Vermelho	R\$ 0,29	R\$ 29,00
1.21	m	30	Cabo Flexível 1 mm ² / 750 V - Branco	R\$ 0,29	R\$ 8,70
1.22	pc.	30	Terminal pino tubular 1 mm ²	R\$ 0,07	R\$ 2,10
1.23	pc.	20	Abraçadeira plástica T18R	R\$ 0,05	R\$ 1,00
1.24	m	2	Spiraduto 1/4" preto	R\$ 0,87	R\$ 1,74
1.25	pc.	20	Arrebite POP alumínio 5x10 mm	R\$ 0,05	R\$ 1,00
1.26	pc.	4	Parafuso cabeça redonda 1/4" x 3/4"	R\$ 0,13	R\$ 0,52
1.27	pc.	10	Aruela lisa 1/4"	R\$ 0,05	R\$ 0,50
1.28	pc.	10	Supressor RC 130-250 V Fabr. WEG	R\$ 22,71	R\$ 227,10
1.29	pc.	1	Chave 2 posições 5A - Fabr. Margirus	R\$ 17,87	R\$ 17,87
1.30	pc.	6	Isolador Paralelo IBTP 30 x 60 mm 3/8" - Fabr. Cebel	R\$ 4,00	R\$ 24,00
1.31	pc.	1	Vergalhão rosado 1/4" x 3 m	R\$ 4,69	R\$ 4,69
1.32	pc.	10	Porca sextavada 1/4"	R\$ 0,10	R\$ 1,00
1.33	m	1	Tubo termoencolhível 1x4"	R\$ 3,24	R\$ 3,24
1.34	pc.	4	Spray de tinta esmalte (vermelho, branco, azul e verde)	R\$ 13,53	R\$ 54,12
1.35	pc.	1	Ventilador de painel 120x120 mm	R\$ 41,30	R\$ 41,30
1.36	pc.	2	Grelha para ventilador 120x120 mm	R\$ 35,23	R\$ 70,46
1.37	pc.	15	Parafuso 3/16" x 1/2" cabeça redonda	R\$ 0,05	R\$ 0,75
1.38	pc.	20	Parafuso 3/16" x 3/4" cabeça sextavada de latão	R\$ 1,15	R\$ 23,00
1.39	pc.	30	Arruela lisa 3/16" de latão	R\$ 0,52	R\$ 15,60
1.40	pc.	1	Chave seccionadora NH 450 A - Fabr.Siemens	R\$ 298,00	R\$ 298,00
1.41	pc.	3	Fusível NH 250 A - Fabr. Siemens	R\$ 32,05	R\$ 96,15
1.42			Instalação (cabos + acessórios)		R\$ 1.900,00
Total do Material					R\$ 15.616,22

Custo M. Obra Montagem	R\$ 2.950,00
Custo M. Obra Instalação	R\$ 1.950,00
Total Mão de Obra	R\$ 4.900,00

Total Geral (210 kVAr / 380 V)	R\$ 20.516,22
Custo Médio (R\$ / kVAr)	R\$ 97,70

Referências Bibliográficas

AMERICO, M. *Sistemas Motrizes: Eficiência Energética e Técnicas de Acionamento*. Apresentações em Power Point em curso Cepel/Sebrae – RJ/UFF. Niterói-RJ, 2003. Citado por: GARCIA, Agenor G. P. *Impacto da lei de eficiência energética para motores elétricos no potencial de conservação de energia na indústria.*; orientador Prof. Maurício Tiomno Tolmasquim, D. Sc.: Rio de Janeiro: Dissertação de Mestrado em Planejamento Energético – COPPE / UFRJ, 2003. 127p.

ANDREAS, John C. *Energy efficient electric motors: selection and application*. New York 2ªEd., 1992. 272p.

ANDRADE, Moacyr T.O. *A influência da Energia Reativa no planejamento do setor elétrico e a necessidade de consolidação do período horário para avaliação do fator de potência das cargas*. Tese de Doutorado: Orientador Prof. Dr. Sérgio Valdir Bajay, Campinas – SP: Unicamp, 1993. 201p.

ANEEL. *Resolução N° 456, de 29 de Novembro de 2000*, Brasília, ANEEL, 2000 Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/>> Acesso em 15 mar. 2008.

AZEVEDO, Érick M. *Análise da Manutenção em Motores de Indução Trifásicos Considerando a Conservação de Energia*. Dissertação de Mestrado: orientador Prof. Dr. Jamil Haddad, Itajubá - MG: EFEI, 2000. 84p.

BALDOR. *Catalog AC Motors*. Disponível em: <www.baldor.com/products/ac_motors.asp>
Acesso em: 12 jan. 2008.

BARTOS, Frank. J. *Efficient Motors Can Ease Energy Crunch*, Control Engineering, 5/1/2001.
Disponível em: <<http://www.controleng.com/article/CA73845.html>> Acesso em 27 fev. 2008.

BEU. *Balanço de Energia útil*, 2005 (ano Base 2004). Disponível em:
<http://www.mme.gov.br/programs_display.do?chn=9271> Acesso em 14 out. 2007.

BEN. *Balanço Energético Nacional*, 2007 (ano Base 2006). Disponível em:
<http://www.mme.gov.br/site/menu/select_main_menu_item.do?channelId=1432&pageId=4040> Acesso em 12 fev. 2008.

BRASIL. Decreto 4.508 de 11 dez. 2002. *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.dez.2002. Disponível em:
<<http://www.inmetro.gov.br/qualidade/decreto4508.pdf>> Acesso em 27 jan. 2008.

CAPEHART, Barney L. and Kevin D. Slack. *Power Factor Benefits of High Efficiency Motors*, *Energy Engineering Journal*, Vol. 93, No. 3, 1996. pp. 6-18. Disponível em:
<<http://www.ise.ufl.edu/capehart/WECMOTR.doc>> Acesso em 24 fev. 2008.

CABRAL L.M.M.; Cachapuz P.B.B.; Dias R.F.; Lamarão S.T.N. *O Panorama do Setor de Energia Elétrica no Brasil*. Rio de Janeiro: Centro de Memória da Eletricidade no Brasil., 1998. 333p.

CARDEAL, Valter. *Tarifação de Energia Reativa: regulamentação, metodologias e aplicação*. Brasília: DNAEE, 1992. Citado por: ANDRADE, Moacyr T.O. *A influência da Energia Reativa no planejamento do setor elétrico e a necessidade de consolidação do período horário para*

avaliação do fator de potência das cargas. Tese de Doutorado: Orientador Prof. Dr. Sérgio Valdir Bajay, Campinas – SP: Unicamp, 1993. 201p.

CHERMAN, A. *Sobre os Ombros de Gigantes: uma história da física*. Rio de Janeiro: Jorge Zahar Ed., 2004. 199p.

CPFL. *Preços de Tarifas de Energia praticados pela CPFL Paulista*. Disponível em: http://www.cpflempresas.com.br/Comuns/SimuladorTarifa/calculo_tarifa_frm.asp acesso em 12 mai. 2008.

DELGADO, Marco A. P. *Alternativas da Eficiência Energética no Brasil: Uma Análise Técnico-Econômica para Viabilização de Motores Elétricos de Alto-Rendimento e o Caso das Empresas de Serviços de Energia – ESE*, Rio de Janeiro, RJ – Brasil, 1996, 165p.

DIAS, Guilherme A. D. *Harmônicas em Sistemas Industriais*. Porto Alegre: EDIPUCRS, 1998. 213p.

EBERLE. *Motores Elétricos Trifásicos Industrial e Alto Rendimento*, 2003, 14p.

EDP. *Energia Reativa: Deixe de pagar o que não consome. – Como anular a fatura de energia reativa ?* Lisboa 1989. Citado por: ANDRADE, Moacyr T.O. *A influência da Energia Reativa no planejamento do setor elétrico e a necessidade de consolidação do período horário para avaliação do fator de potência das cargas*. Tese de Doutorado: Orientador Prof. Dr. Sérgio Valdir Bajay, Campinas – SP: Unicamp, 1993. 201p.

ELETROBRÁS. *Conservação de Energia: Eficiência Energética de Instalações e Equipamentos*. Itajubá, MG: Editora da EFEI 2ª Ed., 2001. 467p.

EPCOS. *Capacitores PhiCap para Correção do Fator de Potência*, 2004, 23p.

FAIRES, Virgil M. *Elementos Orgânicos de Máquinas*. Tradução Humberto César Tavares Gonçalves, Rio de Janeiro: Ao Livro Técnico, 1971. Citado por: DELGADO, Marco A. P. *Alternativas da Eficiência Energética no Brasil: Uma Análise Técnico-Econômica para Viabilização de Motores Elétricos de Alto-Rendimento e o Caso das Empresas de Serviços de Energia – ESE*, Rio de Janeiro, RJ – Brasil, 1996, 165p.

FELLOW, Austin H. B. An Update on Ac Induction Motor Efficiency, IEEE paper no. PID 94-20, pp. 1362-1372, 1994.

GALESNE, Alain, Fensterseifer Jaime E., Lamb Roberto. *Decisões de Investimentos da Empresa*: São Paulo: Editora Atlas 1ª Ed., 1999.

GARCIA, Agenor G. P. *Impacto da lei de eficiência energética para motores elétricos no potencial de conservação de energia na indústria.*; orientador Prof. Maurício Tiomno Tolmasquim, D. Sc.: Rio de Janeiro: Dissertação de Mestrado em Planejamento Energético – COPPE / UFRJ, 2003. 127p.

GELLER, Howard Steven., *Revolução Energética: Políticas para um futuro sustentável*. Rio de Janeiro: Relume Dumará, USAid, 2003. 299p.

GUEDES, Manuel Vaz. *O Alternador Síncrono Trifásico – modelização*; Apontamentos. Faculdade do Porto – Portugal, 1996.

GUEDES, Manuel Vaz. *O Motor de Indução Trifásico – seleção e aplicação*. Faculdade do Porto – Portugal, 1994. 75p.

HERSZTERG, Ivan. *O Uso do Motor Elétrico na Indústria: Perspectivas de Conservação de Energia*, Rio de Janeiro, RJ – Brasil, 1996, 175p.

KOHLBACH. Catálogo dos motores elétricos. Disponível em: <http://201.76.41.253/kcel/index.asp?dep=53>>. Acesso em: 18 jan. 2008.

HONNICKE JR, Hilário. Entrevista concedida pelo engenheiro da divisão de vendas técnicas da WEG motores LTDA. Jaraguá do Sul. Rio de Janeiro, 1996. Citado por: DELGADO, Marco A. P. *Alternativas da Eficiência Energética no Brasil: Uma Análise Técnico-Econômica para Viabilização de Motores Elétricos de Alto-Rendimento e o Caso das Empresas de Serviços de Energia – ESE*, Rio de Janeiro, RJ – Brasil, 1996, 165p.

KOSOW, Inwing L., *Máquinas Elétricas e Transformadores*. São Paulo: Globo 15ªEd., 2005. 667p.

KREUTZFELD, S. Motores de Alto Rendimento: uma economia viável? Revista Eletricidade Moderna, São Paulo, p. 30-37, out. 1988. Citado por: RAMOS, Mário C. E. S., *Implementação de Motores de Alto Rendimento em uma indústria de alimentos: Estudo de Caso.; Orientador: Prof. Dr. Hédio Tatizawa*. - São Paulo: Dissertação de Mestrado - EP / FEA / IEE / IF da Universidade de São Paulo, 2005. 91p.

KUSCO, Alexander. Medora, Noshirwan K. Power Harmonic Problems at a Plastics Extrusion Plant, IEEE, 1995. pp. 2726-2733.

LOBOSCO, Orlando S. *Seleção e Aplicação de Motores Elétricos*. São Paulo, SP: McGraw-Hill: Siemens S.A.,1988. 347p.

MATEMÁTICA ESSENCIAL. *Curso de Análise financeira e financiamento* disponível em: <<http://pessoal.sercomtel.com.br/matematica/financeira/analise/analise.htm#ana08>> acesso 15 mai. 2008.

MAMEDE FILHO, João. *Instalações Elétricas Industriais*. Rio de Janeiro: LTC 5ª Ed., 1997. 656p.

MARTIGNONI, Alfonso. *Máquinas de Corrente Alternada*. São Paulo: Globo 7ªEd., 2005. 410p.

MCCOY, G. A.; Litman, T.; Douglass, J. G. *Energy-Efficient Electric Motor Selection Handbook*, 1990, 50p.

MORENO, Hilton. *Harmônicas nas Instalações Elétricas: Causas Efeitos e Soluções*. São Paulo, SP: Procobre 1ª Ed., 2001. 65p.

MONTEIRO, Marcelo M.; Junior, Antonio A. F. *Modelo de Avaliação em Projetos de Investimento de Capital*. Universidade Federal Fluminense, Niterói, RJ: ENEGEP, 1997. 8p.

MOULET, S. et. al. Compensation d'énergie reative: mode d'employ. Cashier de l'ingeniere, Paris, oct. 1989. número especial. citado por: ANDRADE, Moacyr T.O., *A influência da Energia Reativa no planejamento do setor elétrico e a necessidade de consolidação do período horário para avaliação do fator de potência das cargas*. Tese de Doutorado: Orientador Prof. Dr. Sérgio Valdir Bajay, Campinas – SP: Unicamp, 1993. 201p.

NEMA. Product Scope and Nominal Efficiency Levels, 2003. Disponível em: <http://www.nema.org/stds/complimentary-docs/upload/MG1premium.pdf>. Acesso em: 25 fev. 2008.

NISKIER, J.; Macintyre A. J. *Instalações Elétricas*. Rio de Janeiro: LTC 3ªEd., 1996. 532p.

OSTERLEI, R. E. Proceedings of the 7th National Conference on Power Transmission, Gould Inc., St. Louis, MO, 1980. Citado por: ANDREAS, John C., *Energy efficient electric motors: selection and application*. New York 2ªEd., 1992. 272p.

RAMOS, Mário C. E. S. *Implementação de Motores de Alto Rendimento em uma indústria de alimentos: Estudo de Caso.*; Orientador: Prof. Dr. Hédio Tatizawa. - São Paulo: Dissertação de Mestrado - EP / FEA / IEE / IF da Universidade de São Paulo, 2005. 91p.

SANTOS, André L. *Avaliação do Potencial de Conservação de Energia em Motores Elétricos no Brasil* – Universidade Federal de Itajubá, 2005, 110p.

SCHEAFER, Roberto; Oliveira, Sebastião E. M.; Garcia, Agenor G. P.; Silva, Tatiana L. V.; Monteiro, Luís F. C. *Avaliação dos Índices de Eficiência Energética para Motores Trifásicos de Indução*, Relatório Final, Rio de Janeiro: PPE/COPPE/UFRJ, 2005, 80p.

SECRETARIA DE SANEAMENTO E ENERGIA. *Aumenta o consumo de energia elétrica em São Paulo* - Governo do Estado de São Paulo, 2008. Disponível em: <<http://www.saneamento.sp.gov.br/noticia.htm>> Acesso em 26 de julho de 2007.

SIEMENS, Catálogo Motores conforme norma NEMA. Disponível em: <<http://www.siemens.com.br/templates/produto.aspx?channel=250&produto=14000&conteudo=14002>> Acesso em: 10 jan. 2008.

SIEMENS. *Mundo em Movimento, Apresentação Motores elétricos Siemens e a Economia de Energia*, 2005. Disponível em: <<http://www.siemens.com.br/>> Acesso em: 11 jan. 2008.

SPECTOR, Nelson. *Manual para a Redação de Teses, Projetos de Pesquisa e Artigos Científicos*. 2ª Ed., Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, 2001, 150p.

TLA. *Manual Capacitores de Potência*. Disponível em: <<http://www.tla.com.br/download-tla-capacitores.php>>. Acesso em 15 fev. 2008.

US MOTORS. Catálogo dos motores elétricos. Disponível em: <http://www.usmotors.com/default_ecatalog.htm>. Acesso em: 10 fev. 2008.

WEG, *Motores Elétricos*: Linhas de produtos, características, especificações, instalações e manutenções. Jaraguá do Sul: 2005. 145p. Disponível em: <http://catalogo.weg.com.br/PES_CAT/detailProduto.asp?ID_MENU=1&cd_produto=37&CD_CATEGORIA_PRODUTO=6&CD_EMPRESA=110> Acesso 19 dez. 2005.

WEG. *Curva característica dos motores em relação a potência nominal*. Disponível em: http://catalogo.weg.com.br/PES_CAT/detailProduto.asp?ID_MENU=1&cd_produto=37&CD_CATEGORIA_PRODUTO=6&CD_EMPRESA=110> Acesso em 15 jan. 2008.

WEG MOTORS. Catálogo Motores conforme norma NEMA. Disponível em: <http://www.wegelectric.com/asp/system/empty.asp?P=29&VID=default&SID=353617633367317&S=1&C=20986>> Acesso 05 jan. 2008.

WIKIPÉDIA. *O motor elétrico*. Disponível em: <http://pt.wikipedia.org/wiki/Motorel%C3%A9trico>> acesso em: 18 mar. 2008.

WOLFF, Joca. *O Motor Elétrico: Uma história de energia, inteligência e trabalho*. 1ª Ed., Rio de Janeiro: Editora UNERJ, 2004. 84p.